

MANUFACTURA Y EVALUACIÓN DE PARTES DE DISPOSITIVOS PARA TRANSPORTE ÓSEO REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO

Juan Sebastián Escobar Vega



Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica
Santiago de Cali – Colombia
2018

MANUFACTURA Y EVALUACIÓN DE PARTES DE DISPOSITIVOS PARA TRANSPORTE ÓSEO REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO

Juan Sebastián Escobar Vega

Trabajo para optar por el título de Magister en Ingeniería Mecánica

Director: Ph.D. Gonzalo Fernando Casanova
Ph.D. José Jaime García

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica
Santiago de Cali – Colombia
2018

X _____

Gonzalo Fernando Casanova García

Director

X _____

Jurado Evaluador 1

X _____

Jurado Evaluador 2

RESUMEN

En esta tesis se desarrolló la manufactura de prensas para sistemas de fijación externa con materiales compuestos con fibras de carbono y matriz epoxi CF/EP. Se presenta el diseño y el proceso de construcción paso a paso, de un dispositivo de fijación externa de huesos para alargamiento y transporte. Este fijador fue fabricado con fibras de carbono (FC), seleccionadas por su bajo peso, alta resistencia y propiedad de radio lucidez, especialmente indicados para aplicaciones biomédicas. Este proyecto incluye el estudio e implementación de procedimientos de manufactura con FC. Además, se determinó la resistencia de los compuestos con materiales locales e importados y la técnica para obtener propiedades suficientemente altas para la aplicación. Se construyó un modelo de elementos finitos con el cual se identificaron las zonas de mayor esfuerzo y se validó un modelo para materiales compuestos.

ABSTRACT

In this thesis it is developed the manufacture of clamps for external fixator systems. These were fabricated with carbon fibers on a matrix of epoxy resin CF/EP. The design and the manufacture process of an external fixator device are presented step by step. This fixator is capable of lengthening and bone transport. Carbon fibers were selected due to their characteristics: low weight, high resistance, high stiffness, and radiolucent which is useful in biomedical applications. The main contribution of this work includes the study and implementation of carbon fibers manufacture procedures. In addition, the resistance and characteristics of local and imported materials was also presented, along with the recommended procedure to ensure sufficient performance to the application. Finally a finite element model was validated and the elements and zones of maximum stresses were identified.

CONTENIDO

Resumen	4
Índice de figuras	6
1. Introducción.....	8
1.1 Fijadores externos	8
1.2 Introducción a los transportadores óseos de fibra de carbono	9
1.3 Resinas	10
1.4 El curado	11
1.5 Procesos de fabricación con fibras de carbono.	12
2 Objetivos.....	14
2.1 Objetivo General	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. Efecto de las vibraciones de baja frecuencia sobre los vacíos de materiales compuestos.....	15
3.1 Introducción.....	15
3.2 Procedimientos.....	15

3.3 Montaje experimental.....	16
3.4 Resultados	17
4. Manufactura de una pieza en forma de T	21
4.1 Introducción.....	21
4.2 Diseño de pieza en forma de T	21
4.3 Diseño de moldes	22
4.4 Proceso de fabricación inicial.....	23
4.5 Fabricación de pieza con ayuda de insertos en fibra de carbono	25
4.6 Procedimiento de manufactura definitivo	27
4.6.1 Cálculo de tela	28
4.6.2 Cálculo de resina	29
4.7 Posicionamiento de fibras	30
4.8 Resultados	32
4.8.1 Análisis macro estructural	33
4.8.2 Análisis micro estructural	34
5. Construcción de un fijador externo de fibra de carbono	41
5.1 Diseño del prototipo.....	41
5.2 Diseño de moldes	42
5.3 Análisis de posicionamiento de fibras y enrollado.....	43
5.4 Curado.....	45
5.5 Resultados	46
5.5.1 Maquinado e insertos de peek	46
5.5.2 Ensamble.....	47
6. Evaluación biomecánica del prototipo.....	50
6.1 Metodología	50
6.3 Resultados experimentales	52
6.2 Elaboración de un modelo de elementos finitos	55
6.2.1 Malla	56
6.2.2 Contactos	57
6.2.3 Condiciones de borde.....	57
6.4 Resultados numéricos	58
7. Conclusiones	62
8. Bibliografía	64
9. Anexos	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Izquierda proceso de alargamiento [7]. derecha transporte de hueso[5].	8
Figura 2 Fijadores externos para rodilla con anillos y barras longitudinales.[11]	9
Figura 3 Ciclo de curado para una resina epoxi cuya temperatura de curado ese 350°F (izquierda) con rampa extra para penetración de resina (derecha) única rampa hasta temperatura de curado. [15]	11
Figura 4 Ciclo de curado con autoclave y dos rampas de temperatura.[15]	12
Figura 5 Ilustración de penetración de resina a los manojos de fibras [23].	13
Figura 6 Molde y tela para moldear probetas de hexagonales (izquierda). Dimensiones y apariencia después del moldeo (derecha)	16
Figura 7 Setup experimental	17
Figura 8 Microestructura de una sección transversal de probeta cuadrada de fibra de carbono epoxy del grupo de control. Izquierda muestra con micro vacíos, derecha probeta con micro vacíos y macro vacíos.	18
Figura 9 Microestructura de una sección transversal de probeta cuadrada de fibra de carbono epoxy vibrado a 15 Hz. Izquierda muestra con micro vacíos, derecha probeta con micro vacíos y macro vacíos.	18
Figura 10 Tratamientos realizados en Image J. arriba izquierda imagen original, arriba derecha imagen de 8 bits, abajo izquierda imagen con el umbral ajustado para mostrar vacíos, abajo derecha imagen con umbral ajustado para mostrar fibras.	19
Figura 11 Separacion del compuesto en sus componentes y porcentajes de area ocupados.	20
Figura 12 Resultados de porcentaje de vacios obtenidos para 18 probetas 6 de cada grupo.	20
Figura 13 Ciclo de diseño.	21
Figura 14 Pieza en forma de T.	22
Figura 15 Molde para fabricacion de pieza en forma de T Explosionado.	23
Figura 16 Izquierda molde pre-ensamblado, derecha aplicación de resina a la tela	24
Figura 17 a) Diagrama de enrollado b) molde cerrado.	25
Figura 18 Secuencia de pasos para desmoldar.	25
Figura 19 Insertos de fibra de carbono: rizado A, B, C y mandril para enrollar en forma de T D, E, F.	26
Figura 20 Diagrama del proceso simplificado	27
Figura 21 A) Tela de fibra de carbono delimitada con cinta y B) recortada a la medida.	28
Figura 22 Progresión de enrollado de tela para una pieza con forma de hexaedro.	29
Figura 23 Resina epoxi y endurecedor con la proporción utilizada.	30
Figura 24 Molde con forma de E y preforma rectangular.	31
Figura 25 Defectos generados por fallas en la preforma.	31
Figura 26 Posicionamiento de tela para mejorar la homogeneidad de la proporción fibra y resina.	32
Figura 27 Piezas fabricadas, organizadas en orden cronológico y porcentaje de fibra vista macro.	33
Figura 28 Corte transversal de las piezas fabricadas. Organizadas en orden cronológico.	34
Figura 29 Pieza A microscopio 25x en los 8 puntos de interés.	35
Figura 30 Pieza B microscopio 25x en los 8 puntos de interés.	36
Figura 31 Pieza D microscopio 25x en 8 puntos de interés.	37
Figura 32 Pieza E microscopio 25x en 8 puntos de interés.	38
Figura 33 Pieza F microscopio 25x en 8 puntos de interés.	39
Figura 34 Tamaños de los poros	39
Figura 35 Microestructura de la fibra para cada una de las piezas en zonas de alta compactación.	40
Figura 36 A Sección transversal del riel, B forma de la prensa, C geometría de la tapa	41
FIGURA 37 Etapas de fabricación para la parte principal de la prensa.	42
FIGURA 38 Etapas de fabricación para la tapa de la prensa.	42
Figura 39 Molde para fabricacion de prensas de un transportador de hueso con riel en forma de "I". explosionado.	43
Figura 40 Analisis de posicionamiento de tela dentro de la prensa.	44
Figura 41 Volumen y areas totales y para adicionar de la pieza rectangular.	44

Figura 42 Paso a paso para el enrollado de la tela para la construcción de la prensa rectangular.....	45
Figura 43 Curva de curado térmico aplicado a las piezas del transportador.....	46
Figura 44 Operaciones de maquinado realizadas en las piezas moldeadas A) prensa y B) tapa de la prensa.....	46
Figura 45 Insertos de peek con tornillo.....	47
Figura 46 Procedimiento para pegado de insertos de peek.....	47
Figura 47 Fijador externo fabricado en fibra de carbono	48
Figura 48 Componentes individuales del fijador externo	48
Figura 49 Máquina para ensayos biomecánicos.....	51
Figura 50 Configuraciones de modos de carga según la norma ASTM F154 [10]......	51
Figura 51 Configuraciones experimentales para las pruebas de flexión y carga axial	52
Figura 52 Resultados de rigidez axial separados según el efecto del riel y del tratamiento térmico	52
Figura 53 Resultados de rigidez medio lateral separados según el efecto del riel y del tratamiento térmico.....	53
Figura 54 Resultados de rigidez antero posterior separados según el efecto del riel y del tratamiento térmico.	53
FIGURA 55 Resultados de rigidez torsional según el efecto del tratamiento térmico.....	54
FIGURA 56 Resultados de rigidez torsional comparado con otros sistemas.	54
Figura 57 Comparación de rigideces contra los valores de referencia y otros modelos.....	55
FIGURA 58 Prototipos comparados a) Irs orthofix de aluminio. B) prototipo PLA. C) prototipo de fibra de carbono.....	55
Figura 59 Configuración del análisis, materiales utilizados y equipo de trabajo.....	56
FIGURA 60 Malla y métodos utilizados para su conformación.....	56
FIGURA 61 Contactos y definiciones.....	57
FIGURA 62 Condiciones de borde	58
FIGURA 63 Fuerza de reacción en la posición del desplazamiento aplicado.	59
FIGURA 64 Estado de deformación bajo carga axial.....	59
FIGURA 65 Estado de esfuerzos normales para la prensa cercana a la carga.....	60
FIGURA 66 Estado de esfuerzos normales en la tapa cercana a la carga.....	60
FIGURA 67 Esfuerzos normales en el riel en las direcciones principales.	61

1. INTRODUCCIÓN

1.1 FIJADORES EXTERNOS

Los fijadores externos son sistemas biomecánicos que están diseñados para cumplir múltiples funciones entre las cuales se encuentran la fijación de fracturas simple y el transporte de hueso. Ambas técnicas explotan la capacidad del calo óseo de ser manipulado para alargar el hueso o para corregir deformidades. Estos sistemas deben garantizar una cierta rigidez para que se pueda regenerar el calo óseo. Generalmente los fijadores externos constan de varias prensas que deslizan sobre un riel rígido de aproximadamente 45 cm de largo. A las prensas van unidos los clavos que en el otro extremo se fijan al hueso del paciente.

Existen algunas compañías líderes en la fabricación y distribución de estos sistemas entre los que cabe destacar a Orthofix [1] y Ortopedia Baumer [2]. Estos sistemas pueden llegar a costar COP\$13'000.000 [3]. Haciendo uso de los dispositivos mencionados se practica la callotaxis o distracción osteogénica, el cual se basa en el principio de osteogénesis por distracción que fue descubierto accidentalmente por el médico ruso Gavriil A. Ilizarov. Consiste en alargar la masa de calo mediante un proceso de distracción lenta y simétrica. Este tratamiento se realiza para alargar huesos iniciando con un hueso sin fractura pero más corto de lo normal (Figura 1 a). La técnica de callotaxis es aplicada con el procedimiento que se describe a continuación. 1. Se induce la fractura del hueso u osteotomía de manera intencionada. 2. Se limpian los tejidos circundantes y en especial el periostio. 3. Se controla la necrosis del hueso. 4. Se realiza la fase de latencia para permitir la organización del calo. 5. Se realiza la distracción gradual y controlada. 6. Se realiza la fase de neutralización para facilitar la osificación del calo. 7. Se finaliza con la de Dinamización para ayudar a la regeneración [4].

Cuando existe una pérdida importante de hueso se puede practicar el transporte óseo (Figura 1). Este procedimiento difiere en el descrito anteriormente ya que en este caso el hueso se desliza a través del tejido blando hasta cubrir el espacio del hueso perdido y se utilizan tres prensas en lugar de dos. La técnica consiste en estabilizar el hueso con dos prensas en los dos segmentos del hueso y utilizar una tercera prensa intermedia para movilizar un fragmento de hueso, generado a partir de la callotaxis convencional, descrita anteriormente [5]. Una vez que los dos segmentos están en contacto pueden ser comprimidos o sometidos a otra técnica de unión [6].

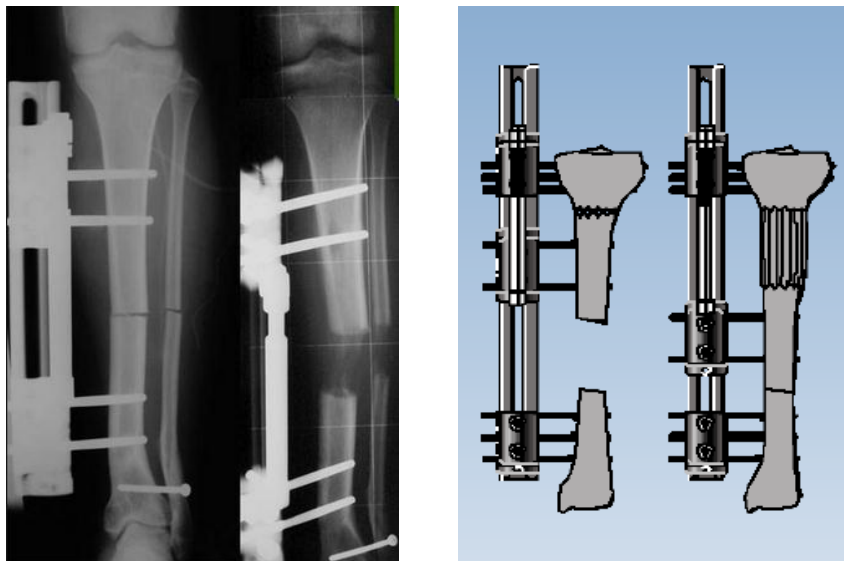


FIGURA 1 IZQUIERDA PROCESO DE ALARGAMIENTO [7]. DERECHA TRASPORTE DE HUESO[5].

Con la aplicación de materiales compuestos en fijadores externos para fractura de huesos y transporte óseo, se han realizado varias mejoras en estos sistemas, como la utilización de anillos en FC/EP [8] y también el desarrollo de nuevos fijadores, en los que sus partes están fabricadas en FC/EP, como es el caso de la construcción de un fijador externo utilizando una variación de la mezcla T-300/MC102 (FC/EP) con el que se logró tener menos peso y traslucidez ante los rayos X [9]. Aunque tradicionalmente los fijadores externos de transporte óseo se han fabricado en acero y en aluminio con anodizado duro, cada vez es más la inclusión de piezas en fibra de carbono. Recientemente en la Universidad del Valle fue fabricado un riel en (FC/EP) diseñado para trabajar con prensas del dispositivo de Orthofix [3]. El dispositivo se sometió a una evaluación mecánica bajo la norma ASTM F1541 [10] el cual resultó ser más rígido en la dirección axial que el modelo de Orthofix en aluminio, pero al mismo tiempo resultó más débil bajo las cargas flexionales.

Dado el alto costo de los sistemas de transporte óseo importados, además de la necesidad de disponer un sistema liviano y traslucido a los rayos X, en este proyecto se desarrolló un sistema de transporte hecho con fibra de carbono a un costo relativamente bajo.

1.2 INTRODUCCIÓN A LOS TRASPORTADORES ÓSEOS DE FIBRA DE CARBONO

Dado el alto costo que tienen los sistemas de fijación y transporte óseo en nuestro país, sumado a una creciente demanda de estos dispositivos para pacientes fracturados en accidentes de tránsito y que en muchos casos necesitan tratamientos de fijación y transporte de huesos, se propuso un proyecto financiado por Colciencias orientado a la fabricación de un transportador óseo de bajo costo, liviano y eficiente.

Tradicionalmente los fijadores externos se han fabricado con materiales metálicos. Modelos comerciales recientes incluyen piezas como barras, rieles, o incluso anillos de materiales compuestos (Figura 2). Las ventajas de los materiales compuestos es que son transparentes a las radiografías y de bajo peso. Además la apropiación de las técnicas de manufactura con fibra de carbono, representa una ventaja competitiva para nuestro país, el cual tiene limitada experiencia en este tema.

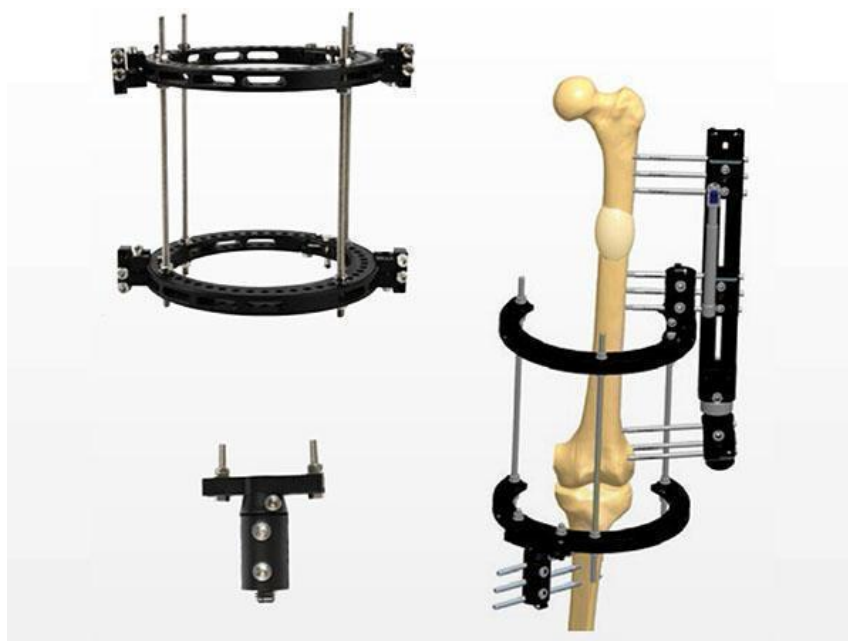


FIGURA 2 FIJADORES EXTERNOS PARA RODILLA CON ANILLOS Y BARRAS LONGITUDINALES. [11]

Los materiales compuestos consisten en una matriz, generalmente de resina, que alberga fibras sintéticas orientadas para trabajar a tensión. Las fibras se aplican en forma de tejidos con diferentes orientaciones para garantizar sus propiedades en diferentes direcciones. La forma final puede ser obtenida por medio de diferentes procesos, entre los cuales se destacan el enrollado de fibras, que es similar a un proceso de torneado; la pultrución, equivalente al proceso mecánico de extrusión; y el moldeado, el cual es indicado para fabricar piezas complejas. Dos variaciones del moldeado ampliamente usadas son hechas con molde abierto y molde cerrado [12]. En este trabajo se usará la manufactura con molde cerrado ya que permite obtener mejores propiedades mecánicas y tolerancias dimensionales.

El componente principal de los materiales compuestos es la fibra, generalmente hecha a partir de polímeros cristalinos, que presentan buenas propiedades mecánicas, consecuencia de la cristalinidad. En su proceso de fabricación se consigue, mediante estiramiento para ordenar las cadenas de polímero en una misma dirección, que coincide con el eje de la fibra. Un buen ejemplo de fibras de altas prestaciones son las fibras de carbono, que se obtienen por pirólisis controlada del poliácronitrilo. Estas fibras, con densidades de $1,9 \text{ g/cm}^3$, presentan módulos de elasticidad de hasta 400 GPa [13]. El principal inconveniente de las fibras poliméricas es que presentan bajas propiedades en la dirección perpendicular a la fibra. Por ello, su aplicación exige en muchos casos la fabricación de materiales compuestos formados por varios polímeros. Es decir que la fibra necesita normalmente una matriz que la soporte y le ayude a mejorar sus propiedades en la dirección perpendicular.

La manufactura en fibra de carbono es un tema relativamente nuevo en Colombia y cada vez va ganando más fuerza y aplicaciones. Su uso se concentra a actividades potenciales como lo son la industria automovilística, sobresaliendo en el mercado de las personalizaciones de motos. Pero su mayor potencial se ha dejado de explotar. Este material posee excelentes propiedades mecánicas y un enorme potencial en aplicaciones estructurales, esto gracias a su elevada resistencia llegando a ser 5 veces más fuerte que el acero y hasta tres veces más liviano. Esto hace de este material una opción interesante en aplicaciones donde la reducción de peso resulte beneficiosa como en el caso de dispositivos biomecánicos, brindando confort al paciente. Otras propiedades muy apreciables en la fibra de carbono son la resistencia a la corrosión, al fuego, su alta estabilidad química y la conductividad eléctrica.

1.3 RESINAS

La matriz del compuesto funciona como unión transfiriendo las cargas a través de la red de fibras. Esta mantiene la orientación de las fibras y las protege de los efectos ambientales. También es capaz de redistribuir las cargas cuando se rompe alguna fibra. Las características principales que deben ser evaluadas en una matriz son su módulo de elasticidad, su rigidez, esfuerzo de fluencia, tenacidad, propiedades térmicas y facilidad de maquinado.

Las resinas pueden encontrarse en tres categorías principales; termoestables, elastómeras y termoplásticas. Son polímeros, una molécula larga que contiene átomos que se unen principalmente por enlaces covalentes a lo largo de la molécula, mientras que enlaces secundarios actúan entre las moléculas. En general los polímeros termoplásticos están unidos por enlaces secundarios y los termoestables forman una red tridimensional de enlaces covalentes unidos entre segmentos que también tienen enlaces secundarios.

