



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DISEÑO DE UN CABEZAL PARA LA COLOCACIÓN DE  
FIBRAS DE CARBONO CON SISTEMA DE CORTE A  $\pm 45^\circ$ .

## TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA EN LA OPCIÓN  
TERMINAL DE DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMAS  
MECÁNICOS**

PRESENTA

**ING. MANUEL DE JESÚS ESPINOSA RAMÍREZ**

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO., JULIO DE 2017





CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Director de Posgrado  
PICYT – CIDESI  
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno Manuel de Jesús Espinosa Ramírez, una vez leída y revisada la Tesis titulada **“Diseño de un cabezal para la colocación de fibras de carbono con sistema de corte a  $\pm 45^\circ$ ”**, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de **Maestro en Ciencia y Tecnología** en la opción terminal de Diseño y Desarrollo de Sistemas Mecánicos durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmo la presente a los 17 días del mes de Julio del año dos mil diecisiete.

M. C. Roberto Sosa Cruz  
Directores de Tesis

Dr. Luis de Llano Vizcaya  
Co Director de Tesis



Director de Posgrado  
PICYT – CIDESI  
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno Manuel de Jesús Espinosa Ramírez, una vez leída y revisada la Tesis titulada “**Diseño de un cabezal para la colocación de fibras de carbono con sistema de corte a  $\pm 45^\circ$** ”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de **Maestro en Ciencia y Tecnología** en la opción terminal de Diseño y Desarrollo de Sistemas Mecánicos durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 17 días del mes de Julio del año dos mil diecisiete. .

Dr. Vicente Bringas Rico  
Presidente

M. I. Emilio Ataulfo Sánchez Medina  
Secretario

Dr. Luis del Llano Vizcaya  
Vocal

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por haberme permitido llegar hasta este momento, por otorgarme la salud y la capacidad necesaria para el logro de este objetivo, por poner a las personas adecuadas en mi camino.

Agradezco a mi familia, mis padres Jesús Espinosa Martínez y Guadalupe Ramírez Vásquez y a mis hermanos Fabiola Magdalena, Sergio, Jesús y Sonia Guadalupe, por su apoyo incondicional, por el impulso anímico y económico para continuar con un trayecto de estudio.

Agradezco al Dr. Hugo Gámez Cuatzin por la oportunidad brindada al permitirme formar parte del equipo de trabajo del proyecto P02 CEMIE Eólico.

Agradezco al Mtro. Roberto Sosa Cruz así como al Dr. Luis del Llano Vizcaya, por el apoyo incondicional, los consejos, conocimientos y tiempo otorgado, sobre todo por su amistad durante mi estancia.

A mis compañeros de generación y de trabajo por su ayuda en las materias cursadas durante estos años y por su disposición en cualquier duda o problema suscitado, en especial al equipo de sistemas dinámicos que colaboraron en conjunto dentro del proyecto P02 CEMIE Eólico, Lucía Limones, Jaime Trejo y Luz Elenne Rangel.

Agradezco a mi novia Bethy por su apoyo incondicional en cada momento desde el inicio de la maestría, por cada palabra de aliento en los momentos difíciles y por el cariño que me muestra cada día.

Al personal de PICYT por su ayuda en los diversos trámites efectuados durante mi estancia, por mantenerse siempre al pendiente del seguimiento de nuestro desempeño dentro del Centro.

# Contenido

RESUMEN .....	I
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ANTECEDENTES .....	2
1.2.1 Desarrollos desde 1990.....	2
1.2.2 Desarrollos desde el 2000 hasta la actualidad.....	3
1.3 ESTADO DEL ARTE .....	4
1.3.1 Análisis de Patentes .....	6
1.3.1.1 Applicator head for fiber with particular systems for cutting fibers .....	9
1.3.1.2 Fiber application machine.....	10
1.3.1.3 Thermoplastic multi-tape application head.....	11
1.3.2 Conclusiones en el análisis de las patentes.....	12
1.4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	13
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	13
1.6 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1 TECNOLOGÍA DE COLOCACIÓN AUTOMATIZADA DE FIBRAS.....	14
2.2 VENTAJAS DE LA MANUFACTURA AUTOMATIZADA AFP .....	14
2.3 CABEZAL COLOCADOR DE FIBRAS DE CARBONO .....	15
2.4 SISTEMA DE MONTAJE DE CARRETE REALIMENTADOR .....	15
2.5 SISTEMA DE GUIA Y DE REALIMENTACIÓN DE FIBRAS.....	17
2.6 SISTEMA DE CORTE-BLOQUEO DE FIBRAS .....	18
2.7 SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE FIBRAS .....	19
2.7.1 Rayos Laser.....	20
2.7.2 Antorcha de gas caliente (Hot gas Torch, HGT) .....	21
2.7.3 Lámpara IR.....	21
2.8 RODILLO DE COMPACTACIÓN .....	22
2.9 ACTUADORES NEUMÁTICOS .....	23
2.9.1 Cálculo de actuadores lineales de simple efecto .....	23
2.9.2 Velocidad en los diferentes cilindros .....	24
2.9.3 Volumen, Tiempo y Caudal .....	24
2.10 TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO POR RUEDAS DE FRICCIÓN .....	25
2.11 TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO POR POLEAS Y CORREAS .....	26

2.11.1	Determinación de la relación de transmisión .....	28
2.11.2	Momento torsor.....	29
2.11.3	Ángulo abrazado por la correa y longitud .....	30
2.12	ESFUERZOS CORTANTES.....	31
2.13	FACTOR DE SEGURIDAD .....	32
CAPÍTULO III: DISEÑO DEL CABEZAL.....		33
3.1	REQUERIMIENTOS DE MATERIALES .....	33
3.2	CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN DE LOS MATERIALES .....	33
3.2	SISTEMA DE CORTE DE FIBRAS.....	35
3.2.1	Diseño del sistema de corte para experimentos.....	36
3.2.2	Diseño del sistema de corte para el herramienta.....	38
3.3	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE FIBRA .....	40
3.4	SISTEMA DE COMPACTACIÓN DE FIBRAS .....	41
3.5	SISTEMA DE MONTAJE DE CARRETES.....	43
3.6	DISEÑO A DETALLE DEL CABEZAL .....	45
CAPÍTULO IV: EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS .....		47
4.1	ANÁLISIS ESTÁTICO DE CARCASA .....	47
4.1.1	Modulo I Carcasa principal del cabezal.....	47
4.1.2	Restricciones y condiciones de frontera .....	48
4.1.3	Resultados parciales de simulación estática .....	49
4.2	SIMULACIÓN ESTÁTICA DE FLECHA PARA RODILLO MOTRIZ.....	52
4.2.1	Restricciones y condiciones de frontera .....	52
4.2.2	Interpretación de resultados de simulación estática .....	53
4.3	ANÁLISIS ESTÁTICO DEL SISTEMA DE GUIADO.....	55
4.3.1	Restricciones y condiciones de frontera .....	56
4.3.2	Interpretación de resultados de simulación estática.....	56
4.4	SELECCIÓN DE MOTOR PARA POSICIONAMIENTO A $\pm 45^\circ$ .....	59
4.4.1	Cálculo del momento de inercia de la base del sistema de corte.....	59
4.4.2	Cálculo de Torque para la selección del motor .....	60
4.5	SELECCIÓN DE POLEAS Y CÁLCULO DE LONGITUD DE BANDA.....	61
4.6	DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EL SISTEMA DE CORTE .....	63
4.6.1	Desarrollo del diseño experimental .....	65
4.6.2	Resultado y conclusiones del diseño experimental .....	66
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....		72

# Índice de Figuras

Fig. 1: Sistema AFP. Cortesía de Automated Dynamics .....	5
Fig. 2: Sistema Grofi. Cortesía DLR .....	6
Fig. 3: Cabezal de colocación de fibras prepreg de Coriolis Composites. ....	9
Fig. 4: Diagrama general del cabezal patentado por Coriolis Composites.....	11
Fig. 5: Diagrama general del cabezal, The boeing Company.....	12
Fig. 6: Diagrama de los componentes principales de un cabezal para colocación de fibras .....	14
Fig. 7: Cabezal para la colocación de fibras. Coriolis composites .....	15
Fig. 8: Montaje del carrete de fibra en forma horizontal. DLR .....	16
Fig. 9: Montaje del carretes de fibras en forma vertical. DLR.....	16
Fig. 10: Montaje de carretes en alojamiento acondicionado. Coriolis Composites.....	17
Fig. 11: Placas ranuradas para guiado de fibra .....	17
Fig. 12: Sistema de guiado diferente a las placas ranuradas .....	17
Fig. 13: Configuración de un sistema de realimentación de fibras.....	18
Fig. 14: Configuración del mecanismo de corte del herramental. Coriolis Composites .....	19
Fig. 15: Posicionamiento de la fuente de calentado en un cabezal.....	20
Fig. 16: Sistema de calentado de fibras usando antorcha de gas .....	21
Fig. 17: Enfriamiento del rodillo de compactación mediante un flujo de aire. ....	22
Fig. 18: Diferentes diseños de rodillos de compactación.....	22
Fig. 19: Diagrama esquemático de las partes de un cilindro de simple efecto.....	23
Fig. 20: Representación esquemática de ruedas de fricción.....	25
Fig. 21: Esquema de parámetros en ruedas de fricción .....	25
Fig. 22: Representación esquemática de relación de velocidades.....	26
Fig. 23: Representación de parámetros en transmisión de movimiento por banda .....	27
Fig. 24: Parámetros para obtención de relación de transmisión .....	28
Fig. 25: Transmisión de movimiento por poleas y bandas.....	29
Fig. 26: Poleas de igual diámetro .....	30
Fig. 27: Representación de parámetros para poleas de diámetros diferentes.....	30
Fig. 28: Diagrama de la porción AC .....	31
Fig. 29: Placa sujeta a fuerzas cortantes .....	31
Fig. 30: Tornillos de las placas solapadas.....	31
Fig. 31: Placas solapadas sujetos a fuerzas cortantes .....	31
Fig. 32: Configuración de corte de fibra.....	36
Fig. 33: Diseño CAD del sistema de corte para pruebas .....	37
Fig. 34: Vista superior del sistema de corte para experimentos.....	38
Fig. 35: Representación esquemática del origen de las pérdidas de material.....	39
Fig. 36: Configuración geométrica del sistema de corte.....	39
Fig. 37: Configuración geométrica del sistema de realimentación.....	41
Fig. 38: Vista isométrica de la configuración del rodillo de compactación de fibras.....	42
Fig. 39: Carcasa principal del herramental.....	42
Fig. 40: Vista isométrica del módulo de distribución de fibras .....	44
Fig. 41: Polea con capacidad de movimientos axiales sobre el eje.....	45
Fig. 42: Vista isométrica del diseño final del cabezal AFP.....	45
Fig. 43: Brazo robot de la marca SCHUNK.....	47
Fig. 44: Diferentes vistas de la carcasa principal del herramental.....	48
Fig. 45: Esquema de la configuración de la fuerza de compactado.....	48
Fig. 46: Restricciones y condiciones de frontera de la carcasa .....	49

Fig. 47: Gráfica Esfuerzo, Deformación, Factor de seguridad vs Elementos de malla .....	50
Fig. 48: Gráfica para la visualización de la calidad de los elementos.....	50
Fig. 49: (a) Esfuerzo máximo de Von Mises (b) Deformación máxima .....	51
Fig. 50: Factor de seguridad de los tornillos sujetos a esfuerzo cortante.....	51
Fig. 51: Isométrico de flecha motriz para el rodillo de realimentación de fibras .....	52
Fig. 52: Restricciones y condiciones de frontera.....	53
Fig. 53: Gráfica Esfuerzo, Deformación, Factor de seguridad vs Elementos.....	53
Fig. 54: Gráfica de visualización de calidad de elementos.....	54
Fig. 55: Deformación máxima (a) y Esfuerzo máximo de Von Mises en flecha (b) .....	54
Fig. 56: Gráfico del factor de seguridad de flecha.....	55
Fig. 58: Ensamble completo de sistema de guiado .....	55
Fig. 57: Pieza de guiado sujeto a carga máxima.....	55
Fig. 59: Restricciones y condiciones de frontera.....	56
Fig. 60: Gráfica de comportamiento esfuerzo, deformación, F. S. vs Elementos de mallado ....	57
Fig. 61: Gráfica de calidad de elementos de mallado .....	58
Fig. 62: (a) Deformación máxima (b) Esfuerzo de Von Mises.....	58
Fig. 63: Factor de seguridad en tornillos de unión en pieza sujeta a fuerza de corte .....	59
Fig. 64: (a) Ensamble para rotación $\pm 45^\circ$ , (b) Datos calculados de momento de inercia .....	60
Fig. 65: Datos técnicos del brazo robot SCHUNK .....	60
Fig. 66: Motor a pasos híbrido NEMA 8 del tipo bipolar.....	61
Fig. 67: Polea dentada para la transmisión de movimiento por banda en sistema de corte .....	62
Fig. 68: Banda dentada GT2 para poleas dentadas.....	62
Fig. 69: Cálculo de longitud de correa mediante Solidworks 2016.....	63
Fig. 70: a) Neopreno b) Nylamid tipo M y c) Aluminio .....	64
Fig. 71: Tiras de fibra de carbono prepreg de 12.7 mm .....	64
Fig. 72: Cuchilla de acero inoxidable al alto carbono.....	65
Fig. 73: Micro cilindro neumático de simple efecto retracción por muelle.....	65
Fig. 74: Configuración mecánica del proceso de corte .....	65
Fig. 75: Conexiones del micro controlador con electroválvula 3/2 .....	66
Fig. 76: Gráfica de efectos principales de los factores de experimentación.....	69
Fig. 77: Gráfica de efectos de interacción de los factores de análisis.....	70

## Índice de tablas

Tabla 1: Análisis comparativo de requerimientos de patentes .....	8
Tabla 2: Comparativa de fuentes de calor para el calentado de materiales compuestos.....	19
Tabla 3: Características de brazo robot Powerball light-weight arm LWA 4.6 SCHUNK.....	33
Tabla 4: Propiedades físicas y mecánicas de los materiales .....	34
Tabla 5: Propiedades de la fibra de carbono DA 409/G35150.....	35
Tabla 6: Propiedades físicas y mecánicas de los materiales .....	47
Tabla 7: Resultados generales obtenidos.....	49
Tabla 8: Resultados de simulación estática de la flecha .....	53
Tabla 9: Resultados de simulación estática para pieza sujeta a fuerza de corte .....	57
Tabla 10: Especificación del motor a pasos NEMA 8 .....	61
Tabla 11: Tabla de propiedades .....	64
Tabla 12: Datos sobre la calidad de corte de las fibras.....	68
Tabla 13: Cuadro de ANOVA para el diseño experimental del proceso de corte .....	68



## RESUMEN

En la actualidad la manufactura de piezas de materiales compuestos se ha ido incrementando significativamente, siendo estos utilizados principalmente en tres diferentes sectores, la aeronáutica, la eólica y la automotriz. Sin embargo los altos tiempos de manufactura con métodos tradicionales no permiten eficientar las tasas de producción, además de generarse altos porcentajes de pérdidas de material lo cual hace que el costo del producto sea elevado. Para minimizar estos problemas dos tecnologías de manufactura automatizada que son esenciales en la fabricación de piezas de materiales compuestos son: la colocación automatizada de fibras AFP y la colocación automatizada de cintas ATL, dichos procesos son llevados a cabo por un cabezal montado a una estructura o brazo robótico que de forma sincronizada realizan el impregnado de las cintas-fibras sobre un molde.

Los problemas de pérdidas de material durante el proceso de apilamiento de fibras son actuales en las tecnologías AFP existentes en el mercado y estos se deben principalmente a la forma de corte de las fibras cuando el apilamiento de las mismas son en ángulos de  $\pm 45^\circ$ , y con el fin de minimizar dichas pérdidas se propuso un mecanismo con capacidad de realizar cortes a  $\pm 45^\circ$ .

A partir de ello, en CIDESI surge una línea de investigación enfocada a la colocación automatizada de fibras denominado AFP (Automated Fiber Placement), por lo que se crea un prototipo de cabezal que es montado a un brazo robótico Powerball light-weight arm LWA 4.6 de la marca CHUNK con la capacidad de colocar pre-impregnados de fibras de carbono unidireccional.

En esta tesis se presenta el diseño de un prototipo de cabezal para la colocación de fibras (AFP) que tiene como principal aporte, el optimizar específicamente el mecanismo de corte de fibras con el objetivo de minimizar las pérdidas de material durante el proceso de manufactura a través del uso del método de cizallado.

Como parte del desarrollo de las actividades de investigación se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- a) Análisis estático para las concentraciones de esfuerzos y deformaciones a través de un software comercial basado en el método de elemento finito (MEF).
- b) Cálculos analíticos y experimentales en sistema de corte a  $\pm 45^\circ$ .
- c) Estudios de los efectos de presión de corte sobre el acabado superficial de la fibra.
- d) Análisis del estado del arte y de patentes sobre la tecnología AFP y su desarrollo actual.
- e) Diseño y selección de materiales para cada uno de los sistemas que conforman el cabezal AFP.

# CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo contiene una propuesta de diseño de cabezal y mecanismo de corte para la manipulación de tiras de materiales compuestos.

El cabezal para la colocación de fibras de materiales compuestos se puede definir como el dispositivo principal de un proceso de manufactura automatizada que consiste en aplicar fibras (fibras de carbono, fibra de vidrio) con anchos comerciales de 3.175mm, 6.35 mm y 12.7 mm sobre determinados moldes de trabajo y con capacidad de corte en ángulos de  $\pm 45^\circ$ , de manera general, dicho proceso es comúnmente conocido como la Colocación Automatizada de Fibras o en Inglés Automated Fiber Placement (AFP).

La característica de este tipo de tecnología automatizada es la capacidad de colocar tiras de fibras a diferentes ángulos de orientación ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) sobre moldes con curvaturas complejas. Uno de los principales inconvenientes, es que se producen pérdidas durante el proceso debido al corte o excedente de material.

Para analizar esta problemática es necesario mencionar la causa principal de la pérdida de material durante el proceso, el cual se debe a un sistema del cabezal que no posee la capacidad de realizar cortes en ángulos de  $\pm 45^\circ$  respecto de la longitud de la tira de la fibra y este sistema es comúnmente conocido como el sistema de corte de fibras.

Debido a esto, se propone como tema de investigación el diseño de un prototipo de cabezal para la colocación de fibras de carbono con un sistema particular de corte a  $\pm 45^\circ$ , esto para minimizar dichas pérdidas de material, y al mismo tiempo eficientar el aprovechamiento de los materiales compuestos durante el proceso de manufactura de piezas.

Por lo tanto, el objetivo principal del presente tema de tesis es diseñar un cabezal que permita hacer más eficiente el aprovechamiento del material de trabajo a través de un sistema de corte de fibras a  $\pm 45^\circ$  adaptado propiamente al dispositivo.

En el marco teórico metodológico el desarrollo del presente tema de investigación se realizó con una indagación profunda del estado del arte (patentes, papers, libros, etc.) y con una serie de experimentos sobre los cortes realizados a  $\pm 45^\circ$  a partir del sistema de corte diseñado, haciendo uso de fibra de carbono prepreg del tipo unidireccional (DA409U/G35150 Unidirectional Carbon Epoxy Prepreg System) y adicionalmente se hicieron simulaciones sobre el comportamiento estático de las estructuras principal del cabezal diseñado al cual ira ensamblado el sistema de corte propuesto.

Durante la investigación, uno de los obstáculos principales fue la poca información existente sobre el tema, debido a que actualmente representan trabajos en pleno desarrollo e innovación, por lo cual toda información que es generada por las diferentes instituciones involucradas en el tema de estudio es estrictamente confidencial.

## 1.2 ANTECEDENTES

Con el fin de lograr un diseño óptimo del cabezal con un sistema de corte de fibras a  $\pm 45^\circ$  se realizó una investigación del estado del arte sobre las características principales que deben contemplarse durante los procesos de colocación de fibras de carbono prepreg.

### 1.2.1 Desarrollos desde 1990

Los sistemas AFP fueron comercialmente presentados hacia finales de los 80's, y fueron descritos como una combinación lógica de la colocación de cintas automatizadas (ATL) y el embobinado de filamentos (FW); al combinar la capacidad de ganancia diferencial de FW y la compactación, y la capacidad de corte-restauración del ATL [1].

La Colocación Automatizada de Fibras (AFP) inicia como un producto de desarrollo en 1982 entre Boeing y Cincinnati tools. Después de iniciar el desarrollo, Cincinnati presentó una patente en 1989, pero no fue hasta 1990 cuando comenzó la producción con esta tecnología. La primera máquina de producción fue entregada en 1990 por Cincinnati, con entregas hechas para apoyar el desarrollo de las aspas del GE90. Posteriormente las máquinas fueron entregadas para la manufactura del V-22 Osprey y el F-22 Raptor.

El primer proyecto de investigación europea que estableció viabilidad para manufactura de barril de fuselaje fue FUBA-COMPANY, entre 2001-2006 [2].

Bart [3] demostró un sistema AFP que hace uso de un cuarto acondicionado para reducir la adherencia del pre-impregnado, permitiendo así un mejor sistema de colocación. Adicionalmente, la compresión después de la resistencia al impacto de las láminas manufacturadas por AFP y por colocación manual fue evaluada, mostrando que las propiedades mecánicas de ambos son comparables. Algunos problemas técnicos que siguieron sin resolverse en este periodo fueron la tensión en las tiras, confiabilidad, productividad, y precisión en la colocación.

Para intensificar la productividad, Enders [4] presentó un sistema AFP que podía entregar hasta 24 tiras en una secuencia, hizo uso de esta tecnología para la fabricación de un componente con lo cual logro una velocidad de colocación de 30 m/min generando una productividad de 1.9 kg/h comparado a la productividad mediante colocación manual de 0.7 kg/h para el mismo componente.

Algunos resultados muy interesantes para una aplicación industrial fueron mostrados por Measom y Sewell [5], quienes reportaron sobre el proceso de desarrollo de una pieza. El componente inicialmente fue manufacturado mediante Filament Winding y colocación manual pero al manufacturarse con AFP se redujo la tasa de perdida de material de un 62% a 6% y la productividad mejoro al 450 % para colocación de un solo ancho de cinta de 12.7 mm.

El desarrollo del AFP coincidió con la aparición de los materiales compuestos termoplásticos para las aplicaciones estructurales aeroespaciales, y significativos esfuerzos de investigación fueron dedicados al desarrollo de la tecnología AFP para la colocación de material termoplástico. Gruber y Lamontia [6] señalaron, que esto fue impulsado por la necesidad de manufacturar aeronaves grandes y estructuras

submarinas, que excedían los mayores diámetros de autoclaves y requerían procesos *insitu* con reducidos esfuerzos térmicos residuales.

Las primeras aproximaciones para el desarrollo de la colocación de material termoplástico fueron reportadas por Grove, Mantell, Springer y Sarazin [7].

Estos trabajos identificaron un equilibrio entre la presión de colocación, temperatura y velocidad. La calidad de colocación, medida principalmente por el curado interfacial y tiempo de vaciado, fue afectada perjudicialmente por la velocidad de colocación y debatida por Bourbon et al. [8], quien demostró que el principal factor limitante para la colocación de fibras termoplásticas fue la cantidad de tiempo requerido en calentar el material por encima de su punto de fusión, por lo tanto, la máxima velocidad de colocación fue limitada con trabajos que reportaron velocidades de 3.6 m/min a 5 m/min, resultando en productividades de colocación considerablemente más bajas que para los materiales termoestables.

### 1.2.2 Desarrollos desde el 2000 hasta la actualidad

Grant [9] describió el cambio en el enfoque para la colocación AFP de nuevos procesos para abordar cuestiones respecto a la asequibilidad, confiabilidad de proceso y productividad, y expuso que la tecnología AFP había sido principalmente empleada en programas militares y espaciales hasta el 2000.

Torres Martínez [10] presentó un sistema automatizado para empalmar el conjunto de fibras, y esto mejoraría la productividad al reducir tiempos muertos por relleno de material. Oldani [11] también presentó un sistema automatizado para detectar errores de colocación, mejorando la productividad al reducir los tiempos para inspección de calidad después de colocar la capa.

Para incrementar los niveles de adhesión y además minimizar errores de colocación, un calentado por infrarrojo para cinta termoestable fue presentado por Calawa y Cancarrow para permitir calentamientos más rápidos y temperaturas de colocación más altas [12]. Hamlyn y Hardy [13] presentaron un sistema para intercambiar rápidamente cabezales de colocación y herramientas al mantener un segundo cabezal de colocación listo para la inmediata colocación, y así reducir los sistemas de tiempos muertos.

A pesar de las mejoras en la fuerte productividad y confiabilidad, varios problemas técnicos continuaron. Principalmente, el costo de inversión fue todavía alta comparado a otros métodos de manufactura. La programación fuera de línea que no había sido optimizada en la colocación de cintas sobre moldes con curvas pronunciadas y el control en la colocación de la fibra, seguía siendo un área de continua investigación [14].

Los principales fabricantes de sistemas AFP son: Automated Dynamics (USA), Accudyne (USA), MAGCincinnati (USA), Coriolis (France), Electroimpact (USA) Foster Miller/ATK (USA), Ingersoll (USA), Mikrosam (Macedonia) y MTorres (Spain).

### 1.3 ESTADO DEL ARTE

[15, 16] Mencionan las principales empresas enfocadas al desarrollo de tecnologías de colocación automatizadas de fibras de material compuesto que a continuación se enlistan:

1. Automated Dynamics (EUA)
2. Entec (EUA)
3. Accudyne (EUA)
4. MAGCincinnati (EUA)
5. Electroimpact (EUA)
6. Foster Miller/ATK (EUA)
7. Ingersoll (EUA)
8. Coriolis Composites (Francia)
9. Mikrosam (Macedonia)
10. MTorres (España)
11. GFM (Alemania)
12. Advanced Fiber Placement Technology (Holanda)
13. Boikon (Holanda)
14. Composite Technology Center Stade – Airbus (Alemania)

Los materiales compuestos se utilizan ampliamente en muchos sectores industriales, ofrecen excelentes propiedades del material en comparación con otros materiales estructurales disponibles. Sin embargo, en el proceso colocación manual se pierde mucho tiempo, se genera alta tasa de desechos de material, falta de uniformidad en la colocación y la mano de obra es intensiva, por lo tanto, la colocación con robots se ha introducido para superar estos inconvenientes. Este enfoque puede en gran medida reducir el tiempo de ciclo y los costos de fabricación [15].