Las resinas termoestables son polímeros conformados por una red tridimensional amorfa cuyos enlaces covalentes no pueden ser deshechos después del curado. Antes del curado estos tienen una relativa baja viscosidad. También son muy reactivos por lo cual tienen buenas capacidades de unión con el refuerzo. Las resinas termoestables proporcionan un procesado fácil y una mejor impregnación de las fibras de refuerzo. Las más utilizadas son epoxis, poli-ésteres y vinyl ésteres insaturados. En general las resinas termoestables tienen los siguientes rangos de características: bajo costo, módulo elástico 2.75 Gpa o más, viscosidad 100 a 500 cps, temperatura glas 70°C o más, baja absorción de humedad, tiempo de gel de al menos 20 min, preferiblemente

curable a temperatura ambiente, alta tenacidad [13] . Las resinas *epóxicas* son resinas de alto desempeño y aunque son costosas presentan una resistencia elevada [14].

Las resinas *termoplásticas* pueden ser separadas en dos subgrupos: las semicristalinas y las no cristalinas o amorfas. Son una rama lineal de los polímeros la cual se funde cuando la energía es suficiente para deshacer los enlaces secundarios. Cuando se encuentra en fase líquida tienen una viscosidad relativamente alta. La cual restringe su uso en algunos procesos [13].

La selección de resina involucra diferentes factores como son sus características químicas como la viscosidad, el punto de transición vítrea, el tiempo de gel, el ciclo de curado, la estabilidad térmica, la resistencia ambiental, y las emisiones volátiles. Las propiedades más importantes son su módulo de elasticidad, resistencia en diferentes direcciones y la resistencia a la fractura inter-laminar.

1.4 EL CURADO

Existen múltiples agentes de curado los cuales tienen diferentes tiempos y temperaturas de reacción que a su vez resultan en propiedades distintas. Por ejemplo el anhídrido requiere altas temperaturas y un largo tiempo para curar. Cuando curan exhiben buenas propiedades a altas temperaturas y buena resistencia química.

El ciclo común de curado de una resina epóxi cuya temperatura de curado es de 350°F posee dos rampas y dos periodos isotérmicos. En la primera parte del proceso un aumento de la temperatura de (240-280°F) hace que la viscosidad baje significativamente y la resina fluya y penetre en todos los intersticios. Luego se aplica la segunda rampa hasta los 350°F (temperatura de curado), donde la fluidez inicialmente aumenta por el incremento de temperatura pero luego cae drásticamente cuando el proceso de entrecruzamiento de la resina comienza. Así la resina se convierte en gel y luego solidifica mientras el periodo isotérmico continúa entre los 340 a 370°F. Generalmente este estado dura entre 4 y 6 horas para que el curado sea completo. Este proceso tiene como alternativa una única rampa hasta los 370°F cuando la resina se coloca en sus proporciones finales en la fibra eliminando la necesidad de hacer fluir primero y luego solidificar [15]. Ambas curvas se muestran en la Figura 3.

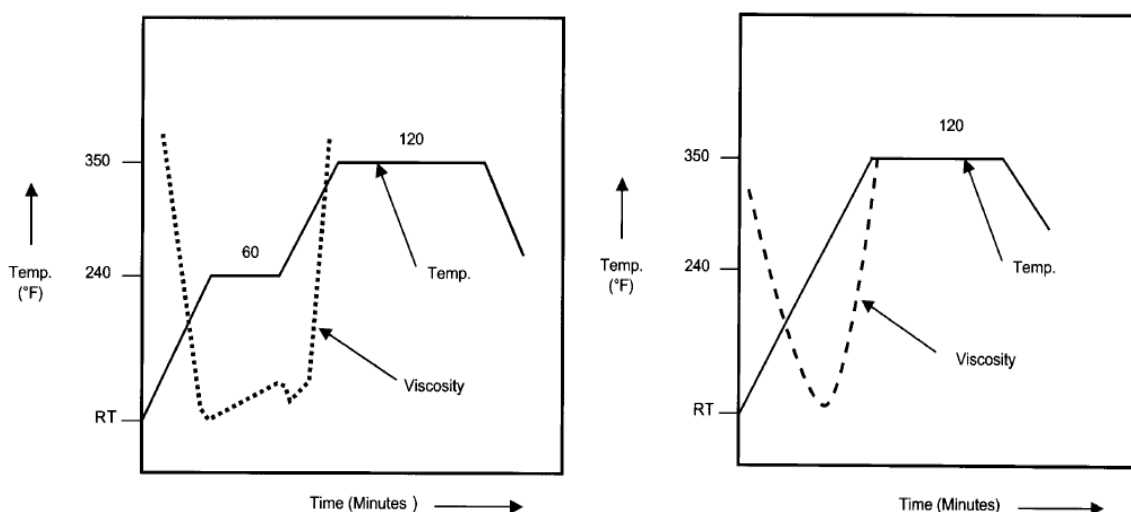


FIGURA 3 CICLO DE CURADO PARA UNA RESINA EPOXI CUYA TEMPERATURA DE CURADO ES DE 350°F (IZQUIERDA) CON RAMPA EXTRA PARA PENETRACIÓN DE RESINA (DERECHA) ÚNICA RAMPA HASTA TEMPERATURA DE CURADO. [15]

Durante el proceso de curado otro factor a tener en cuenta es la presión, que provee la compactación de las capas y ayuda a eliminar los vacíos de aire que pueden quedar atrapados entre capas. La presión se aplica también en dos etapas. En la primera etapa cuando la resina se encuentra en su mínima viscosidad se aplica solo vacío para que las burbujas de aire sean extraídas. Posteriormente en la fase de alta temperatura se aplica presión externa proporcionada por la autoclave para que la pieza termine de curar bajo presión ver Figura 4. La teoría explica que la formación de vacíos ocurre cuando la presión de vacío (presión de los gases atrapados) es mayor a la presión hidrostática en la resina. Así cuando la viscosidad de la resina aumenta los vacíos quedan atrapados [15]. Se han hecho estudios con el fin de encontrar condiciones donde se evite la nucleación de vacíos, pero sigue siendo un problema si comprender totalmente. Ya existen modelos para simular el curado de la resina. Estos predicen la dinámica de la resina, su viscosidad flujo y transferencia de calor así como la formación de vacíos y esfuerzos residuales [16].

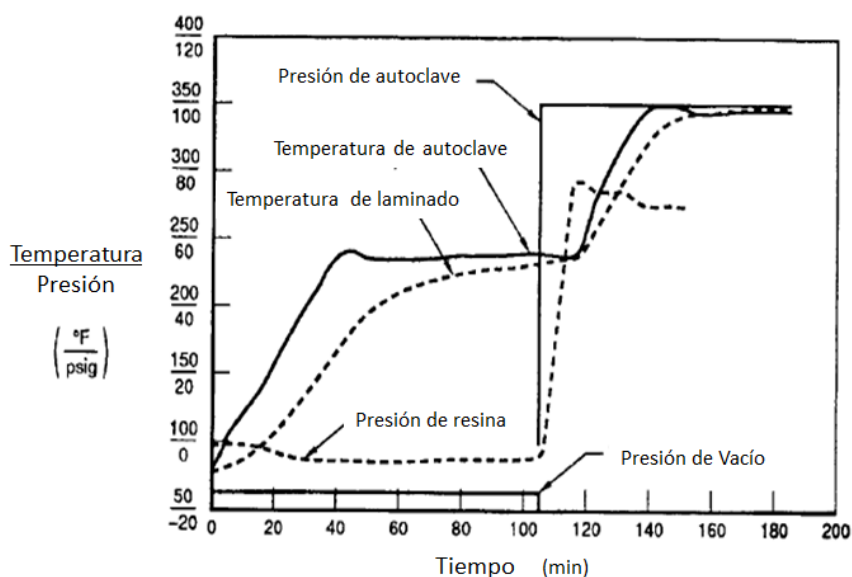


FIGURA 4 CICLO DE CURADO CON AUTOCLAVE Y DOS RAMPAS DE TEMPERATURA.[15]

1.5 PROCESOS DE FABRICACIÓN CON FIBRAS DE CARBONO.

Cuando se trata de piezas con formas complejas o irregulares, la diferencia entre las posibilidades de aplicar una técnica a metales y Carbon Fiber Epoxi Matrix (CF/EP) se hace evidente. Así, mientras resulta práctico y relativamente rápido crear formas irregulares con materiales metálicos (isotrópicos) mediante procesos de maquinado por arranque de viruta, la mayoría de las veces resulta complicado maquinar piezas de FRCP, puesto que durante el proceso de corte se lastima la continuidad de las fibras, incidiendo negativamente sobre las propiedades mecánicas finales de la pieza. A pesar de lo anterior, en algunos casos es posible aceptar ciertos daños en las fibras de piezas de FRCP maquinadas.

En muchos casos el procesamiento de materiales compuestos utiliza las mismas técnicas del procesamiento de matrices. Entre ellas se incluye el moldeo por inyección [17], moldeo por compresión y extrusión. Existen unas técnicas alternativas únicas para la fabricación de compuestos, entre ellas listamos el enrollado de filamentos o hilos [18], la poltrución [19] y el capado a mano. El proceso de capado manual consiste en colocar placas sucesivas de telas pre impregnadas sobre un molde [20], donde se somete a curado. Como alternativa se puede colocar una bolsa de nailon sobre las capas y evacuar el aire contenido entre ellas [21]. Para mejorar las propiedades la pieza empacada al vacío se ubica dentro de una autoclave, con presión y temperatura controlada durante el curado. El proceso con autoclave es mejor en comparación a un horno simple cuya

presión máxima de curado es la atmosférica (14.7 psi), el autoclave funciona con el principio de presión diferencial, la bolsa es evacuada para remover el aire y el autoclave proporciona presión de gas a la pieza (100 psi). Mediante este proceso se pueden alcanzar mejores razones de compresión, una mayor proporción de fibra/resina y menos porosidad y vacíos interiores [22]. En la Figura 5 se muestra de que forma la resina se distribuye en los tejidos de una tela Pre-impregnada, dejando espacios vacíos, de la misma forma cuando se aplica la resina sobre la tela esta no penetra completamente. Por esto es necesario en ambos casos la aplicación de calor, para licuar la resina y aplicar presión, que ayuda a rellenar los espacios vacíos. Para lograr las mejores propiedades del compuesto la clave está en humedecer la parte interna de las fibras con resina y evacuar los vacíos que se anidan entre las capas y las fibras. Para esto es esencial el manejo de la presión y la temperatura, como también el doblado. El objetivo es tener un molde integral capaz de ejercer suficiente presión sobre las fibras y pueda ser sometido a un tratamiento térmico para un proceso de curado.

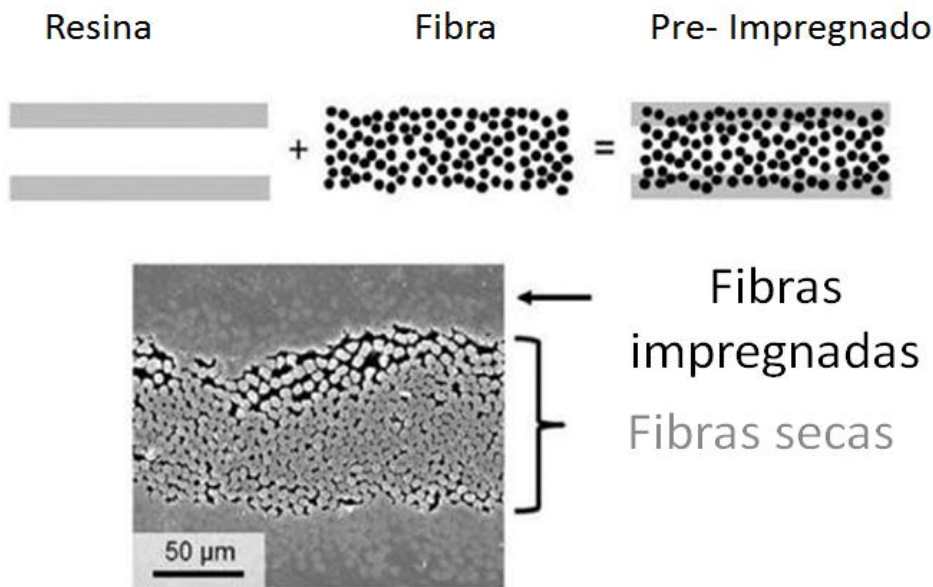


FIGURA 5 ILUSTRACIÓN DE PENETRACIÓN DE RESINA A LOS MANOJOS DE FIBRAS [23].

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

IMPLEMENTAR Y EVALUAR PROCESOS DE FABRICACIÓN DE PARTES DE GEOMETRÍA COMPLEJA FABRICADOS CON COMPUESTOS REFORZADOS CF/EP.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. APROPIAR Y DESARROLLAR PROCEDIMIENTOS PARA EL DISEÑO, LA CONSTRUCCIÓN Y LA EVALUACIÓN DE MOLDES PARA PRODUCIR PARTES DE CF/EP.
2. EVALUAR EL EFECTO DE LA PROPORCIÓN FIBRA RESINA, TEMPERATURA DE CURADO Y LA PRESENCIA DE INSERTOS EN LA CALIDAD DE LAS PARTES Y LA PRODUCTIVIDAD DEL PROCESO.
3. ANALIZAR EL EFECTO DE VIBRACIONES COMO MÉTODO DE ELIMINACIÓN DE BURBUJAS DURANTE EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE COMPUESTOS CF/EP.
4. UTILIZAR MÉTODOS TEÓRICOS PARA EL ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES DE MATERIALES COMPUESTOS.
5. EVALUAR MECÁNICAMENTE UN SISTEMA DE FIJACIÓN EXTERNA CON PARTES FIBROREFORZADAS BAJO LA NORMA ASTM F1541.

3. EFECTO DE LAS VIBRACIONES DE BAJA FRECUENCIA SOBRE LOS VACÍOS DE MATERIALES COMPUESTOS

3.1 INTRODUCCIÓN

Los elementos fabricados con materiales compuestos reforzados tienden a tener un pequeño porcentaje de vacíos que se alojan entre las fibras y la resina. Por lo general esto ocurre durante el proceso de impregnado de la tela, cuando la resina no es capaz de penetrar suficiente entre las fibras dejando espacios con aire entre los manojos de fibra. Esto representa defectos internos que según [24], puede disminuir las propiedades mecánicas del compuesto en hasta un 30%. La medida del contenido de vacíos llega incluso a ser un parámetro de calidad y existen niveles admisibles dependiendo del tipo de aplicación, por ejemplo para la industria aeronáutica el porcentaje debe ser menor al 3%. Se ha reportado estudios sobre cómo las vibraciones mecánicas en forma de ondas sonoras afecta el contenido de vacíos. Compston y Stachurski [25], llegaron a la conclusión que vibrar un laminado de fibra de vidrio a bajas frecuencias durante el curado, tiene un efecto sobre el contenido de burbujas.

Con el fin de probar esta teoría en fibra de carbono se propuso un experimento con el fin de explorar la efectividad de las vibraciones mecánicas para disminuir el porcentaje de vacíos internos. Para entender el fenómeno de la formación de vacíos intersticiales en los materiales compuestos se deben abordar dos aspectos complementarios: la impregnación de la tela y la dinámica de las burbujas en un medio poroso. En nuestro caso se presta especial interés a las burbujas que están sometidas un campo acústico. Existen varios casos en donde las fuerzas acústicas interactúan con las burbujas de un fluido, el caso más conocido es tal vez el de la cavitación acústica. Paralelamente existen otros casos como es el caso de desplazamiento de burbujas que resulta ser una alternativa plausible en la disminución de vacíos intersticiales en los materiales compuestos.

La cavitación acústica es el crecimiento y colapso de las micro-burbujas preexistentes bajo la influencia de un campo ultrasónico en líquidos. Las burbujas de cavitación pueden caracterizarse por la dinámica de las oscilaciones y de las temperaturas y presiones máximas alcanzadas cuando colapsan [26]. En estos procedimientos generalmente se aplica un pulso ultrasónico de múltiples frecuencias o chirp para lograr que las burbujas crezcan hasta un tamaño donde puedan resonar. La frecuencia central de este pulso está alrededor de los 500 kHz dependiendo del fluido. Una vez que las burbujas alcanzan el tamaño de resonancia llegan a colapsar. Existen variables importantes en este proceso como son: temperatura de la burbuja, tamaño de la burbuja, densidad del fluido entre otras.

En [27] han estudiado cómo se comportan las burbujas bajo el efecto de las vibraciones acústicas y han formulado una ecuación de presión para burbujas oscilando no-linealmente bajo pulsos ultrasónicos de alta magnitud, teniendo en cuenta el amortiguamiento debido a la compresibilidad del gas durante el colapso violento que se da en burbujas cavitando.

3.2 PROCEDIMIENTOS

Se planteó un experimento en donde se analizaron tres tratamientos con dos frecuencias de excitación acústica a la misma amplitud y un grupo de control sin excitación. Los valores de las frecuencias se eligieron basados en [25] donde se realizó un experimento similar con fibra de vidrio. Para cada una de las condiciones se moldeó seis probetas hexaédricas con dos montajes. Se fabricaron tres probetas con forma de hexaedro en cada montaje, y se hicieron 6 montajes en total, dos para cada una de las frecuencias de prueba. Los

hexaedros fueron contruidos con tela de fibra de carbono de 200 gr/ m² con resina West System 205 con catalizador 105. Se impregnó la tela con el procedimiento descrito anteriormente y se enrolló en una preforma con geometría hexaédrica. Para el moldeo de las probetas se utilizó el molde de polietileno mostrado en la Figura 66 a la izquierda con lo que fue posible obtener hexaedros como los mostrados a la derecha.

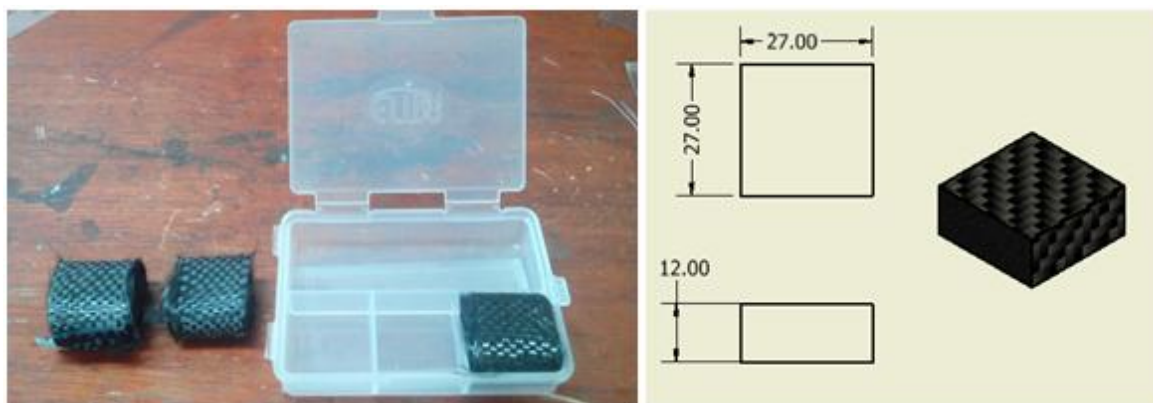


FIGURA 6 MOLDE Y TELA PARA MOLDEAR PROBETAS DE HEXAGONALES (IZQUIERDA). DIMENSIONES Y APARIENCIA DESPUÉS DEL MOLDEO (DERECHA)

3.3 Montaje experimental

El montaje experimental (Figura 7) consta de un osciloscopio (Modelo TDS 2014C, Tektronix, USA) con el cual se adquiere y se corrobora la señal producida por un Generador de funciones DDS arbitrario (Modelo - AFG3021C, Tektronix, USA). Esta misma señal fue enviada a un sistema de agitación (shaker) donde se posiciona la muestra y es sometida a un movimiento armónico con frecuencias de 15Hz y 25Hz, por separado, durante un tiempo de 60 minutos. Este es el tiempo que tarda la resina en solidificarse. Finalmente el molde es retirado del montaje y se deja curar durante 24 horas. Paralelamente se fabricó el grupo de control en donde las probetas se dejaron curar al medio ambiente durante 24 horas sin vibración.



FIGURA 7 SETUP EXPERIMENTAL

Cada una de estas probetas fue cortada por la mitad con un cortador de precisión siguiendo la dirección de enrollado y luego pulida con alúmina en paños primero de $0.1\mu\text{m}$ y luego $0.05\mu\text{m}$. Con las probetas pulidas fue posible analizar con aumento de 25X a 200X la estructura microscópica del compuesto

3.4 RESULTADOS

En la Figura 88, se muestra la estructura microscópica del compuesto en la cual se puede diferenciar elementos como; la fibra (porción amarilla y blanca); la resina (color gris y suave); y los vacíos (puntos de pimienta y figuras negras).

Las imágenes de las Figura 8 y Figura 9 muestran cada una dos sectores de dos probetas distintas. En la Figura 8 la muestra no está vibrada mientras que en la Figura 9 ha sido vibrada a 15Hz. En los sectores de la probeta mostrados en la Figura 8A, se observa una estructura uniforme del compuesto, mientras que en la Figura 8B se tiene un sector con macro vacíos. Con estas imágenes se busca explicar primero que existen dos tipos de fenómenos en cuanto a vacíos; el primero puede ser denominado vacíos comunes o puntos de pimienta, que son estructuras pequeñas provenientes de impregnación incompleta de la tela, que generalmente se alojan entre un manojo de hilos o suspendidos dentro de la resina. El otro tipo de vacíos se denomina macro vacíos y es una estructura mucho más grande que se puede ver como una mancha en las imágenes de la derecha y proviene de burbujas atrapadas en la preforma durante el enrollado. Estas burbujas son expulsadas generalmente durante la compactación, pero al tenerse un compuesto de baja densidad de fibra, el compuesto no ha sido sometido a presiones altas y los macro vacíos no son expulsados. Además, estos macro vacíos no son afectados por las vibraciones así que los encontramos tanto en las probetas vibradas como en las no vibradas. En este análisis se tomarán en cuenta solo los vacíos comunes o puntos de pimienta.

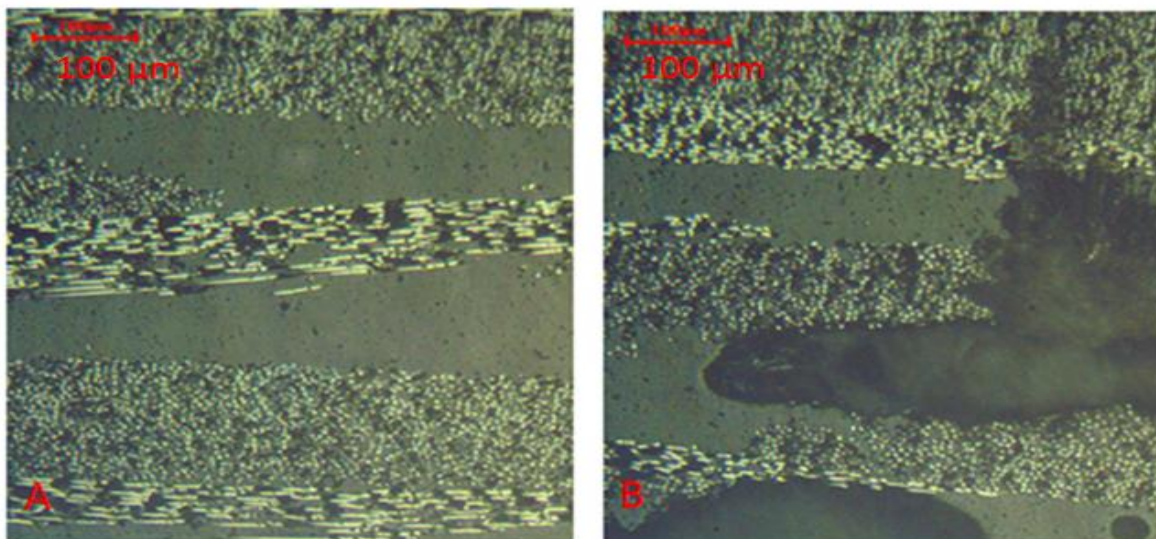


FIGURA 8 MICROESTRUCTURA DE UNA SECCIÓN TRASVERSAL DE PROBETA CUADRADA DE FIBRA DE CARBONO EPOXY DEL GRUPO DE CONTROL. IZQUIERDA MUESTRA CON MICRO VACÍOS, DERECHA PROBETA CON MICRO VACÍOS Y MACRO VACÍOS.

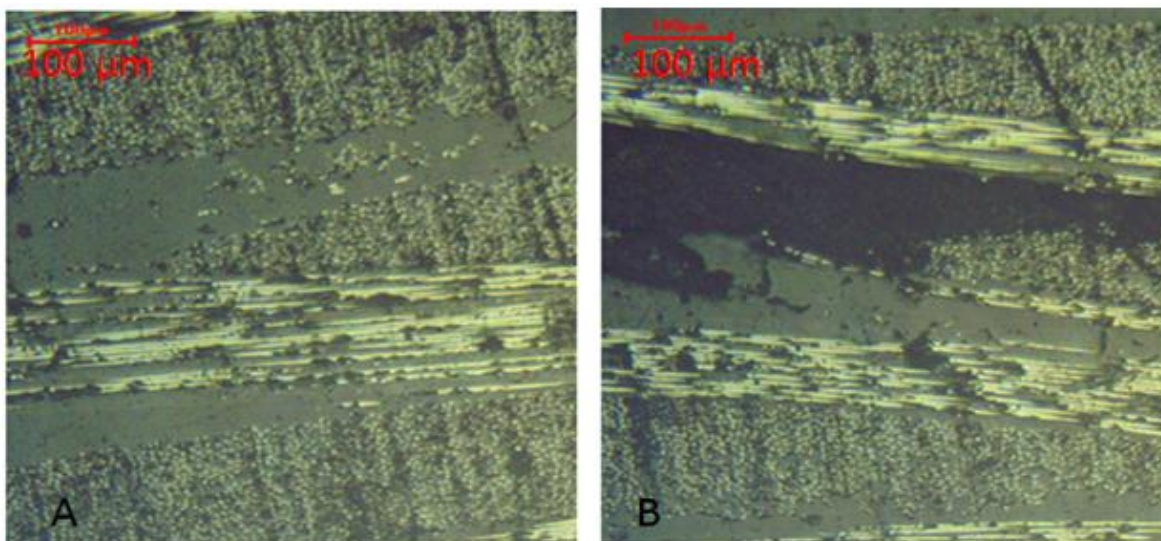


FIGURA 9 MICROESTRUCTURA DE UNA SECCIÓN TRASVERSAL DE PROBETA CUADRADA DE FIBRA DE CARBONO EPOXY VIBRADO A 15 HZ. IZQUIERDA MUESTRA CON MICRO VACÍOS, DERECHA PROBETA CON MICRO VACÍOS Y MACRO VACÍOS.

Para determinar el contenido de vacíos se empleó el software de análisis de imágenes Image J que por medio de un tratamiento nos permite calcular los porcentajes de cada componente dentro del compuesto. El procedimiento consiste en reducir la imagen de 32 a 8 bits donde se deja la imagen en una escala de grises. Posteriormente es posible graduar el umbral para reducir la imagen a blancos y negros. Para esto primero se aplica un filtro de Fourier con el fin de homogenizar la imagen. Haciendo esto resulta fácil ajustar el umbral de color para separar ya sean las fibras la resina o los vacíos. En la Figura 10 se muestra como partiendo de la imagen original se aplica el procedimiento y finalmente muestra en negro los vacíos en la Figura 10C y la fibra en la Figura 10D por medio de la pestaña de resultados es posible saber qué porcentaje corresponde con el área de color negro.

En la Figura 11 se muestra con mayor aumento 200x como se aísla cada componente mediante el uso del umbral. La imagen de arriba ha sido convertida a 8 bits. Podemos ver claramente como en la imagen central que la parte blanca representa las fibras de carbono mientras que la parte negra es la resina junto con los vacíos. En la última imagen se han aislado los vacíos o puntos de pimienta y se puede ver que para este caso particular el área representa un 7.9 % del área total.

Se repitió el mismo procedimiento para las 18 probetas eligiendo al azar el lugar de la fotografía evitando lugares con macro vacíos. De esta forma se pudo construir un gráfico que relaciona el porcentaje de vacíos con el tratamiento de curado que se tuvo. La Figura 12 muestra los resultados agrupados de las 18 probetas el cual arroja concentraciones de burbujas en promedio de entre los 5% a los 20 %. De los resultados obtenidos se puede decir que los tratamientos con vibraciones a 15Hz generaron un compuesto con un contenido bajo de burbujas hasta 8%. El resultado fue muy similar al obtenido sin vibraciones que alcanzó el 7% de vacíos con una desviación estándar tal que ambos tratamientos son estadísticamente iguales con un 95% de certeza. En contraste, en el compuesto tratado con vibraciones de 25Hz de frecuencia se observó un aumento en la cantidad de burbujas atrapadas llegando al 16 % con una desviación estándar de ± 2 . De esta manera se pudo determinar que el tratamiento con vibraciones a 25Hz fue perjudicial para la calidad del compuesto haciendo que se incremente el porcentaje de vacíos.

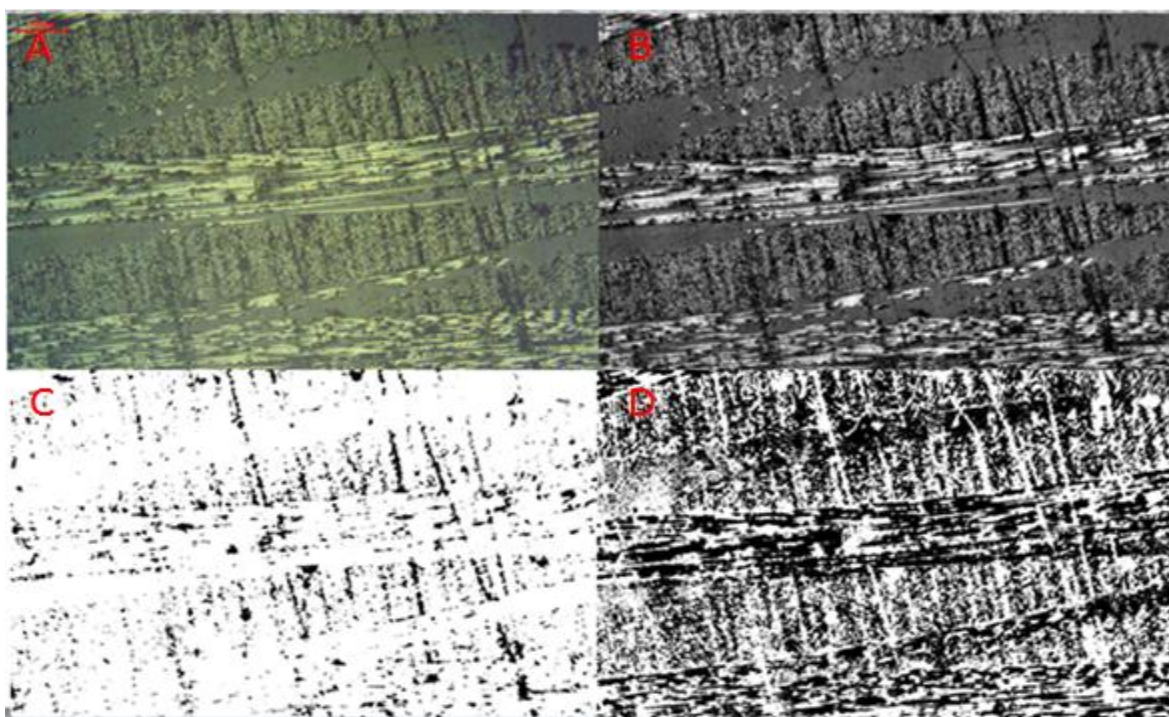


FIGURA 10 TRATAMIENTOS REALIZADOS EN IMAGE J. ARRIBA IZQUIERDA IMAGEN ORIGINAL, ARRIBA DERECHA IMAGEN DE 8 BITS, ABAJO IZQUIERDA IMAGEN CON EL UMBRAL AJUSTADO PARA MOSTRAR VACÍOS, ABAJO DERECHA IMAGEN CON UMBRAL AJUSTADO PARA MOSTRAR FIBRAS.

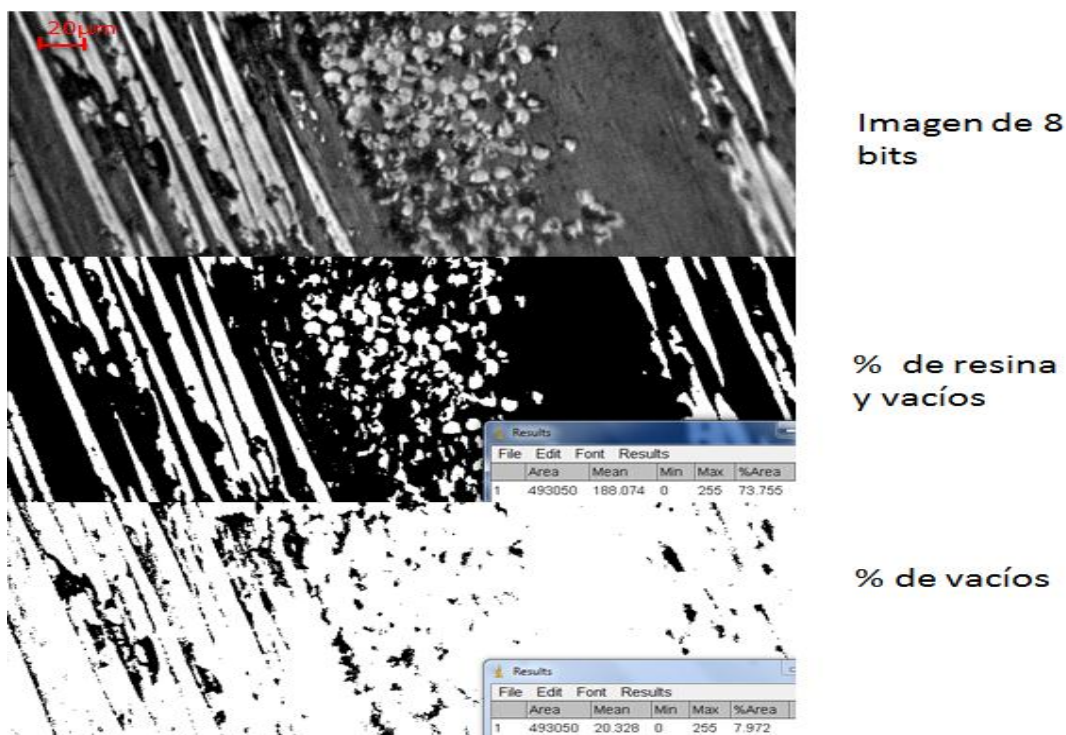


FIGURA 11 SEPARACION DEL COMPUESTO EN SUS COMPONENTES Y PORCENTAJES DE AREA OCUPADOS.

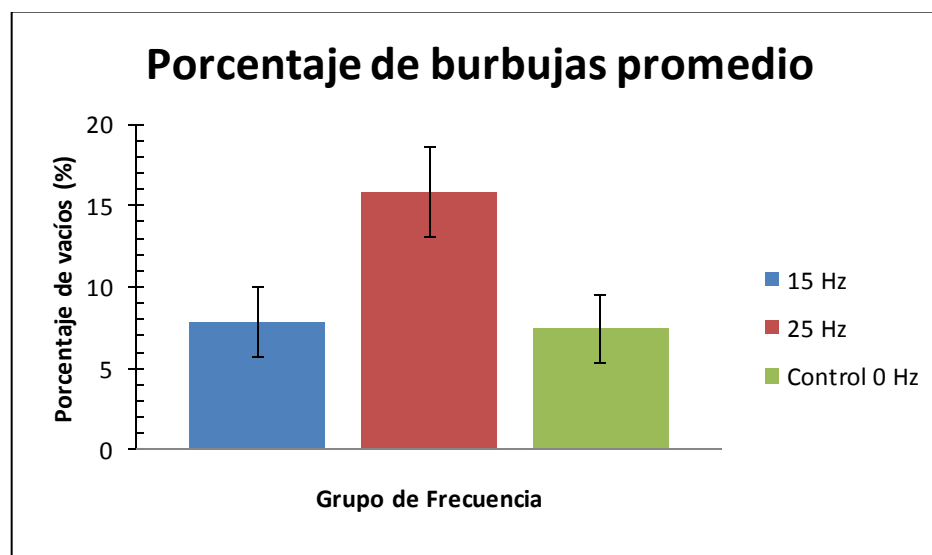


FIGURA 12 RESULTADOS DE PORCENTAJE DE VACIOS OBTENIDOS PARA 18 PROBETAS 6 DE CADA GRUPO.

4. MANUFACTURA DE UNA PIEZA EN FORMA DE T

4.1 INTRODUCCIÓN

En esta sección del trabajo se realizó el diseño y manufactura de una pieza en forma de T con la cual se experimentó y se mejoró progresivamente la calidad de las piezas moldeadas para definir un procedimiento con el cual, posteriormente, construir las partes de un sistema de fijación. Se diseñaron los moldes y procedimientos de manufactura, así como pruebas para la selección de una resina, entre las varias existentes en el mercado. Adicionalmente se experimentó con insertos roscados y maquinado del compuesto de fibra de carbono para utilizarlos en procesos de ensamble. El ciclo de diseño se muestra en la **Error! Reference source not found..**

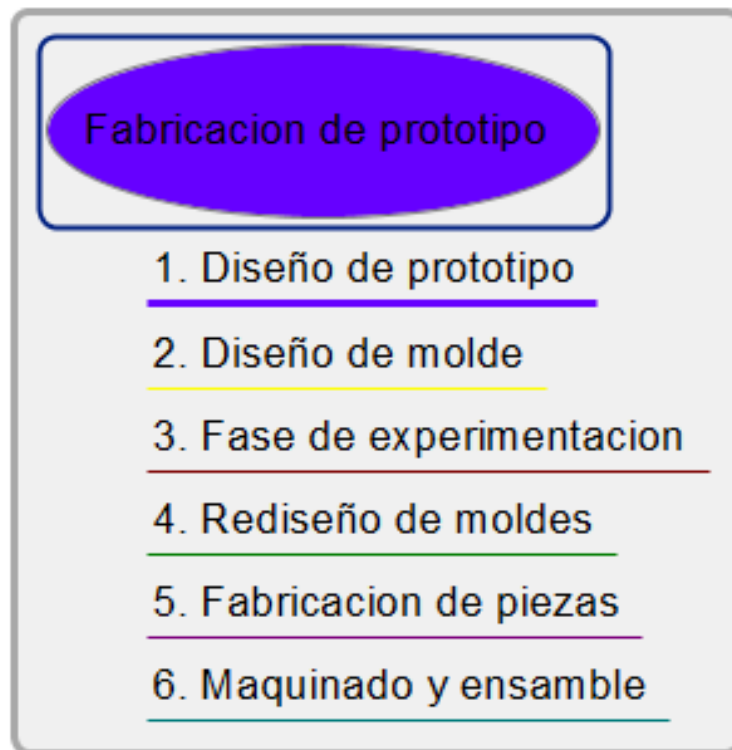


FIGURA 13 CICLO DE DISEÑO.

4.2 DISEÑO DE PIEZA EN FORMA DE T

Para probar las técnicas de fabricación de fibra de carbono se propuso la construcción de una pieza compleja con algunos de los detalles característicos de una prensa de un fijador externo como lo son las cavidades donde se sujetan los clavos. También se propuso que la geometría tenga sección transversal en forma de T. El diseño final de la pieza se concibió de la forma de la Figura 14.

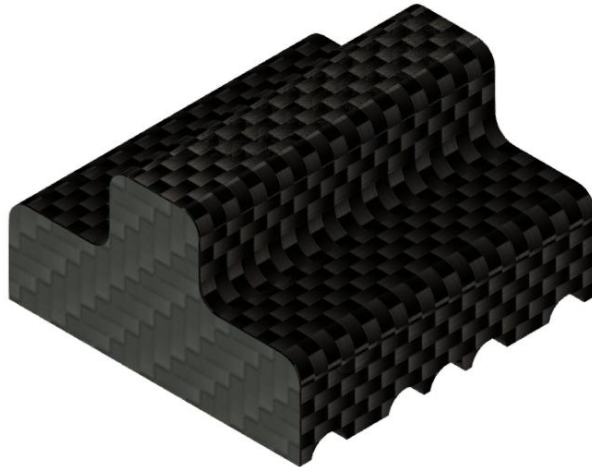


FIGURA 14 PIEZA EN FORMA DE T

4.3 DISEÑO DE MOLDES.

Para fabricar la pieza propuesta anteriormente se diseñó un molde cerrado mostrado en la Figura 15 el cual consta de 4 piezas principales que se identifican con números en la figura. Las piezas 1 y 2 conforman la cavidad principal mientras que las piezas 3 y 4 son dos tapas una delantera y una superior respectivamente. Además para su ensamblaje se necesita de los tornillos mostrados. El orden en el cual se realiza el ensamble sigue los números de las piezas de tal manera que se une primero las piezas 1 y 2 cavidades con forma de L, para luego posicionar la tapa delantera y finalmente la tapa superior, por medio de la cual se realiza la compresión del compuesto. Los planos de este molde se adjuntan en los anexos.

La compactación se realizó con tornillos, por la facilidad de manejo y a pesar de las dificultades que presenta trabajar con resina, que se rebosa al momento de la compactación. Para mitigar este efecto se diseñó sobre el molde un sistema de sellos mecánicos con “o” ring para direccionar la fluencia de la resina a los agujeros de desahogo. El desmolde se realiza con la ayuda de tornillos de extracción ya sea para expulsar la pieza o para separar las partes que componen el molde. Para facilitar el desmolde, la cavidad es formada por tres partes que se pueden separar.

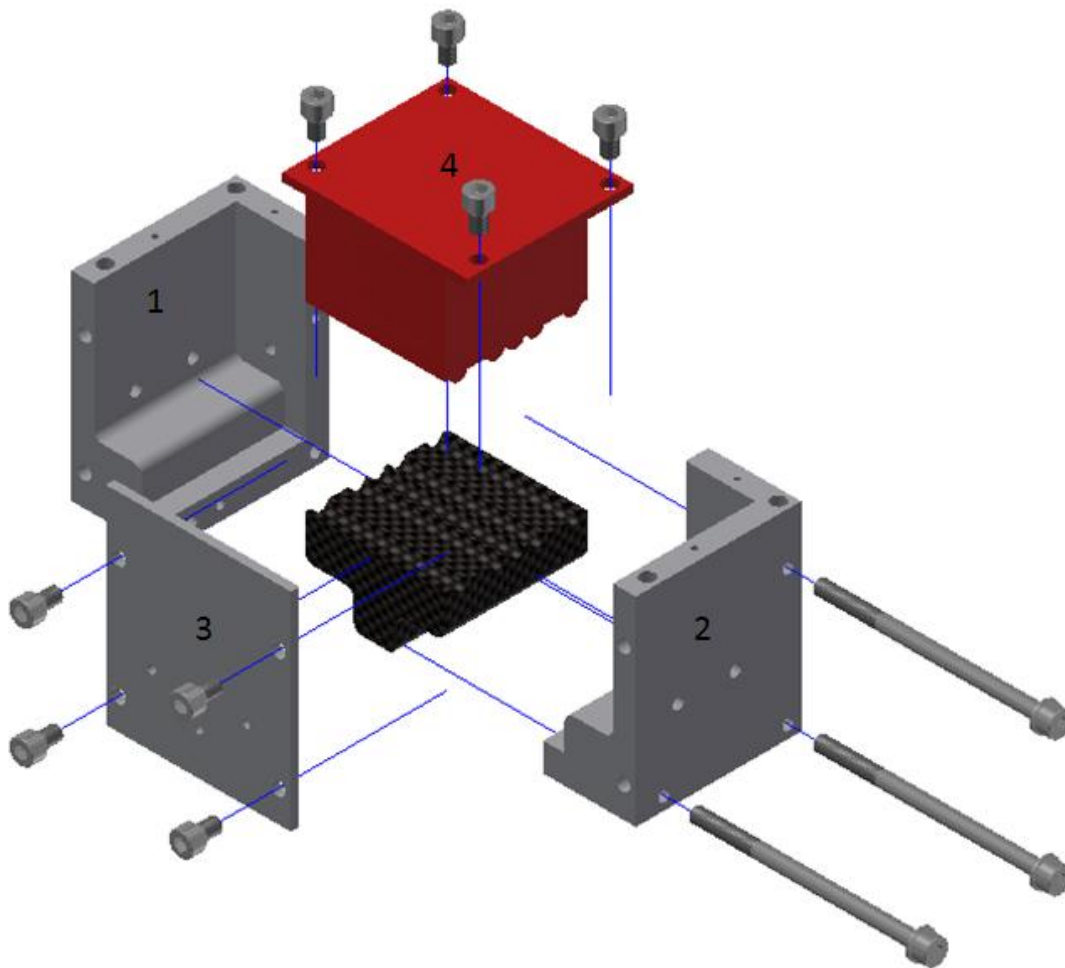


FIGURA 15 MOLDE PARA FABRICACION DE PIEZA EN FORMA DE T EXPLOSIONADO.