La colocación automatizada de fibras ofrece características más importantes y ventajas que no se consiguen con técnicas tradicionales de manufactura. Estas características incluyen el corte y reinicio de las tiras de fibra, la reducción de volumen y consolidación del material *insitu*, el control preciso de ángulos de colocación de fibra cuando se requiera, así como la presión de compactación y alto grado de repetitividad. Además, el uso de un robot manipulador aumenta la flexibilidad del proceso de colocación de la fibra y permite la fabricación de estructuras con curvaturas más complejas.

La calidad altamente consistente y fabricación rentable de los materiales compuestos avanzados pueden ser logradas a través de la automatización. Se podrá por lo tanto abrir hasta nuevos mercados y aplicaciones para los productos de materiales compuestos fabricados por las industrias aeroespacial, automotriz y energía renovable.

Las áreas adicionales donde los materiales compuesto son de creciente interés son la energía renovable y la automotriz, donde los materiales compuestos avanzados necesitan ser rentables en su fabricación cuando se compara con sus contrapartes metálicos. Para lograr esto la automatización es uno de los caminos a seguir [15].

Las tecnologías de manufactura automatizadas son de alto interés en la industria de la manufactura ya que permite tener un mayor control de la calidad, precisión y repetitividad.

Las tecnologías en Colocación de Fibras Automatizada es una de las tecnologías que están siendo usadas para la manufactura avanzada de laminados de materiales compuestos principalmente del uso de fibra de carbono y fibra de vidrio siendo pre-impregnados o secos así como termoplásticos o termoestables. La fuerza de compactación que se maneja para un material termoestable es entre 445 N y de 1000 N para cintas de 300 mm de ancho. La presión que se ejerce es de aproximadamente 0.1 MPa y para los compuestos termoplásticos es de 1.4 MPa. Las principales variables a controlarse en un sistema AFP son la velocidad de aplicación, presión, temperatura, confiabilidad, productividad, precisión y tensión de la cinta. De acuerdo a estas variables controlables, también es de gran importancia encontrar la relación óptima entre ellas para que la productividad sea la más alta posible (medida en unidades kg/h).

La compañía *Coriolis Composites* de Francia cuenta con sistemas que hacen el curado fuera de autoclave haciendo uso de materiales termoplásticos, al igual que la compañía holandesa *Advanced Fiber Placement Technologies (AFPT)*, entre otras empresas.

Muchas de las empresas mencionadas atienden con gran esfuerzo a la industria aeronáutica que en estos momentos es la única que puede llegar a pagar este tipo de tecnología y que demanda requerimientos de manufactura elevados.

Algunas de las empresas han realizado convenios de colaboración con algunas universidades e institutos como el caso de *Automated Dynamics* quien tiene un convenio con el Centro de Investigación de Manufactura Avanzada (AMRC por sus siglas en inglés) de la Universidad de Sheffield y Boeing.



Fig. 1: Sistema AFP. Cortesía de Automated Dynamics

*Coriolis Composites* ha estado trabajando con la Universidad Tecnológica de Alemania (TUM por sus siglas en alemán) en donde han compartido una estrecha colaboración a tal grado de desarrollar cabezales a la medida para poder continuar con las investigaciones en el tema. Existen otras empresas como *MAG* que se encuentra colaborando en conjunto con centros de investigación como el Centro Aeroespacial Alemán (DLR por sus siglas en alemán) en donde se encuentran desarrollando un sistema de robots colaborativos para manufacturar con tecnología AFP. TUM cuenta con un centro en materiales compuestos y uno de los proyectos incluidos es la manufactura de materiales compuestos por acomodo de Fibras Automático investigando acerca del proceso y buscando mejoras en conjunto con *Coriolis Composites* y con *AFPT*.



El Centro Aeroespacial Alemán (DLR por sus siglas en Alemán) se encuentra desarrollando infraestructura para producción en masa de componentes de materiales compuestos. Se tiene la capacidad actual de producir piezas de 20 x 5.5 m<sup>2</sup> [17]. El sistema denominado Grofi es un sistema AFP y se compone de varios robots que trabajan en un ambiente colaborativo. En este sistema se encuentra participando la compañía MAG, y tiene la capacidad de ejercer una fuerza de 2 kN [18]. En el sistema AFP la fuerza de compactación depende mucho de la calidad deseada y las temperaturas de curado sin autoclave.

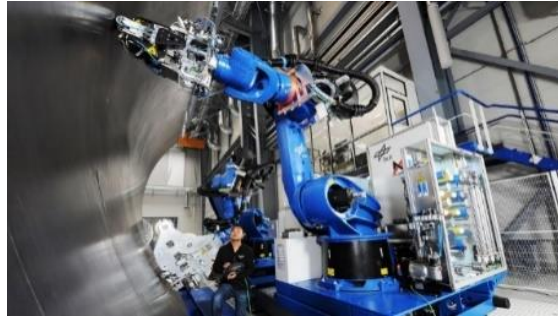


Fig. 2: Sistema Grofi. Cortesía DLR

[8] hace mención de que el curado sin autoclave es un proceso factible de realizar. Tener un proceso fuera de autoclave es ventajoso, debido a que no se requiere un sistema grande (en dado caso que sean componentes grandes), no existe un control de temperatura en un espacio grande además de evitar controlar la presión. Teniendo un proceso sin autoclave se manufacturaría una pieza compleja de un solo paso.

Además de los conocimientos actualmente existentes respecto a los desarrollos e innovaciones continuas en los procesos de colocación de fibras automatizadas fue necesario hacer una indagación profunda sobre las diferentes patentes ya existentes de las instituciones y compañías que se encuentran involucradas en esta tecnología. Cabe mencionar que se analizaron las patentes de Coriolis Composites, The Boeing Company, Torres Martínez, Automated Dynamics, etc.

### 1.3.1 Análisis de Patentes

Esta investigación se realizó con el fin de lograr un diseño integro, identificando en cada una de las patentes las ventajas y desventajas que permitirán lograr el cumplimiento de los requerimientos y restricciones de diseño para el funcionamiento óptimo del cabezal de colocación de fibras.

A continuación se listan los criterios de evaluación que el modelo debe contemplar en los diferentes aspectos del diseño conceptual, previo a los análisis de integridad estructural-funcional.

**Instalación:** Diseño de un modelo con una configuración que permita practicidad en el ensamble de los componentes.

**Complejidad de mecanismo:** Los principios que darán funcionalidad al modelo, buscando que cada uno de los sistemas que integran al cabezal sean funcionales.

**Peso:** El cabezal de colocación debe ser ligero (3 kg a 6 kg) respecto de la carga máxima que puede soportar el brazo robot.

**Dimensiones:** Un cabezal con dimensiones que no interfieran con el movimiento del antebrazo del robot.

**Adaptabilidad:** La estructura debe de proveer espacio y soporte para los diversos dispositivos de medición de variables.

**Material:** Debido a que el bajo peso y la resistencia mecánica son características que debe cumplir el cabezal, serán seleccionados materiales con dichas características.

**Carretes de fibras:** Un cabezal con capacidad de alojar carretes de fibras de alimentación.

**Posición de carretes:** Un cabezal con carretes de fibra montados en una posición horizontal.

**Realimentación de fibra:** Una configuración que mantenga a la fibra lista para una secuencia de realimentación cada vez que sea realizado un corte.

**Separación del aislante de fibra:** Una configuración que permita retirar la cinta aislante de la fibra de forma sencilla en un trayecto anterior al sistema de corte.

**Estructura del cabezal:** Configuración geométrica del cabezal, buscando un modelo compacto.

**Corte-bloqueo de fibras:** Un mecanismo sencillo y capaz de realizar cortes en ángulos de  $\pm 45^\circ$  respecto de la longitud de la fibra.

**Guiado de fibras:** La configuración en el guiado de las fibras debe ser funcional.

**Consolidación de la fibra:** Un cabezal con capacidad de soportar y aplicar una carga máxima de 350 N.

**Versatilidad:** Capacidad del cabezal para ser funcional en diferentes moldes abiertos.

**Robustez:** El cabezal debe ser robusto durante el proceso de colocación de fibras.

**Mantenimiento:** Un cabezal práctico para los servicios rápidos de mantenimiento.

Los criterios de evaluación contempladas para el diseño del cabezal fueron evaluadas a partir de una ponderación adoptada para el análisis de patentes, tal y como se describe a continuación.

Ponderación :	
5.- Muy buena	(+)
4.- Buena	
3.- Neutral	
2.- Mala	
1.- Muy mala	(-)

**Nota:** En el cuadro anterior indica que al tenerse una característica con cualidades que permitan alcanzar el cumplimiento de los requerimientos, entonces el valor de ponderación deberá ser más alta, por ejemplo un valor de 4 o 5 y mientras menos favorable sea, el valor a asignarse será de 1, 2 o 3.



A continuación se presenta la tabla comparativa de los criterios de evaluación considerados para las patentes analizadas.

ESTADO DEL ARTE: MODELOS	Requerimientos:																			Puntaje	Promedio
	Instalación	Peso	Dimensiones	Adaptabilidad	Material	Estructura	Corte-bloqueo	Guiado	Enfriamiento	Versatilidad	Robustez	Mantenimiento	Consolidación de fibras	Almacenamiento de carretes	Posicionamiento de carretes	Realimentación de fibra	Separación del aislante	Complejidad del mecanismo	Fuente de calor		
1.- Tape placement head for applying thermoplastic tape to an object [19]	2	2	3	3	3	2	3	2	3	2	3	4	3	4	3	3	2	3	3	53	2.1
2.- End effector for constructing composite members [20]	2	3	3	3	4	3	1	3	2	3	3	4	3	4	2	3	3	3	3	55	2.2
3.- Composite tape laying machine [21]	2	2	2	3	3	2	2	2	2	3	3	2	3	4	3	3	2	2	3	48	1.9
4.- Applicator head for fiber with particular systems for cutting fibers [22]	4	4	3	4	3	4	3	5	4	4	4	4	4	2	3	3	3	3	4	68	2.7
5.- Fiber application machine [23]	4	4	3	3	3	4	3	5	3	3	3	4	4	2	2	4	2	3	3	62	2.5
6.- Thermoplastic multi-tape application head [24]	4	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3	4	2	3	3	2	3	3	59	2.4
7.- Bi-directional fiber placement head [25]	3	1	1	3	3	2	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	50	2.0
8.- Composite-tape placement head [26]	3	1	1	4	3	3	5	3	1	3	3	3	4	3	3	4	2	3	4	56	2.2
9.- Fiber placement delivery system with modular cut/add actuators [27]	3	2	2	3	3	2	2	3	2	2	3	3	3	2	2	4	2	3	2	48	1.9
10.- Multiple tape laying apparatus and method [28]	3	1	1	3	3	3	2	3	3	4	3	3	3	4	4	3	3	3	1	53	2.1

Tabla 1: Análisis comparativo de requerimientos de patentes

Entre el análisis de las patentes previamente descritas en la tabla anterior y para lograr el cumplimiento de los requerimientos descritos, se citan a continuación las patentes más importantes, describiendo las características limitantes en cada una de ellas que a la vez representan aspectos que pueden ser áreas de mejora para el diseño de cabezal AFP CIDESI.

### 1.3.1.1 Applicator head for fiber with particular systems for cutting fibers

La Fig. 3 muestra el diagrama esquemático de un cabezal patentado por la empresa francesa Coriolis Composites [22]. La presente invención se trata de un cabezal aplicador de fibras de carbono de material compuesto (termoestable o termoplástico) montado sobre un brazo robótico.

**Componentes del cabezal:** El cabezal incluye un rodillo compactor, medios de almacenamiento y de transporte de la fibra al cabezal de aplicación (rodillos de accionamiento de traslado de fibra), sistema de corte-bloqueo para cada fibra individual (consisten de un medio de bloqueo mediante un sistema de control preciso y complejo, y cada cuchillas es activado por un cilindro neumático), medios de cambio de ruta (con el fin de redirigir cada fibra que se acaba de cortar), incluye medios de regulación de temperatura.

**Componentes-piezas:** Tubos flexibles, válvulas de control direccional, módulos termoeléctricos de efecto peltier, motor, banda, cilindros neumáticos, fuente de calor, etc.

**Características:** Los carretes de fibra se encuentran montados fuera del cabezal. Cabezal montado en brazo robot de 6 ejes.

**Ventajas:** Cabezal de estructura más compacta. El cabezal cuenta con medios de enfriamiento. Cabezal ensamblado a partir de diferentes módulos. Practicidad para el desmontaje y mantenimiento de los módulos.

**Desventajas:** Capacidad de corte limitado a 0° y 90° respecto de la longitud de la fibra. Carretes de fibra no montables en el cabezal.

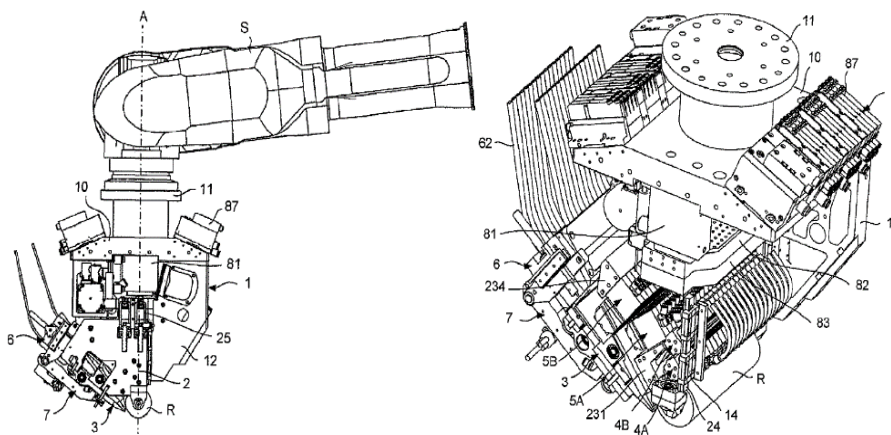


Fig. 3: Cabezal de colocación de fibras prepreg de Coriolis Composites.

Actualmente dicha patente es funcional pero con las siguientes características limitantes que pueden ser adaptadas:

- El Sistema de corte solo permite realizar cortes perpendiculares respecto a la longitud de la fibra, obligando al cabezal a generar pérdidas de material durante el proceso de colocación en ángulos de  $\pm 45^\circ$ .
- Los carretes de alimentación y de recogida de aislante de fibra no se encuentran alojados propiamente al cabezal, lo que obligaría a diseñarse un sistema más complejo para el guiado de las fibras.
- Incremento de costos en la manufactura debido a la adaptación de un sistema de guiado más complejo.

### 1.3.1.2 Fiber application machine

Otra de las opciones exploradas es la siguiente patente, en la Fig. 4 se observa el diagrama esquemático del cabezal patentado por Coriolis Composites con características distintivas a la patente anterior [23]. La presente invención se trata de una máquina para la colocación de fibras montada sobre una estructura tipo pórtico o brazo robot. El propósito de la presente invención es superar los limitantes en la velocidad de colocación y en particular, proponer una máquina de aplicación de fibra compacta, de diseño sencillo y menos costoso.

**Características:** El cabezal puede ser montado sobre un brazo robot o una estructura pórtico. Los medios de accionamiento pueden ser controlados de tal manera que la velocidad periférica de los cilindros es de 20 a 40%, aproximadamente 30% más rápida que la velocidad de movimiento más alta de las fibras. El cabezal cuenta con dispositivos para la incorporación de resina a la fibra de vidrio seco. Los medios de dosificación tienen la capacidad de recubrir de resina a la fibra justo enfrente del rodillo. Los rodillos tienen ranuras anulares.

**Componentes del cabezal:** La presente invención comprende un rodillo de compactación, medios de guiado de la fibra, medios de almacenamiento, medios de transporte de la fibra al cabezal, sistema limitador de tensión (dos cilindros), medios de dosificación, es decir, donde se almacenara la resina, medios para el corte y re-direccionamiento de fibras, medios de enfriamiento de la resina aplicada a la fibras para evitar su adherencia en el rodillo aplicador, medios para calentar la resina, bombas volumétricas que permiten agregar la resina a las fibras antes de su aplicación.

**Componentes-piezas:** Rodillo de compactación, depósito de resina, cilindros neumáticos, mangueras para el transporte de fibra, fuente de calentado, bombas volumétricas, motores, bandas, cámara de dosificación, hornos de fusión, tambor de vaciado, recipientes a presión.

**Ventajas:** Mecanismo de realimentación de fibra aplicable para un nuevo diseño.

**Desventajas:** Sistema de corte limitado solo a  $0^\circ$  y  $90^\circ$  respecto de la longitud de la fibra. Carretes de fibra no montables en el cabezal.

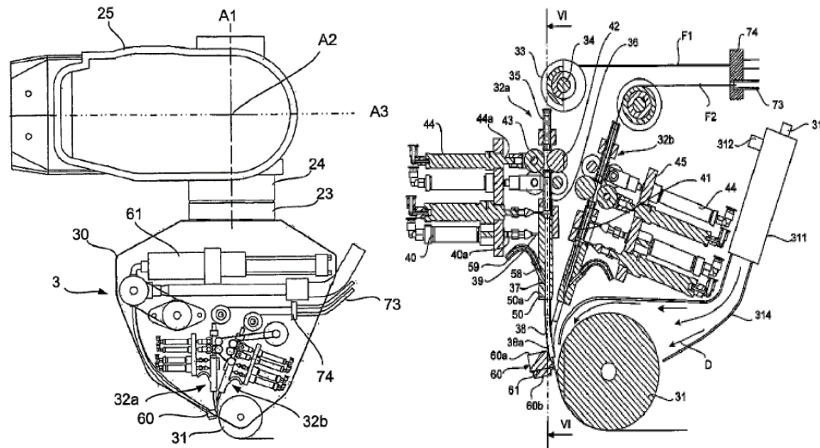


Fig. 4: Diagrama general del cabezal patentado por Coriolis Composites.

La patente presenta las siguientes características limitantes:

- El cabezal está limitado al uso de solamente fibras de vidrio, por lo que dicha patente no cumple con los requisitos necesarios para hacer uso tanto de pre-impregnados de fibra de carbono de resina termoestable y termoplástica.
- El sistema de corte está limitado solo a 0° y 90° respecto de la longitud de la fibra, lo que implica mayor pérdida de material durante el proceso de apilamiento en ángulos de  $\pm 45^\circ$ .
- Los carretes de alimentación y de recogida de cinta aislante de la fibra no se encuentran alojados propiamente al cabezal, lo cual hace que el diseño del sistema de guiado sea complejo.
- Incremento de costos en la manufactura debido a la adaptación de un sistema de guiado más complejo.

### 1.3.1.3 Thermoplastic multi-tape application head

Otro cabezal analizado es el patentado por la empresa aeronáutica The Boeing Company [24], en la siguiente Fig.5 se observa el diagrama esquemático del cabezal. La presente invención consiste de un cabezal para la colocación de cintas impregnadas de resina termoplásticas (fibra de carbono) para formar un laminado.

**Características:** A parte del rodillo de compactación presenta unos rodillos de compactación en frío. Cabezal de colocación con estructura ligera. El rodillo compactador se encuentra montado sobre rodamientos enfriados por aire. La forma de mantener una presión controlada en los rodillos de realimentación de cinta es regulada por el movimiento (salida y entrada del vástago) de un cilindro neumático.

**Ventajas:** Los rodillos de consolidación tiene la capacidad de inclinación y adaptación a la superficie del molde mediante un mecanismo de rodillos auxiliares. Mecanismo sencillo de guiado de cinta que puede aplicarse para el diseño un nuevo cabezal. La fuerza de compactación se realiza mediante un cilindro neumático.

**Desventajas:** El corte de cinta es mediante una guillotina y los cortes son a 0° y 90° respecto de la longitud de la cinta. El mecanismo de activación del rodillo de

alimentación motriz contiene muchas piezas haciéndolo más complejo. El rodillo compactador es accionado por un motor (algo poco común).

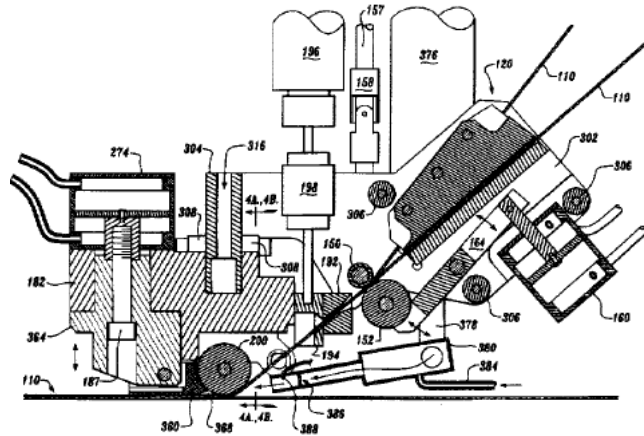


Fig. 5: Diagrama general del cabezal, The boeing Company.

La patente presenta una estructura práctica en el ensamblado con un sistema de guiado sencillo sin embargo entre sus características limitantes que pueden ser acondicionados se describen a continuación:

- El cabezal está diseñado para el manejo de fibras termoplásticas, por lo que se desconoce el comportamiento funcional al hacer uso de fibras de material compuesto con resina termoestable.
- El sistema de corte es mediante cuchillas tipo guillotina limitado a cortes a 0° y 90° respecto de la longitud de la fibra, lo cual la generación de pérdidas de material durante el proceso de colocación a  $\pm 45^\circ$  es considerable.
- Carretes de alimentación y de recogida de cinta aislante de la fibra no alojados propiamente al cabezal, lo que implica mayor complejidad en el sistema de guiado de las fibras.
- Incremento de costos en accesorios y manufactura a causa de la adaptación de un sistema más complejo.
- El mecanismo de guiado de fibras es complejo al estar formado por muchas piezas que podrían ser simplificado a un sistema más sencillo y que a la vez hace que el cabezal sea más voluminoso y pesado.

### 1.3.2 Conclusiones en el análisis de las patentes

Después de haber concluido un análisis exhaustivo de los cabezales de colocación de fibras de diferentes empresas y de las características limitantes identificadas, se observan en cada una de ellas una principal problemática, la cual representa la aportación principal del presente tema de tesis, que permitirá optimizar el aprovechamiento del material durante el proceso de colocación de fibras, misma que se describe a continuación:

“Un cabezal para la colocación de fibras de carbono con un sistema particular de corte en ángulos de  $\pm 45^\circ$  respecto de la longitud de la fibra”.

## 1.4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente la automatización de componentes reforzados con materiales compuestos está en continua investigación en diferentes países ya que permite reducir pérdidas de materiales compuestos durante el proceso, además de poder controlar algunas propiedades mecánicas del componente fabricado.

En CIDESI no se tienen antecedentes de proyectos encaminados a la investigación de tecnologías de manufactura automatizadas de piezas a partir de fibras de materiales compuestos por lo que se plantea realizar el diseño de un cabezal compacto para la colocación de fibras con un sistema particular de corte en ángulos de  $\pm 45^\circ$  que permitirá minimizar la pérdida de material durante el proceso de colocación.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

Actualmente las tendencias en el uso de cabezales con tecnología AFP aumentan paulatinamente en la industria eólica. Por lo que a través del proyecto P02 del CEMIE Eólico se plantea la necesidad de iniciar investigaciones enfocadas a la manufactura de palas de aerogeneradores eólicos siendo indispensable el diseño de un prototipo cabezal para la colocación de fibras de materiales compuestos.

El realizar el diseño de un cabezal para la colocación de fibras permitirá dar inicio a una línea de investigación enfocado a la manufactura automatizada de materiales compuestos en CIDESI.

Además en el desarrollo de un cabezal para la colocación de fibras se contempla también el diseñar un sistema que permitirá realizar cortes en ángulo de  $\pm 45^\circ$  haciendo que las pérdidas de materiales durante el proceso sean mucho menor, siendo uno de los principales problemas de la tecnología automatizada AFP.

## 1.6 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal del presente trabajo de tesis es el realizar el diseño de un cabezal para la colocación de tiras de fibras de carbono con un sistema particular de corte a  $\pm 45^\circ$ .

## 1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para lograr el objetivo general del presente tema de tesis, es necesario contemplar los siguientes objetivos específicos:

- Investigación del estado del arte de los instrumentales con tecnología AFP, con el fin de evaluar su viabilidad técnica en cuanto a requerimientos de diseño.
- Propuesta del diseño conceptual del cabezal para la colocación de fibras de carbono con sistema de corte a  $\pm 45^\circ$ .
- Configuración mecánica para la separación de la cinta aislante de la fibra de carbono.
- Análisis y experimentación de fuerzas de corte y para la selección del yunque de corte.
- Análisis de FEM para las distribuciones de esfuerzos en piezas críticas del diseño.



## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 TECNOLOGÍA DE COLOCACIÓN AUTOMATIZADA DE FIBRAS

Los sistemas de colocación automatizada de fibras del inglés Automated Fiber Placement (AFP), se caracterizan por usar fibras con anchos de 3.2 mm, 6.35 mm, y 12.7 mm, las cuales son impregnadas de forma automatizada sobre moldes a partir de varias tiras de fibras y colocadas en una sola secuencia, denominado banda de fibras. La colocación automatizada de fibras es el proceso por el cual las cintas de materiales compuestos se colocan sobre la superficie de una herramienta en una posición adecuada a partir de una máquina y no manualmente. [29]

La técnica de colocación de fibras AFP, consiste de un cabezal que manipula de 8 a 32 tiras de fibras. El cabezal con rodillo de compactación coloca este conjunto de tiras simultáneamente con la capacidad de detener e iniciar las tiras individualmente. Por lo tanto, el espesor de la pieza y la fuerza pueden variar continuamente a lo largo de la superficie de la herramienta.