Probablemente la parte más importante del diseño es la forma en que se aplica la presión al molde debido a que es determinante para una consolidación adecuada del compuesto. La dirección de compactación y el posicionamiento de las fibras es esencial para una buena orientación final de las fibras y de esta forma garantizar una distribución y compactado uniformes. Para piezas no planas la organización de las fibras, previa al proceso de compresión es fundamental para un buen resultado, ya que la compresión no tiene la capacidad de reorganizar las fibras dentro del molde. Esto puede llegar a ocasionar incluso que el molde no cierre. En este caso tenemos que la dirección de compactación es la vertical, y la pieza no tiene una sección transversal uniforme en esa dirección, por lo cual, al enrollar fue necesario colocar tramos de tela perpendiculares a la dirección de compactación y no paralelos. Esto conlleva a problemas de baja densidad de tela y ondulaciones que se mostraran más adelante.

4.4 PROCESO DE FABRICACIÓN INICIAL

1. Se pre ensambla el molde de la forma mostrada en la Figura 16 uniendo las dos mitades de la cavidad con la tapa frontal y dejando la tapa superior para el final (con este elemento se realiza la compresión del compuesto).

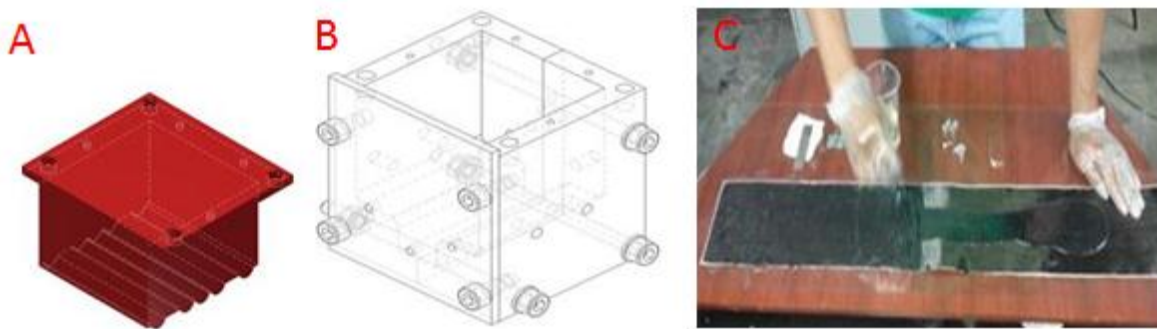


FIGURA 16 IZQUIERDA MOLDE PRE-ENSAMBLADO, DERECHA APLICACIÓN DE RESINA A LA TELA.

2. Se prepara la mezcla de resina y endurecedor en un vaso desechable. Las proporciones deben ser 100/15 peso a peso; Resina/Endurecedor (o dependiendo de las especificaciones del fabricante). Se mide con una gramera las cantidades necesarias de resina y endurecedor y se mezclan con un palillo hasta que se homogenice.
3. Con la mezcla lista se debe proceder rápidamente ya que el catalizador ha comenzado a endurecer la resina. Se dispone de aproximadamente media hora para terminar el proceso en el cual la mezcla ya ha alcanzado su punto de gel (este tiempo varía según la referencia de la resina). Se coloca el trozo de tela sobre una superficie limpia y lisa (puede usarse acetato o plástico) y se impregna la tela de manera tal que no quede resina en exceso sobre la superficie, como lo muestra la Figura 16 C. El exceso de resina debe esparcirse, de ser necesario puede ser retirado para lograr un proceso más limpio en el momento de llevar la tela al molde y su posterior compresión.

SE DOBLA Y ENROLLA LA TELA COMO SE MUESTRA EN LA

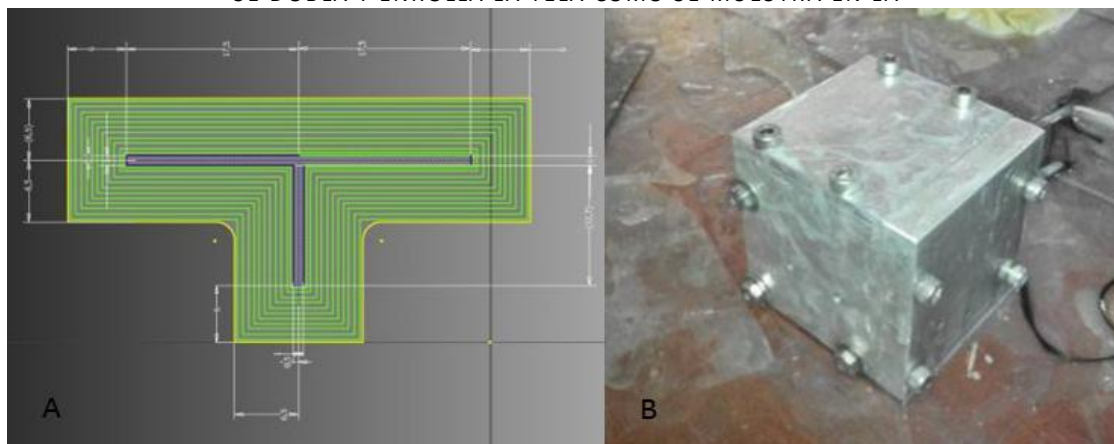


FIGURA 17 A) DIAGRAMA DE ENROLLADO B) MOLDE CERRADO.

4. En esta fase se usa un mandril en forma de T que permite dar la preforma a la tela y puede ser retirado o dejado al interior para mantener la forma. En caso de dejarse se sugiere que el material sea el mismo compuesto. Luego se introduce en la cavidad del molde por la parte superior, se pone la tapa y se cierra con los tornillos para comprimir.

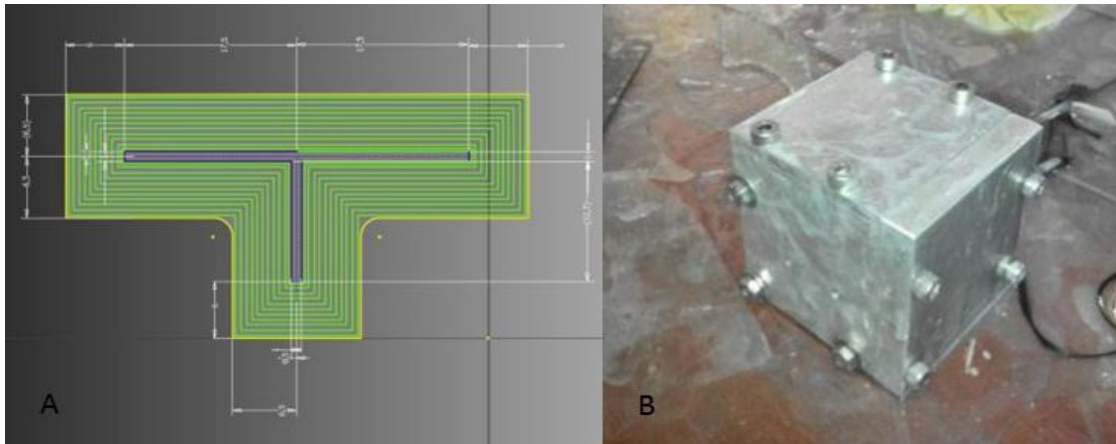


FIGURA 17 A) DIAGRAMA DE ENROLLADO B) MOLDE CERRADO.

5. Se limpia el molde y se deja curar por 24 horas. Ver Figura 17. En este momento se puede someter la pieza a un curado térmico a una temperatura controlada, que depende de la resina que se utilice, para acelerar el tiempo de curado a 5 horas y obtener mejores propiedades mecánicas.
6. Pasado el tiempo de curado, se quita el exceso de resina y se retiran los tornillos para desmoldar. En algunos casos la resina se introduce en la cabeza del tornillo o en los agujeros del molde por lo cual es necesario despegar y en algunos casos reemplazar tornillos.
7. Se remueve la tapa delantera y se quitan los tornillos de la tapa superior luego se utiliza el agujero de extracción para separar las piezas en L Ver Figura 18.



FIGURA 18 SECUENCIA DE PASOS PARA DESMOLDAR.

8. Finalmente se quita la tapa superior y se quitan las rebabas que puedan haber quedado. Hay algunas que necesitaran cortarse y limarse como las de los orificios de desahogo. Ver Figura 18 Derecha.

4.5 FABRICACIÓN DE PIEZA CON AYUDA DE INSERTOS EN FIBRA DE CARBONO

De la literatura [17] se sabe que con un proceso de compression molding (CM) pueden obtenerse acabados con radios superiores a 1.5 mm solo mediante la compresión. La geometría que se busca fabricar tiene una zona crítica con 0,25 mm de radio. En estas zonas se han tenido atrapamiento de burbujas y en el mejor de los casos se llena completamente la cavidad con resina. Mediante la adición de insertos con geometría especial se

espera mejorar la densidad de fibra en estas cavidades y también la distribución de tela en la parte central de la pieza donde se han tenido zonas con exceso de resina y sin tela. Se optó por hacer los insertos en fibra de carbono para darle estructura a la preforma, dada la ventaja de que pueden permanecer dentro de la pieza, logrando conservar la propiedad de translucidez. Los insertos ayudan a posicionar la tela en los lugares de escasa fibra.

En las imágenes de la Figura 19 se muestran las dos piezas utilizadas para este objetivo. En A, B y C el inserto para rellenar las esquinas más agudas correspondientes al lugar donde se aseguran los clavos que van empotrados al hueso. Para moldear este inserto se usó la técnica de moldeo abierto, utilizando la tapa del molde original que se muestra en la Figura 19 A, y una lámina de aluminio plana para realizar la compactación. Se usaron 4 capas de tela e hilos de fibra de carbono para rellenar las esquinas. Esta pieza ayudó a compactar la tela contra el rizado de la tapa haciendo que en el moldeo la tela llegara a las esquinas más agudas del molde. En la Figura 19D a 19F se muestran las tres piezas rectangulares con las que se fabricó un mandril en forma de T para enrollar la tela. Éste se fabricó a partir de una lámina de fibra de carbono moldeada en un molde rectangular. El mandril permanece dentro de la pieza durante el moldeo y le da estructura a la preforma para posicionarla en el molde. Se siguió el procedimiento de enrollado descrito anteriormente buscando obtener una preforma con forma de T. primero se dobla la tela en 4 capas obteniendo un trozo de 50 mm de ancho y 1 m de largo aproximadamente. El lado de 50 mm se coloca sobre el mandril y luego se enrolla el metro de tela alrededor llegando a la preforma deseada. Una vuelta antes de finalizar el enrollado sobre la cara más grande de la T se posiciona el inserto rizado cubriéndolo con la última capa de tela. Estas piezas son consumibles y es necesario moldearlas con anterioridad al moldeo final.

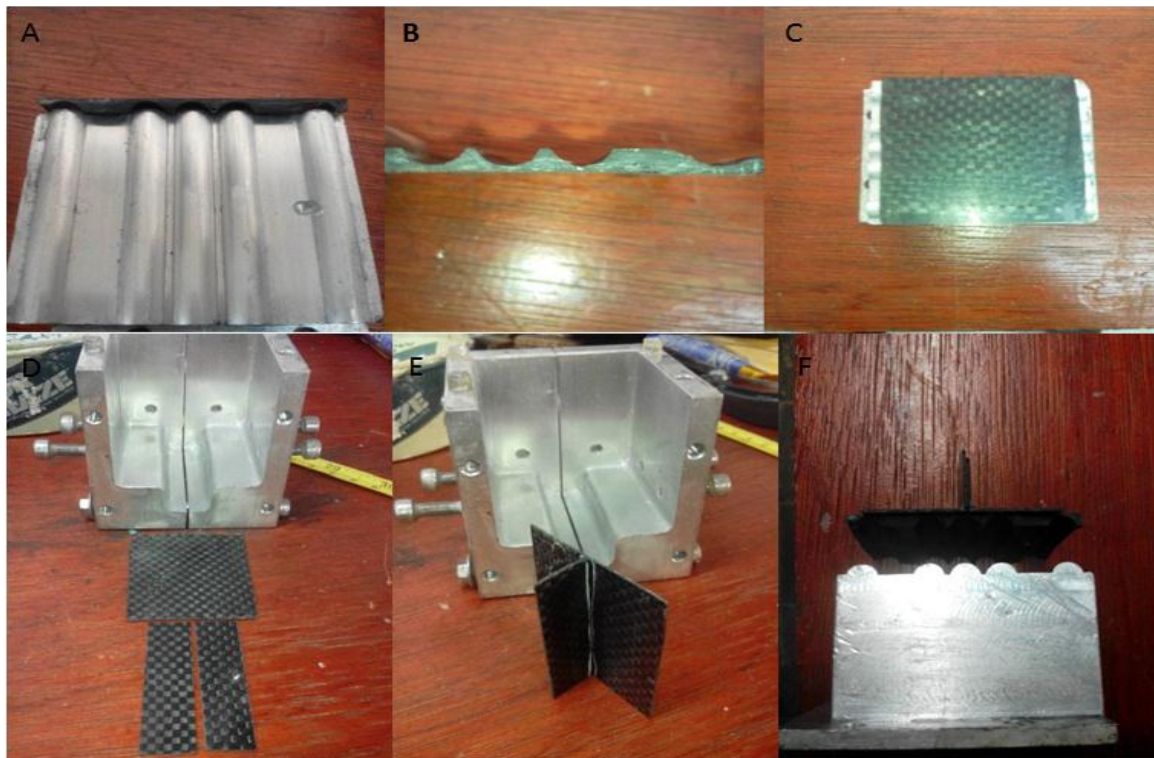


FIGURA 19 INSERTOS DE FIBRA DE CARBONO: RIZADO A, B, C Y MANDRIL PARA ENROLLAR EN FORMA DE T D, E, F.

4.6 PROCEDIMIENTO DE MANUFACTURA DEFINITIVO

En esta sección se detallan los por menores del procedimiento empleado y se analizan los efectos de diferentes bifurcaciones del mismo, que surgieron como acciones de mejoramiento continuo en la búsqueda de mayor eficiencia, rapidez y facilidad en el proceso de manufactura.

Para este trabajo se empleó el método de fabricación de moldeo por compresión. En general, el proceso consiste en pre-impregnar manualmente la tela de fibra de CF con resina epóxica, la cual se enrolla de manera ordenada y sistemática para lograr un preforma. Esta preforma se introduce en la cavidad de un molde cerrado, seguido se aplica presión mediante un pistón para compactar hasta que el compuesto adopta la forma del molde. La presión se mantiene a diferentes temperaturas hasta que la resina completa su curado y luego de varias horas se desmolda para retirar la pieza. El diagrama del proceso se muestra en la Figura 20. Luego se explica el paso a paso del procedimiento. Los materiales se enumeran a continuación.

Herramientas y Materiales: 1. Balanza, 2. Vasos desechables, 3. Palillo agitador, 4. Guantes de látex, 5. Cinta de enmascarar, 6. Llaves Allen, 7. Cera de desmolde, 8. Metro, 9. paños, 10. Tijeras, 11. Resina y endurecedor, 12. Tela de FC, 13. Molde especializado,

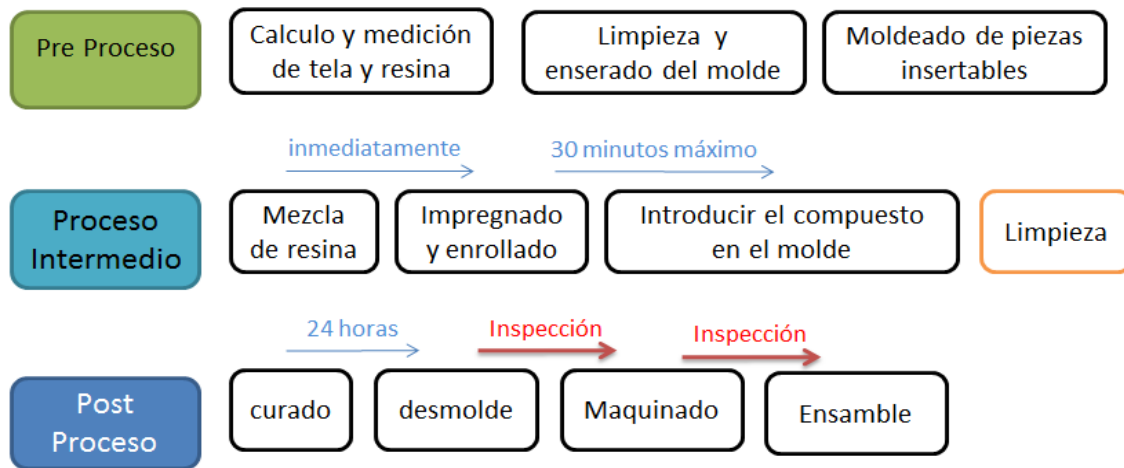


FIGURA 20 DIAGRAMA DEL PROCESO SIMPLIFICADO

Es importante conocer la densidad del compuesto CF/EP, la cual varía en la medida que cambia el porcentaje de fibra. Por esta razón fue necesario determinar la densidad el compuesto para un 70% de fibra ya que con este porcentaje se espera obtener buenos resultados en términos de compactación y distribución de fibra así como en acabados superficiales. Con los datos experimentales se obtuvo un valor aproximado de $\rho_{70\%} \approx 1.52 \frac{gr}{cm^3}$, dividiendo el peso de la pieza con su volumen teórico. Esta medida es un promedio dado que el porcentaje de fibra también oscilaba entre 68 y 72%. (El porcentaje de fibra se calcula con el peso inicial de la tela que es introducida al molde, comparada con el peso final de la pieza moldeada).

ECUACIÓN 1

$$\%_{fibra} \approx \frac{W_{tela-in}}{W_{pieza}}$$

4.6.1 CÁLCULO DE TELA

Se calcula la cantidad de tela utilizando el volumen de la pieza dibujada en CAD ϑ_{cad} en cm^3 . Este volumen se multiplica por la densidad del compuesto CF/EP (en una proporción $\frac{70}{30}$) la cual se nombra $\rho_{70\%}$ esta multiplicación nos da el peso teórico total de la pieza, luego se saca el peso de la tela, multiplicando por el porcentaje de fibra que será 70%. Con esta multiplicación se obtiene el peso de tela a utilizar (W_{tela}) Ecuación 2. Luego usando la Ecuación 3, conociendo la densidad de la tela por unidad de área $\rho_{\text{área}} = \frac{200 \text{ g}}{\text{m}^2}$ se calcula el área de tela requerida A_{tela} . La forma del área se elige en función de las dimensiones de la pieza.

ECUACIÓN 2

$$\vartheta_{cad} * \rho_{70\%} * 0.7 = W_{tela} (g)$$

ECUACIÓN 3

$$\frac{W_{tela}}{\rho_{\text{área}}} = A_{tela}$$



FIGURA 21 **A)** TELA DE FIBRA DE CARBONO DELIMITADA CON CINTA Y **B)** RECORTADA A LA MEDIDA.

Eligiendo la geometría se marca una porción de tela con el área calculada, se bordea el área de tela utilizando cinta de enmascarar en los límites para evitar que se descosa y deshílache, ver Figura 21. Se dejan de 2 a 4 milímetros de cinta dentro del área a utilizar (se puede apreciar en el borde de la tela).

Al partir de un trozo rectangular se puede optar por enrollar en una sola dirección o en varias direcciones como se hace con las piezas de Origami. Se puede enrollar en una sola dirección cuando la pieza tiene una sección transversal uniforme. Mientras más complicada sea la geometría mayor número de dobleces y en ocasiones se requiere utilizar más de un trozo de tela para ajustar su posicionamiento y así lograr una mejor adaptación al molde y una densidad uniforme. Con la Figura 22 se busca explicar una forma básica para cortar y doblar la tela para llegar a las dimensiones de la preforma. Para seleccionar el área a cortar se sugiere dejar el ancho de la tela W de tres a cuatro veces la dimensión de profundidad de la pieza, luego se determina el largo L dividiendo el área total (A_{tela}) por la medida seleccionada de ancho W , así se llega al trozo inicial de tela que tendrá unas dimensiones proporcionales a la preforma. Esta debe ser muy parecida a la forma de la pieza final ya que como se tiene una sola dirección de compactación es necesario posicionar las fibras de manera que su único movimiento dentro del molde sea en la dirección de la compactación.

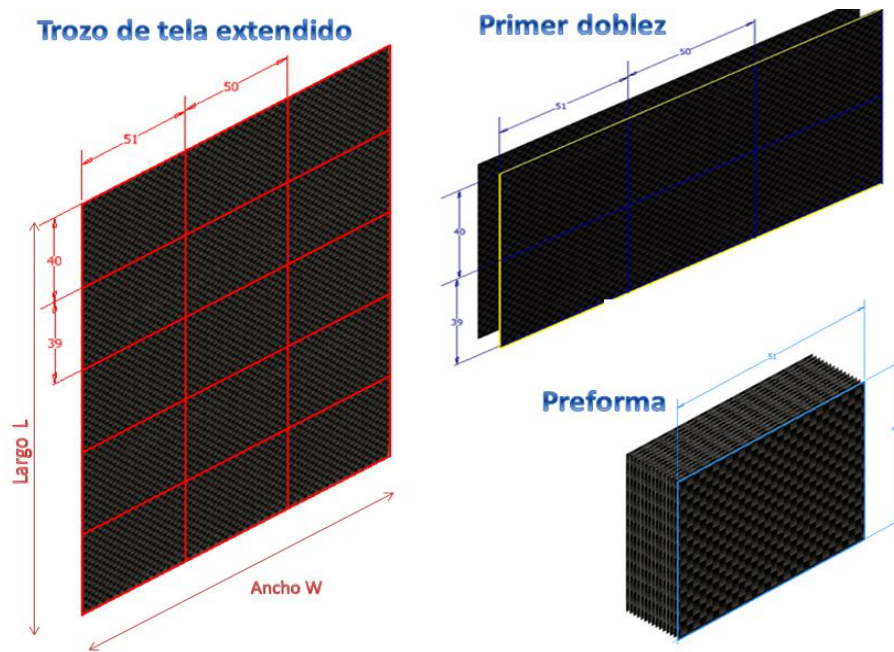


FIGURA 22 PROGRESIÓN DE ENROLLADO DE TELA PARA UNA PIEZA CON FORMA DE HEXAEDRO.

4.6.2 CÁLCULO DE RESINA

A partir del volumen del CAD se calcula la cantidad de resina que se necesita para la pieza. En esta técnica donde se necesita impregnar la tela antes de introducirla en el molde, es necesario dejar un exceso de resina para asegurar que todas las fibras se empapen bien. Para esto se toma un factor de 1.5 veces la cantidad de resina requerida. Como se ha mencionado anteriormente la meta es una pieza con 70% de fibra y 30% de resina en peso. Por lo tanto el peso se calcula a partir de la fórmula de la Ecuación 4:

ECUACIÓN 4

$$v_{cad} * \rho_{70\%} * 0.3 * 1.5 = W_{resina} (gr)$$

El peso total de la resina corresponde con la mezcla de resina y endurecedor, cuya proporción depende del tipo de resina que se esté utilizando. Para este caso la mezcla se hace con una relación de 100 g de resina por cada 15 g de endurecedor, como se muestra en la Figura 23.

El exceso de resina es retirado en una primera fase en el impregnado, también posteriormente durante el enrollado de la tela y finalmente en la compactación.



FIGURA 23 RESINA EPOXI Y ENDURECEDOR CON LA PROPORCIÓN UTILIZADA.

4.7 POSICIONAMIENTO DE FIBRAS

Un laminado consiste en una pila no consolidada de capas parcialmente impregnadas. Cada capa consiste en fibras alineadas, regiones ricas en resina circundante, micro-huecos dentro los núcleos de los manojos de fibras secos (entre fibras individuales) y macro-huecos dentro de las regiones ricas en resina situadas alrededor de los manojos de fibras o entre pliegues. Una vez que se aplica vacío, el aire es evacuado a través del núcleo del manajo, el contenido de macro-vacío disminuye, y el lecho de fibra es comprimido. Sin embargo, los manojos permanecen parcialmente secos. Una vez que la temperatura se eleva gradualmente, la resina infiltra gradualmente las zonas en seco para producir (idealmente) una microestructura libre de vacíos.

Se debe buscar la mejor forma de enrollar la tela teniendo en cuenta la dirección de las fibras pero sobre todo la cavidad que la tela llenará. La preforma es el resultado de los pasos de enrollado de tela y pueden ser complejos o simples como se muestra en la Figura 22 .

Para lograr llenar una cavidad de manera eficiente es necesario tener en cuenta su volumen pero también su topología de una manera detallada. Esto quiere decir que no es suficiente conocer la cantidad de tela que será utilizada sino la manera en que se orienta dentro del molde. En Figura 24 se muestra un ejemplo de un molde abierto con una sola dirección de compactación en la dirección vertical. Con este se busca explicar cómo afecta un escalón o protuberancia, la distribución de tela dentro de un molde con una sección trasversal uniforme. Como se puede ver el molde tiene sección transversal de E donde la línea central representa la protuberancia y las líneas de arriba y abajo las paredes del molde. El molde está abierto por el frente y por detrás y adicionalmente tiene una tapa superior con la cual se realiza la compactación en la dirección vertical. Se muestra como partiendo de una preforma con geometría de hexaedro y sección transversal rectangular, se llega a un llenado de cavidad deficiente, este se evidencia en las zonas señaladas en la Figura 25 por las flechas rojas y los puntos fucsia.

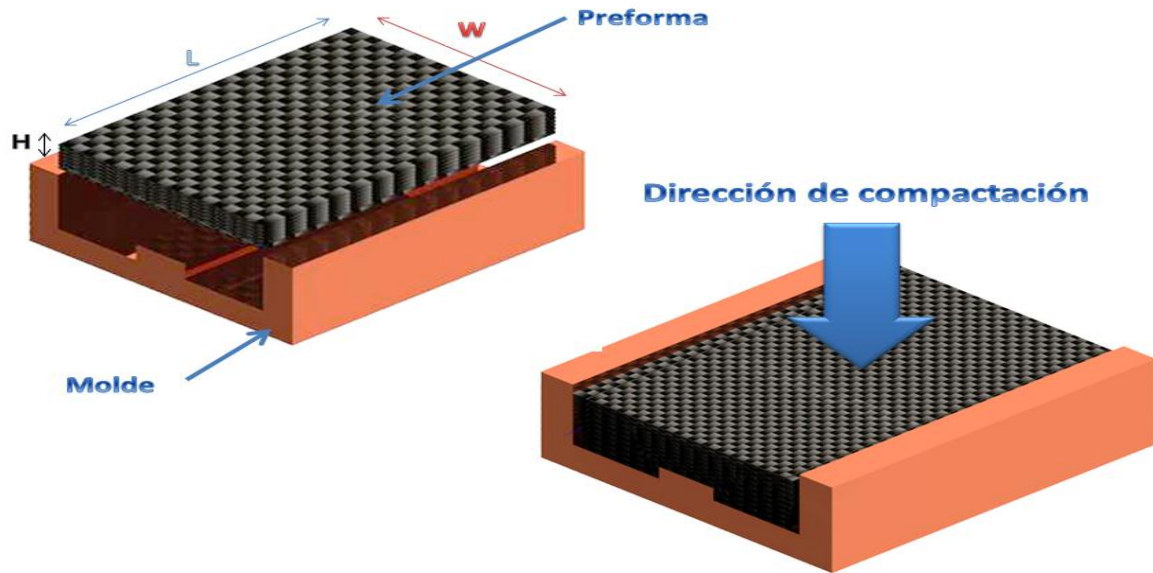


FIGURA 24 MOLDE CON FORMA DE E Y PREFORMA RECTANGULAR.

La Figura 25 muestra arriba la preforma en estado original y abajo el estado compactado dentro del molde. Las flechas muestran las zonas donde la tela no alcanza a llegar y los puntos zonas con densidades de tela diferentes. Para que la tela llene las esquinas se emplea una preforma con sección transversal trapezoidal ubicada con la cara más grande sobre la protuberancia, así el aumento de longitud permite a la tela adaptarse al recorrido disminuyendo las zonas con alta concentración de resina. Sin embargo aún existe la diferencia en la densidad de fibra que se genera cuando la misma cantidad de capas es compactada a diferentes alturas.

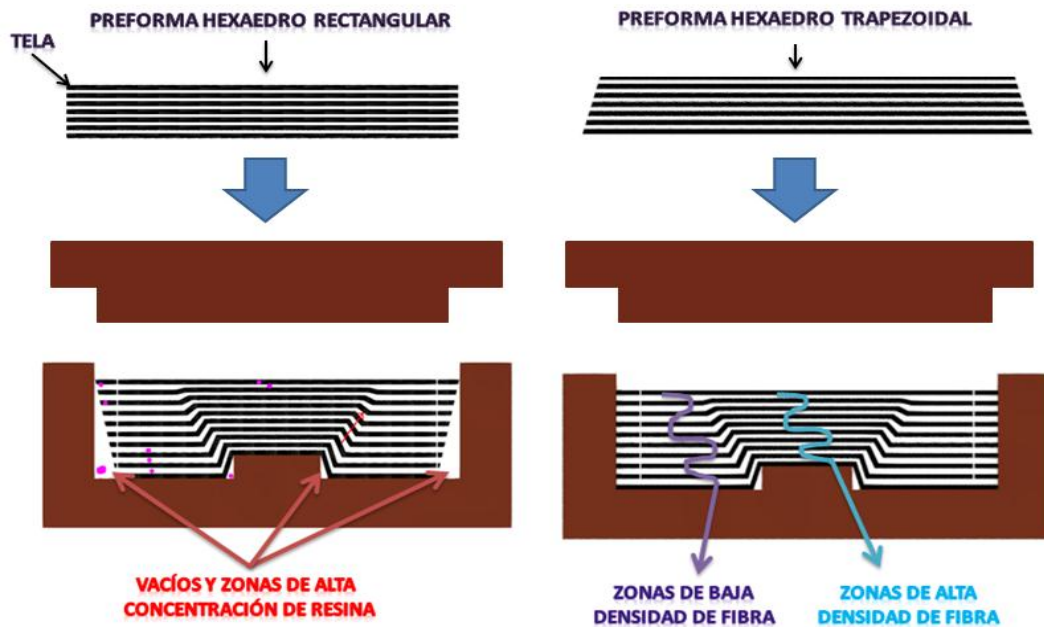


FIGURA 25 DEFECTOS GENERADOS POR FALLAS EN LA PREFORMA.

Como lo muestra la parte derecha de la Figura 25 la protuberancia reduce la altura del compuesto haciendo que la densidad de tela aumente en la zona inmediatamente superior por el contrario las zonas cercanas a las paredes laterales del molde tienen una mayor altura y la densidad de fibra es más baja. Para balancear la posición de la tela se recurre a incluir una porción de tela en los lugares donde la densidad es más baja. Para ello se sustrae de la porción de tela original calculada una cantidad proporcional al volumen que se desea aumente su densidad. En la Figura 26 se muestra con rojo la tela adicionada en las zonas de baja densidad también se puede notar que la tela de la parte inferior es ligeramente más larga para adaptarse a la protuberancia correctamente. En esta última fase se ha corregido los defectos de vacíos laterales y diferencia de densidades. Ambas son clave para la elaboración de un buen compuesto y pueden incluso prevenir sobreesfuerzos en el molde que lleven a su deterioro.

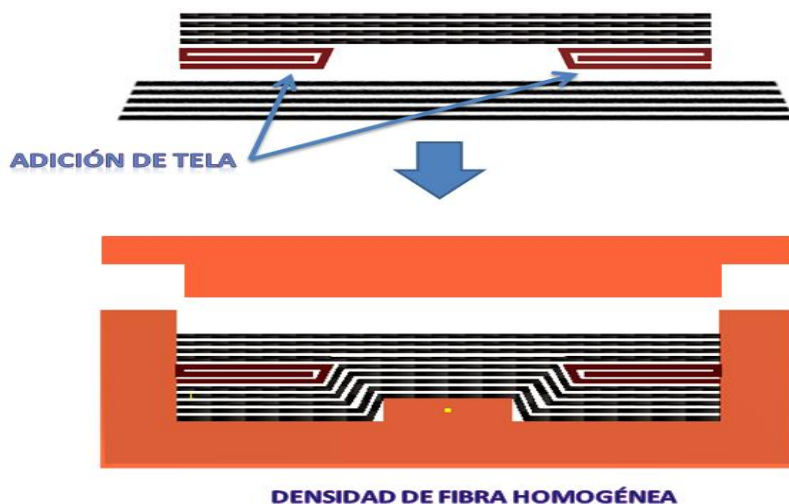


FIGURA 26 POSICIONAMIENTO DE TELA PARA MEJORAR LA HOMOGENEIDAD DE LA PROPORCIÓN FIBRA Y RESINA.

Cuando existen piezas cuya sección transversal no es uniforme se hace más complejo el posicionamiento de las fibras, se debe pensar en términos de la densidad, el volumen y el número de capas, cuando solo hay una dirección de compactación se puede pensar en términos del espacio vertical; cuanto más espacio vertical tenga, más capas se debe poner para encontrar la misma densidad de fibra. Así mismo cuando hay menos espacio vertical, se disminuye el número de capas para no crear espacios donde la densidad de tela sea excesiva, hay casos donde esto evita que el molde cierre completamente generando piezas con fallas dimensionales y mala compactación en algunas zonas.

4.8 RESULTADOS

Se obtuvieron seis piezas, cada una de las cuales tuvo una mejora significativa en la calidad superficial y en la cantidad de defectos con respecto a su antecesora. La técnica se pule con cada ensayo con variaciones en el patrón de enrollado y en el porcentaje de fibra que se utiliza. A continuación se muestra una vista general de las piezas, se puede ver que la calidad superficial mejoró conforme se avanzó en el proceso. En la Figura 27 se muestran a grandes rasgos los resultados obtenidos. Las piezas A, B, C y D tienen en la parte superior donde van los clavos zonas con macro-vacíos que no siguen la geometría del molde y representan un defecto estructural mayor, las piezas E y F copian mucho mejor esta estructura. Se destaca la pieza F la cual se construyó con el inserto rizado, en esta pieza la tela alcanza a penetrar casi todos los intersticios más angostos. En la tabla 1 podemos ver la composición de cada una de las piezas en porcentaje de fibra.

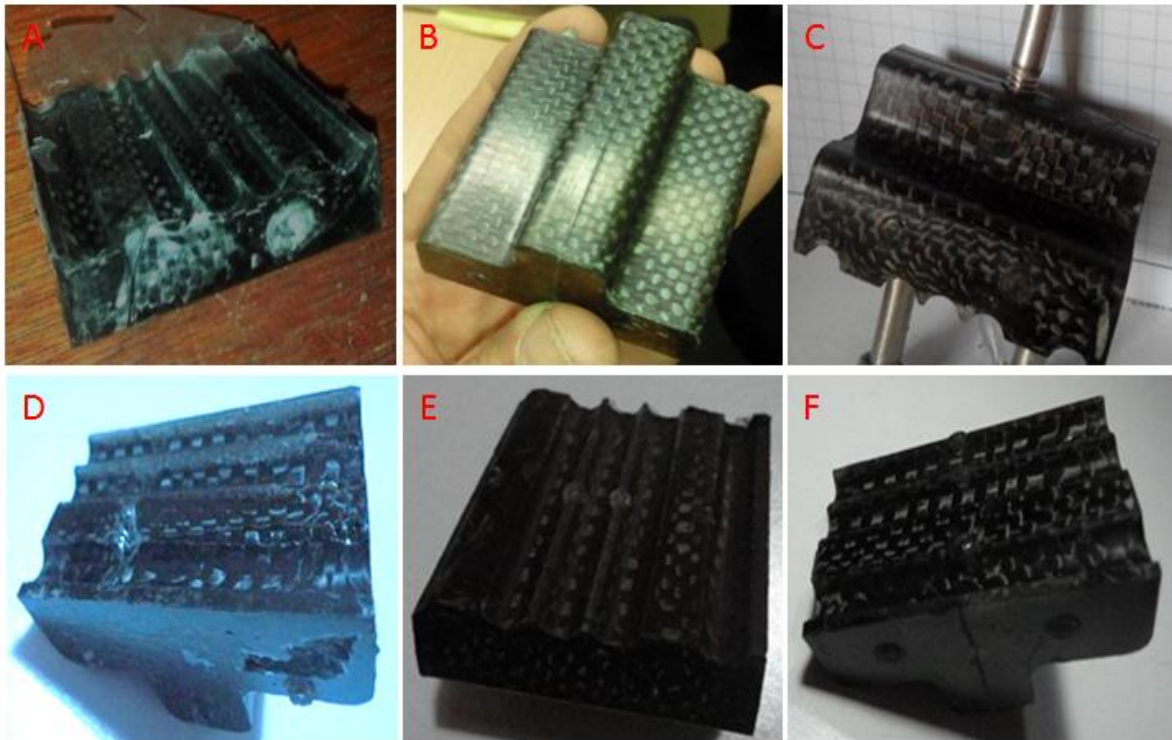


FIGURA 27 PIEZAS FABRICADAS, ORGANIZADAS EN ORDEN CRONOLÓGICO Y PORCENTAJE DE FIBRA VISTA MACRO.

TABLA 1 PORCENTAJE DE FIBRA DE CADA PIEZA

Espécimen	Peso total (gr)	Peso de la tela (gr)	Porcentaje de fibra (%)
A	57,52	29,59	51,40
B	57,17	29,59	51,70
D	58,29	34	58,40
F	59,50	35,4	59,50
G	60,00	41,7	69,50

4.8.1 ANÁLISIS MACRO ESTRUCTURAL

Para profundizar en la calidad de las piezas fabricadas se analizaron los recorridos de la tela y la distribución a lo largo de la probeta. Para esto se realizó un corte transversal de la pieza por la mitad y se pulió con lijas de 220

hasta 1200 progresivamente finalizando con una pasada con alúmina de 0.05 μm en un paño húmedo. El resultado se muestra en la Figura 28.

En general se puede decir que la cantidad de tela está bien distribuida interiormente y sigue el patrón de diseño. También se nota que la distancia entre capas de tela o dicho de otra manera, la compactación del compuesto, aumenta con el porcentaje de fibra y de la misma forma las zonas de solo resina disminuyen. Específicamente se puede ver variaciones entre las distintas probetas, se destaca la disminución de macro burbujas atrapadas a medida que se aumenta el porcentaje de fibra. La Figura 28C corresponde a una probeta construida con un inserto de aluminio buscando una mejor distribución y compactación de las fibras. En las últimas tres probetas D, E, F ya no se observan macro- vacíos sin embargo en todas las probetas se observa zonas en donde no hay fibra.

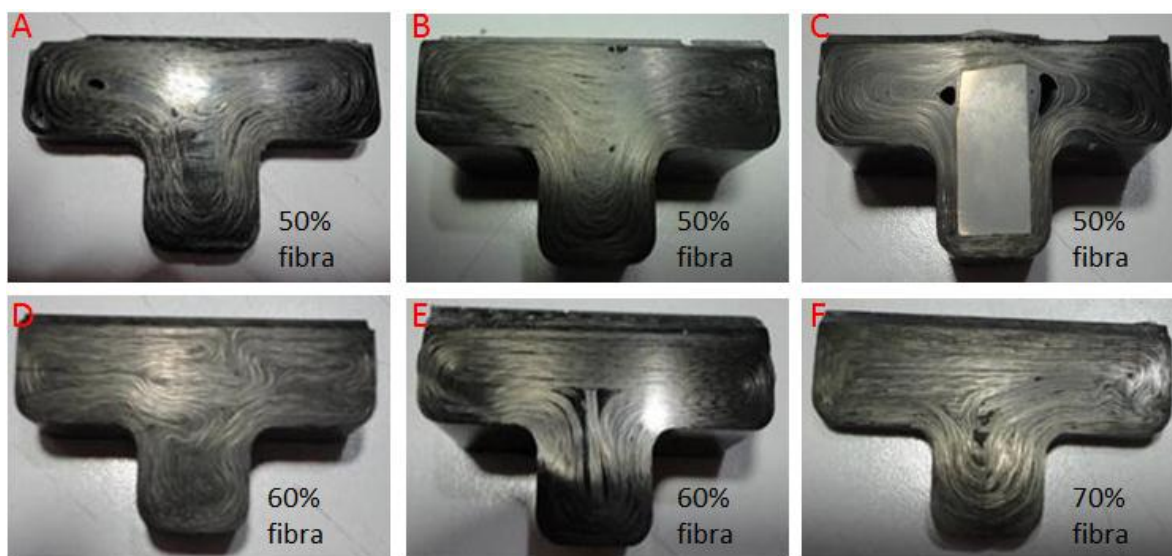


FIGURA 28 CORTE TRASVERSAL DE LAS PIEZAS FABRICADAS. ORGANIZADAS EN ORDEN CRONOLÓGICO.

Con las imágenes de la Figura 28 se puede analizar el recorrido de la tela, y determinar cuáles zonas tienen más compactación y en qué lugares casi no hay tela. Mientras más juntas estén las líneas, hay más compactación, y cabe resaltar que al no ser un laminado plano, la compactación no es uniforme a lo largo de la pieza. En general se observa que la zona central se caracteriza por tener grandes acumulaciones de resina. Esto se explica por el patrón de enrollado y la dirección de compactación. En la mitad de la pieza E se ve claramente la dificultad de la tela para adaptarse a giros de 270 y 360 grados; Cuando un doblez es paralelo a la dirección de compactación se compactara fácilmente y las capas quedaran planas y si hay suficiente tela, paralelas. Ver las puntas superiores de la “T” donde la tela escribe una C. En las piezas A, B y C se da este fenómeno y se pueden ver zonas grandes de solo resina. Esto se debe a falta de fibra lo que implica menos compactación. En contraste las piezas E y F tienen mayor cantidad de fibra y por eso la compactación es mayor y la tela queda casi paralela. Por otro lado si el doblez es perpendicular a la dirección de compactación generalmente dejara un espacio de resina como se puede ver en el centro de las probetas A, B, C y E. Otra forma de verlo es la medida de ondulaciones de la tela mientras más rectas y paralelas sean las fibras mayor compactación.

4.8.2 ANÁLISIS MICRO ESTRUCTURAL

En las siguientes figuras 29-33 las superficies blancas son fibra de carbono paralela a la superficie y las zonas azules la matriz epoxica. También se pueden ver círculos pequeños y a veces más grandes que corresponden a

las burbujas de aire o gases volátiles de la resina. Se observó con un aumento de 25x analizando diferentes puntos, para cada una de las piezas se sacaron 8 puntos de interés las 6 esquinas, cerca de la superficie de arriba y el centro. Con este aumento se ve claramente la distribución de la tela y algunos defectos como vacíos y zonas ricas en resina.