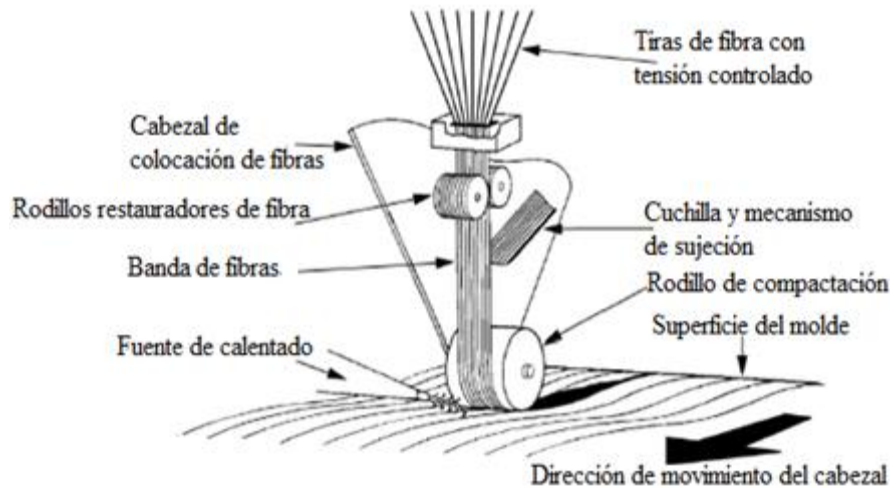


Fig. 6: Diagrama de los componentes principales de un cabezal para colocación de fibras

### 2.2 VENTAJAS DE LA MANUFACTURA AUTOMATIZADA AFP

Las técnicas de colocación de fibras automatizadas ofrecen varias ventajas sobre la colocación manual.

- El tiempo y la mano de obra necesaria para la manufactura de piezas disminuyen. Esto es en parte debido a que varios pasos en el proceso de colocación a mano se reducen o eliminan.
- El corte y el pegado de la fibra son eliminados debido a que el proceso de colocación de fibras hace efectivamente esto a medida que avanza la consolidación y el corte de la cinta.
- La colocación de cintas permite el control de partes de espesor fino para equilibrar de manera óptima el peso y la fuerza, ya que el patrón de la cinta puede adaptarse a los requisitos de resistencia.

- La máquina puede orientar las tiras de fibras con mayor precisión en comparación a la forma manual, por lo que la calidad de la pieza mejora.
- Las pérdidas por corte de materia prima de rollos de gran ancho se eliminan, por lo que la relación de compra/uso de material mejora.

### 2.3 CABEZAL COLOCADOR DE FIBRAS DE CARBONO

Un cabezal para la colocación de fibras de materiales compuestos (AFP) Fig. 7, es un dispositivo que se caracteriza por su montaje sobre un brazo robótico o estructura gantry, puede definirse como un dispositivo automatizado formado a partir de subsistemas que de manera íntegra permite llevar a cabo la función de impregnado de fibras sobre superficies de herramientas de trabajo (moldes) a una determinada velocidad, temperatura y fuerza de consolidación.

El cabezal se encuentra formado por subsistemas que a continuación se listan:

- Sistema de montaje de los carretes de realimentación de fibras.
- Sistema de guiado de fibras (realimentación de fibras).
- Sistema de corte-bloqueo automático.
- Rodillo de consolidación de fibras.
- Sistema de calentado de fibras.

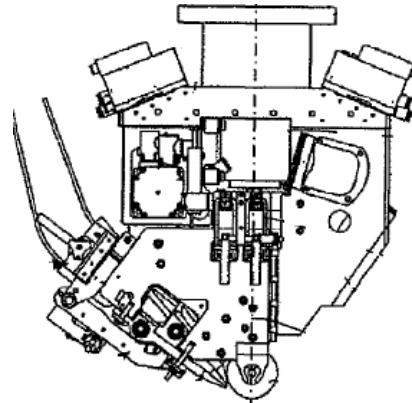


Fig. 7: Cabezal para la colocación de fibras. Coriolis composites

### 2.4 SISTEMA DE MONTAJE DE CARRETE REALIMENTADOR

El sistema de montaje de carretes hace referencia a la forma o posición en que será adaptado los rollos o carretes de materia prima, es decir, los carretes pueden ser posicionados horizontalmente con respecto a uno de las paredes de soporte vertical del cabezal o bien posicionado de forma vertical con respecto a una pared de soporte horizontal.

En la Fig. 8, se observa que el montaje del carrete es en posición horizontal y paralela al eje del rodillo de compactación permitiendo que el guiado de la cinta desde el carrete hasta el rodillo sea relativamente más fácil, debido a que la cinta se desplaza en un trayectoria en donde el área más ancha entra en contacto tangencial con el rodillo para su consolidación.





Fig. 8: Montaje del carrete de fibra en forma horizontal. DLR

Sin embargo, cuando el posicionamiento de los carretes es de manera vertical Fig. 9, hace que el sistema de guiado sea más complejo, debido a que la superficie más ancha de la fibra es guiada de manera vertical, es decir, que cuando la fibra entre en contacto tangencial con el rodillo, no será con la cara ancha de la fibra sino con el espesor causando que al ejercer la fuerza de compactado la fibra se arrugue, esto hace que el sistema de guiado demande mayor complejidad y tiempo para su diseño, para evitar esto será necesario adicionar un mecanismo que evite lo anterior.



Fig. 9: Montaje del carretes de fibras en forma vertical. DLR

De acuerdo a diferentes invenciones patentadas por empresas e instituciones dedicadas al desarrollo e innovación de tecnología de manufactura automatizada se ha podido observar dos formas de llevar a cabo el alojamiento de los carretes de alimentación.

En una primera configuración los carretes se encuentran montados propiamente al cabezal, con la principal característica que la cantidad de carretes montables siempre será menor a la cantidad que puede ser alojado fuera del cabezal, esto hace que sea uno de los factores importantes para mejorar la producción. Ejemplo de este tipo de sistema

de montajes es presentado en la patente de Automated Dynamics, tal y como se observa en la Fig. 9.

Mientras que en la segunda forma el conjunto de carretes se encuentran ensamblados en un área fuera del cabezal, es decir, que los carretes de alimentación no se encuentran montados propiamente en el cabezal sino que se encuentran ubicadas en un alojamiento en donde la temperatura puede estar o no controlada, ejemplo de éste tipo de cabezal es la patente de la empresa francesa Coriolis Composites [22,23], que puede observarse en Fig. 10.



Fig. 10: Montaje de carretes en alojamiento acondicionado. Coriolis Composites

## 2.5 SISTEMA DE GUIA Y DE REALIMENTACIÓN DE FIBRAS

El sistema de guiado se define como el mecanismo por el cual son conducidas las fibras desde los carretes de realimentación hasta el rodillo de compactación. Las configuraciones de guiado de la materia prima (fibras de material compuesto) desde los carretes hasta el rodillo de consolidación difieren de acuerdo a la ubicación y posición de montaje, es decir, si los carretes se encuentran montados en el cabezal o fuera y si está posicionado horizontal o verticalmente, tal como se describió anteriormente.

La forma comúnmente de guiar las fibras es a través del uso de placas o guías longitudinalmente ranuradas que tienen un ancho sustancialmente correspondiente al ancho de las fibras que usará el cabezal (3.125mm, 6.35 mm y 12.7mm) espaciadas entre sí de manera transversal con distancias similares a la anchura de una ranura, en el caso de cabezales con capacidad de uso de más de una tira de fibra. En la Fig. 11 se observa un ejemplo de tres placas con ranuras de guiado de fibras usado para el cabezal de Coriolis Composites y en la Fig.12 se observa una forma de guiado diferente.

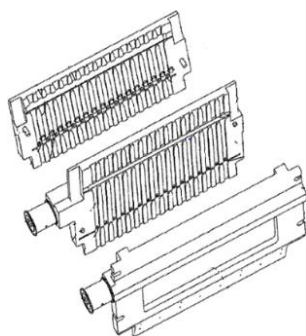


Fig. 11: Placas ranuradas para guiado de fibra

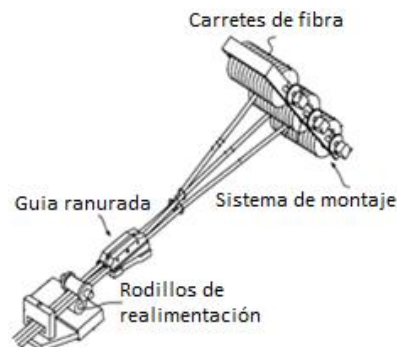


Fig. 12: Sistema de guiado diferente a las placas ranuradas

Cabe destacar que cuando el sistema de montaje de carretes tiene un alojamiento fuera del cabezal, se necesita un guiado adicional desde dicho alojamiento hasta el cabezal y esto se logra en muchos casos haciendo pasar las fibras a través del interior de tubos flexibles.

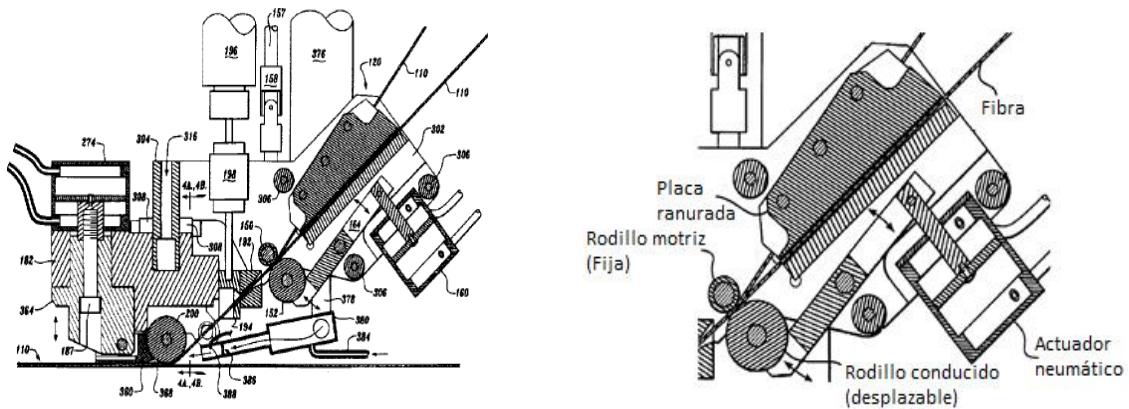


Fig. 13: Configuración de un sistema de realimentación de fibras

Para llevar a cabo la alimentación de la fibra hacia el rodillo de compactación en cada ciclo de corte, es necesario el uso de un sistema de dos poleas o rodillos, uno motriz y el otro conducido, donde la fibra pasara a través de dicho sistema.

La polea motriz caracterizada por ser fija y accionada por algún tipo de motor y la polea conducida montada a un mecanismo con la capacidad de ejercer un desplazamiento lineal que permitirá mantener un contacto tangente con la polea motriz, haciendo que la fibra entre en contacto con las dos poleas causando de esta forma un movimiento de traslación en el interior de las guías. Ejemplo del sistema de realimentación de fibras descrito anteriormente es la propuesta en la patente Thermoplastic multi-tape application head [24], tal y como se observa en la Fig. 13.

## 2.6 SISTEMA DE CORTE-BLOQUEO DE FIBRAS

El sistema de corte y bloqueo de fibras, se puede definir como el mecanismo que realiza el fijado y al mismo tiempo el corte de fibras durante el proceso de colocación del cabezal.

En dicho sistema se pueden distinguir dos pasos principales: El primero consiste en llevar a cabo la fijación de la fibra a cortar, es decir, hacer que la fibra sea fijada contra las paredes de guiado con el fin de evitar movimientos que dificulten el proceso de corte. El segundo se basa en que una vez sujeta la fibra se procede a realizar el corte a través del uso de cuchillas mediante el proceso de cizallado accionado por un dispositivo lineal. En la Fig. 14 es un tipo de sistema de corte mediante punzón diseñado y utilizado en el cabezal de la empresa francesa Coriolis composites, además se observa una vista seccionada del cabezal mostrando principalmente el principio de funcionamiento del sistema de corte-bloqueo.

Actualmente la mayoría de los mecanismos de corte presentes en diferentes patentes de cabezales se caracterizan por realizar los cortes perpendicularmente a la longitud de la fibra. Sin embargo en el campo laboral de los materiales compuestos se han experimentado laminados con apilamientos de fibras de material compuesto en ángulos de  $\pm 45^\circ$  observándose mejores resultados en las propiedades mecánicas para diferentes piezas de acuerdo a su aplicación.

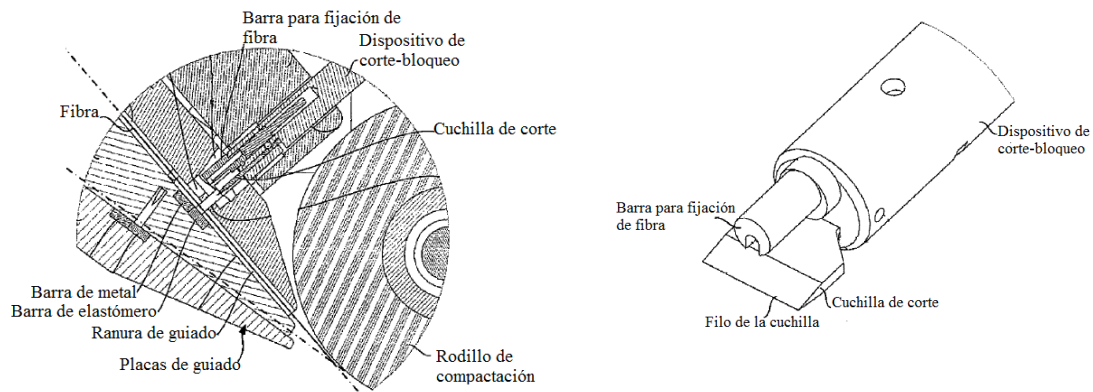


Fig. 14: Configuración del mecanismo de corte del herramienta. Coriolis Composites

## 2.7 SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE FIBRAS

El sistema de calentamiento, es aquella formada por dispositivos que permiten generar altas temperaturas y llevar a cabo el proceso de colocación de fibras. La principal función es activar la resina con el fin de facilitar la adherencia de las fibras sobre la superficie del molde.

Existen muchas fuentes de calor, incluida la antorcha de gas caliente, infrarrojos, láser tradicional CO<sub>2</sub>, láser tradicional Nd:YAG, láser de diodo de alta potencia, ultrasonidos, microondas y de inducción.

De acuerdo a [30], describe que los criterios más importantes para llevar a cabo la selección de las herramientas de calentado son las siguientes: peso, precio, eficiencia de calentado, tiempo de respuesta y tamaño, tal y como se describe en la tabla 2.

Características de la fuente de calentado:	Herramientas de calentado para composites			
	Soplet e de gas	Lámparas IR	Laser tradicional [CO <sub>2</sub> and Nd:YAG]	Laser Diodo
Eficiencia de calentado	1 (--)	3 (=)	4 (+)	5 (++)
Tiempo de respuesta	1 (--)	3 (=)	4 (+)	5 (++)
Tamaño	5 (++)	3 (=)	1 (--)	5 (++)
Peso	5 (++)	4 (+)	1 (--)	4 (+)
Precio	3 (=)	4 (+)	1 (--)	2 (-)

Tabla 2: Comparativa de fuentes de calor para el calentado de materiales compuestos

En la tabla anterior, se enlistan las herramientas mayormente utilizadas en los cabezales para llevar a cabo el calentado de las fibras. Las fuentes de calor tales como la antorcha de gas caliente y los rayos láser, irradian su energía directamente en el punto de

contacto o sujeción (rodillo de consolidación, fibra y superficie del molde), y los calentadores infrarrojos se encuentran sobre todo en la etapa de precalentamiento [4]. En la Fig. 15 se observa el punto de contacto o sujeción y la forma de irradiar energía calorífica hacia la cinta o fibra.

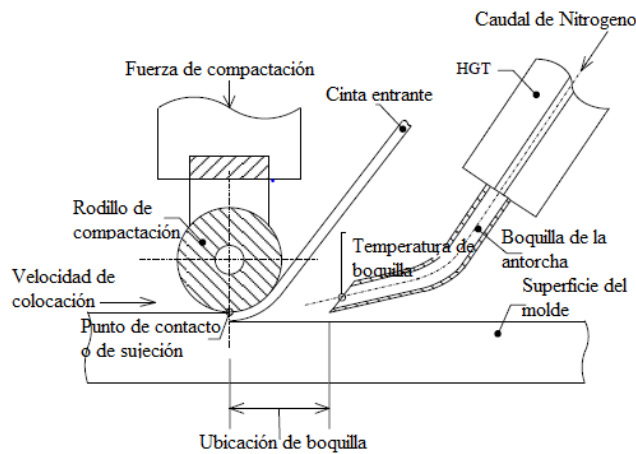


Fig. 15: Posicionamiento de la fuente de calentado en un cabezal

Con el fin de permitir la producción a altas velocidades y a altas temperaturas, una fuente de calor eficiente deberá ser incorporada al cabezal. Además, el tiempo de respuesta de los calentadores debe ser tan rápida como sea posible con un rendimiento estable.

### 2.7.1 Rayos Laser

El calentamiento radiactivo por rayo láser es una excelente técnica de calentamiento para la eficiencia energética y el rápido tiempo de respuesta. La radiación de los rayos láser puede ser centrada directamente hacia el punto de contacto, calentando instantáneamente la cinta entrante y la superficie del molde. Existen tres tipos de rayos laser que actualmente son utilizados en el calentado de materiales compuestos, Laser CO<sub>2</sub>, Nd: YAG y diodo de alta potencia.

Se ha demostrado a través de desarrollos experimentales que la emisividad (absorción) de la resina de los materiales compuestos prepreg es altamente dependiente de la longitud de onda de luz. Para el CO<sub>2</sub> (10600 nm) la longitud de onda de la resina es altamente absorbente y para el láser Nd: YAG (1064 nm) como para el diodo de alta potencia (808 nm) la resina es transparente.

Por lo tanto, cuando se utiliza el láser de CO<sub>2</sub> como fuente de calor hay un mayor riesgo de quemar y oxidar la superficie de la resina del material lo que afecta la adherencia de la interfaz de fibra/matriz.

Dado que las fibras de carbono son muy conductoras térmicamente a lo largo de su longitud, se logra un calentamiento más uniforme y controlable.



### 2.7.2 Antorcha de gas caliente (Hot gas Torch, HGT)

De acuerdo a Automated Dynamics Corporation ADC [31], en el sistema de calentado HGT, el gas nitrógeno es calentado pasando a través de varios elementos de calefacción.

De acuerdo a un procesamiento inicial de la fibra y mediante medición de la temperatura en el rodillo, se encontraron que una boquilla convencional concentra la temperatura en la parte media del rodillo en lugar de proporcionar una temperatura uniforme a través de todo su ancho. Por lo tanto, para superar este problema, se sugirió una nueva boquilla más ancha.

Con el fin de garantizar un flujo de calor suficiente para el procesamiento de una fibra termoplástica de 12.7 mm de ancho, se compararon las relaciones entre la temperatura en el rodillo, la velocidad de flujo de gas nitrógeno, y la distancia boquilla-rodillo. Para cambiar la distancia boquilla/rodillo, el soporte de la boquilla se ajustó con suavidad hacia delante/atrás y se giró hacia arriba/abajo para asegurar su punta (flujo de gas), como se observa en la Fig. 16.

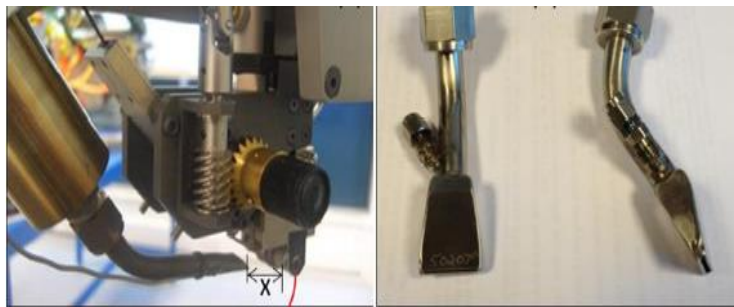


Fig. 16: Sistema de calentado de fibras usando antorcha de gas

Cabe destacar que el ancho de las boquillas para el calentado de las fibras a través del uso de sopletes de gas nitrógeno dependerá directamente del ancho de material compuesto que será usado en el proceso de colocación. Además de acuerdo a [30] se observan que la eficiencia de calentado y el tiempo de respuesta no son comparables como las lámparas infrarrojas y los rayos láser, las cuales representan factores importantes para mejorar la productividad de manufactura de materiales compuestos.

### 2.7.3 Lámpara IR

En este método, la luz infrarroja es incidida a diferentes ángulos sobre las fibras de material compuesto previamente colocadas, para dar inicio al pre-curado durante el procesamiento.

Los rayos infrarrojos se caracterizan por emitir radiaciones de entre 750 nm y 1 mm de longitud de onda. La principal ventaja de la lámpara IR es, el tiempo de respuesta corto, la durabilidad en un entorno de fabricación y longitud de onda más larga con alta potencia de salida. De acuerdo a la tabla comparativa de fuentes de calentado se observa que la lámpara IR presentan cualidades neutras respecto a las otras fuentes de calentado, sin embargo de acuerdo a pruebas experimentales se han obtenido resultados considerables, tales pruebas son por ejemplo las realizadas por la empresa Coriolis composites [32].

## 2.8 RODILLO DE COMPACTACIÓN

Se puede definir como la herramienta de un cabezal encargado de ejercer contacto con la fibra a colocarse y la superficie del molde, a través de la acción de la fuerza aplicada al herramental mediante el brazo robot.

Actualmente de acuerdo a las investigaciones experimentales llevadas a cabo por diferentes instituciones y empresas dedicadas al desarrollo de manufactura automatizada mediante cabezales AFP, entre los materiales comúnmente experimentados para los rodillos de consolidación se encuentran la silicona y el aluminio, con diseños específicos que permitan disipar eficientemente la temperatura irradiada por la fuente de calentado que se encuentra adyacente a ella. Durante el proceso de colocación de las fibras, el rodillo debe permanecer idóneamente a una temperatura que evite que la fibra pueda adherirse a ella.

En varios diseños de patentes se han encontrado diferentes configuraciones para mantener enfriado el rodillo, una de ellas es dirigir un flujo de aire directamente sobre el rodillo compactador tal y como se observa en la Fig. 17 correspondiente a un cabezal de Coriolis Composite [23] y al igual que la experimentada por TUM, Fig. 18.

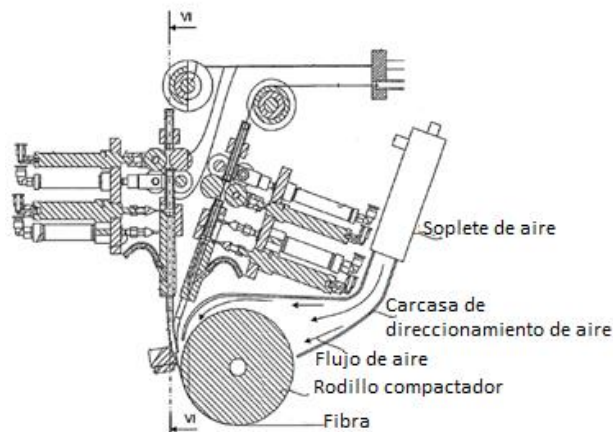


Fig. 17: Enfriamiento del rodillo de compactación mediante un flujo de aire.

Otro de los diseños de rodillos utilizados se caracteriza por contener barrenados a través de toda la sección transversal por el cual circula aire, con el fin de disipar el calor absorbido por el rodillo. En la Fig. 18 se puede observar diferentes diseños de rodillos enfriados por agua y por aire experimentados por la Universidad Técnica de Munich. Esta problemática aún sigue en constante investigación realizándose diferentes diseños de rodillos con el objetivo de optimizar la colocación y la calidad de los materiales compuestos fabricados.

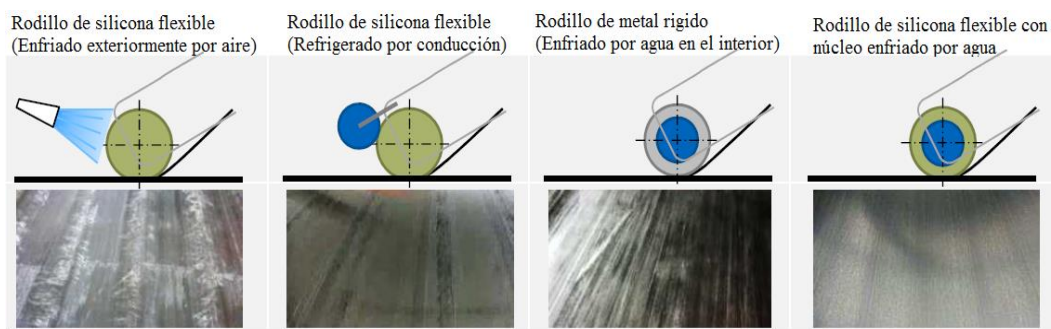


Fig. 18: Diferentes diseños de rodillos de compactación

## 2.9 ACTUADORES NEUMÁTICOS

Los actuadores neumáticos en los cabezales son utilizados dentro de los sistemas de alimentación y de corte de fibra, debido a que por medio del vástago le permite al rodillo y a la cuchilla desplazarse linealmente.

### 2.9.1 Cálculo de actuadores lineales de simple efecto

Para calcular la fuerza que ejerce el vástago de un cilindro en sus carreras de avance o retroceso se debe partir de la presión de trabajo. La fuerza desarrollada depende de la superficie útil del actuador, que será diferente según se trate de cilindros de simple o de doble efecto.

Los cilindros de simple efecto son aquellos que solo realizan un trabajo cuando se desplaza su elemento móvil (vástago) en un único sentido, es decir, realizan el trabajo en una sola carrera de ciclo. En la Fig. 19 se observa el diagrama esquemático de un cilindro de simple efecto.

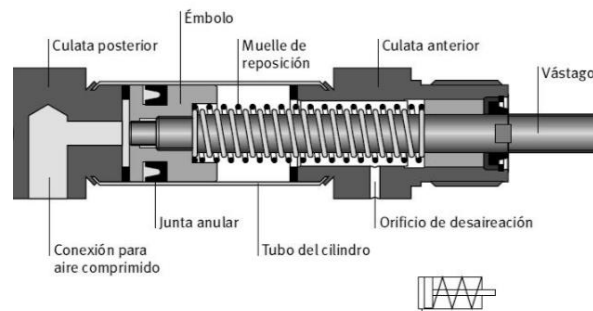


Fig. 19: Diagrama esquemático de las partes de un cilindro de simple efecto

En estos cilindros solamente se ejerce fuerza en el sentido de avance, es decir la fuerza que realiza el aire comprimido, cuando el cilindro regresa a su posición estable lo hace por medio de la fuerza de empuje del resorte, que exclusivamente sirve para recuperar la posición del vástago, pero es incapaz de desarrollar ningún tipo de trabajo mecánico.

A efectos de cálculo se interpreta que la fuerza del resorte es del orden del 10% de la fuerza neumática. La fuerza teórica del émbolo se calcula con la siguiente fórmula:

$$F_{teorica} = P_{aire} \cdot A_{embolo} \quad (1)$$

En la práctica es necesario conocer la fuerza real que realiza el émbolo. Para calcularla hay que tener en cuenta los rozamientos que existen, lo que provoca pérdidas sobre la fuerza teórica. En condiciones normales de servicio (4 a 8 bar) se puede considerar que las fuerzas de rozamiento suponen entre un 5 a un 15% de la fuerza teórica calculada.

La fuerza real se calcula mediante la siguiente expresión:

$$F_{real} = P \cdot A - (F_{resorte} + F_{rozamiento}) \quad (2)$$

Sección o área del embolo del cilindro:

$$A = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \frac{d^2}{4} \quad (3)$$



Volúmen:

$$V = A \cdot L = \pi \frac{d^2}{4} \cdot L \quad (4)$$

Donde:

$L$  = Carrera del cilindro neumático

$d$  = Diámetro del embolo

Para determinar la fuerza real hay que tener en cuenta los rozamientos. En condiciones normales de servicio (presiones entre 4 y 8 bar) las fuerzas de rozamiento representan de un 3 a un 20 % de la fuerza calculada.

Si el cilindro es de simple efecto, a la fuerza teórica calculada, hay que reducirle además la del resorte. La fuerza de un muelle depende de la elongación del mismo y se calcula por la expresión:

$$F_{resorte} = k \cdot x \quad (5)$$

Donde:

$F_{resorte}$  = Fuerza del muelle en N

$k$  = Constante del muelle en N/mm

$x$  = Elongación en mm

### 2.9.2 Velocidad en los diferentes cilindros

La velocidad de un cilindro ( $v$ ) es la división entre el caudal ( $Q$ ) y el área de empuje ( $A$ ), por lo cual la velocidad a la que sale o regresa un cilindro depende de la siguiente fórmula.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (6)$$

### 2.9.3 Volumen, Tiempo y Caudal

Para desplazar el émbolo de un cilindro neumático se requiere una cierta cantidad de aire a la presión correspondiente a la fuerza de trabajo. La cantidad de aire corresponde al volumen de la cámara:

$$V = A_{avance} \cdot L \quad (7)$$

El cilindro tardará un tiempo más o menos pequeño en realizar cada uno de los movimientos de avance y retorno, desplazando en ese tiempo los correspondientes volúmenes de avance y retorno, dividiendo el volumen desplazado por el tiempo que emplea podemos obtener el caudal necesario para cada uno de los movimientos, generalmente nos interesa obtener el caudal por ciclo completo que se calcula dividiendo el volumen total (en caso de cilindros de doble efecto) por el tiempo total.

$$Q = \frac{V_{total}}{t} \quad (8)$$

Donde:  $t$  es el tiempo en que tarda en salir y regresar el vástago del cilindro neumático.

## 2.10 TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO POR RUEDAS DE FRICCIÓN

Permite transmitir un movimiento giratorio entre dos ejes paralelos o perpendiculares, modificando las características de velocidad y/o sentido de giro.

Sus aplicaciones prácticas son muy limitadas debido a que no puede transmitir grandes esfuerzos entre los ejes, pues todo su funcionamiento se basa en la fricción que se produce entre las dos ruedas. Se usa cuando se pretenden transmitir pequeñas potencias, ya que al estar en contacto una rueda con otra se produce una pérdida de velocidad.

La relación de transmisión suele ser de 6 aunque su máximo es 10, su potencia es baja y la velocidad tangencial suele rondar los 20 m/s. Una gran ventaja es su bajo costo pero tiene el inconveniente de ser muy ruidosas a grandes velocidades y su mal comportamiento a efectos de choque.

Este sistema consiste en dos ruedas solidarias con sus ejes, cuyos perímetros se encuentran en contacto directo. El movimiento se transmite de una rueda a otra mediante fricción (rozamiento). Desde el punto de vista técnico se tiene que considerar cuatro factores:

**Eje conductor:** Que tiene el giro que se requiere transmitir. Normalmente estará unido a un motor.

**Rueda conductora:** Solidaria con el eje conductor, recoge el giro de este y lo transmite por fricción (rozamiento) a la rueda conducida.

**Rueda conducida:** Recoge el giro de la rueda conductora mediante fricción entre ambas.

**Eje conducido:** Recibe el giro de la rueda conducida y lo transmite al receptor.

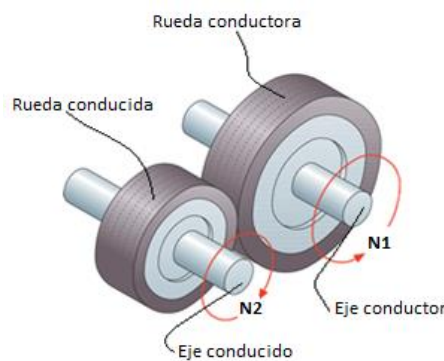


Fig. 20: Representación esquemática de ruedas de fricción

Para el cálculo matemático, se debe considerar cuatro elementos:

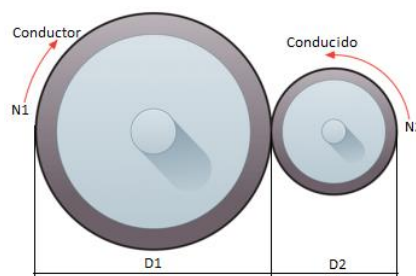


Fig. 21: Esquema de parámetros en ruedas de fricción

Donde:

$D_1$  = Diámetro de la rueda conductora

$D_2$  = Diámetro de la rueda conducida

$N_1$  = Velocidad de rotación del eje conductor rpm

$N_2$  = Velocidad de rotación del eje conducido rpm

Se encuentran ligados mediante la siguiente relación matemática para el cálculo de velocidad:

$$v_1 = v_2 \quad (9)$$

$$D_1 N_1 = D_2 N_2 \quad (10)$$

La ecuación anterior nos dice que podemos:

- Aumentar la velocidad de giro del eje conducido ( $N_2 > N_1$ ), haciendo que el diámetro de la rueda conductora sea mayor que la de la rueda conducida ( $D_1 > D_2$ ).
- Hacer que los dos ejes lleven la misma velocidad ( $N_1 = N_2$ ), haciendo que el diámetro de las dos ruedas sean iguales ( $D_1 = D_2$ ).
- Disminuir la velocidad de giro del eje conducido ( $N_2 < N_1$ ), haciendo que el diámetro de la rueda conductora sea menor que el de la rueda conducida ( $D_1 < D_2$ ).

Tal y como se observa en la siguiente representación esquemática.

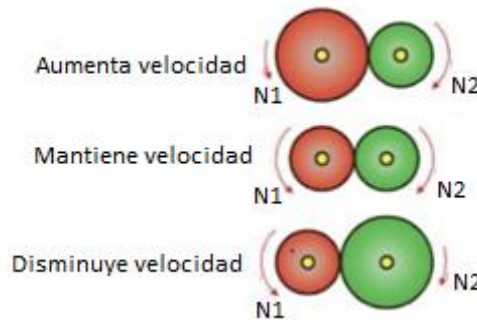


Fig. 22: Representación esquemática de relación de velocidades

## 2.11 TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO POR POLEAS Y CORREAS

Cuando el eje de una maquina motriz gira a una velocidad de rotación  $n$  (rpm), una polea que se encuentra solidaria, enchavetada, atornillada o soldada, al mismo, también gira a la misma velocidad de rotación  $n$ , y como ya se sabe, la velocidad tangencial  $v$  (m/s) en la periferia de la polea dependerá del radio de la misma.

Esta polea puede transmitir, por fricción o a través de una correa, su movimiento a otra polea que esté montada sobre el eje de otro mecanismo receptor del movimiento, el cual según sea la relación de transmisión, podrá adquirir menor, igual o mayor velocidad de rotación que el primero. La polea que transmite el movimiento se denomina motora o conductora, en tanto que la que recibe el movimiento recibe el nombre de conducida.

Según se muestra en la Fig. 23, la polea motora tiene un radio  $R$ , gira a una velocidad angular  $\omega$  (rad/s) y sobre la periferia de la misma actúa constantemente una fuerza

tangencial  $P$  que produce un momento motor  $M$  que torsiona el eje. Este momento motor está dado por la expresión:

$$M_m = P \cdot R \quad (11)$$

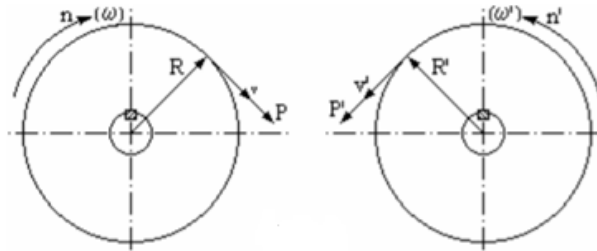


Fig. 23: Representación de parámetros en transmisión de movimiento por banda

La potencia que desarrolla el motor que acciona la polea motora es:

$$N = M_m \cdot \omega \quad (12)$$

Además, como el punto de aplicación de la fuerza  $P$  se mueve con una velocidad tangencial periférica  $v$ , la potencia desarrollada tangencialmente por la polea es:

$$N = P \cdot v \quad (13)$$

Las expresiones anteriores permiten conocer, a partir del momento motor  $M_m$  y de la velocidad angular  $\omega$  (rad/s), o de la fuerza  $P$  y de la velocidad tangencial  $v$ , que debe realizar la polea motora, la potencia  $N$  en el eje que debe entregarle el motor, o viceversa.

Para un número  $n$  de vueltas por minuto:

$$v = \omega \cdot R = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R}{60} \quad (14)$$

Resulta de las ecuaciones de potencia, lo siguiente:

$$N = P \cdot v = P \cdot \omega \cdot R = P \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R}{60} = \frac{P \cdot R \cdot n}{9.55} \quad (15)$$

Si  $P$  está en Newton,  $R$  está en  $m$ ,  $\omega$  en rad/s y  $v$  en m/s,  $N$  resulta en vatios  $W$ .

El sistema de poleas con correa más simple consiste en dos poleas situadas a cierta distancia, que giran a la vez por efecto del rozamiento de una correa con ambas poleas. Las correas suelen ser cintas de cuero flexible y resistente. En base a esta definición distinguimos claramente los siguientes elementos:

- 1.- **Polea motriz:** También llamada polea conductora. Es la polea ajustada al eje que tiene movimiento propio, causado por un motor, manivela, etc., este eje conductor posee el movimiento que se desea transmitir.
- 2.- **Polea conducida:** Es la polea ajustada al eje que se tiene que mover.
- 3.- **La correa de transmisión:** Es una cinta o tira cerrada de cuero, caucho u otro material flexible que permite la transmisión del movimiento entre ambas poleas. La correa debe mantenerse lo suficientemente tenso, de otro modo, no cumple su cometido satisfactoriamente.

Según el tamaño de las poleas se tiene dos tipos:

**1.- Sistema reductor de velocidad:** En este caso, la velocidad de la polea conducida es menor que la velocidad de la polea motriz. Esto se debe a que la polea conducida es mayor que la polea motriz.

**2.- Sistema multiplicador de velocidad:** En este caso, la velocidad de la polea conducida es mayor que la velocidad de la polea motriz. Esto se debe a que la polea conducida es menor que la polea motriz.

La correa en su funcionamiento está sometido a esfuerzos. Pero sus dos tramos no soportan los mismos esfuerzos; el tramo que va de la rueda motriz a la conducida se encuentra flojo, mientras que el otro está totalmente tenso.

Las correas pueden ser de distintos tipos:

- **Trapezoidales:** Son las más utilizadas, pues se adaptan firmemente al canal de la polea evitando el posible deslizamiento entre polea y correa.
- **Redondas:** Se utilizan correas redondas cuando ésta se tiene que adaptar a curvas cerradas cuando se necesitan fuerzas pequeñas.
- **Planas:** Cada vez de menor utilización, se emplean para transmitir el esfuerzo de giro y el movimiento de los motores a las máquinas.
- **Dentadas:** Las correas dentadas, que además son trapezoidales, se utilizan cuando es necesario asegurar el agarre. En ellas, el acoplamiento se efectúa sobre poleas con dientes tallados que reproducen el perfil de la correa.

El proceso de transmisión del movimiento con correas es un proceso de elevado rendimiento (95 – 98%) y precio reducido. Eso hace que dichos mecanismo sean muy empleados en distintos aparatos: electrónicos (disqueteras, equipos de video y audio) y en algunos mecanismo de los motores térmicos (ventilador, distribución, alternador, bomba de agua, etc).

La finalidad de estos sistemas de transmisión es transmitir movimientos de un lugar a otro pero, sobre todo, modificar sus características: su velocidad y como consecuencia, fuerza que puede desarrollar.

### 2.11.1 Determinación de la relación de transmisión

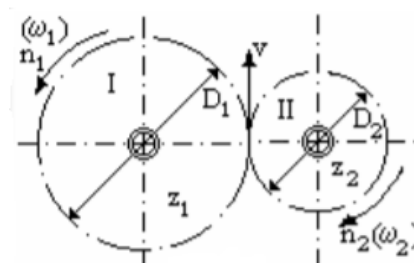


Fig. 24: Parámetros para obtención de relación de transmisión

Para que pueda engranar dos engranes entre sí, según se muestra en la Fig. 24, deben tenerse igual módulo, de donde se obtiene la relación de transmisión  $i$  las expresiones siguientes, en función de sus velocidades angulares, diámetros primitivos y número de dientes:

$$i = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{D_1}{D_2} = \frac{z_1}{z_2} \quad (16)$$

Para el accionamiento de poleas con correas, la relación de transmisión  $i$ , de acuerdo a la Fig. 25 es:

$$i = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\text{velocidad angular polea conducida}}{\text{velocidad angular polea conductra}} \quad (17)$$

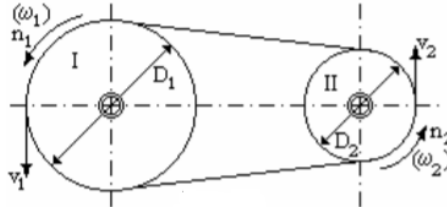


Fig. 25: Transmisión de movimiento por poleas y bandas

Pero se tiene que:

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60} \quad (18)$$

$$\omega_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_2}{60} \quad (19)$$

La velocidad tangencial periférica en las poleas está dada por la siguiente expresión:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad (20)$$

Como las dos poleas están unidas por un mismo vínculo indeformable, sus velocidades periféricas deben ser iguales:

$$v_1 = v_2 \quad (21)$$

### 2.11.2 Momento torsor

Cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo capaz de girar sobre un eje, produce un movimiento de rotación o giro.

El momento torsor y la velocidad transmitidos por un sistema de poleas están estrechamente relacionados con el valor de la relación de transmisión del sistema.

En este caso

$$i = \frac{M_1}{M_2} \quad (22)$$

Donde:

$M_1$ : El momento torsor de la polea motriz o polea de entrada

$M_2$ : El momento torsor de la polea conducida o polea de salida

Se puede observar que

- Si  $i < 1$  (reductor),  $M_2 > M_1$ . En este caso, la velocidad de la rueda conducida es menor que la de la polea motriz ( $v_2 < v_1$ ), pero el momento torsor resultante es mayor.
- Si  $i > 1$  (multiplicador),  $M_2 < M_1$ . En este caso, la velocidad de la rueda conducida es mayor que la de la polea motriz ( $v_2 > v_1$ ), pero el momento torsor resultante es menor.

Al momento torsor también se le denomina par de fuerzas o par motor.

- Si se desea mayor momento torsor, utilizaremos un sistema reductor.
- Si se desea desarrollar mayor velocidad, utilizaremos un sistema multiplicador, pero desarrolla un momento torsor menor.

### 2.11.3 Ángulo abrazado por la correa y longitud

El ángulo con que abraza la correa a las poleas dependerá de los diámetros de estas últimas y de la distancia a la que se encuentran entre sí sus centros. Si los diámetros de ambas poleas son iguales, según se muestra en la Fig. 26, el ángulo con que abraza la correa a cada polea es  $180^\circ$ .

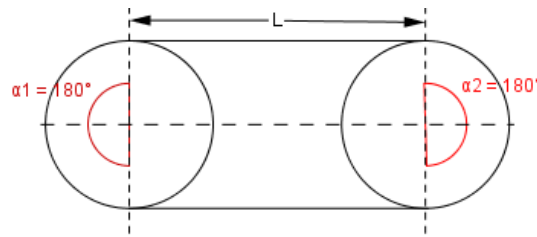


Fig. 26: Poleas de igual diámetro

Si los diámetros no son iguales, según se muestra en la Fig. 27, los ángulos abrazados por la correa son diferentes, siendo el ángulo  $\alpha_1$  menor a  $180^\circ$  en la polea menor y el ángulo  $\alpha_2$  mayor a  $180^\circ$  en la polea mayor.

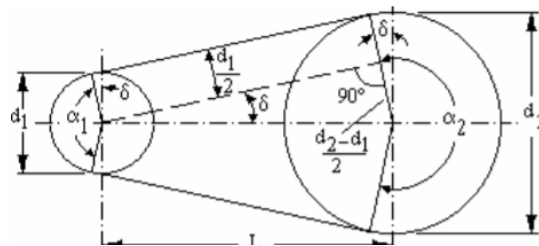


Fig. 27: Representación de parámetros para poleas de diámetros diferentes

Si se analiza la Fig. 27, se tiene que el ángulo  $\alpha_1$  con el cual la correa abraza a la polea menor es igual a  $180^\circ - 2\delta$  y el ángulo  $\alpha_2$  con el cual abraza a la polea mayor es  $180^\circ + 2\delta$ , siendo  $\delta$  el ángulo que forma el radio de cada polea que pasa por el último o primer punto de contacto que tiene la correa al dejar o entrar a la polea respectivamente, con el eje vertical de la polea, resultando por lo tanto que la longitud total de la correa es:

$$l = \pi d_1 \frac{\alpha_1}{360^\circ} + \pi d_2 \frac{\alpha_2}{360^\circ} + 2L \cos \delta \quad (23)$$

Si las poleas son de igual diámetro, la ecuación anterior se convierte en:

$$l = \pi d + 2L \quad (24)$$

## 2.12 ESFUERZOS CORTANTES

Los esfuerzos cortantes se encuentran comúnmente en pernos, pasadores y remaches utilizados para conectar diversos elementos estructurales y componentes de máquinas.

Un tipo de esfuerzo muy diferente al normal se obtiene cuando se aplican fuerzas transversales  $P$  y  $P'$  a un elemento  $AB$  Fig. 29. Al efectuar un corte en  $C$  entre los puntos de aplicación de las dos fuerzas, obtenemos el diagrama de la porción  $AC$  que se muestra en la Fig. 28.

Se concluye que debe existir fuerzas internas en el plano de la sección, y que su resultante es igual a  $P$ . Estas fuerzas internas elementales se conocen como fuerzas cortantes, y la magnitud  $P$  de su resultante es el cortante en la sección.

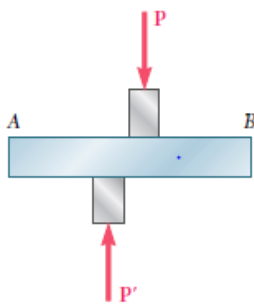


Fig. 29: Placa sujeta a fuerzas

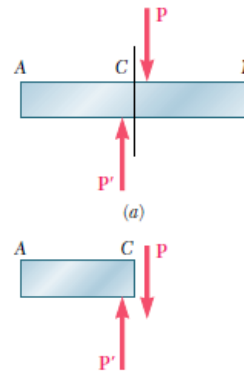


Fig. 28: Diagrama de la porción AC

Considere dos placas  $A$  y  $B$  conectadas por un perno  $CD$  Fig. 31. Si a las placas se les somete a fuerzas de tensión de magnitud  $F$ , se desarrollaran esfuerzos en la sección del perno que corresponde al plano  $EE'$ . Al dibujar los diagramas del perno y de la porción localizada por encima del plano  $EE'$ , se concluye que el cortante  $P$  en la sección es igual a  $F$ . Se obtiene el esfuerzo cortante promedio en la sección, de acuerdo con la fórmula de esfuerzo, dividiendo el cortante  $P = F$  por el área  $A$  de la sección transversal:

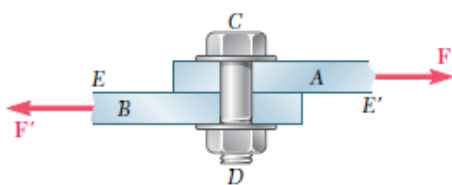


Fig. 31: Placas solapadas sujetas a fuerzas cortantes

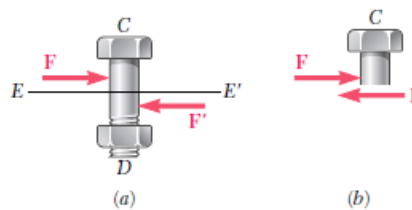


Fig. 30: Tornillos de las placas solapadas

$$\tau_{prom} = \frac{P}{A} = \frac{F}{A} \quad (25)$$



## 2.13 FACTOR DE SEGURIDAD

La máxima carga que puede soportar a un elemento estructural o un componente de maquinaria en condiciones normales de uso es considerablemente más pequeña que la carga última. Esta carga más pequeña se conoce como la carga permisible y, en ocasiones, como la carga de trabajo o carga de diseño. El remanente de la capacidad portadora de carga del elemento se mantienen en reserva para asegurar su desempeño seguro. La razón de la carga última a la carga permisible se emplea para definir el factor de seguridad. Se tiene que

$$\text{Factor de seguridad} = F. S. = \frac{\text{carga última}}{\text{carga permisible}} \quad (26)$$

Una definición alterna del factor de seguridad se basa en el uso de esfuerzos:

$$\text{Factor de seguridad} = F. S. = \frac{\text{esfuerzo último}}{\text{esfuerzo permisible}} \quad (27)$$

Las dos expresiones dadas para el factor de seguridad en las ecuaciones, son idénticas cuando existe una relación lineal entre la carga y el esfuerzo. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones de ingeniería esta relación deja de ser lineal al acercarse la carga a su valor último, y el factor de seguridad en función de esfuerzos no suministra una evaluación válida de la seguridad de un diseño dado.

## CAPÍTULO III: DISEÑO DEL CABEZAL

### 3.1 REQUERIMIENTOS DE MATERIALES

Anteriormente se describieron un conjunto de requerimientos contemplados para llevar a cabo el diseño del herramental, entre dichos requerimientos de diseño contemplamos: el tipo de material, el peso y las dimensiones a proponer para la estructura principal del soporte del herramental.

Uno de los objetivos de diseño que se han contemplado es: la propuesta de diseño de un cabezal con la característica de la alta resistencia mecánica que permita gran robustez durante el proceso de colocación, bajo costo, fácil manufactura, peso relativamente bajo y una dimensión considerable que permita minimizar efectos de falla en los mecanismos articulados del brazo robot.

El herramental fue diseñado para un brazo robótico *Powerball light-weight arm LWA 4.6 SCHUNK*. En las siguientes tablas se muestran las características del brazo robot que ha sido seleccionado para el montaje del herramental.



Weight [kg]	12.5					
Recommended workpiece weight [kg]	6 (including gripper)					
Min. ambient temperature [°C]	5					
Max. ambient temperature [°C]	55					
	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4	Axis 5	Axis 6
Max. angular acceleration [°/s <sup>2</sup> ]	300	300	300	300	300	300
Max. angular velocity [°/s]	72	72	72	72	72	72
	X	Y	Z	a	b	c
IP rating	40					
Noise emission [dB(A)]	≤ 70					
Nominal voltage, rated voltage [VDC]	24					
Average current input [A]	3					
Max. current input [A]	20					
Communication interface	A CAN bus for all axes, protocol: CANopen (CiA DS402:IEC61800-7-201)					
Service	USB-mini type B					

Tabla 3: Características de brazo robot Powerball light-weight arm LWA 4.6 SCHUNK

El requerimiento final para el dimensionamiento y el peso del prototipo del herramental considera que dicho diseño pueda ser mantenida en un cubo de 25 cm<sup>3</sup> y un rango en el peso de entre 3 kg y 5kg.

### 3.2 CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN DE LOS MATERIALES

Las consideraciones para la selección de los materiales para la fabricación del cabezal son las siguientes:

- Facilidad de maquinado
- Resistencia mecánica
- Costo
- Disponibilidad
- Dureza
- Adherencia

En función de estos parámetros se llevó a cabo la selección de los materiales que serán utilizados en las diferentes piezas del diseño final, a continuación se presenta la tabla 4 con las características físicas y mecánicas de cada material.

Materiales	Propiedades físicas y mecánicas			
	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficiente poisson	Límite elástico (MPa)	Módulo Elástico (GPa)
Aluminio 6061 T6	2700	0,33	275	69
Acero inoxidable AISI 304	8000	0,29	206	190
Nylamid tipo M	1140	0,33	70,6	2,35
Caucho de Silicona 55°				

Tabla 4: Propiedades físicas y mecánicas de los materiales

Para la carcasa principal y para la mayoría de las piezas del herramienta se ha seleccionado el material Aluminio 6061 T6. Esto debido a que es una aleación dúctil y ligera, con gran resistencia y excelentes características de acabado, es ideal para la elaboración de piezas maquinadas con calidades excelentes y para trabajos que requieran buen acabado superficial.

Este aluminio posee excelente resistencia a la corrosión, además de facilidad de soldadura y una resistencia parecida a la del acero. Esta es una aleación de propósito general muy popular con buena facilidad de maquinado a pesar de su tratamiento de envejecimiento artificial T6.

Además su resistencia es superior al de las aleaciones 6063, elaborado mediante tratamientos térmicos, envejecido artificialmente, óptima conformación con el frío, excelentes características para soldadura fuerte y al arco, costo y buena disponibilidad.

El diseño del dispositivo contempla el uso de rodillos los cuales tienen una función primordial para el funcionamiento del herramienta, estas estarán sujetos a diferentes cargas de trabajo para lo cual cada una de las piezas rodantes se encontraran ensambladas a flechas, para ello se ha seleccionado el material acero Inoxidable AISI 304.

Entre sus características principales están, una larga vida útil que mantendrá un acabado limpio y atractivo con bajo costo de mantenimiento. El grado 304 es la forma más común de acero inoxidable utilizada en el mundo, posee excelente resistencia a la corrosión a una amplia variedad de medios corrosivos, resistente a la corrosión en servicio intermitente hasta 871°C (1600 °F) y hasta 926°C (1700°F) en servicio continuo, disponibilidad y alta resistencia mecánica.