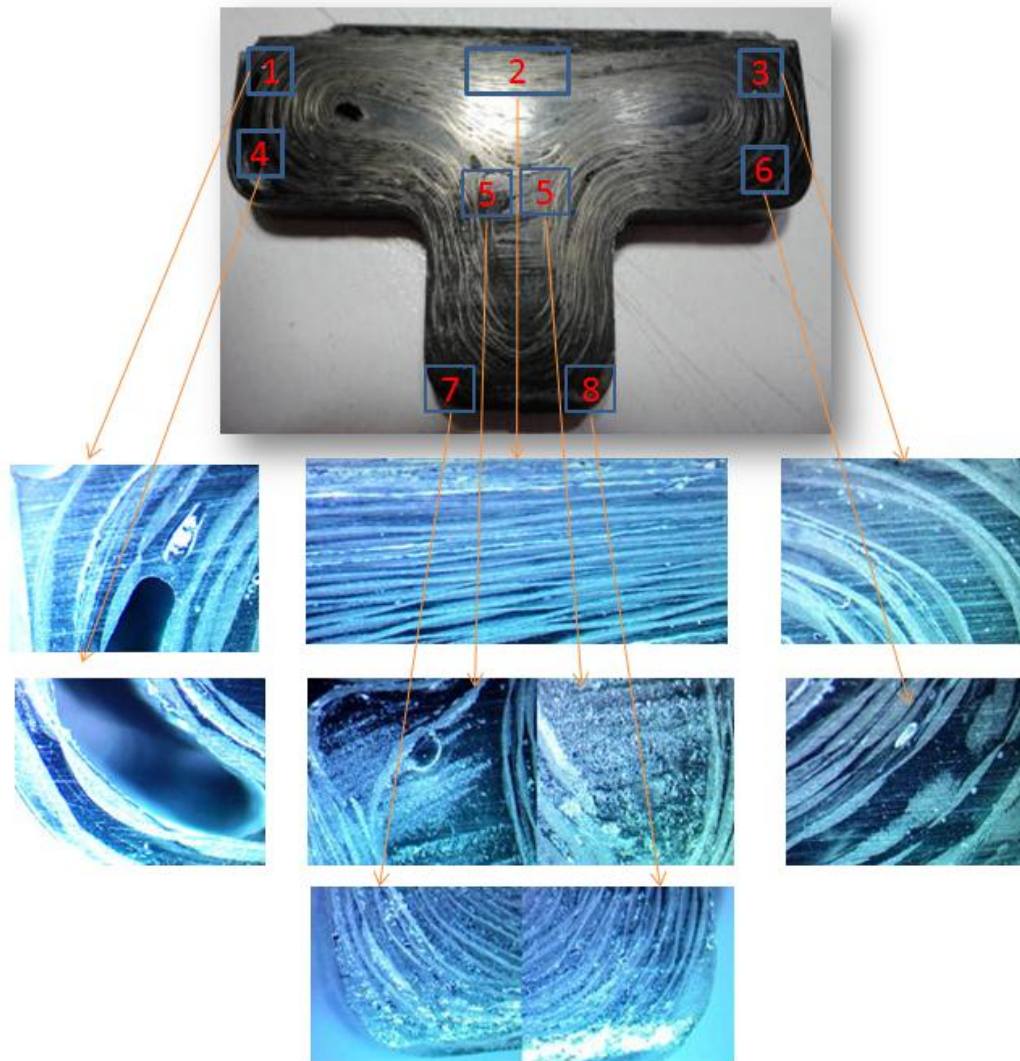


FIGURA 29 PIEZA A MICROSCOPIO 25X EN LOS 8 PUNTOS DE INTERÉS.

La pieza A con 50% de fibra y sin insertos se muestra en la Figura 29, se puede ver macro vacíos de aire en las zonas **1, 4, 3 y 6**. Se nota también que la separación entre capas de tela es grande lo cual evidencia falta de compactación. También se ve frecuentemente lugares en donde solo hay resina, zona **5** como en el centro y en las esquinas inferiores. Así se puede asegurar que esta pieza es poco homogénea y el posicionamiento de las fibras no es adecuado. De la tabla 1 podemos ver que la proporción fibra resina es baja, este factor determinante, es principalmente por esta razón que el llenado de la tela es insuficiente.

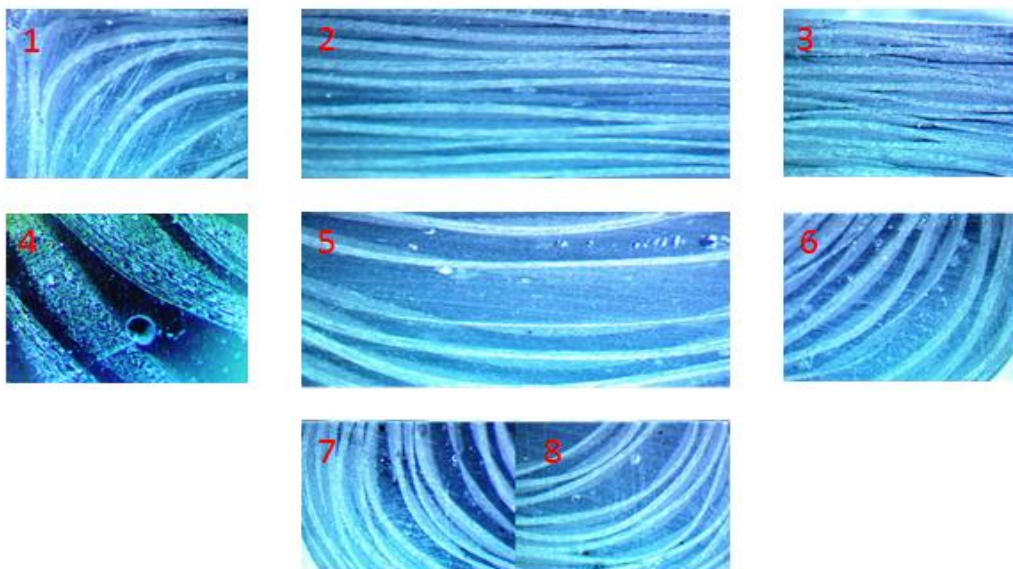
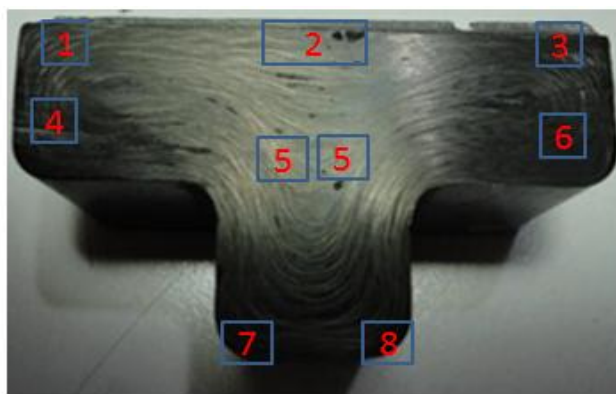


FIGURA 30 PIEZA B MICROSCOPIO 25X EN LOS 8 PUNTOS DE INTERÉS.

En la pieza B correspondiente con un 50% de fibra sin insertos pero on una mejora en el enrollado se muestra en la Figura 30, se alcanza a ver algunos poros y zonas oscuras donde hay exceso de resina. En la parte superior, zona 2, se ve como la distancia entre capas es más pequeña mientras que en el centro y en las esquinas se da una mayor separación, zonas **4, 5 y 6**. En las esquinas también se ve como a medida que nos acercamos al centro la distancia entre capas aumenta. En esta pieza se tiene un porcentaje de resina muy similar al de la pieza **A** 51.7%, pero el enrollado de la tela se ajustó mejor a las dimensiones del molde es por ello que hay un aumento significativo en la calidad de las superficies y una mejor distribución de las fibras al interior, la que se evidencia en la separación más uniforme de las capas. De igual forma, al ser la proporción fibra resina insuficiente se siguen teniendo macro vacíos en otras partes de la pieza, como por ejemplo en la parte superior. En este ensayo se logró darle una mejora estética a la pieza con respecto a su antecesora.

La microestructura de la pieza C no fue analizada en detalle por considerarla impráctica debido a la inclusión de una pieza metálica en su interior.

En la pieza D se utilizó un 60% de fibra y se enrolló la tela poniendo énfasis en mejorar la posición de la tela en las paredes del molde, ver Figura 31. Las capas están mucho más cerca entre ellas y dejan menos espacio de solo resina, sin embargo, estas zonas todavía existen, generalmente en la parte central o en donde la tela se pliega zonas 2 y 5. En esta pieza se intentó una distribución de enrollado diferente a los anteriores.

Posicionando la tela directamente sobre el molde para asegurar que alcanzara las esquinas inferiores y dejando dos puntas libres para que la tela tuviera mayor libertad de movimiento y se acomodase mejor en la zona central con la ayuda de la compresión, lo cual se logró. Se puede notar también que la cantidad del refuerzo ayuda a tener mayor compactación y las zonas de vacíos son mínimas al igual que las zonas de solo resina.



FIGURA 31 PIEZA D MICROSCOPIO 25X EN 8 PUNTOS DE INTERÉS.

La Figura 32 muestra la pieza E la cual tiene un 60% de fibra y dos insertos de fibra de carbono uno para darle forma de T y estructura a la preforma y otro para mejorar la adaptación de la tela al rizado de la parte superior donde van los calvos que se atornillan al hueso. Se obtuvo acabados superficiales y distribución de tela muy buenos en la superficie de la pieza; sin embargo existe una zona de solo resina que se limita al centro de la pieza zona 5, alrededor del lugar donde se encuentra el inserto de FC. La compactación es buena ya que las fibras están juntas, aunque se observa en la parte inferior zonas 7 y 8 poros y gran separación entre capas. En la parte superior la compactación es muy buena y se alcanzaron la mayoría de los detalles con la tela esto gracias al inserto rizado.

En la última pieza F, mostrada en la Figura 33, se utilizó un inserto en forma de T, se excluyó el inserto rizado y se subió el porcentaje de fibra al 70%. Se obtuvo un buen acabado superficial sin embargo los detalles de la parte superior no fueron tan bien copiados. Además, el inserto en forma de T se desarmó y salió de su lugar

desplazando también la posición de las capas de tela, zonas **5** y **6**. Por lo anterior, y por una pobre distribución de la tela se presentan las ondulaciones. Sin embargo, se observa una buena compactación con poca presencia de vacíos inter-capas (manchas negras) zona 5.

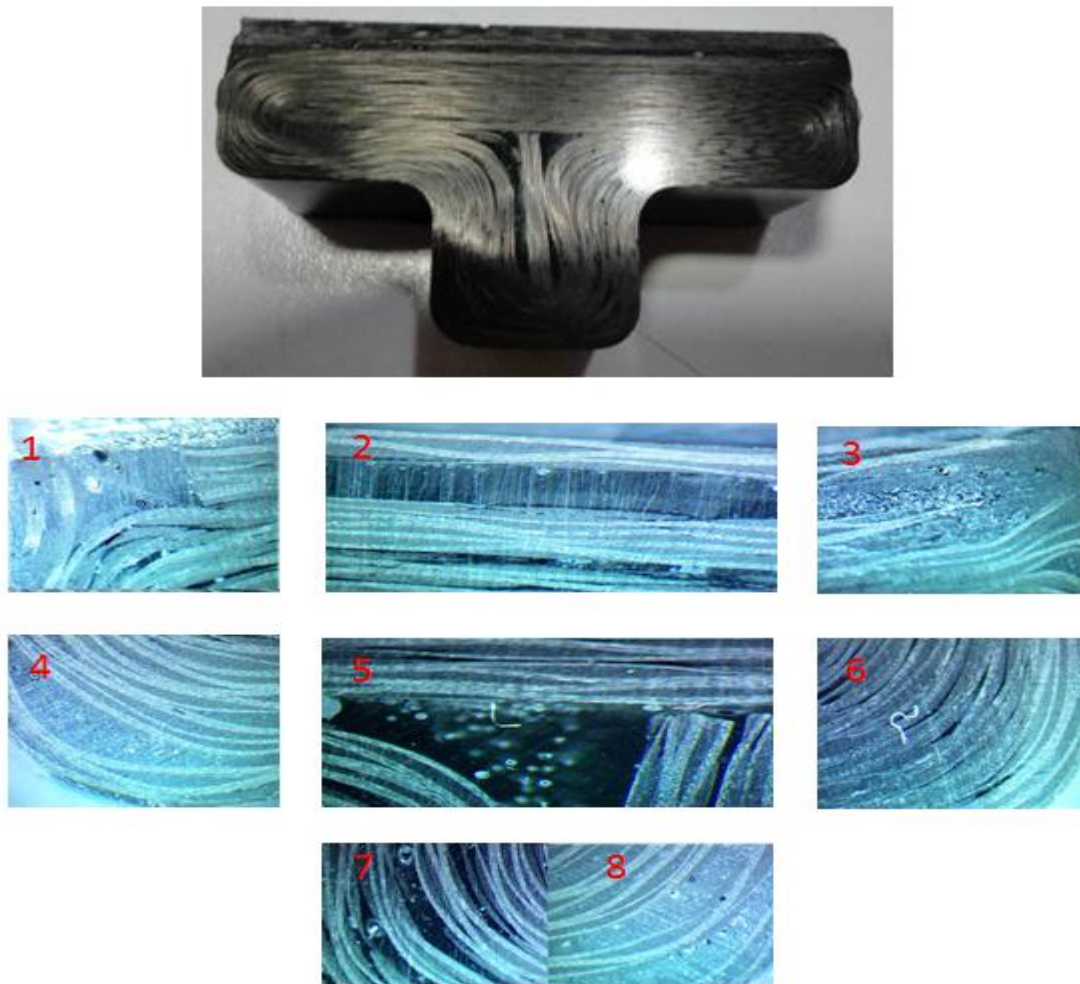


FIGURA 32 PIEZA E MICROSCOPIO 25X EN 8 PUNTOS DE INTERÉS.

Finalmente se midió el tamaño de los poros más frecuentes, la mayoría superaban los 100 μm como se ven en la Figura 34. Para complementar este análisis se hicieron micrografías con un aumento de 400X en donde se pueden ver las fibras paralelas y perpendiculares al corte, los puntos redondos son fibras perpendiculares y las líneas blancas son fibras paralelas ver Figura 35. Esta topología es muy común en la bibliografía, que aunque parecen muy similares las unas de las otras existe variaciones importantes en la composición, la proporción de fibra, resina y vacíos puede cambiar drásticamente de un lugar a otro dentro de la pieza. Esto ayuda a determinar la homogeneidad de la pieza. Como se ve en la Figura 35 las dos primeras probetas imágenes 1 y 2 son más oscuras debido a la alta concentración de resina y en las zonas más negras se supone un vacío o zonas de baja impregnación de las fibras. En las probetas siguientes 3, 4, 5 y 6 se les ve mucho más contenido de fibras en toda la zona, en general se puede decir que la distribución de las fibras perpendiculares es casi hexagonal (esto indica una buena compactación) pero resulta difícil determinar si existen zonas donde las fibras se encuentren secas.

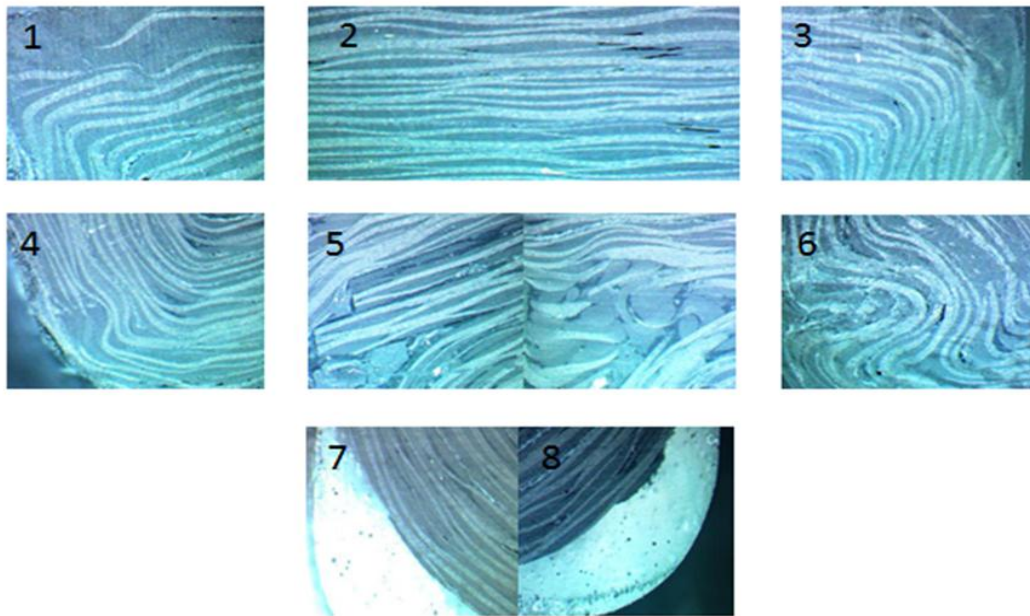


FIGURA 33 PIEZA F MICROSCOPIO 25X EN 8 PUNTOS DE INTERÉS

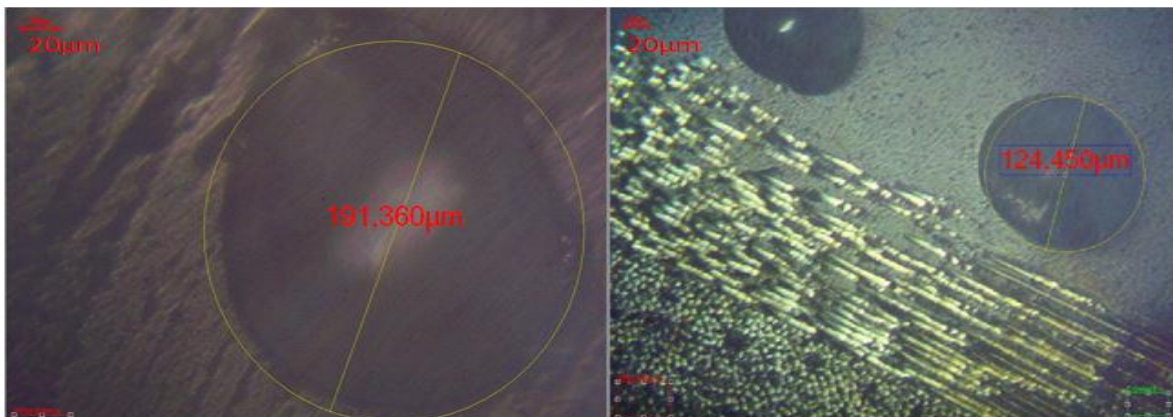


FIGURA 34 TAMAÑOS DE LOS POROS

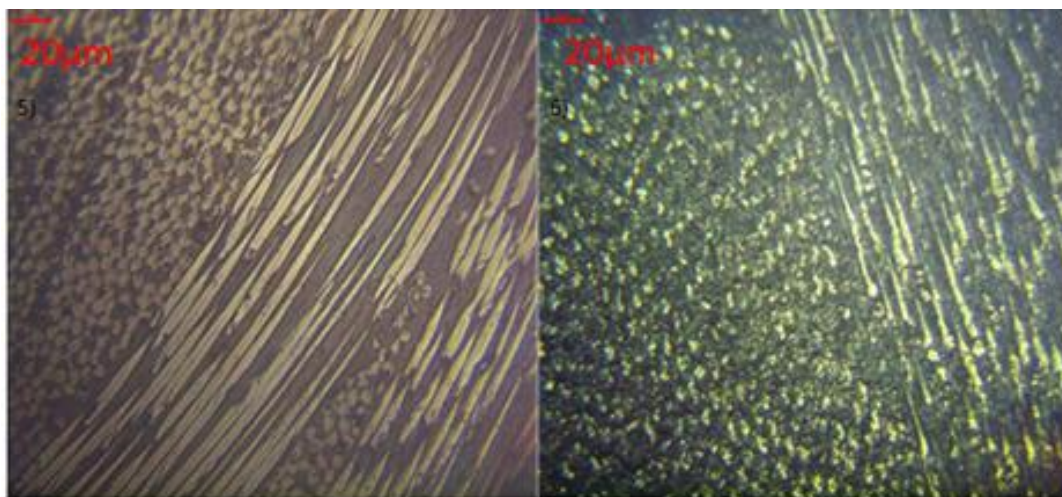


FIGURA 35 MICROESTRUCTURA DE LA FIBRA PARA CADA UNA DE LAS PIEZAS EN ZONAS DE ALTA COMPACTACIÓN.

5. CONSTRUCCIÓN DE UN FIJADOR EXTERNO DE FIBRA DE CARBONO

5.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO

El fijador externo tiene como función mantener una posición entre dos fragmentos de hueso, la posición relativa entre estos debe mantenerse en unos intervalos de movimiento limitados. Los movimientos cortantes son críticos mientras que los movimientos axiales son beneficiosos para el tratamiento, ya que estimulan la formación del callo óseo y pueden estar en el orden del milímetro en compresión. En términos generales se puede definir las características estructurales de un fijador por medio de su rigidez en: Plano medio lateral, plano anteroposterior, en la dirección axial y rotacional. Gracias a un estudio previo [28], A. Leyton obtuvo valores de prototipos comerciales con los cuales se ajusta el diseño. En este documento también se especifican dimensiones permisibles funcionalidades y número de partes. Teniendo esta base se buscó una geometría adecuada para la manufactura en fibra de carbono. En un comienzo se pensó en utilizar elementos comerciales para el riel. En trabajos anteriores [29] se ha utilizado varillas circulares solidas de fibra de carbono y por ello el diseño de la prensa se concibió con una geometría con forma de T para utilizar vigas rectangulares o cuadradas. De esta forma se avanzó con la experiencia y manufactura de piezas complejas con esta primera propuesta de diseño. Además se puede mencionar que para la selección de un riel se siguió la comparación realizada para diferentes geometrías en [28] donde se puede dimensionar el área de la sección trasversal en función de la geometría seleccionada.