Tal y como se ha mencionado en secciones anteriores el cabezal debe contener un sistema que permita realizar cortes efectivos a partir de la cuchilla que impacta sobre el yunque a una determinada carga, para ello se realizaron pruebas experimentales haciendo uso de tres materiales: Aluminio 6061 T6, Neopreno y Nylamid tipo M.

La pre-selección de dichos materiales se debe a la buena disponibilidad presente en el mercado, su fácil maquinabilidad, su flexibilidad en cuanto a costo. Además, poseen

mayor disponibilidad de medidas para la fabricación de piezas desde muy pequeñas hasta muy grandes.

Como se ha comentado anteriormente un herramental con tecnología AFP manipula principalmente tiras de materiales compuestos. Dichos materiales se caracterizan por estar constituidas por dos partes la matriz (resinas termoestables o termoplásticas) y el refuerzo (fibras de carbono, de vidrio, de kevlar, etc.) debido a esto, la fibra de carbono prepreg se caracteriza por ser muy pegajosa lo que facilita su adherencia a las piezas con la que hace contacto.

Para ello y debido a que el objetivo del sistema de compactado es hacer uso de un material en donde la fibra no pueda adherirse al rodillo se ha seleccionado el material caucho de silicona. Este caucho se vuelve muy elástico y poco resistente después de curado, es económico, de fácil maquinabilidad, con capacidad de variación de dureza de acuerdo a necesidades, con poca facilidad de adherencia a la fibra y alta disponibilidad.

Para el caso del presente proyecto, se diseñará un prototipo-herramental con la capacidad de manejar carretes de fibra de carbono de resina termoestable con un ancho de aproximadamente 6.35 mm.

En la siguiente tabla se enlistan las propiedades de la fibra de carbono prepreg DA 409/G35 150, que ha sido seleccionado para la fabricación de laminados a partir del herramental:

Propiedades mecánicas	Valores
Presión y ciclo de curado	1 hora a 250°F y 50 psi
Espesor	0.006 in/capa
Esfuerzo de flexión	224 Ksi
Módulo a flexión	17.9 Msi
Esfuerzo a cortante	13.8 Msi
Esfuerzos a tensión	280 Ksi
Módulo a tensión	18.8 Msi

Tabla 5: Propiedades de la fibra de carbono DA 409/G35150

Cabe mencionar que tanto el tipo de material compuesto y el ancho de la misma representan factores de gran importancia dentro del diseño del sistema de guiado y la configuración en el sistema de corte, dicho efectos se describen con mayor detalle en los siguientes apartados.

### 3.2 SISTEMA DE CORTE DE FIBRAS

El sistema de corte de fibras es el módulo de corte del herramental, su principal función es llevar a cabo los cortes durante los ciclos de colocación de fibras.

A partir del análisis realizado en el estado del arte, se ha seleccionado un sistema similar al método denominado cizalla, una forma de corte comúnmente utilizado en los herramientas existentes tales como la de Coriolis Composites, dicho método de corte consiste básicamente en la utilización de una cuchilla de corte y un yunque.

El proceso de corte consiste en que la fibra de carbono se encuentra ubicado en un espacio contenido entre la cuchilla y el yunque Fig. 32, la cuchilla tiene la capacidad de desplazarse a una cierta velocidad y fuerza debido a que esta se encuentra fija al vástago de un actuador neumático de tipo lineal, cuando ésta es activada la cuchilla incide directamente sobre la fibra y a su vez sobre el yunque, de esta forma se logra el corte de la fibra a lo largo de todo el ancho del material.

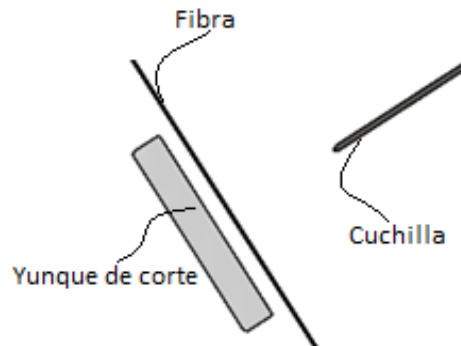


Fig. 32: Configuración de corte de fibra

De lo previamente descrito se distinguen cuatro parámetros fundamentales, se considerarán tres de ellas que nos permitan realizar el corte. En primer lugar debemos considerar una fuerza de corte obtenida a partir de las características del cilindro neumático, en segundo lugar el tipo de material para el yunque y por último el material de la cuchilla.

Por lo tanto, se presentan los materiales que han sido seleccionados para las pruebas a realizarse del sistema de corte:

- Cuchillas con hoja de acero al alto carbono
- Cilindro neumático de simple efecto Marca: SMC
- Yunque de Acero inoxidable, Neopreno y Nylamid tipo M
- Resortes de hilo de guitarra
- Base estructural del sistema de corte de Aluminio

### 3.2.1 Diseño del sistema de corte para experimentos

Con la finalidad de cerciorarse de que el sistema de corte funcione adecuadamente cuando se encuentre ensamblada en el diseño final del herramental, se realizaron diseños individuales del sistema de corte, con el objetivo de obtener la fuerza necesaria que nos permitirá realizar el corte de la fibra.

En la Fig. 33, se observa la configuración del sistema de corte diseñado para llevar a cabo las pruebas experimentales de corte.

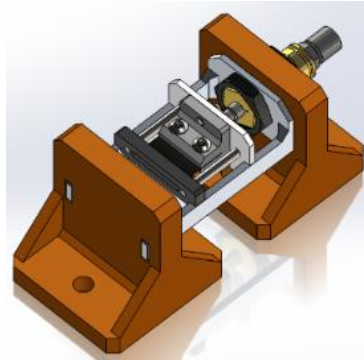


Fig. 33: Diseño CAD del sistema de corte para pruebas

Para realizar las pruebas necesarias del sistema de corte, se manufacturar las piezas con el apoyo de una impresora 3D permitiéndonos ahorro de tiempo y costo.

Los principales materiales utilizados para la manufactura del diseño se enlistan a continuación:

- Plástico ABS
- Tornillos y tuercas estándares de uso comercial
- Cuchilla de hoja de acero al alto carbono (navajas de repuesto para raspador)
- Cilindro neumático de simple efecto de piezas de latón, acero inoxidable, etc.

El sistema se encuentra conformado por las siguientes piezas principales, con referencia a la Fig. 33:

1.- **Bases de montaje:** Se observa en color naranja, piezas manufacturadas de material ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) que representan el soporte para las piezas restantes del sistema tales como el cilindro neumático, la cuchilla, la estructura de guiado del vástago, etc.

2.- **Base de guiado:** Se observa en color plateado manufacturado de material ABS, su principal funcionalidad es evitar posibles giros del vástago del cilindro neumático, además sirve como una guía para la base de montaje de la cuchilla.

3.- **Base de montaje de cuchilla:** Se puede observar en color gris claro manufacturado de material ABS, representa la pieza donde se encuentra fija la cuchilla a partir de dos tornillos métricos M3x0.5.

4.- **Cilindro neumático de simple efecto:** Cilindro neumático de la marca SMC fabricado de acero inoxidable, latón, etc., con la función de ejercer la fuerza de corte a partir de una presión inyectada en su interior.

5.- **Cuchilla de corte:** Se observa en color negro, fabricado de un acero al alto carbono, teniendo como principal función realizar el corte de las fibras al impactar sobre el yunque.

6.- **Yunque de corte:** Material del tipo elastómero (Neopreno, Nylamid), su función es complementar el corte de las fibras cuando la cuchilla es activada por el cilindro neumático.

En la Fig. 34, podemos observar cada una de las piezas manufacturadas y ensambladas, utilizados para las pruebas experimentales de corte. Cabe mencionar que la experimentación de corte de fibras será descrita en secciones posteriores.



Fig. 34: Vista superior del sistema de corte para experimentos

### 3.2.2 Diseño del sistema de corte para el herramental

El principio de funcionamiento del sistema de corte fue seleccionado a partir de las patentes analizadas y presentadas en el capítulo I. Además, el sistema de corte presentado en el punto 3.2.1 tal y como se ha mencionado fue diseñado con el fin de realizar pruebas de corte que nos permitieran dar la certeza de que el sistema a adaptarse al herramental lleve a cabo el proceso de corte sin ningún problema.

Actualmente entre unas de las principales áreas de mejora para un herramental colocador de fibras, es básicamente investigar las configuraciones que permitan al mecanismo de corte realizar a lo largo del ancho de la fibra, cortes con ángulos de  $\pm 45^\circ$ .

El objetivo de diseñar un mecanismo de corte con estas características es permitir realizar la colocación de tiras de fibras de carbono a tales ángulos descritos, sin embargo, la principal aportación de esta configuración es minimizar las pérdidas de materiales que se generan justamente cuando las fibras son cortadas a  $\pm 45^\circ$  sobre los moldes de trabajo.

En la Fig. 35, se visualizan las pérdidas de material cuando dichas tiras son apiladas a  $\pm 45^\circ$  y sobre los bordes de los moldes. Haciendo una comparación entre un herramental ATL y un AFP, se observa que en la primera la pérdida de material es mayor esto debido a que el ancho de la fibra es aproximadamente 30 cm que en comparación del ancho de fibra del AFP es de 6.35 mm y 12.7 mm. Este cambio en la dimensiones de ancho de las fibras hace que los triángulos generados de material como se ve en la Fig. 35-*a* sean de un tamaño mayor que el que se produce con un herramental AFP, como se observa en la Fig.35-*b*.



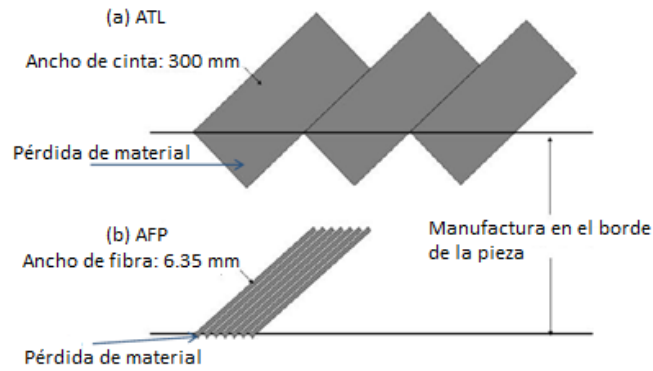


Fig. 35: Representación esquemática del origen de las pérdidas de material

En función de aprovechar estas pérdidas de material que son mínimas cuando se habla de pocas tiras cortadas pero que en grandes cantidades de corte realizadas para manufactura de piezas a gran escala pueden representar un porcentaje considerable del total de material utilizado durante los procesos de producción.

De acuerdo a dicha característica considerada en los requerimientos propuestos como objetivo a obtener para el diseño del herramental, se hace la descripción de la necesidad de mejora para el diseño del sistema de corte:

**Corte-bloqueo de fibras:** Un mecanismo sencillo y capaz de realizar cortes adicionales en ángulos de  $\pm 45^\circ$  respecto de la longitud de la fibra, que permita minimizar pérdidas durante el proceso.

Considerando lo anterior como unos de los objetivos de diseño, se propone el siguiente concepto para el módulo o sistema de corte de fibras que se encuentra adaptado al diseño final del herramental.

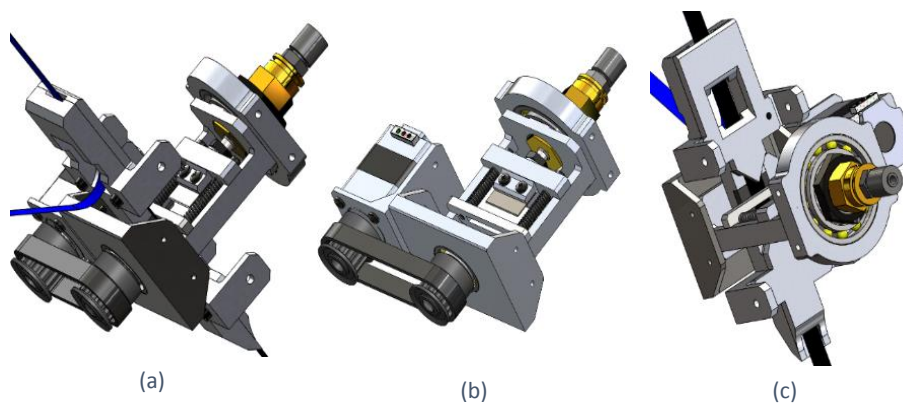


Fig. 36: Configuración geométrica del sistema de corte

En la Fig. 36-*a,c*, se observan dos diferentes vistas isométricas del módulo de corte y la configuración de guiado de la fibra (tira de color negro) que es direccionada a través de los canales presentes en las piezas de guiado y en la Fig.36-*b*, observamos el módulo de corte sin adicionar la configuración de guiado de fibras, en ella se distinguen los principales componentes y además podemos visualizar con mayor claridad el principio de funcionamiento de dicho sistema de corte.

Para obtener fibras cortadas, necesitamos que la cuchilla de corte este a determinada configuración para ser adaptado a las dimensiones del diseño, además debe encontrarse montado a una pieza de fijado a través de tornillos, tanto la cuchilla y su base de fijado estará unido a un cilindro neumático de simple efecto. Para direccionar la carrera de avance-retroceso y evitar el giro del vástago se contempla una base de guiado y de montaje del cilindro neumático, que a su vez se encuentran soportados en sus extremos por baleros radiales que permiten que todo el ensamble rote, es decir, la base de guiado, placa de fijación de fibra, cuchilla y cilindro neumático pueden ser rotados a las posiciones angulares de corte.

La rotación de dicho ensamble se genera a partir de un motor a pasos en donde dicha transmisión de movimiento rotacional es llevado a cabo mediante el uso de una banda que está en contacto con unas poleas dentadas unidas al eje del motor y al eje de la base del sistema de corte tal y como se observa en la figura anterior, permitiéndonos de esta manera rotar la cuchilla a las posiciones angulares de  $\pm 45^\circ$ .

### 3.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE FIBRA

Un herramental para la colocación automatizada de fibras se caracteriza por tener la capacidad de llevar a cabo la realimentación de tiras de fibras de forma automatizada, que estarán siendo cortadas a determinadas longitudes de acuerdo a las necesidades de manufactura de laminados de material compuesto.

Los requerimientos para el sistema de realimentación se describen a continuación:

**Alimentación de fibra:** Una configuración mecánica que mantenga a la fibra lista para una secuencia de realimentación en cada una de los ciclos de corte.

**Separación del aislante de fibra:** Una configuración que permita retirar la cinta aislante de la fibra de forma sencilla, pero con la característica de ser retirada antes de llegar al módulo de corte.

**Guiado de fibras:** La configuración en el guiado de las fibras debe ser sencillo, minimizando las probabilidades de adherencia de la fibra a las paredes de dichas guías.

De acuerdo a estos tres requerimientos de diseño se realizaron propuestas conceptuales sobre cómo solventar el transporte de la tira de fibra desde el módulo de almacenamiento hasta el rodillo de compactado, evitando al máximo problemas de adherencia del material a las paredes de guiado y desplazando la fibra mediante el uso de un mecanismo sencillo en cada uno de los ciclos de corte.

El sistema de realimentación de fibras propuesto, consiste de un mecanismo muy sencillo basado en la transmisión de movimiento por ruedas de fricción descrito en el capítulo II. En la Fig. 37, se observa la configuración geométrica del ensamble final del diseño conceptual propuesto para el realimentado de fibras:

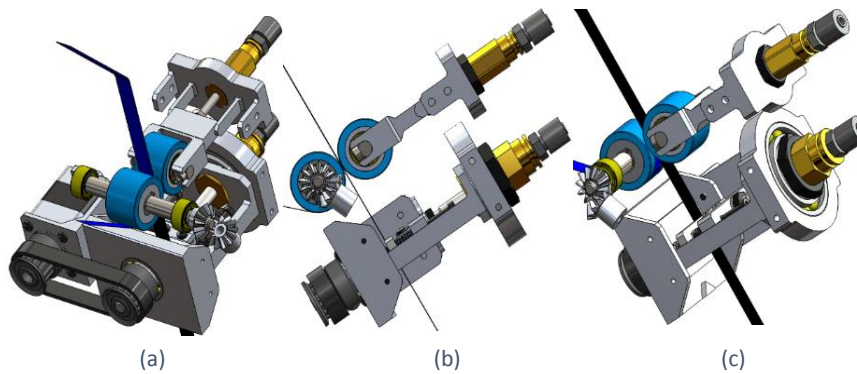


Fig. 37: Configuración geométrica del sistema de realimentación

En la Fig. 37, se observan diferentes vistas del sistema de realimentación junto al sistema de corte. En la Fig. 37-*b*, vemos una vista lateral del ensamble en donde observamos claramente la tira de fibra de carbono que se encuentra entre dos rodillos de fricción (sistema de realimentado de fibras).

Para que la fibra pueda ser desplazada en cada ciclo de corte, se cuenta con un rodillo conductor que es accionado a través de un motor de corriente directa, transmitiéndose el movimiento rotatorio a través de un sistema de engranes cónicos de dientes rectos acoplados al eje del rodillo motriz en donde se encuentra montado por sus extremos a unos rodamientos radiales para una libre rotación.

Por otra parte para llevar a cabo el desplazamiento de la fibra, es necesario que los dos rodillos ejerzan un contacto, el cual es permitido debido a que la base de montaje del rodillo conducido está unida al vástago de un cilindro neumático de simple efecto, de esta manera se tiene un mecanismo sencillo que permite controlar la fuerza de contacto existente entre las ruedas de fricción a través de la manipulación de la presión de trabajo (aire comprimido), además controla la separación entre ellas.

Con el fin de evitar problemas por adherencia de la fibra a la superficie cilíndrica de los rodillos debido al contacto constante existente entre las fibras y las ruedas de realimentación, dichos rodillos se caracterizan por tener un núcleo sólido revestido de un material polimérico (silicona) que minimiza dicha adherencia de la fibra causadas por la presencia de resina.

### 3.4 SISTEMA DE COMPACTACIÓN DE FIBRAS

De los requerimientos contemplados para el diseño de un sistema simple de compactado de fibras, debemos cumplir con un instrumental que tenga la capacidad de soportar y aplicar una carga máxima de 350 N.

Los instrumentales AFP consisten de un sistema de compactado en el que hacen uso de un rodillo como la principal pieza que ejerce contacto directo sobre la fibra y ésta a su vez con la superficie del molde de trabajo, permitido a través de la trayectoria seguida

por el brazo robot y de la fuerza ejercida por la misma, se lleva el proceso de colocación o apilamiento de la fibra a la superficie del molde.

Con el fin de cumplir objetivamente los requerimientos de diseño para el presente módulo y en función de los conocimientos adquiridos del análisis del estado del arte, se ha optado por seguir el mismo principio de funcionamiento del sistema de compactación, es decir, hacer uso de un rodillo para el apilamiento de la fibra sobre el molde.

En la Fig. 38, podemos observar la geometría de diseño propuesto para el rodillo de compactado, el cual estará unido al herramental como se observará posteriormente.

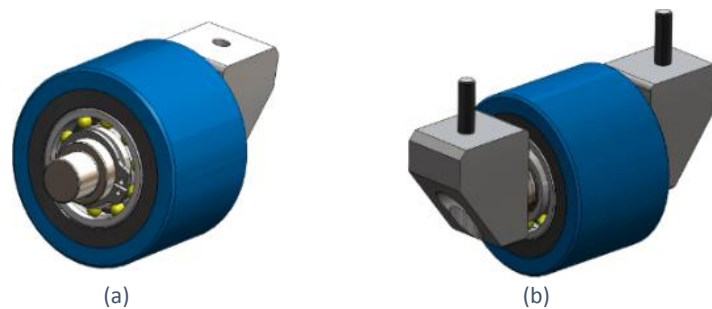


Fig. 38: Vista isométrica de la configuración del rodillo de compactación de fibras

En la Fig. 38, podemos observar la geometría propuesta para compactación de las fibras a través de un rodillo (color azul) que tiene un grado de libertad mediante rodamientos radiales, que a su vez se encuentran unidas a un eje de acero inoxidable 304 que se mantiene fija a unas bases, las cuales estarán ensambladas a las paredes del soporte principal del herramental mediante un par de tornillos como se observa en la figura.

Con el fin de mantener un proceso de colocación de las fibras, el rodillo de compactación que se observa en la Fig. 39, es ensamblado a unas placas de aluminio que a su vez se encuentran unidas a las paredes del soporte principal del herramental, como se muestra a continuación:

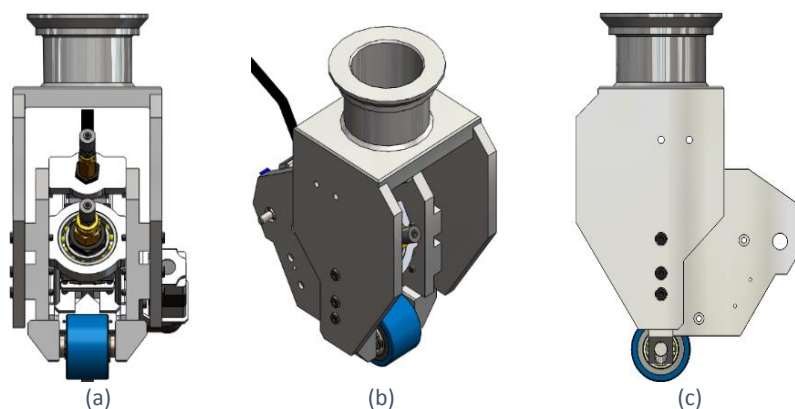


Fig. 39: Carcasa principal del herramental

Una de las características principales consideradas para el diseño del soporte principal del herramental es minimizar la concentración de esfuerzos normales o cortantes, momentos flexionantes, torsiones, deformaciones, etc., que puedan generarse en las piezas más críticas tales como los tornillos sujetos a esfuerzos cortantes, el eje de montaje del rodillo compactador, las deformación de las paredes, etc. Además es importante mencionar que dicho soporte del herramental debe tener la capacidad de soportar cargas normales, que serán transmitidas por el brazo robot a través de la brida de unión, actuando dicha fuerza normal a la superficie del molde de trabajo.

### 3.5 SISTEMA DE MONTAJE DE CARRETES

Como se ha descrito en el capítulo II, el herramental para la colocación automatizada de fibras debe tener la capacidad de alojar una cantidad determinada de carretes de fibras de carbono o vidrio las cuales serán colocadas a través un conjunto de sistemas hacia el molde de trabajo.

También se ha hecho mención de dos tipos principales de configuración de montaje y de los medios necesarios para transportar dicha tiras de fibras desde el área de distribución hasta el rodillo de compactación. De acuerdo a lo anterior podemos distinguir una configuración de montaje de los materiales de consumo (carretes de fibras) en un área en el que no se encuentran montados propiamente en el herramental, y por otra parte la siguiente configuración tiene la característica de que dichos carretes se encuentran ensamblados en una área determinada del herramental, dicha zona es considera como el módulo de distribución de material.

El módulo de distribución de material (fibras) es el sistema en el cual se tiene tanto los carretes de alimentación y de re-embobinado del backing paper, además de contar con los mecanismos necesarios para proveer la fibras hacia el módulo de realimentación, de corte-guiado y de compactación de la fibra.

Anteriormente se ha mencionado que de acuerdo al paper [1] los cabezales AFP tienen la capacidad de manejar hasta un total de 32 carretes de materiales con el fin de obtener una mayor área de apilamiento, sin embargo, para el desarrollo del siguiente prototipo se ha considerado el diseño de un cabezal con el manejo de una sola tira de fibra de carbono.

El diseño del prototipo debe cumplir el siguiente requerimiento: Diseñar un cabezal con capacidad de alojar un carrete de fibra de alimentación y que su posición sea horizontal.

De acuerdo a dichos requerimientos se propone el siguiente diseño conceptual para el alojamiento del material, esto nos permite minimizar problemas que pueden generarse durante el transporte de las fibras si se hubiese optado un concepto en donde dichos carretes fuesen montados fuera del herramental.

En la Fig. 40, podemos visualizar la geometría del módulo de distribución de fibras que estará siendo montado al soporte principal del cabezal.

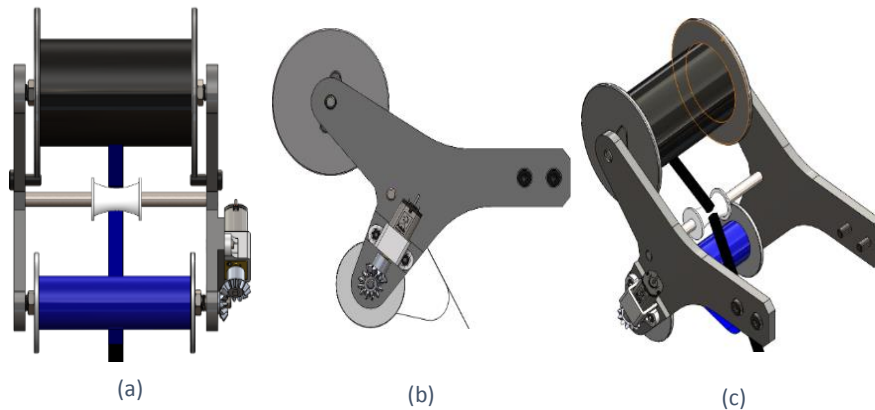


Fig. 40: Vista isométrica del módulo de distribución de fibras

El módulo de distribución de material para el herramental a diseñar se encuentra principalmente formado por dos placas de soporte que ejercen la función de mantener fijos a los carretes de alimentación (color negro) y el de recogida del backing paper (color azul) durante los procesos de realimentación de fibra.

El carrete de fibra tendrá la capacidad de experimentar un movimiento rotatorio libre debido a que se encuentra montado sobre un eje de acero inoxidable que a su vez está acoplado a unos rodamientos radiales de bolas, la rotación se origina cuando la fibra pasa a través de las ruedas de fricción haciendo que la fibra sea desplazada hacia el sistema de corte para su posterior apilamiento al molde.

El carrete de recogida del backing paper de la fibra (color azul) se encuentra acoplado a un eje que también está montado por sus extremos a unos rodamientos que permite que dicho carrete experimente libre movimiento de rotación, en uno de los extremos del eje se tiene acoplado un engrane cónico y uno más al eje de un motor de corriente directa que transmite los movimientos rotacionales al carrete para bobinar el backing paper durante el proceso de apilamiento de fibras.