Para la geometría del riel, se tomó una forma similar a la del riel de Orthofix el modelo Long Model por su rigidez y la presencia de una ranura rectangular que puede ser maquinada fácilmente. Se le planteó la simplificación de la aleta lateral cuya función de proporcionar menor juego rotacional en las prensas, sería reemplazada por tolerancias más estrechas en las ranuras del riel y la prensa. La sección trasversal puede verse en la Figura 36A. Luego de esto se diseñó una prensa que deslizara en este riel, lo cual dio como resultado una geometría muy similar a las prensas de Orthofix de aluminio con la simplificación de las aletas externas (Figura 36B). Se sabe por la experimentación que los módulos de elasticidad del compuesto fabricado FC/EP son muy similares a los del aluminio y por ello las dimensiones concuerdan con las del modelo de Orthofix. Para evitar maquinar roscas sobre el material compuesto, implantaron en las piezas unos insertos de Polyether ether ketone (PEEK) sobre el cual se maquinaron las roscas. Los insertos se pegaron sobre las piezas con un aglutinante epóxico. El diseño sin los insertos de las roscas se muestra en la Figura 36 B y C.

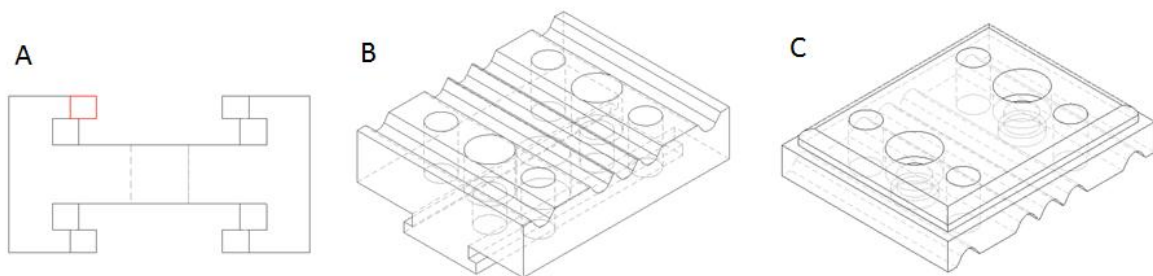


FIGURA 36 A SECCIÓN TRASVERSAL DEL RIEL, B FORMA DE LA PRENSA, C GEOMETRÍA DE LA TAPA.

Una vez definida la geometría del prototipo se define el proceso de manufactura el cual se realiza en tres etapas; una etapa de moldeo, una de maquinado y una de adhesión de insertos para las piezas que llevan roscas. En el proceso de diseño estas etapas son interdependientes y deben ser definidas desde el comienzo. En términos generales se procura mediante el proceso de moldeo llegar a una pieza con la mayor cantidad de características de la pieza final dejando el maquinado para las formas que sean muy difíciles de lograr en el moldeo, como serían las ranuras y los agujeros, y utilizando la adición de insertos solo para geometrías que no puedan conseguirse sobre el compuesto como es el caso de las roscas. En la Figura 37 se muestra las tres etapas principales de fabricación para la parte del riel de la prensa y en la FIGURA 38 las dos etapas de fabricación de la tapa.

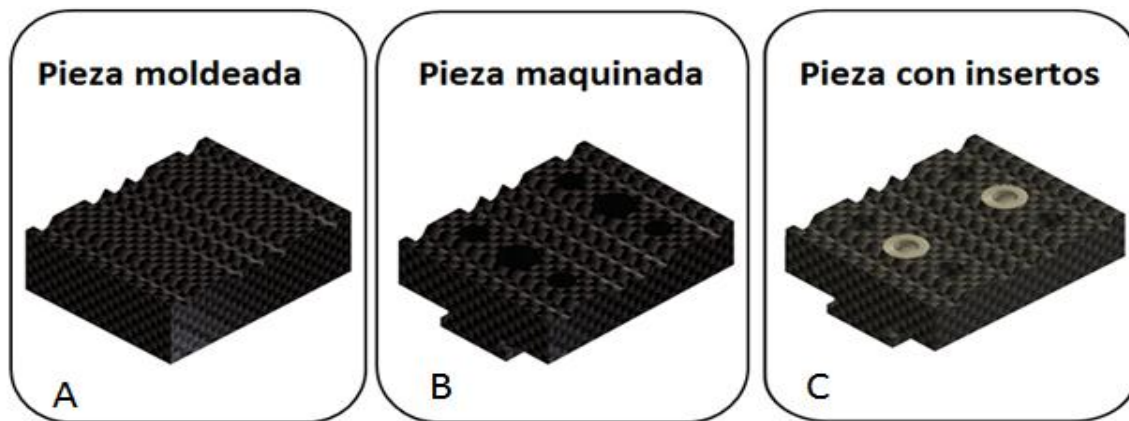


FIGURA 37 ETAPAS DE FABRICACIÓN PARA LA PARTE PRINCIPAL DE LA PRENSA.

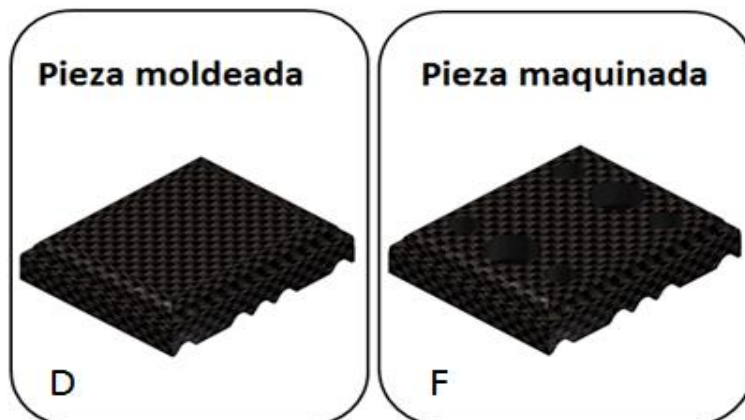


FIGURA 38 ETAPAS DE FABRICACIÓN PARA LA TAPA DE LA PRENSA.

5.2 DISEÑO DE MOLDES

Para la fabricación de las piezas mostradas anteriormente se concibió un molde cerrado con la capacidad de fabricar las piezas precursoras de ambas partes finales: las prensas y las tapas. En el diseño de este molde se ha implementado las mejoras del estudio anteriormente descrito en la sección 4.3, gracias a ello se ha elevado el espesor de la tapa delantera y también el espesor de los agujeros para los tornillos de la tapa superior y ahora son de $\frac{3}{4}$ de pulgada, este es el elemento que está sujeto a los esfuerzos durante la

compresión. Además se han realizado ranuras tanto en el pistón de la tapa superior como en las uniones del molde con el fin de sellar el molde, direccionando la resina al agujero de desahogo que ahora es más grande. Nuevamente se manejó un agujero roscado de extracción en la parte 2, para separar las partes 1 y 2.

Para fabricar la prensa se utilizan las piezas 1, 2, 3 y 5 del molde mostrado en la Figura 39. Mientras que para fabricar la tapa se utilizan todas las piezas incluyendo la 4 que sirve para reducir el espesor de la pieza y a la vez darle un acabado redondeado en las puntas. Esta pieza se posiciona en el interior de la cavidad cuando las piezas 1, 2 y tres se encuentran ensambladas.

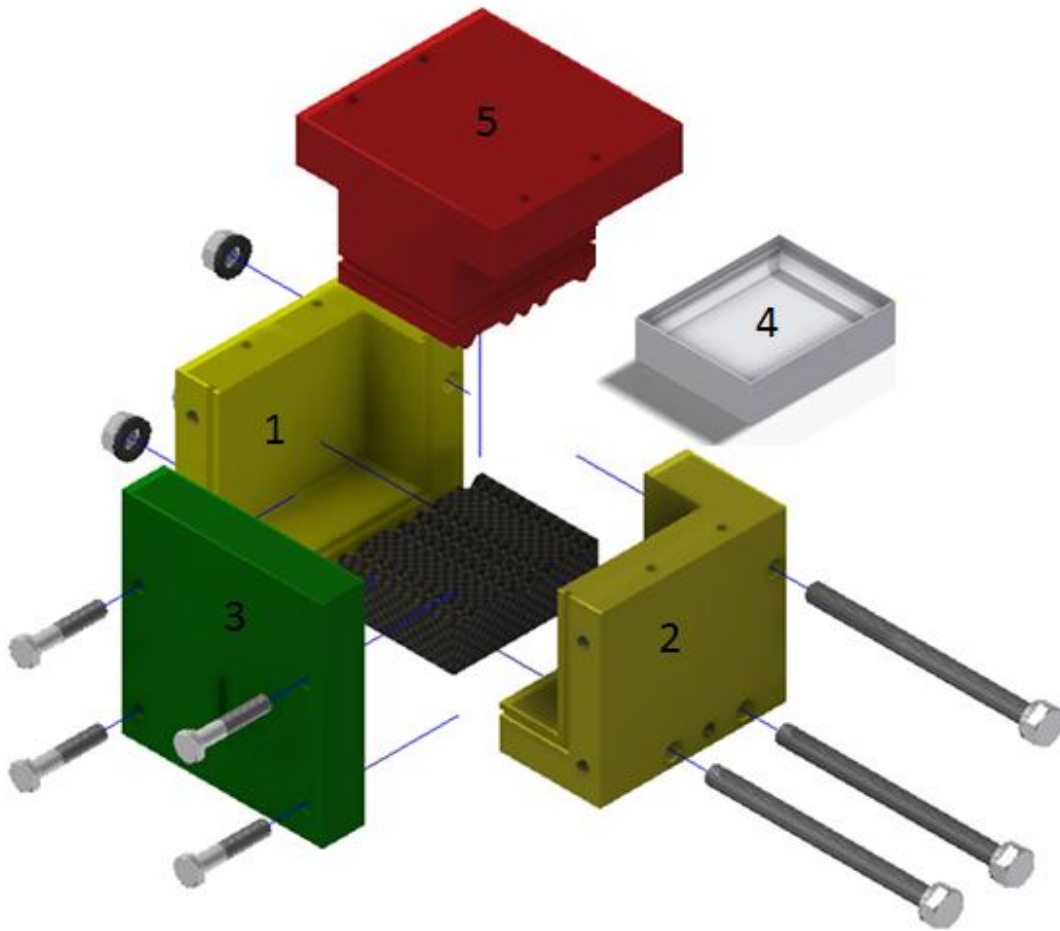


FIGURA 39 MOLDE PARA FABRICACION DE PRENSAS DE UN TRASPORTADOR DE HUESO CON RIEL EN FORMA DE "I". EXPLOSIONADO.

5.3 ANÁLISIS DE POSICIONAMIENTO DE FIBRAS Y ENROLLADO

Para la construcción de la preforma se siguió el procedimiento final que se explica en el capítulo anterior. Se tiene un volumen de 31.75 cm^3 y con ello se calculó un área de 169 cm^2 de tela y la resina necesaria se calcula en 15 g más 50% de desperdicio (21 g). Al momento de enrollar la tela fue necesario hacer un análisis de posicionamiento de tela con los conceptos explicados anteriormente.

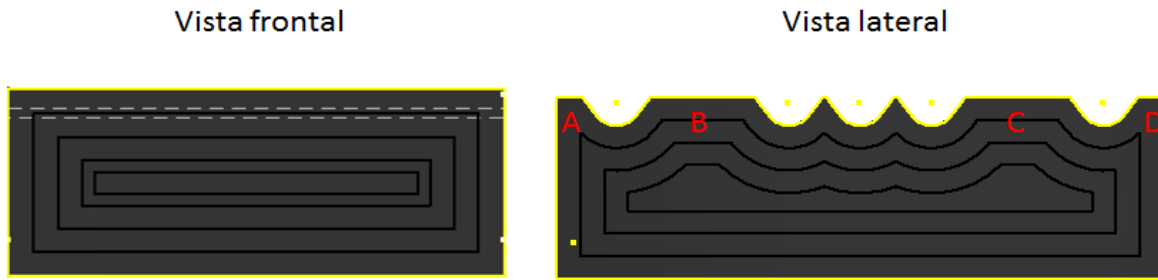


FIGURA 40 ANALISIS DE POSICIONAMIENTO DE TELA DENTRO DE LA PRENSA.

Para diseñar el enrollado de la tela se hace un análisis de la sección transversal desde la vista frontal y la vista lateral las cuales se muestran en la Figura 40, como se puede notar en la vista frontal la sección es rectangular, no hay ninguna diferencia de alturas dentro de cualquier corte transversal lo cual implica que no debe hacerse adición de tela perpendicular a esta vista. Por el contrario en la vista lateral de la Figura 40 se observa una sección transversal con múltiples diferencias de altura las más importantes se señalan con letras rojas. Estas diferencias se pueden solucionar de dos maneras. Para el caso de los extremos se puede enrollar la preforma de tal manera que la longitud de tramo **AD** se más larga que la de la pieza original para que al embutirla en el molde se compacte más la zona de los extremos. Para el caso de las zonas **B** y **C** es necesario hacer una adición de tela en la dirección perpendicular a esta vista. El volumen de esta porción se calcula con ayuda del CAD, Figura 41A, donde la parte con textura de fibra de carbono es el volumen que se va a adicionar. En este caso el volumen fue de $3,4 \text{ cm}^3$, se calcula el área de tela por medio de la Ecuación 1 y Ecuación 2 y se llega a un área de tela de 18 cm^2 . El área es dividida en dos y se llega a trozos de $25 \text{ cm} * 3.6 \text{ cm}$. En la Figura 41 B se muestra el trozo total de tela y el área correspondiente a la adicción localizada A_a .

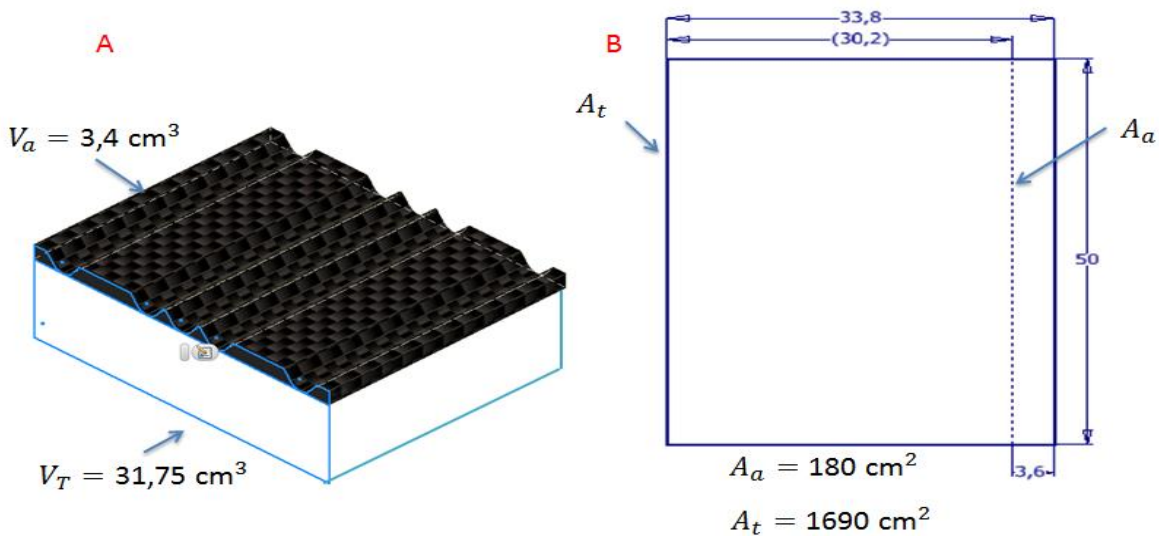


FIGURA 41 VOLUMENES Y AREAS TOTALES Y PARA ADICIONAR DE LA PIEZA RECTANGULAR.

Una vez seleccionado el tramo total de tela se recorta el área para la adición y se divide en dos. Cada uno de estos pedazos se dobla a su vez en 4 partes por el lado más angosto dejando tiras de $0.8 * 25 \text{ cm}^2$ los cuales se muestran en la Figura 42.B. El resto de la tela se dobla en la mitad dejando un pedazo de $30.2 * 25 \text{ cm}^2$. Las tiras de adición se posicionan en la mitad del segmento de $3.8 * 25 \text{ cm}^2$ mostrados en la Figura 42.B. Luego este tramo se dobla aprisionando las tiras quedando la tela de la forma de la Figura 42.C.

Luego la tela se dobla por el lado de 25cm de 5 en 5 hasta obtener un doblez de 5.25cm*26.4cm obteniéndose el resultado mostrado en la Figura 42.E. Finalmente, se enrolla la tela que queda alrededor del tramo de 3.9cm hasta llegar a una preforma de aproximadamente 5.25cm*4.3cm, que tridimensionalmente se verá como la preforma de Figura 22. Para la tapa se realizó el mismo procedimiento y se llevó a cabo un análisis de enrollado parecido al anterior dada la semejanza entre las dos piezas.

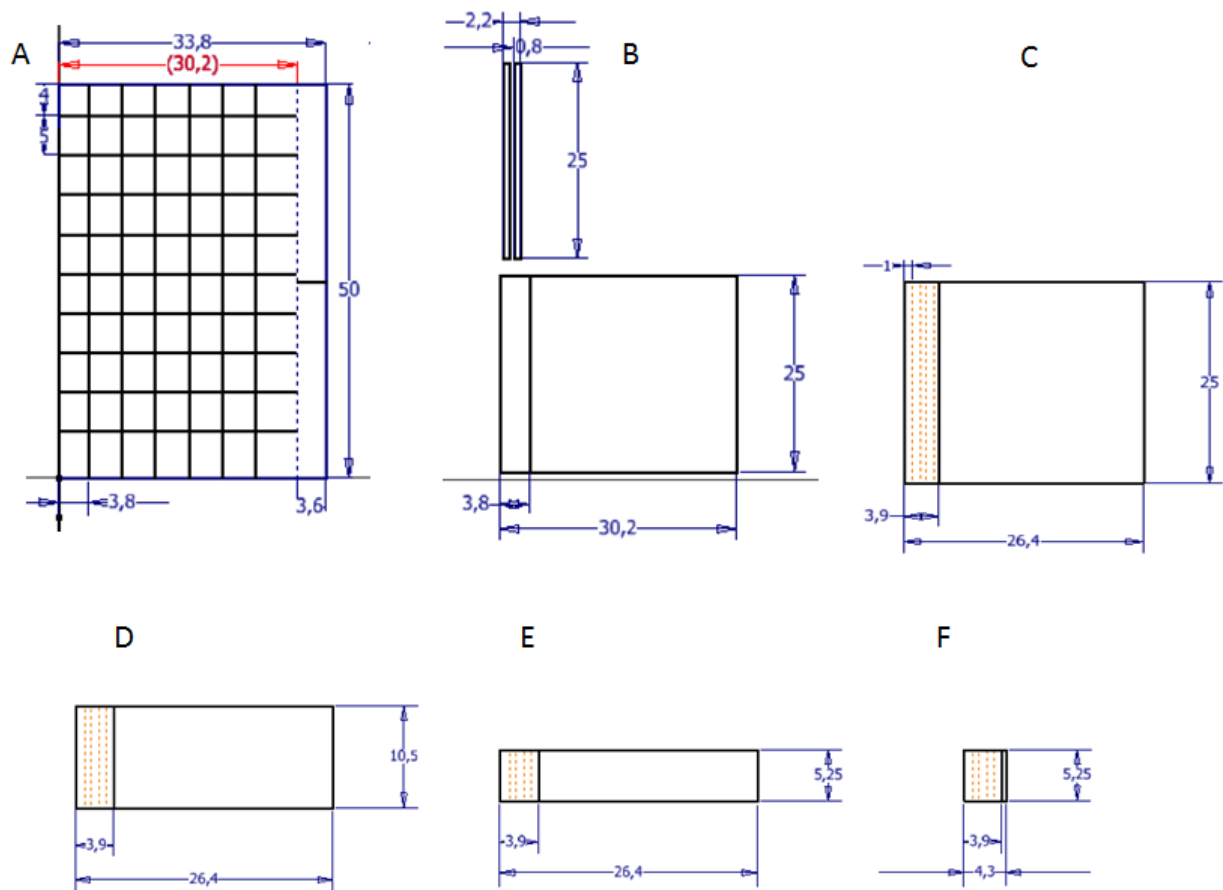


FIGURA 42 PASO A PASO PARA EL ENROLLADO DE LA TELA PARA LA CONSTRUCCION DE LA PRENSA RECTANGULAR.

5.4 CURADO

Siguiendo estos parámetros se fabricaron 6 piezas de cada una para construir dos sistemas completos de transportadores óseos. Para evaluar el efecto de un tratamiento térmico en el desempeño de fijador se realizó, a tres de las piezas, un curado a temperatura ambiente y a la otra un ciclo de curado térmico de 4 horas según el gráfico mostrado en la Figura 43. Primero se sube la temperatura con una rampa de 30°C/hora hasta alcanzar los 60°C los cuales se mantienen durante dos horas y luego se enfría gradualmente y se deja curar a temperatura ambiente durante 24 horas para desmoldar, sin embargo la pieza no alcanzara sus propiedades finales sino hasta pasadas 72 horas.



FIGURA 43 CURVA DE CURADO TERMICO APLICADO A LAS PIEZAS DEL TRASPORTADOR.

5.5 RESULTADOS

5.5.1 MAQUINADO E INSERTOS DE PEEK

Las piezas moldeadas requieren de un maquinado para adquirir sus dimensiones finales. La prensa se ranuró a los costados y se perforó verticalmente para los insertos y los agujeros del distractor (ver cilindros azules de la Figura 44), mientras que la tapa solo se perforo para los agujeros de los tornillos y del distractor. Los planos de maquinado se muestran en los anexos.