Debido a que el carrete tiene una longitud superior al ancho de la fibra a manipular, hace que la fibra este embobinada a la largo de toda la longitud. Para llevar a cabo el proceso de realimentación, la fibra experimenta movimiento axial en el pleno proceso de desenrollado de esta, lo cual puede causar problemas de torsiones sobre el ancho de la misma, para evitar lo anterior y de acuerdo a la investigación sobre máquinas y dispositivos que solventan esta misma problemática se ha optado por incorporar el siguiente concepto:



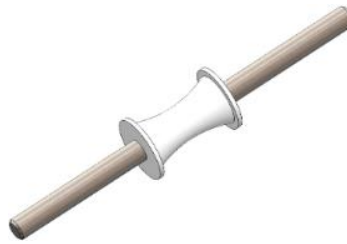


Fig. 41: Polea con capacidad de movimientos axiales sobre el eje

En la Fig. 41, observamos una polea (color blanco), esta polea tiene la característica de poseer una geometría con superficie curvada, donde dicha tira de fibra tendrá contacto durante los procesos de realimentado, la superficie curva representa uno de los factores que permitirá minimizar el fenómeno de torsión, además la polea también tendrá la capacidad de poseer movimiento axial con el propósito de minimizar los efectos propios de la fibra.

### 3.6 DISEÑO A DETALLE DEL CABEZAL

En las secciones anteriores del presente capítulo hemos tocado a detalle cada uno de los módulos que integran el herramienta para la colocación automatizada de fibras, se ha descrito las funciones principales que ejercen y su principio de funcionamiento en cada uno de ellos, en la presente sección nos enfocaremos a describir la integración de cada uno de los sistemas que conforman el cabezal para la colocación automatizada de fibras.

El cabezal diseñado representa un prototipo a escala con los mismos principios de funcionamiento de los herramientales de 32 tiras, sin embargo tal y como sea mencionado existe una característica de mejora en el mecanismo de corte. Esta configuración adicional al sistema de corte representa el aspecto más importante adicionado al diseño del herramienta que nos permite lograr el objetivo de mejorar la eficiencia de aprovechamiento de los materiales (fibra de carbono).

En la Fig. 42, presentamos el diseño conceptual final del diseño propuesto para la colocación automatizada de fibras con anchos de 10 mm, 6.35 mm y 3.125 mm.

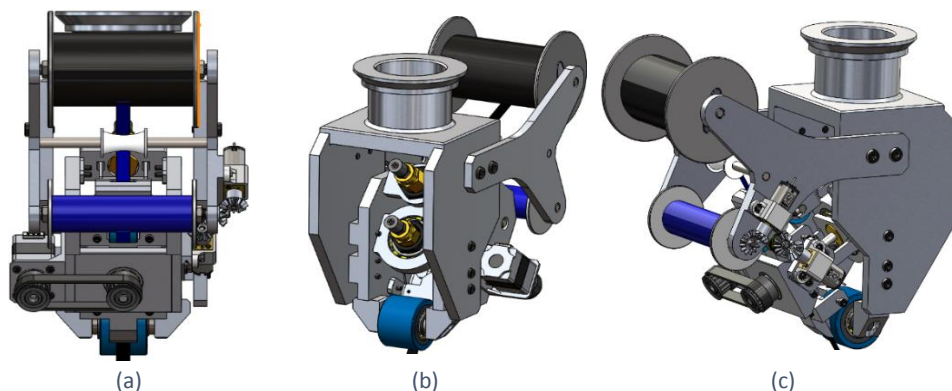


Fig. 42: Vista isométrica del diseño final del cabezal AFP



En la Fig. 42, podemos observar diferentes vistas isométricas del diseño final del cabezal colocador de fibras, en dicho dispositivo se encuentran ensamblados cada uno de los módulos que anteriormente se han descrito. La integración de cada sistema que conforma el herramental permitirá lograr llevar a cabo los procesos comunes de apilamientos de tiras de fibra de carbono a diferentes orientaciones  $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ .

## CAPÍTULO IV: EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISIS ESTÁTICO DE CARCASA

Se han considerado requerimientos de diseño para el herramental, tales como: el tipo de material y las dimensiones para la estructura de soporte del herramental, los cuales deben cumplir una alta resistencia, bajo costo, fácil manufactura y peso considerable, esto con el fin de optimizar la masa total, para ello se ha considerado un rango de entre 3 kg y 6 kg, además dicho prototipo deberá contemplar una mayor robustez durante el proceso de colocación de fibras.

Se describen los materiales seleccionados para el soporte principal del herramental:

Materiales	Propiedades físicas y mecánicas			
	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficiente poisson	Límite elástico (MPa)	Módulo elástico (GPa)
Aluminio 6061	2700	0,33	275	69
Acero inox. 304	8000	0,29	206	190

Tabla 6: Propiedades físicas y mecánicas de los materiales

#### 4.1.1 Modulo I Carcasa principal del cabezal

Tomando como referencia la primera consideración de diseño, a continuación se propone la siguiente estructura geométrica del soporte, la cual de acuerdo al diseño modular representa la base que permitirá soportar la carga máxima de 350 N que será aplicada de forma normal al molde a través del brazo robot donde ira montado el herramental, cabe mencionar que dicho robot seleccionado es un *Powerball light-weight arm LWA 4.6 SCHUNK*. Dicho brazo robot se observa en la Fig. 43.



Fig. 43: Brazo robot de la marca SCHUNK

A continuación, se observa la vista isométrica simplificada del diseño propuesto para la carcasa principal del cabezal Fig. 44, el cual se considera para simulaciones estáticas.

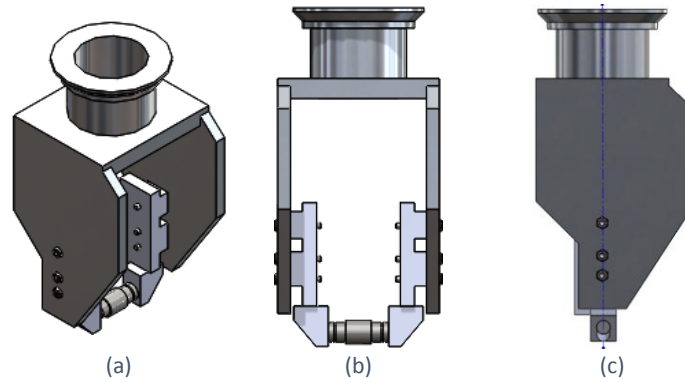


Fig. 44: Diferentes vistas de la carcasa principal del herramienta

En la Fig. 44-c, la línea azul representa el eje de aplicación de la fuerza de 350 N el cual coincide directamente con el centro de montaje de la flecha o eje donde se encuentra montado el rodillo compactador, tal y como se observa en la Fig. 44-a, b.

#### 4.1.2 Restricciones y condiciones de frontera

Visualizando el comportamiento físico del cabezal montado al brazo robot y considerando que la carga será aplicada de manera normal a la superficie del molde Fig. 45, se describe las restricciones y las condiciones de frontera considerados para la carcasa principal, para generar las simulaciones del comportamiento físico mediante el paquete de simulación Ansys (Módulo Static Structural) con el fin de obtener resultados aproximados al comportamiento real del proceso.

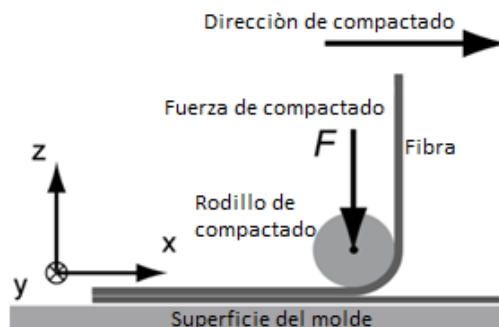


Fig. 45: Esquema de la configuración de la fuerza de compactado

La brida de montaje representa la pieza de unión al brazo robot, por lo que a través del software se mantendrá como superficie fija, además representa el área de la pieza donde se transmitirá la fuerza de 350 N generándose así una reacción normal en el rodillo de compactación cuando éste entra en contacto con el molde. Estas restricciones pueden observarse en la Fig. 46.

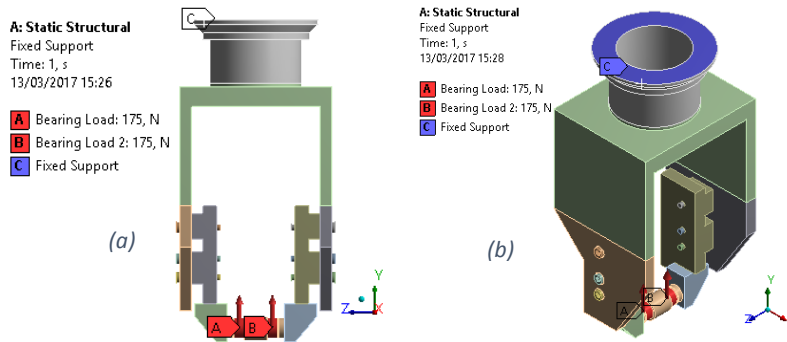


Fig. 46: Restricciones y condiciones de frontera de la carcasa

### 4.1.3 Resultados parciales de simulación estática

Como se mencionó anteriormente la propuesta de diseño del Módulo I es una carcasa con capacidad de soportar una carga máxima de 350 N la cual representa aproximadamente una carga de 35.68 kg-f, sin embargo, la carga a aplicarse dependerá del ancho de la fibra, siendo cargas más grandes mientras más grande sea el ancho (300 mm) y cargas más reducidas para fibras de anchos pequeños (12.7 mm). La propuesta de diseño del cabezal o herramental de colocación está centrada en la utilización de un ancho máximo de 6.35 mm (1/4 in).

A partir de lo anterior se presenta la tabla 7, donde se observan los resultados obtenidos a partir del análisis de elemento finito mediante el uso del software de simulación ansys workbench 2016.

Carga máxima	No.	Esfuerzo máxima MPa	Deformación máxima mm	Factor de Seguridad	No. Elementos	Calidad de elemento
<b>350</b>	1	41.96	0.03	4.91	471611	0.82
	2	42.04	0.03	4.90	517644	0.82
	3	42.13	0.03	4.89	457572	0.85
	4	42.13	0.03	4.89	455173	0.85
	5	42.21	0.03	4.88	522056	0.82
	6	42.3	0.03	4.87	452629	0.85
	7	44.06	0.03	4.68	598589	0.8
	8	44.3	0.03	4.65	599675	0.8
	9	44.78	0.03	4.60	1307346	0.81
	10	45.13	0.034	4.56	1286441	0.81

Tabla 7: Resultados generales obtenidos

Con el objetivo de visualizar el comportamiento general de la carcasa principal de soporte del herramental y a partir de los resultados obtenidos presentes en la tabla 7, en la Fig. 47 se observa la gráfica esfuerzo, deformación, factor de seguridad contra los elementos de malla.

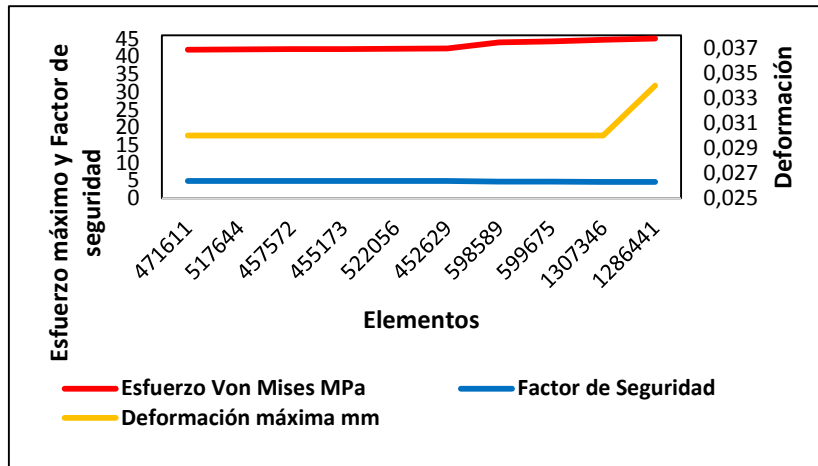


Fig. 47: Gráfica Esfuerzo, Deformación, Factor de seguridad vs Elementos de malla

De la gráfica interpretamos lo siguiente, los esfuerzos se encuentran vinculados con el factor de seguridad de acuerdo a la teoría de mecánica de materiales, entonces a partir de este concepto se observa que el esfuerzo máximo inicial de 41.96 MPa genera un factor de seguridad de aproximadamente 4.91, sin embargo a partir de un número determinado de corridas realizadas se ha obtenido un máximo valor de 45.13 MPa haciendo que el factor de seguridad decrezca hasta un valor de 4.56, por otra parte se visualiza que la deformación máxima de 0.030 mm ubicada principalmente en un par de tornillos se mantiene en un valor constante en la mayoría de las corridas excepto en la última en donde observamos una ligera diferencia no significativa de 0.004 milésimas.

En general la deformación y la concentración de esfuerzos máximos presentes en los tornillos de unión representan valores no críticos comparados con el módulo de elasticidad y el esfuerzo de fluencia del material.

Con el objetivo de tener una mayor confiabilidad en los resultados comparados al comportamiento real que experimentará el ensamble se ha contemplado el monitoreo de la métrica “calidad de elemento”, el cual representa una herramienta de Static Structural que nos permite visualizar y evaluar la información sobre la calidad total del mallado, para nuestro caso se presenta la siguiente gráfica, Fig. 48.

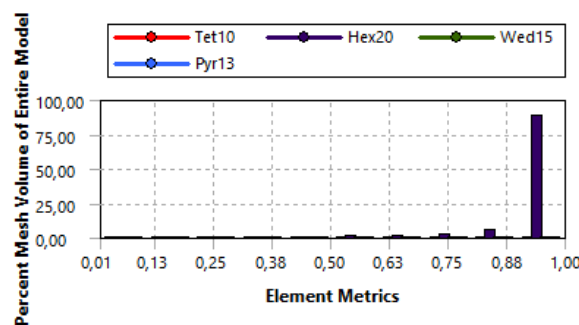


Fig. 48: Gráfica para la visualización de la calidad de los elementos

De la gráfica anterior se observa que el mayor porcentaje del total de elementos presentes en el mallado de la carcasa presentan una calidad de elemento de 0.89 construidos de elementos hexagonales de 20 nodos, esto indica que la confiabilidad en

los resultados obtenidos es buena, debido a que los resultados mejoran cuando la calidad promedio de los elementos de la malla se aproxima a la unidad.

Los resultados obtenidos se deben principalmente, que al estar en contacto el rodillo compactador sobre la superficie del molde de manera ortogonal, la fuerza de reacción genera un momento flexionante sobre la flecha, haciendo que las paredes también experimenten dicho fenómeno, además el esfuerzo cortante presente en los tornillos de unión representan el principal causante de la mayor concentración de esfuerzo dando lugar a que dichas piezas empiecen a fallar en primer lugar de todo el ensamble, tal y como se observa en la Fig. 49.

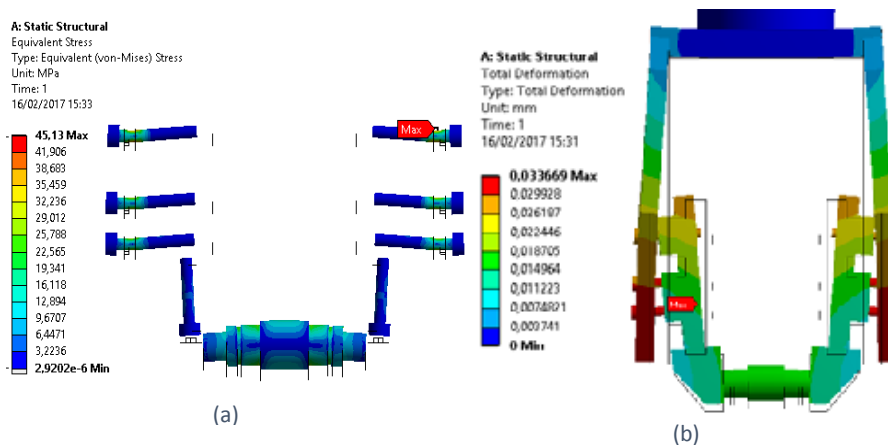


Fig. 49: (a) Esfuerzo máximo de Von Mises (b) Deformación máxima

En conclusión se afirma que el soporte principal del herramental tendrá la capacidad suficiente para soportar una carga máxima de 350 N sin ningún problema, esto se debe principalmente al espesor (pared de 6.35 mm) que se considera en el diseño de dichas piezas y al material utilizado para los tornillos de unión (Acero inoxidable AISI 304), además se observa en cada una de las corridas experimentales de la tabla 7 un factor de seguridad mayor a la unidad, lo cual permite cerciorarnos que el soporte del herramental no fallara cuando esté sujeta a la carga máxima. El esfuerzo máximo de 45.13 MPa representa un 21.91% del esfuerzo de fluencia de 206 MPa con lo cual los tornillos de unión tienen la capacidad de soportar un 78.09% de carga adicional para que dichas piezas inicien su etapa de fractura.

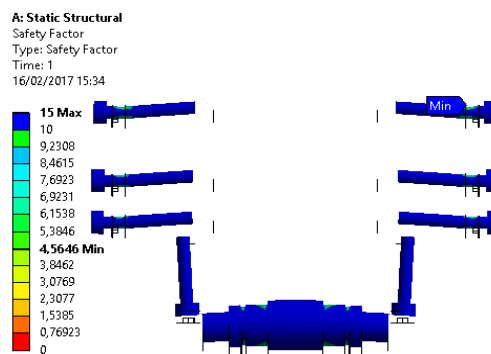


Fig. 50: Factor de seguridad de los tornillos sujetos a esfuerzo cortante

## 4.2 SIMULACIÓN ESTÁTICA DE FLECHA PARA RODILLO MOTRIZ

El módulo de realimentación de fibras, se ha mencionado que se encuentra integrado por unos rodillos con el principio de funcionamiento de las ruedas de fricción y que a su vez éstas se encuentran montados sobre ejes de acero inoxidable AISI 304.

Dichos ejes son las principales componentes del sistema que se encuentran sometidos a cargas radiales originadas cuando los dos rodillos entran en contacto para llevar a cabo la realimentación de la fibra hacia el sistema de corte, esta carga es debido a la presión de empuje que recibe el émbolo del micro cilindro neumático SMC, el cual hace posible el funcionamiento del sistema de realimentación de fibras.

Con la finalidad de conocer el comportamiento mecánico del eje cuando se encuentra sometido a una carga máxima, se han realizado simulaciones computacionales a partir de la plataforma de Ansys Workbench, considerando como objetivo principal el cerciorarse de que dicho componente no experimente una fractura durante los ciclos de trabajo.

Para tener una mayor claridad respecto al diseño del eje para el rodillo motriz, a continuación se presenta sus características:

- Material de la pieza: Acero inoxidable AISI 304
- Longitud total efectiva: 42.47 mm
- Diámetro mínimo: 5 mm
- Sometido a carga radial máxima: 53 N

En la Fig. 51, se puede observar el diseño conceptual del eje y además se visualiza la configuración de montaje del rodillo.

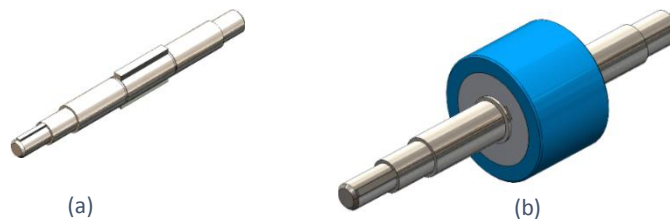


Fig. 51: Isométrico de flecha motriz para el rodillo de realimentación de fibras

### 4.2.1 Restricciones y condiciones de frontera

Para aproximar los resultados de la simulación al comportamiento real que experimenta la flecha cuando se encuentra sometido a la carga radial máxima de 53N, se han tomado las siguientes restricciones para la flecha en la plataforma de simulación, tales condiciones se observan en la Fig. 52.

- El eje se encuentra soportado por sus extremos por rodamientos radiales de bolas, por lo cual se ha seleccionado un soporte fijo del tipo cilíndrico (Cylindrical Support).
- La carga máxima de 53 N sobre el eje siempre es radial.



**B: Static Structural**

Force  
Time: 1, s  
23/03/2017 11:58

- A** Cylindrical Support: 0, mm
- B** Force: 53, N

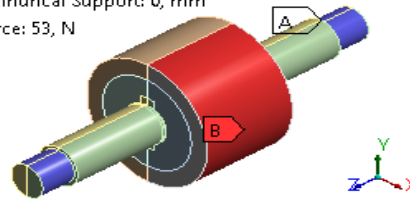


Fig. 52: Restricciones y condiciones de frontera

### 4.2.2 Interpretación de resultados de simulación estática

La carga que experimenta el rodillo de realimentación motriz es transferida directamente hacia la flecha motriz, lo que hace que sea la pieza más crítica debido a su geometría (diámetro mínimo de 5 mm), para ello se analiza su comportamiento estático a partir de los resultados obtenidos.

En la tabla 8, se describe un listado de simulaciones realizadas a partir de una carga máxima de 53 N al que se encuentra sometido la flecha motriz.

Carga Máxima	No.	Esfuerzo Máxima MPa	Deformación Máxima mm	Factor de seguridad	No. Elementos	Calidad de elemento
53 N	1	22.27	0.001	11.23	350010	0.93
	2	22.45	0.0011	11.13	1276011	0.81
	3	23.38	0.0011	10.69	305511	0.9
	4	23.68	0.0011	10.56	594582	0.91
	5	24.58	0.001	10.17	350382	0.93
	6	24.65	0.001	10.14	352745	0.93
	7	24.68	0.001	10.13	638681	0.95
	8	24.87	0.001	10.05	1642274	0.86
	9	24.87	0.001	10.05	1642399	0.86
	10	25.5	0.0011	9.82	549578	0.91

Tabla 8: Resultados de simulación estática de la flecha

Además con la finalidad de visualizar con mayor claridad los resultado descritos en la tabla 8, se presenta la gráfica esfuerzo, deformación, factor de seguridad contra los elementos de mallado, tal y como se ve la Fig. 53.

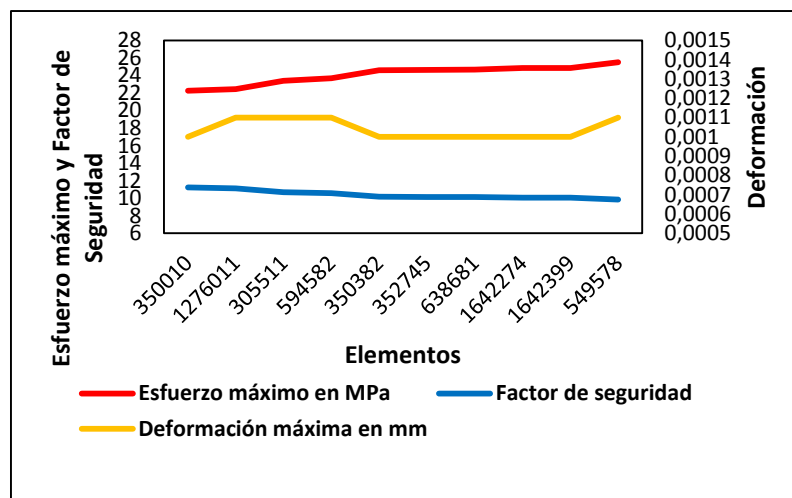


Fig. 53: Gráfica Esfuerzo, Deformación, Factor de seguridad vs Elementos

La gráfica nos brinda la información sobre el comportamiento que experimenta el componente sujeto a la carga máxima de 53 N, podemos observar claramente que para un primer valor obtenido de esfuerzo de 22.27 MPa se tiene un factor de seguridad inicial de 11.23 acompañado de un deformación de 0.001 mm, sin embargo a medida que la concentración de esfuerzo se incrementa hasta un valor máximo de 25.5 MPa indica que el factor de seguridad ha decrecido hasta 9.82, pero el comportamiento de la deformación no experimenta cambios drásticos, manteniéndose en un valor promedio de 0.001 mm, lo cual no representa una deformación crítica.

En la Fig. 54, se hace referencia a una gráfica sobre la calidad promedio del mallado final obtenido para simulación, en ella podemos observar un valor aproximado de la calidad de 0.91 lo cual de acuerdo a la teoría de evaluación de mallado de Ansys Workbench nos indica que el 78% del total de los elementos del mallado tienen un volumen definido (geometría de elemento uniforme) permitiendo a Ansys obtener resultados más precisos.

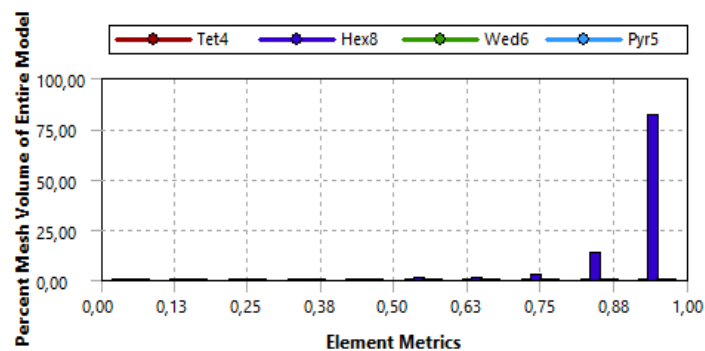


Fig. 54: Gráfica de visualización de calidad de elementos

A continuación, se observan los resultados gráficos sobre el comportamiento de la flecha de acuerdo a la carga al que se encuentra sometida (máximo de 53 N).

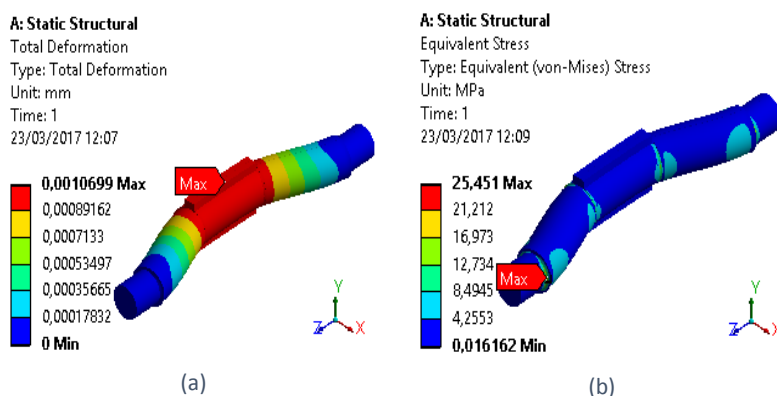


Fig. 55: Deformación máxima (a) y Esfuerzo máximo de Von Mises en flecha (b)

En la Fig. 55-a, observamos la deformación que experimenta, en ella vemos que la máxima deformación es de aproximadamente 0.0011 mm ubicado en la parte central de la flecha lo cual es lógico ya que la carga se encuentra actuando en la parte media del eje y de manera simétrica.

Por otra parte en la Fig. 55-b, observamos el comportamiento de la flecha debido a la concentración de esfuerzos, en ella se visualiza la máxima concentración ubicada en el área de montaje de los rodamientos, es decir, área donde el diámetro del eje es el menor de toda la pieza, teniendo un valor aproximado de 25.45 MPa y como la forma actuante de la carga sobre el eje es simétrica, hace que los máximos esfuerzos estén ubicados en los extremos.

Además también se observa que la concentración de esfuerzo máximo ubicado en el área de ensamblado del rodamiento, es mucho menor comparado con el esfuerzo de fluencia del material (206 MPa) y para ello se ha calculado el factor de seguridad.

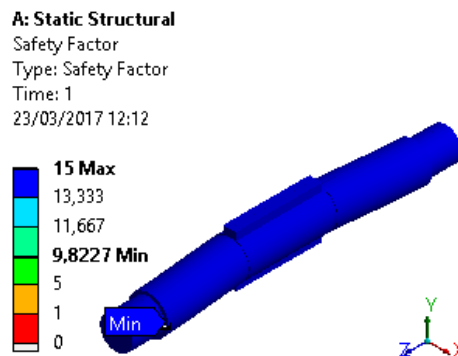


Fig. 56: Gráfico del factor de seguridad de flecha

En la Fig. 56, observamos que la flecha tiene un factor de seguridad mínima de aproximadamente 9.82, lo cual es un valor superior a la unidad esto indica que la pieza pueda soportar sin ningún problema la carga a la que estará sujeta.

### 4.3 ANÁLISIS ESTÁTICO DEL SISTEMA DE GUIADO

El sistema de corte se encuentra integrado de un ensamble que tiene como principal objetivo de llevar a cabo el transporte de la fibra desde el área de distribución de fibras hasta el sistema que permite generar el corte.

Tal como se ha mencionado el ensamble que hace posible dicha función se encuentra integrado por tres piezas que tienen la característica de poseer un guiado aproximadamente igual al ancho de la fibra (6.35 mm) y una altura de 2 mm, a partir de este concepto de diseño se permite guiar la fibra minimizando los movimientos axiales o laterales que pudiera experimentar la fibra durante los procesos de realimentado. El diseño conceptual propuesto para el sistema de guiado y de realimentación se observa en la Fig. 57, 58.

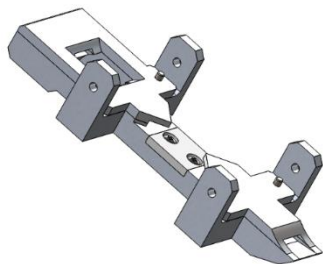


Fig. 57: Ensamble completo de sistema de guiado

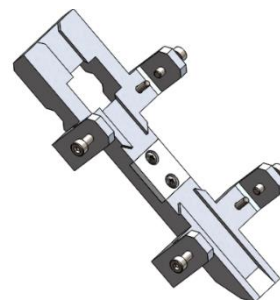


Fig. 58: Pieza de guiado sujeta a carga máxima

En la Fig. 57, podemos observar la pieza principal que se encuentra sujeta a una carga máxima generada por el vástago del micro cilindro neumático cuando entra en contacto con una placa de Nylamid montado en la pieza de guiado principal.

#### 4.3.1 Restricciones y condiciones de frontera

Con el objetivo de visualizar resultados aproximados al comportamiento real que experimenta la pieza principal sujeta a una carga máxima de 53 N, se ha realizado una simplificación de la geometría original con el objetivo de observar el comportamiento de la pieza sobre el área de interés, es decir, el área en donde se encuentra actuando la fuerza generada por la cuchilla de corte como se observa en la Fig. 59.

A continuación se describe la configuración de las restricciones y condiciones de frontera.

- Las paredes a las que se encuentra ensamblada la pieza principal (simplificado) se encuentran fijas a partir de un fixed Support en la plataforma ansys workbench.
- La carga de 53 N es aplicada directamente sobre el área o el espesor de la cuchilla, ya que representa la misma área de impacto de la cuchilla sobre la pieza de análisis.

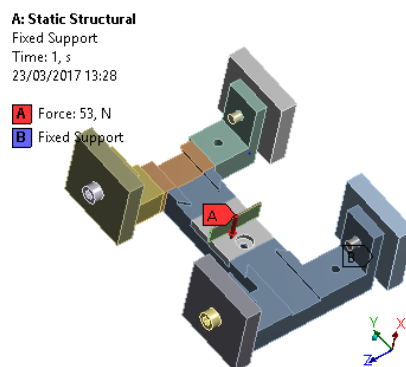


Fig. 59: Restricciones y condiciones de frontera

#### 4.3.2 Interpretación de resultados de simulación estática

Como se ha descrito, la pieza principal que mantiene fija a la placa de Nylamid (yunque de corte), representa el componente del sistema de guiado que estará sujeta a una carga máxima de 53 N y debido a que su espesor mínimo es de aproximadamente 4.25 mm, es importante realizar un análisis para observar su comportamiento mecánico, para ello se presenta la tabla 9 de resultados obtenidos a partir de la carga máxima.

Carga Máxima	No	Esfuerzo máximo MPa	Deformación máxima mm	Factor de seguridad	No. Elementos	Calidad de Elemento
53 N	1	16.84	0.01	9.47	1119058	0.82
	2	19.04	0.01	9.92	210576	0.86
	3	36.23	0.01	5.67	167430	0.87
	4	39.19	0.015	5.26	167327	0.87
	5	41.06	0.011	5.02	167014	0.88
	6	42.34	0.011	4.87	166509	0.88
	7	48.69	0.009	4.23	204728	0.83
	8	49.59	0.011	4.15	203547	0.84
	9	54.67	0.011	3.77	204985	0.83
	10	54.69	0.014	3.77	204330	0.83

Tabla 9: Resultados de simulación estática para pieza sujeta a fuerza de corte

En la tabla anterior, observamos el comportamiento de los esfuerzos máximos de Von Mises obtenidos principalmente en regiones cercanas al área que impacta la cuchilla de corte misma que se verá a mayor detalle más adelante. El esfuerzo mínimo de 16.84 MPa tiende a experimentar un incremento máximo de 54.69 MPa y de acuerdo a la relación entre esfuerzo máximo y esfuerzo de fluencia del material obtenemos un factor de seguridad para lo cual dicho valor decrece de 9.47 hasta un valor de 3.77, esto refleja un comportamiento común en los materiales isotrópicos elástico lineales.

Con el objetivo de una mayor claridad sobre el comportamiento de la pieza sujeta a la carga máxima, se presenta a continuación la siguiente gráfica de esfuerzo, deformación, factor de seguridad contra los elementos de mallado.

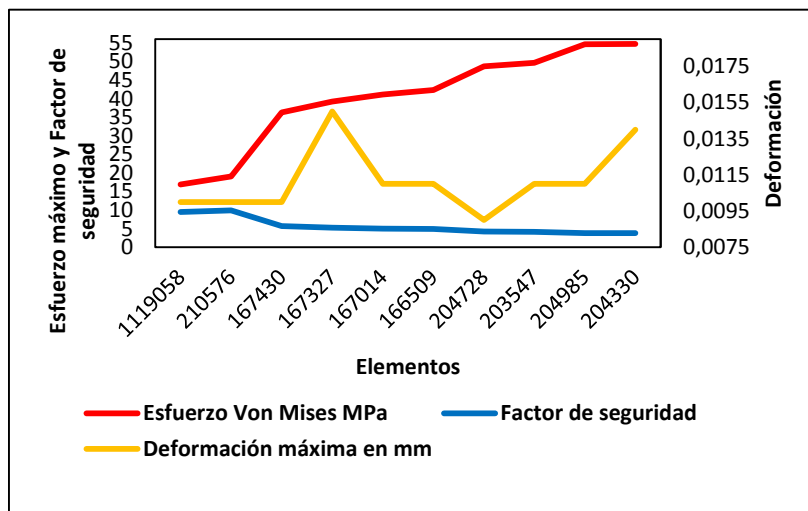


Fig. 60: Gráfica de comportamiento esfuerzo, deformación, F. S. vs Elementos de mallado

En la gráfica de la Fig. 60, observamos claramente que la densidad de mallado varía, sin embargo este no tiene un comportamiento ascendente tal y como ocurre los valores de esfuerzo máximo. Esto se debe principalmente a la uniformidad y calidad de los elementos que se tiene en el mallado de la pieza, a partir de ello se observa claramente que el hecho de tener una densidad de mallado alto respecto a un mallado menos denso no significa que obtengamos resultados más acertados con un mallado de mayor cantidad de elementos.

En la Fig. 61, se observa la información de la calidad de elemento de todo el mallado realizado sobre la pieza de análisis, en dicha gráfica se visualiza que la malla generada está compuesto en su totalidad de un elemento solido del tipo Hexaédrico de 20 nodos en donde un 80% del 100% de los elementos contenidos en el mallado se encuentra en un valor cercano a la unidad, lo cual representa que los elementos son más uniformes en todas sus aristas lo cual hace que los resultados sean más aproximados al comportamiento real de la pieza.

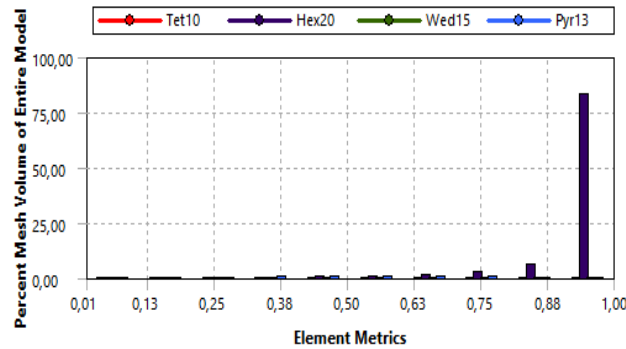


Fig. 61: Gráfica de calidad de elementos de mallado

A continuación, se observa el resultado del esfuerzo máximo de Von Mises y de la deformación máxima que experimenta la pieza.

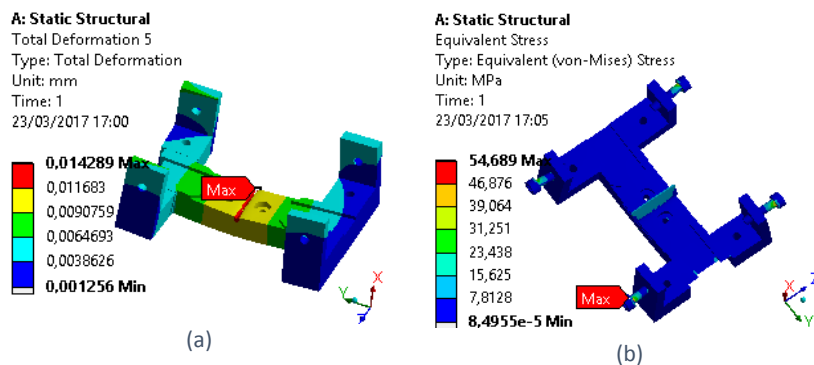


Fig. 62: (a) Deformación máxima (b) Esfuerzo de Von Mises

En la Fig. 62-a, se observa que la máxima deformación que experimenta la pieza se encuentra ubicada sobre la placa de Nylamid con un valor de 0.014 mm expandiéndose dicha deformación sobre la pieza de aluminio con un valor de 0.012 mm.

Por otra parte se observa en la Fig. 62-b, una concentración de esfuerzo cortante máximo de 54.69 MPa ubicado en los tornillos de Acero Inoxidable 3M, sin embargo comparando este valor respecto al esfuerzo de fluencia del material (206 MPa) sólo representa el 26.55% lo que indica que se tiene un margen adicional de 73.45% en donde dicha pieza puede soportar una carga mayor a 53N antes de empezar en la etapa de fractura.

A partir del factor de seguridad encontrado de 3.77, se concluye que dicha pieza soportara la carga de corte sin ningún problema de falla durante los procesos de corte de fibra.

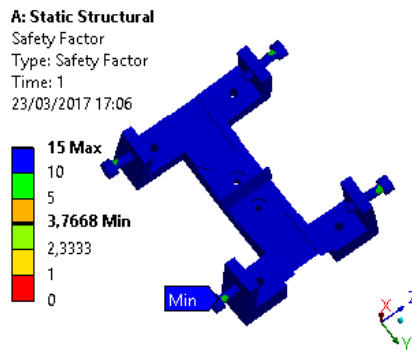


Fig. 63: Factor de seguridad en tornillos de unión en pieza sujeta a fuerza de

#### 4.4 SELECCIÓN DE MOTOR PARA POSICIONAMIENTO A $\pm 45^\circ$ .

De acuerdo a la investigación realizada en el estado del arte y en las patentes se sabe que dicho mecanismo necesita el uso de un motor que permita generar posiciones precisas para alcanzar los ángulos de giro de  $\pm 45^\circ$ , de esta manera se obtendrán los cortes correspondientes a los ángulos de apilamiento de las tiras de fibra sobre el molde de trabajo.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente se ha seleccionado el uso de motores a pasos ya que tiene la capacidad de movimientos precisos de aproximadamente  $1.8^\circ$  por vuelta y para llevar a cabo la selección adecuada de dicho motor respecto a la pieza a rotar, se presentan los siguientes cálculos.

##### 4.4.1 Cálculo del momento de inercia de la base del sistema de corte

Para llevar a cabo el cálculo aproximado del momento de inercia del ensamble total que estará sujeta a movimiento rotacional a través de un eje de referencia, fue necesario tener información sobre las propiedades de los materiales de cada uno de las piezas que conforma el ensamble del sistema de corte sujeto a rotación. Para ello se listan los materiales involucrados en el ensamble que se pueden observar en la Fig. 64-a.

Materiales que integran el ensamble:

- Aluminio 6061
- Acero inoxidable AISI 304
- Acero inoxidable AISI 316
- Latón

A través del apoyo que nos brinda el software de diseño Solidworks 2016, se ha hecho los cálculos correspondientes a un ensamble completo cuando se asignan los materiales a cada una de las piezas que constituye el ensamble. Para ello fue necesario conocer los materiales del ensamble de la base estructural del sistema de corte y con ello obtenemos los datos del momento de inercia necesario para el cálculo del torque, tal y como observa en la Fig. 64-b.



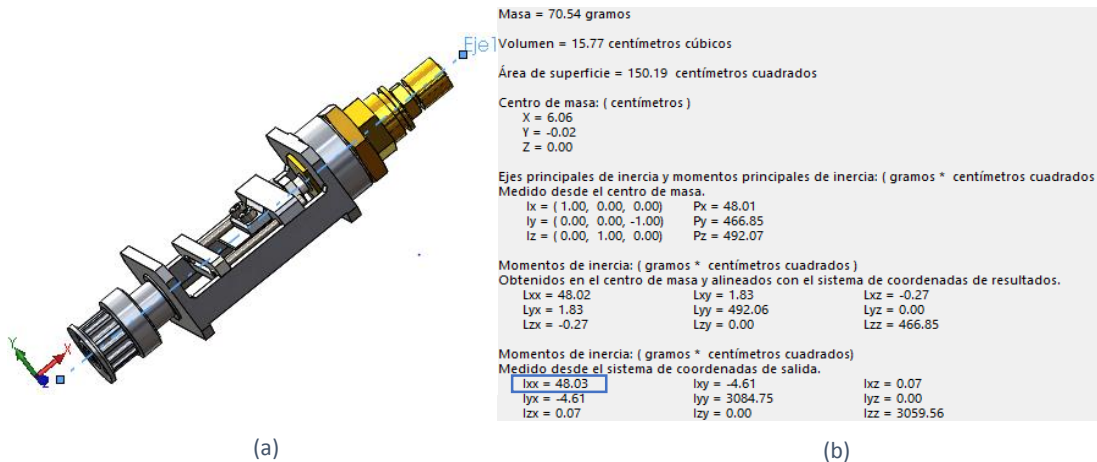


Fig. 64: (a) Ensamble para rotación ±45°, (b) Datos calculados de momento de inercia

#### 4.4.2 Cálculo de Torque para la selección del motor

Para el cálculo de torque, además del momento de inercia del ensamble, es necesario conocer el valor de la variable aceleración angular, la cual representa el cambio que experimenta la velocidad angular por unidad de tiempo y debido a que el sistema de corte se encuentra ensamblado al herramental y a su vez unida al brazo robot (Powerball light-weight arm LWA 4.6 SCHUNK), se ha seleccionado el valor de 300 °/s<sup>2</sup> debido a que representa la máxima aceleración angular que experimentará el sistema de corte a causa del brazo robot, para ello se describe sus características en la Fig. 65:

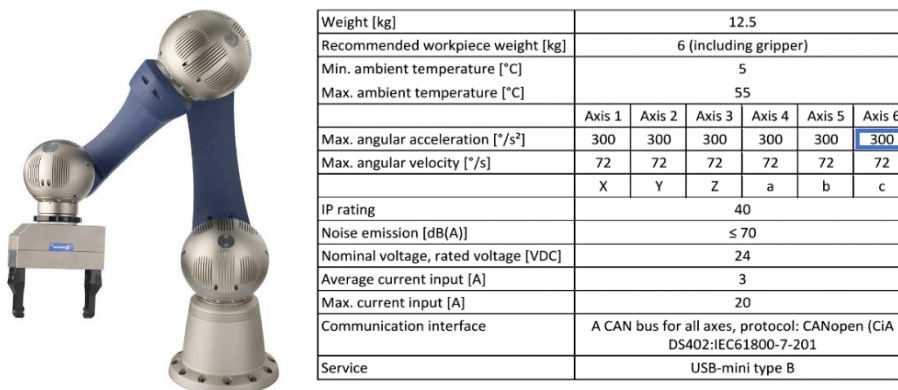


Fig. 65: Datos técnicos del brazo robot SCHUNK

A continuación se describe los cálculos necesarios de torque para la selección de motor a pasos.

Datos de entrada:

$$I = 4.8 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 48 \text{ gr} \cdot \text{cm}^2$$

$\alpha = 300 \text{ deg/s}^2$  (Parámetro obtenido como la aceleración angular del brazo robot del eje 6).

Conversión de la aceleración angular de grados a radianes.

$$300 \frac{\text{deg}}{\text{s}^2} \times \frac{\pi \text{ rad}}{180^\circ} = \frac{5}{3} \pi \text{ rad/s}^2$$

Después de obtener el valor del momento de inercia, se prosigue al cálculo de torque para la selección del motor que a continuación se describen:

$$T = I \cdot \alpha$$

$$T = (4.8 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2)(5.24 \text{ rad/s}^2)$$

$$T = 2.5152 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T = 0.2565 \text{ gr} \cdot \text{cm}$$

Una vez que se ha obtenido el valor del torque necesario que demanda el ensamble correspondiente a la estructura base del sistema de corte propuesto, se procede a la búsqueda del motor adecuado que cumpla con los requerimientos de diseño.

Como se ha descrito anteriormente se ha contemplado el uso de un motor a pasos con base en los cálculos previamente descritos se ha seleccionado un motor híbrido del tipo bipolar de la marca NEMA 8 con pasos angulares de 1.8° tal y como se observa en la Fig. 66.



Fig. 66: Motor a pasos híbrido NEMA 8 del tipo bipolar

En la siguiente tabla se observa las características de torque que presenta el motor NEMA 8.

General specifications		Electrical specifications	
Step Angle (°)	1.8	Rated Voltage (V)	3.9
Temperature Rise (°C)	80 Max (rated current, 2 phase on)	Rated Current (A)	0.6
Ambient Temperature (°C)	-20 ~ +50	Resistance Per Phase (± 10% Ω)	6.5 (25°C)
Number of Phase	2	Inductance Per Phase (± 20% mH)	1.7
Insulation Resistance (MΩ)	100 Min (500VDC)	Holding Torque (g.cm)	180
Insulation Class	Class B	Detent Torque (g.cm)	
Max.radial force (N)	28 (20mm from the flange)	Rotor Torque (g.cm)	2.0
Max.axial force (N)	10	Weight (Kg)	

Tabla 10: Especificación del motor a pasos NEMA 8

## 4.5 SELECCIÓN DE POLEAS Y CÁLCULO DE LONGITUD DE BANDA

Como ya se ha mencionado en el capítulo II, existen diferentes tipos de correas que pueden ser utilizadas para la transmisión de movimiento sin embargo para el caso del diseño propuesto en donde se ha eliminado un mecanismo tensor de banda, nos ha conducido a la selección del tipo dentado para lo cual se hará uso de un par de poleas dentadas de aluminio con dientes de perfil trapezoidal denominadas GT2 de 20 dientes y paso 2 mm, tal y como se observa en la figura siguiente.



Fig. 67: Polea dentada para la transmisión de movimiento por banda en sistema de corte

Debido a que el sistema de corte tendrá la capacidad de realizar cortes en ángulos de  $\pm 45^\circ$ , entonces surge la necesidad de transmitir los mismos grados de rotación del motor a la base del sistema de corte, para ello se hace uso de dos poleas dentadas de las mismas dimensiones y características. Cabe mencionar que los criterios de selección de la polea GT2, es la limitante en cuanto a dimensiones en el diseño y el eficiente agarre entre banda-polea dentada.

Por otra parte debido a que las características de torque no representan un factor crítico que pueda afectar directamente a la banda dentada, se ha seleccionado una banda sincrónica GT2 adecuado para sistemas de posicionamiento y movimientos lineales fabricadas de material caucho con refuerzo de fibra de vidrio con paso de 2 mm y ancho de 6 mm, diseñado específicamente para poleas dentadas GT2 que permiten una transmisión más suave y una mayor precisión en la posición, dicha banda se observan en la siguiente figura.



Fig. 68: Banda dentada GT2 para poleas dentadas

De acuerdo al diseño propuesto y la configuración de ensamblado de las poleas dentadas sobre los ejes del motor y del eje del sistema de corte a rotación, a continuación se presenta los siguientes datos para el cálculo de la longitud de banda.

- Distancia entre centros de poleas: 42.9 mm
- Diámetro de las dos poleas: 12.8 mm

Haciendo uso de la ecuación para cálculo de longitud de banda cuando el diámetro de las dos poleas son las mismas se tiene lo siguiente:

$$l = \pi d + 2L$$

Haciendo el desarrollo de la ecuación mediante la sustitución de valores obtenemos:

$$l = \pi(12.8mm) + (2(42.9mm))$$

$$l = 126.0 mm$$

Para cerciorarse de tener una longitud correcta de banda, a través del software de diseño Solidworks podemos realizar el cálculo, tal y como se observa en la siguiente figura.

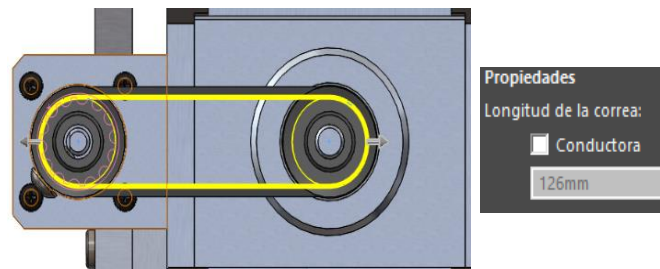


Fig. 69: Cálculo de longitud de correa mediante Solidworks 2016

Además de observar el cálculo de longitud de correa, también podemos visualizar la configuración de montaje de las poleas de transmisión de movimiento.

#### 4.6 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EL SISTEMA DE CORTE

En el análisis presentado en la capítulo I, se llevó a cabo la revisión de la patente *Applicator head for fiber with particular systems for cutting fibers* de la empresa francesa Coriolis Composites. Este documento describe un sistema de corte en donde hace uso de una placa de material elastómero, teniendo como objetivo principal la de funcionar como el yunque con el cual hace contacto la cuchilla a una determinada fuerza y velocidad para producirse el corte de la fibra prepreg durante los procesos de apilamiento.

Así que a partir del estado del arte realizado se contempló como un objetivo específico, llevar a cabo la selección de un material que permita facilitar el corte de las fibras para el sistema que se ha diseñado y que estará ensamblado al herramental, para ello se ha considerado realizar un diseño de experimentos como una herramienta auxiliar a la selección de dicho material.

A continuación se describe el proceso considerado:

**Objetivo:** Realizar la selección de material del yunque de corte y presión de trabajo para la incorporación al sistema de corte del cabezal AFP, permitiendo la obtención de cortes eficientes durante los procesos de apilamiento de la fibra.

Debido a que el interés principal del diseño de experimentos realizado fue el seleccionar un material trabajando a una determinada presión, se optó por llevar a cabo un diseño factorial  $3^2$ , esto debido a que los factores que influyen directamente sobre el experimento y que afectan al corte de la fibra son: el tipo de material y los niveles de presión de trabajo al que operará el cilindro neumático, contemplado a su vez en cada uno de los factores tres niveles, es decir, para el factor tipo de material (neopreno, Nylamid tipo M, Aluminio) y niveles de presión (0.50 MPa, 0.55 MPa, 0.60 MPa).

Además, se ha contemplado llevar a cabo 15 repeticiones (15 cortes) por tratamiento, teniendo un total de 135 corridas experimentales, donde dichos cortes serán en ángulos

de 0°, 45° y -45°. La variable de respuesta considerada está en función de la calidad de corte observada sobre las tiras de fibra cortada que más adelante se detalla.

Por otra parte, los materiales seleccionados para ejercer la función de yunque son los siguientes:

- Neopreno
- Nylamid tipo M
- Aluminio

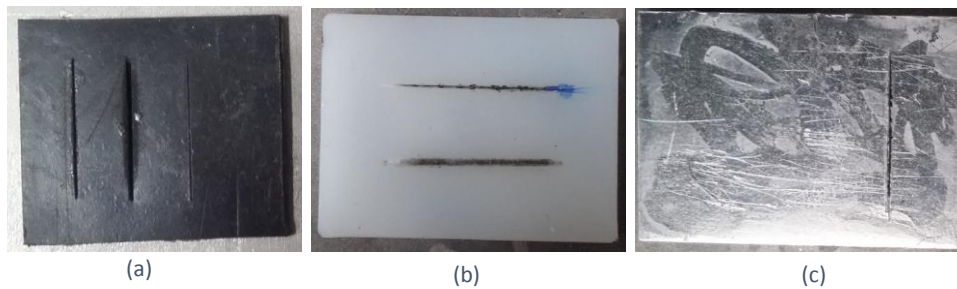


Fig. 70: a) Neopreno b) Nylamid tipo M y c) Aluminio

Las características y propiedades de la fibra prepreg utilizado para el DOE, se describe a continuación:

- Cabe mencionar que para el experimento realizado, las tiras de fibra de carbono prepreg tienen un ancho de 12.7 mm con un espesor aproximado de 0.15 mm.

Propiedades mecánicas	Valores
Presión y ciclo de curado	1 hora a 250°F y 50 psi
Espesor	0.006 in/capa
Esfuerzo de flexión	224 Ksi
Módulo a flexión	17.9 Msi
Esfuerzo a cortante	13.8 Msi
Esfuerzos a tensión	280 Ksi
Módulo a tensión	18.8 Msi

Tabla 11: Tabla de propiedades



Fig. 71: Tiras de fibra de carbono prepreg de 12.7 mm

El sistema de corte consiste específicamente de un Micro-cilindro neumático de accionamiento simple efecto con contracción por muelle, que tendrá acoplado a su vástago una pieza que mantiene fija una cuchilla para ejercer el corte. A continuación describimos las propiedades y características de cada uno de los materiales utilizados.

La cuchilla tiene las siguientes dimensiones y fabricado a partir del siguiente material:

- Acero al alto carbono
- Cuchilla con espesor de 0.4 mm (aproximadamente)
- Dimensiones de 15 mm x 13 mm



Fig. 72: Cuchilla de acero inoxidable al alto carbono

El micro-cilindro neumático de la marca SMC presenta las siguientes características:

- Capacidad de trabajo con una presión máxima de 0.7 MPa
- Carrera del vástago: 10 mm
- Diámetro del embolo: 10 mm
- Fuerza en el muelle en carrera de extensión del vástago: 2.45 N
- Velocidad del embolo de 50 mm a 500 mm/s

Para llevar a cabo la activación de dicho cilindro se utilizó una manguera de diámetro 6 mm activando el paso del fluido mediante una electroválvula 3/2.



Fig. 73: Micro cilindro neumático de simple efecto retracción por muelle

#### 4.6.1 Desarrollo del diseño experimental

Para llevar a cabo cada corte de fibra fue necesario diseñar un modelo mecánico con la característica de ser montado sobre una estructura tipo perfil Bosch, cabe mencionar que dicho modulo está integrado por una base que tiene la facilidad de mantener fijo al micro cilindro SMC y que a su vez en el extremo del vástago se tiene ensamblado una pieza que permite acoplar la cuchilla de corte a través de unos tornillos M2x5. En la Fig. 74, podemos observar la configuración mecánica en el cual se llevaron a cabo cada uno de los cortes.



Fig. 74: Configuración mecánica del proceso de corte



Además como se observa en la Fig. 74, la activación del micro cilindro de simple efecto hace uso de una electroválvula 3/2 así como de mangueras para la transmisión del fluido compresible (aire comprimido) de diámetro 6 mm.

Por otra parte, la electroválvula funciona a través de una fuente de alimentación de 24 Volts con un máximo de 3 Amperes, para dicha activación fue necesario el diseño de una tarjeta electrónica que permitiera la comunicación a través de un micro-controlador (arduino), es decir, para llevar a cabo la activación del cilindro neumático es necesario mandar un pulso (0.5 segundos) a través una programación realizada que comunica directamente a la tarjeta electrónica y la electroválvula. En la Fig. 75, podemos observar las conexiones entre los componentes auxiliares para el proceso de corte de fibra.

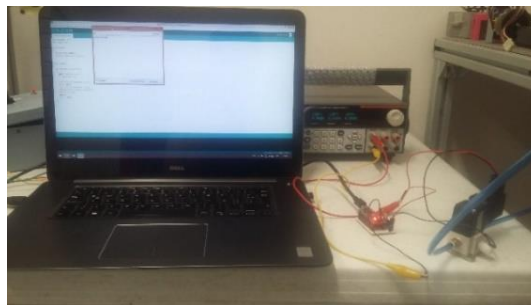


Fig. 75: Conexiones del micro controlador con electroválvula

#### 4.6.2 Resultado y conclusiones del diseño experimental

Con el fin de alcanzar satisfactoriamente el cumplimiento del objetivo para el diseño experimental, se han planteado los siguientes cuestionamientos que más adelante se responderán a través del análisis de los resultados que sean obtenidos, dichas interrogantes se describen a continuación:

1. ¿Qué efectos tiene el tipo de material y la presión de trabajo sobre la calidad de corte?
2. ¿Existe alguna elección del material que produzca de manera regular un corte de calidad independientemente de la presión?

Esto nos permitirá facilitar la selección del material y la presión de trabajo más adecuado para que sean incluidas en el sistema de corte que estará integrada al herramental.

Para llevar a cabo los procesos de corte se han identificado un conjunto de parámetros de entrada tales como la adherencia de la fibra, la dureza del material yunque, la temperatura del área de trabajo y la fuerza de corte, estos factores afectan directamente a la calidad de corte de la fibra (variable de respuesta), sin embargo los principales parámetros considerados en el diseño experimental son las siguientes:

1. El tipo de material del yunque de corte
2. Los niveles de presión en los que se observen cortes de fibra

Para dar inicio a los procesos experimentales fue necesario tomar ciertas consideraciones de medición para la variable de respuesta, es decir, la calidad del corte



sobre la fibra. A partir de dichas observaciones se optaron conceptos para ponderar la eficacia de los cortes, mismos que se describen a continuación:

- Corte deficiente (valor: 10): Consiste de un proceso de corte en donde se observan hilos sin cortar o solamente se aprecia el aplastamiento de la fibra sobre el yunque de corte sin ejercerse ninguna separación de la fibra, además se observa adherencia sobre los materiales.
- Corte regular (valor: 15): Consiste de un proceso en el que se observa un corte pero de forma no uniforme hacia lo ancho de la fibra y como consecuencia causa adherencia sobre la cuchilla y el yunque.
- Corte eficiente (valor: 20): Consiste de un proceso en el que se observa un corte uniforme hacia lo ancho de la fibra pero con cierta adherencia de la fibra cortada sobre el yunque de corte o sobre la cuchilla.
- Corte muy bueno (Valor: 25): Consiste de un proceso en que se observa un corte de forma uniforme a lo ancho de la fibra y con la característica de que no se observa adherencia de la fibra cortada sobre ninguno de los materiales.

Tal y como se ha mencionado se realizó un proceso experimental del tipo diseño factorial  $3^2$ , del cual se genera 9 combinaciones de tratamientos de los factores de estudio (Tipo de material y Niveles de presión de corte) que a continuación se describe:

- Tratamiento 1: Material Neopreno mediante el uso de una presión de 0.50 MPa.
- Tratamiento 2: Material Neopreno mediante el uso de una presión de 0.55 MPa.
- Tratamiento 3: Material Neopreno mediante el uso de una presión de 0.60 MPa.
- Tratamiento 4: Material Nylamid mediante el uso de una presión de 0.50 MPa.
- Tratamiento 5: Material Nylamid mediante el uso de una presión de 0.55 MPa.
- Tratamiento 6: Material Nylamid mediante el uso de una presión de 0.60 MPa.
- Tratamiento 7: Material Aluminio mediante el uso de una presión de 0.50 MPa.
- Tratamiento 8: Material Aluminio mediante el uso de una presión de 0.55 MPa.
- Tratamiento 9: Material Aluminio mediante el uso de una presión de 0.60 MPa.

En cada uno de los tratamientos se realizaron 15 réplicas de cortes llevándose a cabo un total de 35 cortes de segmentos de fibra. Además, es importante recalcar que de los 15 cortes por tratamiento, se realizaron 5 cortes a  $0^\circ$ , 5 cortes a  $45^\circ$  y 5 corte a  $-45^\circ$  (el ángulo de corte no fue considerado como parámetro de estudio debido a que el sistema de corte tiene la capacidad de generarlo). Una vez definidas las diferentes combinaciones de los tratamientos se procedió a realizar cada una de las corridas experimentales, generándose de esta manera la siguiente tabla de datos para la calidad de corte a partir de la ponderación descrita anteriormente.

Material	Ángulo de corte	Presión (MPa)														
		0.5				0.55				0.6						
Neopreno	0°	15	15	15	20	15	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	45°	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	135°	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Nylamid tipo M	0°	20	10	10	10	10	25	10	10	10	20	25	25	25	25	25
	45°	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	135°	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Aluminio	0°	15	10	15	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	45°	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	135°	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

Tabla 12: Datos sobre la calidad de corte de las fibras

A partir de la tabla 12 obtenida de las corridas experimentales, se llevaron a cabo los procesos pertinentes del diseño factorial seleccionado para la obtención de los resultados que permitan dar respuesta a la incertidumbre planteada a partir de los dos cuestionamientos descritos anteriormente.

Para la interpretación de los resultados se optó por realizar un análisis de ANOVA por su simplicidad en la obtención de los datos y su fácil interpretación, además se analizaron los promedios de cada uno de los tratamientos con el fin de observar el comportamiento de cada combinación de factores, dichos resultados se presentan a continuación:

Después de introducir las variables de entrada y la(s) variable(s) de salida(s) e introducir los datos de calidad de corte, MINITAB nos genera la tabla de ANOVA en el cual observamos los efectos de los factores y de su interacción, tal y como se describe en la tabla 13.

Fuente de variación	Suma de cuadrado	GDL	Cuadrado medio	$F_o$	Valor-P
Tipo de material	499.26	2	249.63	19.74	0.000
Presión	161.48	2	80.74	6.38	0.000
Interacción	65.19	4	16.3	1.29	0.278
Error	1593.33	126			
Total	2319.26	134			

Tabla 13: Cuadro de ANOVA para el diseño experimental del proceso de corte

Es importante mencionar que para el diseño experimental realizado se hizo uso de un nivel de confianza del 95% mayormente utilizado, ya que por lo general, un nivel de significancia de 0.05 funciona adecuadamente permitiéndonos evitar cometer errores tanto del tipo 1 (rechazar una hipótesis verdadera) como del tipo 2 (no rechazar una hipótesis falsa) y de esta forma equilibramos las posibilidades de cometer dichos errores.

De acuerdo a la teoría indagada para la interpretación del análisis de ANOVA se encuentra las siguientes observaciones:

Sí el valor-P que obtiene en cada uno de los factores principales y de su interacción son menores al nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ) entonces se afirma que los efectos de

dicho factor afectan significativamente a la variable de respuesta, por otra parte si el valor-P obtenido es mayor al nivel de significancia, es señal de que dicho factor o interacción no afecta significativamente.

Entonces, a partir del análisis ANOVA de la tabla 14 podemos observar que la variable de entrada “Tipo de material” presenta un valor-P de 0.000 el cual es menor al nivel de significancia, esto indica que el efecto que tiene dicho factor sobre la calidad de corte de la fibra es altamente significativa, es decir, que representa un factor importante para que pueda llevarse a cabo el corte de la fibra independientemente de la presión de trabajo.

En cuanto a la variable “presión” al igual que el “tipo de material” también presenta un valor-P de 0.000 menor al nivel de significancia considerado, entonces afirmamos que también es un factor que influye considerablemente durante los procesos de corte.

Por último se observa también el efecto de la interacción de los dos factores, es decir, el comportamiento de la calidad de corte sobre la fibra, cuando los factores “tipo de material y presión” actúan conjuntamente, podemos observar que el valor-P de 0.278 es mayor al nivel de significancia considerado, lo cual es indicio de que su efecto no influye sobre la calidad de corte sin embargo, es claro que los dos factores afectan directamente la calidad de corte por lo que a partir de la teoría se concluye que sí los efectos principales de los factores son significativos entonces el efecto de su interacción también lo es y se recomienda analizarlo con mayor detalle.

Entonces a partir de los resultados descritos en párrafos anteriores se presentan las siguientes gráficas sobre los efectos principales y de interacción de los factores “tipo de material y presión”.

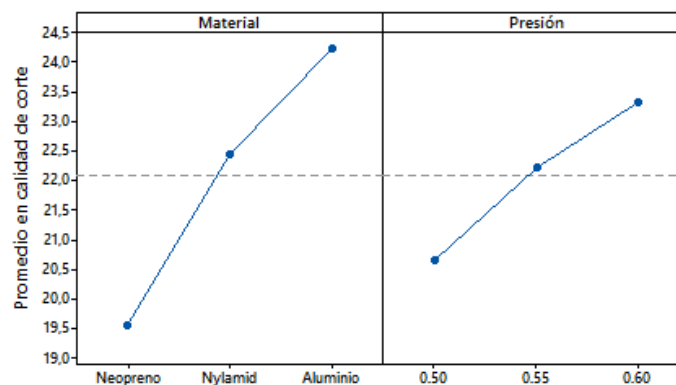


Fig. 76: Gráfica de efectos principales de los factores de experimentación

En la Fig. 76, observamos la gráfica de efecto principal del “tipo de material”, en ella se observan tres puntos correspondientes a cada uno de los niveles (Neopreno, Nylamid, Aluminio). Para el material neoprenos se tiene una media de aproximadamente 19.5 unidades y de acuerdo a la ponderación optada para la medición de la calidad de corte indica que la fibra fue cortada de forma uniforme pero con una adherencia mínima sobre la cuchilla o el yunque de corte. Para el material Nylamid su media es de 22.5 lo cual indica un corte mucho mejor en comparación del neopreno, sin embargo, el material

Aluminio el cual tiene una media de aproximadamente 24.25 genera cortes uniformes y sin adherencia de la fibra cortada sobre los materiales de trabajo.

Para el efecto principal del factor “presión” su interpretación es similar al del factor “tipo de material”, en la gráfica observamos que al trabajar con una presión de 0.50 MPa el promedio en la calidad de corte es de alrededor de 20.5 lo cual indica que se han obtenidos cortes uniformes pero con adherencias de la fibra sobre los material de trabajo, a una presión de 0.55 MPa la calidad promedio es de 22.0 en el corte, sin embargo, dichos cortes presentan adherencia y para una presión de 0.60 MPa la calidad es de aproximadamente 23.0 lo cual representa cortes uniformes con presencia de adherencia.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, debido a que los dos factores son significativos para el diseño experimental realizado a continuación se presenta la gráfica de los efectos de interacción de los factores “tipo de material y presión” donde podremos observar de manera más clara cómo influyen dichos parámetros sobre los procesos de corte.

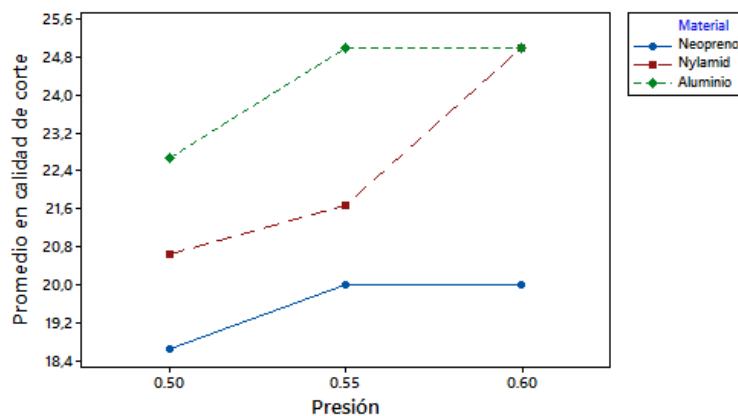


Fig. 77: Gráfica de efectos de interacción de los factores de análisis

En la Fig. 77, observamos los tres tipos de materiales interactuando a la vez con los tres niveles de presión, durante los procesos de corte con una presión de 0.50 MPa los resultados en la calidad (promedio de 22.5) son superiores al utilizar un yunque de aluminio, por otra parte al seleccionar una presión de corte de 0.55 MPa se observa que la calidad promedio del corte sigue siendo superior con aluminio en comparación del neopreno y del Nylamid, sin embargo, se observa algo muy interesante cuando el nivel de presión se incrementa a 0.60 MPa podemos analizar claramente que tanto el aluminio como el Nylamid producen resultados en la calidad de corte con promedio de 24.8 aproximadamente lo cual significa cortes uniformes y sin adherencia sobre la fibra.

Entonces, a partir de los resultados obtenidos podemos concluir lo siguiente:

Los resultados indican que podemos seleccionar dos tipos de materiales (Aluminio y Nylamid) a una presión de 0.60 MPa para los procesos de corte de fibra y obtener cortes eficientes sin o con mínima adherencia sobre los materiales de trabajo (cuchilla y yunque de corte), o bien seleccionar un yunque de corte específicamente de aluminio pero con

la principal característica de obtener corte uniformes y sin adherencia a partir de una presión de trabajo de 0.55 MPa.

Entonces a partir de esto damos respuesta a los cuestionamientos hechos anteriormente; respondiendo el primer cuestionamiento, sin lugar a duda el tipo de material representa un factor primordial debido a que cada material seleccionado tiene una dureza específica y dicho aspecto influye directamente sobre generarse o no el corte y mientras la presión sea mal alta las probabilidades de obtenerse cortes eficientes de fibra se incrementan, por otra parte para la pregunta dos, observamos que el material aluminio genera resultados regulares independientemente de la presión.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el diseño de un cabezal para la colocación de fibras de carbono prepreg, con un sistema de corte que permite posicionamientos angulares de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $-45^\circ$ , esto debido a que existen patentes en donde presentan como problema principal pérdidas de material durante los apilamientos de la fibra para ángulos de  $0^\circ$  con respecto al ancho de la fibra, de acuerdo a la teoría revisada se observa que utilizando un sistema de corte a  $45^\circ$  y  $-45^\circ$  se puede minimizar la pérdida que se genera durante dichos apilamientos, por lo tanto el sistema de corte es uno de los resultados más importantes del presente trabajo.

Un aspecto importante que se debe recalcar es que el presente trabajo de tesis se enfocó al desarrollo de un diseño de herramental que es montado a un brazo robot, con capacidad de carga de 6 kg, por lo cual fue necesario realizar un diseño compacto del herramental.

A partir del análisis estructural realizado se puede concluir que las dimensiones propuestas para las piezas principales sujetas a carga generan comportamientos lo suficientemente buenos como para evitar que la carcasa principal se fracture al estar sujeta a una carga máxima de 350N propuesta a partir de las características del robot sobre el cual se montará el herramental.

Con base al análisis del sistema de corte realizado y a los resultados obtenidos del DOE se concluye que el material idóneo para el yunque de corte es el Nylamid con un presión de trabajo de 0.60 MPa, esto debido a que la adherencia y el corte reflejan resultados eficaces observándose además daños mínimos sobre el filo de la cuchilla en comparación del aluminio que también genera buen corte pero con la diferencia de producirse una cuchilla más dañada específicamente en el borde afilado.

Como ya se ha mencionado el reto principal del presente tema de tesis fue el indagar la forma de como incorporar un sistema que permitirá realizar los cortes a  $45^\circ$  y  $-45^\circ$ , para ello se propuso diseñar una componente montado a unos baleros por sus extremos, esto con la finalidad de proporcionarle la rotación, sin embargo, dicho componente fue factor clave debido a que el sistema de guiado diseñado pasa a través de él de forma lineal, lo cual generaba problemas de interferencia entre el ensamble de guiado y la pieza de posicionamiento para el corte, debido a esto se optó por generar un componente del ensamble de guiado de fibra con ranuras igualmente posicionadas a los ángulos de corte con dimensiones similares al espesor y ancho de la cuchilla.

Haciendo referencia al diseño de experimentos realizado se obtuvo como resultado que al utilizar un yunque de corte de Nylamid nos permite generar cortes uniformes en las fibras con una mínima adherencia considerando una presión de trabajo de 0.6 MPa, aunque es importante mencionar que cuando el yunque es nuevo los cortes no son uniformes debido a que la cuchilla primero realiza el proceso de marcar un canal correspondiente al filo de la misma y una vez marcado el canal los cortes llegan a ser completamente uniformes.

Para el funcionamiento del sistema de corte fue necesario realizar el control preciso del motor paso a paso que permite posicionar la cuchilla a los ángulos especificados, de esta manera hacer que la cuchilla penetre libremente sobres las ranuras durante el proceso de corte, evitando así dañar la cuchilla prematuramente por el impacto que pueda generarse sobre alguna otra área de la pieza que contiene la ranura.

Debido a las limitantes de dimensiones en el diseño no se considera características tales como la incorporación de un sub-sistema de limpieza de cuchillas, un sistema de amortiguamiento del herramental por posibles choques contra el molde, ni la incorporación de un sistema de corte por láser, sin embargo, estos pueden ser presentados como posibles mejoras a futuro para el presente tema de tesis.

Otro de los retos a futuro para la tesis es llevar a cabo la implementación del sistema de corte propuesto pero con la diferencia de que el herramental pueda manipular más de una tira de fibra de material compuesto.

Finalmente con base a los análisis realizados, se observó que a partir de la especificaciones dadas es posible tener un herramental que nos permita minimizar perdidas de material y que a su vez se ajuste a las dimensiones del robot propuesto, ya que cabe mencionar que otros de los retos confrontados durante el desarrollo del proyecto fue el diseñar un cabezal compacto teniendo como limitante principal las dimensiones, por lo tanto se concluye que el objetivo planteado inicialmente se cumplió satisfactoriamente.



## REFERENCIAS

- [1] Knight BW. The technique of Filament Winding. Composites 1970; June: 228-33.
- [2] Chris Gear. Advanced Fibre Placement (2012). GNK Aerospace.
- [3] Barth JR. Fabrication of complex composite structures using Advanced Fiber Placement technology. 35th International SAMPE symposium. Anaheim, California, USA; 1990. p. 720-20.
- [4] Enders ML, Hopkins PC. Developments in the Fiber Placement process. 36th International SAMPE symposium. San Diego, California, USA; 1991. p. 778-90.
- [5] Measom R. Sewell K. Fiber Placement low-cost production for complex composite structures. Washington, DC, USA: American Helicopter Society 52nd Annual Forum; 1996.
- [6] Gruber MB, Lamontia MA. Automated Fabrication processes for large composite aerospace structures: a trade study. 46th International SAMPE symposium, vol. 46. USA: Long Beach, California; 2001. p. 1986-97.
- [7] Mantell SC, Wang QL, Springer GS. Processing thermoplastic composites in a press and by tape Laying – experimental results. J Compos Mater 1992; 26(16): 2378-401.
- [8] Bourban P. Bernet N. Zanetto J. Manson J. Material phenomena controlling rapid Processing of thermoplastic composites. Compos Part A – Appl Sci Manuf 2001; 32(8):1045-57.
- [9] Grant C. Martin Automated Processing technology for composites: current status and visión for the future. 48th International SAMPE symposium. Long Beach, California, USA; 2003.
- [10] Torres Martinez M. Faserstreifenverbinder für Bandwickler. Patent DE 10 2008 010 424, 2nd October 2008.
- [11] Oldani T. In: Increasing productivity in Fiber Placement processes. Sae aerospace manufacturing and Automated fastening conference and exhibition. North Charleston, south Carolina, USA; 2008.
- [12] Calawa R. Nancarrow J. Medium wave infrared heater for high-speed Fiber Placement. Los Angeles, California, USA: SAE Aerofast; 2007.
- [13] Hamlyn A. Hardy Y. Fibre application machine with tool changing system. Patent WO 2008/149004 A1, 11th December 2008.
- [14] Shirinzadeh B, Alici G, Foong CW, Cassidy G. Fabrication process of open surfaces by robotic fibre Placement. Robot Comput Integr Manuf 2004; 20(1):17-28.
- [15] Dirk H. J. A. The engineering aspects of Automated prepreg layup: History, present and future. ELSEVIER “Composites Part B: Engineering”. 2012
- [16] Suong Van Hoa. Automated composites manufacturing. Concordia centre for composites centre des composites Concordia. Advanced Materials International Forum-Bari, Apulia, Italy September 18, 19, 2014.

- [17] C. Krombholz, M. Perner, M. Bock and D. Röstermundt, "Improving the production quality of the advanced automated fiber placement process by mean of online path correction", 28<sup>th</sup> Congr. Int. Counc. Aeronat. Sci. 2012/CAS 2012, vol. 5, pp. 3922-416.
- [18] C. Krombholz, D. Delisle, and M. Perner, "Advanced automated fibre placement", in International Conference on Manufacturing Research, 2013, pp. 411-416.
- [19] Ralph D. Cope, B. Funck, Gruber, Lamontia, Anthony D. Johnson. Tape placement head for applying thermoplastic tape to an object. Patente US 7404868 B2, Julio 2008.
- [20] Robert A. Kisch, Peter Vogeli, Jeffries y Russell DeVlieg. End effector for constructing composite members. Patente US 8256484 B2, Julio 2010.
- [21] Olin E. Weiss, L. Davis, James L. Hudson, y Harlan T. Dowell. Composite tape laying machine. Patente 4351688, Mayo 1981.
- [22] Alexander Hamlyn, Yvan Hardy. Applicator head for fibers with particular systems for cutting fibers. Patente US 7926537 B2, Abril 2011.
- [23] Alexander Hamlyn, Yvan Hardy. Fiber application machine. Patente US 8733417 B2, Noviembre 2008.
- [24] Peter D. McCowin. Thermoplastic multi-tape application head. Patente 5700347, Diciembre 1997.
- [25] Roy L. Barr, Aaron O. Dubberly, Kevin J. Sitton. Bi-directional fiber placement head. Patente 5979531, Noviembre 1999.
- [26] Harald E. Karlson, Ethridge E. Hardesty. Composite-tape placement head. Patente 3775219, Noviembre 1973.
- [27] Keith G. Shupe, Boyd L. Hatch. Fiber placement delivery system with modular cut/add actuators. Patente 5290389, Marzo 1994.
- [28] James P. Martin. Multiple tape laying apparatus and method. Patente US 7293590 B2, Marzo 2004.
- [29] Manufacturing techniques, Chapter three. AeroMet Corporation's presentation at the Defense Manufacturing Conference. December 1999.
- [30] John M. Haake. High power diode laser-assisted fiber placement of composite structure. Presented at Westec 2005 Conference April 4-7, 2005 in LA California.
- [31] Z. Qureshi, T. Swait, R. Scaife, H. M. El-Dessouky. In situ consolidation of thermoplastic prepreg tape using automated tape placement technology: Potential and possibilities. Composites: Part B. Elsevier
- [32] R. Lichtinger, P. Hörmann, D. Stelzl, R. Hinterhölzl. The effects of the input on adjacent paths during Automated Fibre Placement. Composites: Part A. Elsevier