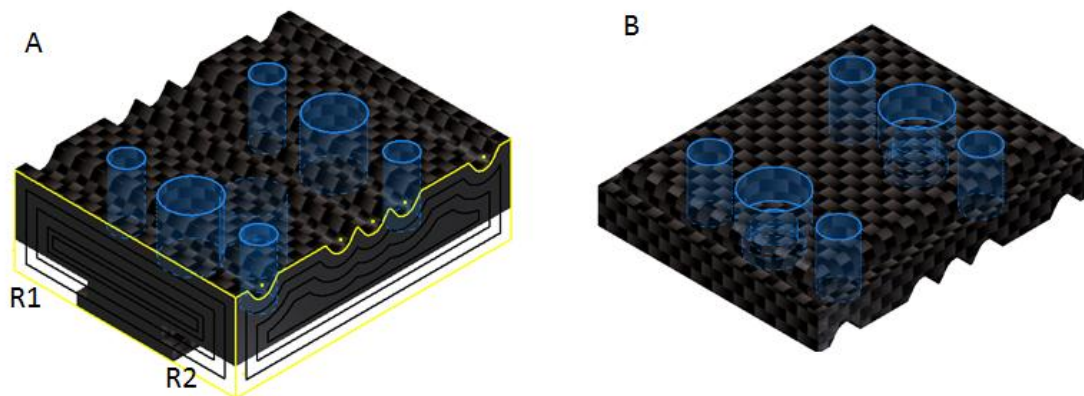


FIGURA 44 OPERACIONES DE MAQUINADO REALIZADAS EN LAS PIEZAS MOLDEADAS A) PRENSA Y B) TAPA DE LA PRENSA.

Con los agujeros maquinados se procedió a pegar los insertos de PEEK cuya función es proveer una rosca para realizar los aprietes de las prensas contra la tapa y contra el riel. Se utilizó un adhesivo híbrido con base en cianoacrilato/epoxi (Referencia Hy 4060GY, loctite). Para pegar los insertos se lijaron las superficies a unir, luego se roscó un tornillo dentro del inserto para mejorar la manipulación y evitar que el pegante se

introdujera en la rosca. Adicionalmente se colocó a la entrada del inserto un trozo de plastilina para evitar que se pegue el tornillo al inserto. Tal como lo muestra la Figura 45.



FIGURA 45 INSERTOS DE PEEK CON TORNILLO

Luego se preparó la pieza de una forma similar tapando con tornillos la parte inferior del agujero, para evitar que el pegante se escape y lo obstruya. Ver Figura 46A y 46B. Se mezclaron los componentes del pegamento y se colocó suficiente cantidad dentro del agujero. Seguidamente se posicionaron los insertos presionando el pegante y obligando a que el exceso se rebose como se muestra en la Figura 46C. Pasados dos minutos el pegante solidifica y se pueden retirar los tornillos para remover el exceso de pegante antes de que esté demasiado duro. El resultado se muestra en la Figura 46D.

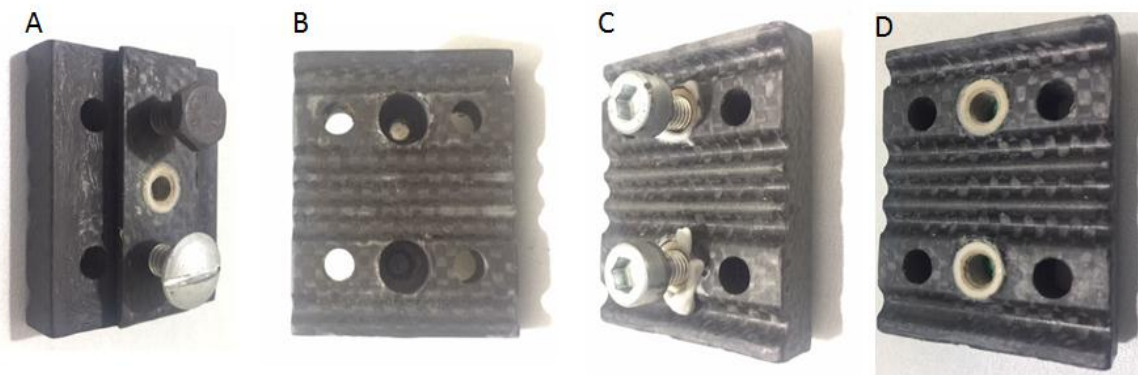


FIGURA 46 PROCEDIMIENTO PARA PEGADO DE INSERTOS DE PEEK

5.5.2 ENSAMBLE

El resultado final se muestra en la Figura 47 donde se puede apreciar una vista lateral y una superior del fijador externo ensamblado. Este está constituido por un riel y dos prensas. Adicionalmente se muestra cada pieza por separado en la Figura 48. Cabe destacar que el riel fue fabricado por A. Paz et al [30] el cual fue aportado a este proyecto como insumo para la construcción del prototipo. Los detalles del peso de las piezas y los ensambles se pueden encontrar en la Tabla 2. El peso de un dispositivo completo sin distractor es de

545 g con lo cual se tiene una disminución en el peso de aproximadamente el 10% al cambiar las prensas de aluminio por prensas de fibra de carbono.

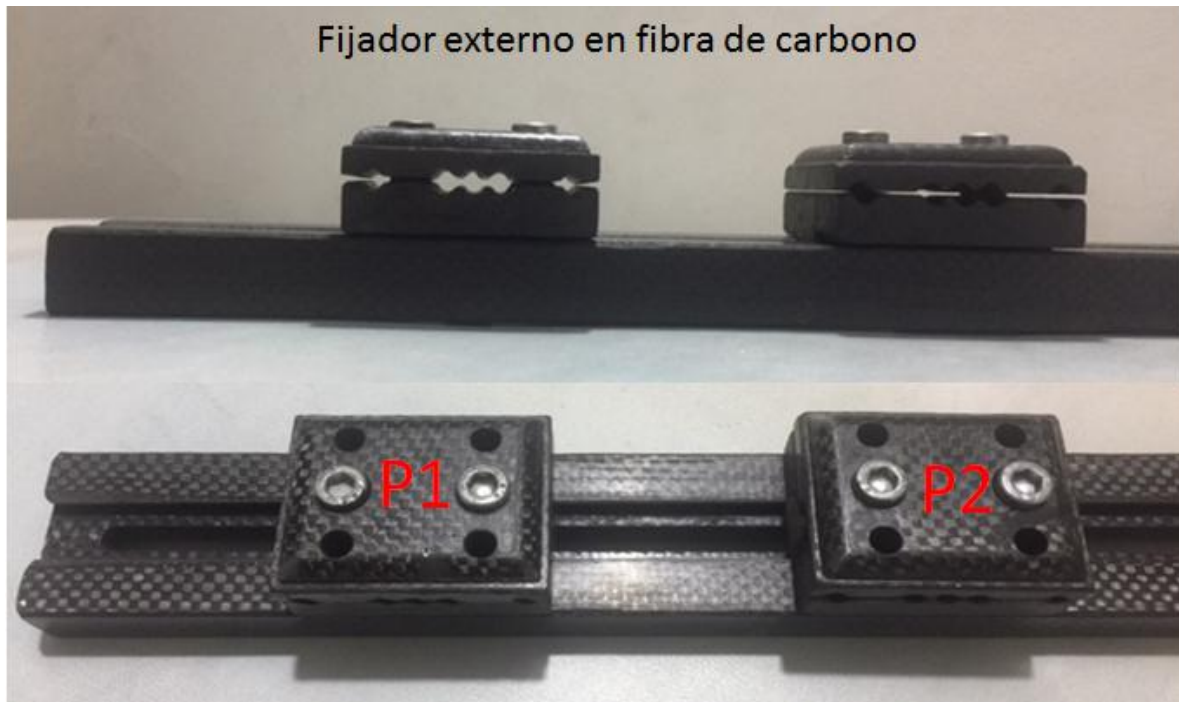


FIGURA 47 FIJADOR EXTERNO FABRICADO EN FIBRA DE CARBONO

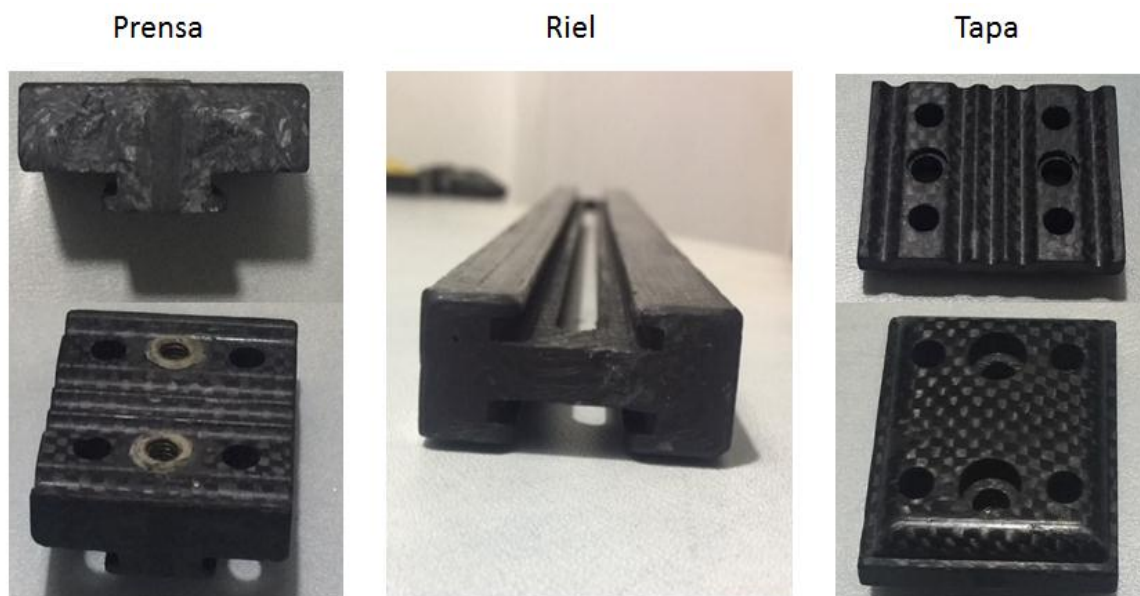


FIGURA 48 COMPONENTES INDIVIDUALES DEL FIJADOR EXTERNO

TABLA 2 PESO DE PIEZAS Y ENSAMBLE

pieza	peso (gr)
riel	319
prensa	34,5
tapa	24,4
prensa con tapa y tornillos	69,9
ensamble de prensa	75,5
ensamble de trasportador	545,5

En las instalaciones de la Universidad del Valle se desarrolló un dispositivo para fijación externa, hecho en fibra de carbono con insertos de PEEK, cuyo único elemento metálico son los tornillos. Es un prototipo de fabricación nacional de bajo costo como lo podemos ver en la Tabla 3 Presupuesto de fabricación de un prototipo de fijación y transporte óseo en fibra de carbono.. Donde se detallan los costos de fabricación, separados por área, en donde la parte gris corresponde con la fabricación de moldes, (la cantidad necesaria por pieza corresponde con la cantidad de usos que puede resistir un molde), la fracción resulta de la división de 1/N° de usos posibles. Se estima que un molde bien tratado puede durar hasta 20 usos. La parte café corresponde con los materiales de fabricación y consumibles, los cuales resultan tener un valor total bastante bajo de COP \$ 297.080. Finalmente, en rojo está la parte de mano de obra de manufactura la cual tiene el valor elevado COP \$1.480.000 y representa casi el 70% del valor del prototipo. El precio total del prototipo es de COP \$2.237.000, un 15% de su contraparte de Orthofix que ronda los COP \$15.000.000.

TABLA 3 PRESUPUESTO DE FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO DE FIJACIÓN Y TRASPORTE ÓSEO EN FIBRA DE CARBONO.

Presupuesto	Cantidad necesaria por pieza	Valor por unidad	Costo por unidad fabricada	Cantidad por prototipo	Costo por prototipo	Total por area
Molde para riel	0,05	\$ 2.300.000,00	\$ 115.000,00	1	\$ 115.000,00	\$ 460.000,00
Molde para prensa	0,05	\$ 2.000.000,00	\$ 100.000,00	3	\$ 300.000,00	
Molde para tapa	0,05	\$ 300.000,00	\$ 15.000,00	3	\$ 45.000,00	
Mela para riel (m2)	1,2	\$ 120.000,00	\$ 144.000,00	1	\$ 144.000,00	\$ 297.080,00
Tela para tapa (m2)	0,17	\$ 120.000,00	\$ 20.400,00	3	\$ 61.200,00	
Tela para prensa (m2)	0,09	\$ 120.000,00	\$ 10.800,00	3	\$ 32.400,00	
Resina para riel (kg)	0,3	\$ 60.000,00	\$ 18.000,00	1	\$ 18.000,00	
Resina para prensa (Kg)	0,021	\$ 60.000,00	\$ 1.260,00	3	\$ 3.780,00	
Resina para tapa (kg)	0,015	\$ 60.000,00	\$ 900,00	3	\$ 2.700,00	
Pegante	0,033	\$ 70.000,00	\$ 2.333	9	\$ 21.000,00	
Guantes y consumibles	1	\$ 70.000,00	\$ 70.000,00	0,2	\$ 14.000,00	
Maquinado de riel	1	\$ 430.000,00	\$ 430.000,00	1	\$ 430.000,00	\$ 1.480.000,00
Maquinado de tapa	1	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00	3	\$ 30.000,00	
Maquinado de prensa	1	\$ 180.000,00	\$ 180.000,00	3	\$ 540.000,00	
Mano de obra (horas)	24	\$ 20.000,00	\$ 480.000,00	1	\$ 480.000,00	
				Total	\$ 2.237.080,00	\$ 2.237.080,00

6. EVALUACIÓN BIOMECÁNICA DEL PROTOTIPO

6.1 METODOLOGÍA

Para la caracterización del fijador se llevaron a cabo pruebas de compresión axial, flexión en voladizo en el plano anteroposterior, flexión en voladizo en el plano medio lateral y prueba de torsión. Para cada estado de carga se hicieron 3 pruebas (combinando las tres prensas disponibles). Usando 2 prensas en el montaje con cada riel y las probetas tratadas térmicamente y otras 6 pruebas con los dos rieles y las probetas no tratadas térmicamente. La Tabla 4 muestra las configuraciones experimentales para el riel 1. Donde la P1, P2 y P3 son las prensas sin tratamiento térmico y P4, P5 y P6 las que tienen un tratamiento térmico. Se repitió lo mismo para el riel 2.

TABLA 4 NUMERO DE PRUEBAS PARA LAS CONFIGURACIONES EXPERIMENTALES CON EL RIEL 1

Riel 1		axial	medio-lateral	antero-posterior	torsional
Sin Tratamiento	P1 y P2	2	2	2	2
	P2 y P3	2	2	2	2
	P1 y P3	2	2	2	2
Con Tratamiento	P4 y P5	2	2	2	2
	P5 y P6	2	2	2	2
	P4 Y P6	2	2	2	2

Para el desarrollo de las pruebas se utilizó una máquina de tensión y compresión (Lloyd modelo LF plus de 200N de capacidad). La fuerza se midió con una celda de carga 150 kg (Omega LC 703-150 de ± 0.11 Kg. de precisión), montada sobre el actuador de la máquina. El desplazamiento fue registrado usando un transductor LVDT (Omega LD610 de ± 15 mm de rango de ± 0.045 mm de precisión), el cual fue posicionado para registrar el desplazamiento. La máquina y los elementos de medición se pueden ver en la Figura 49 Maquina para ensayos biomecánicos. El sistema se evaluó bajo una configuración crítica, con una separación entre prensas de 30 cm medidos desde los extremos exteriores de las prensas y una longitud libre de clavo de 5 cm. Esto según lo estipulado en [28]. Las configuraciones para las diferentes pruebas se muestran en la Figura 50 Configuraciones de modos de carga según la norma astm F154 En la Figura 51 se muestra como quedan los montajes experimentales.

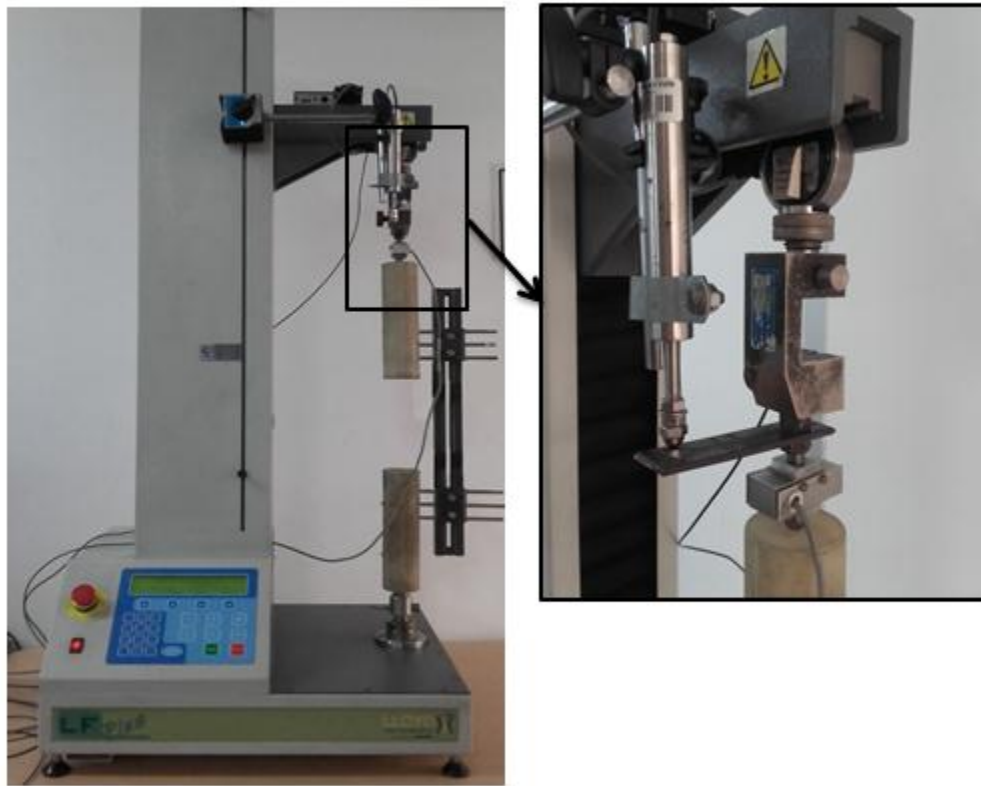


FIGURA 49 MAQUINA PARA ENSAYOS BIOMECÁNICOS

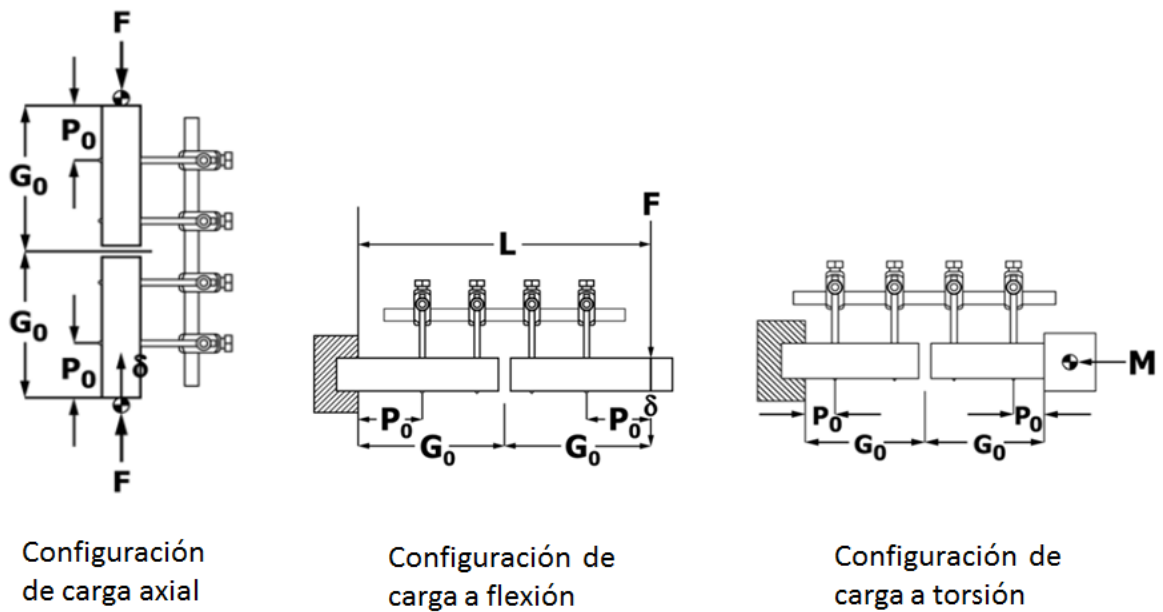


FIGURA 50 CONFIGURACIONES DE MODOS DE CARGA SEGÚN LA NORMA ASTM F154 [10].



FIGURA 51 CONFIGURACIONES EXPERIMENTALES PARA LAS PRUEBAS DE FLEXION Y CARGA AXIAL

6.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados obtenidos en la caracterización biomédica se muestran en las figuras a continuación y se hace la comparación de las piezas manufacturadas con y sin tratamiento térmico, así como también se compara el efecto de los dos rieles uno con resina de West System y otro con resina Sumiglas.

En la Figura 52 se puede apreciar como la diferencia de los rieles tiene un efecto significativo en la rigidez del prototipo con un 95% de significancia, siendo el riel hecho con resina de West System superior en promedio un 15% con una desviación estándar del orden de los 8 N/mm. Al mismo tiempo el efecto del curado térmico en las prensas favorece levemente la rigidez pero en este caso la desviación estándar es de 10 N/mm.

Por otra parte al comparar los resultados para la rigidez en el plano medio lateral resulta ser mejor el riel con resina de West System por 14 %. Sin embargo la desviación estándar es alta, con un valor de 10 N/mm. Paralelamente para este plano las prensas con curado térmico resultan en un desempeño superior a las que fueron curadas al medio ambiente Ver Figura 53.

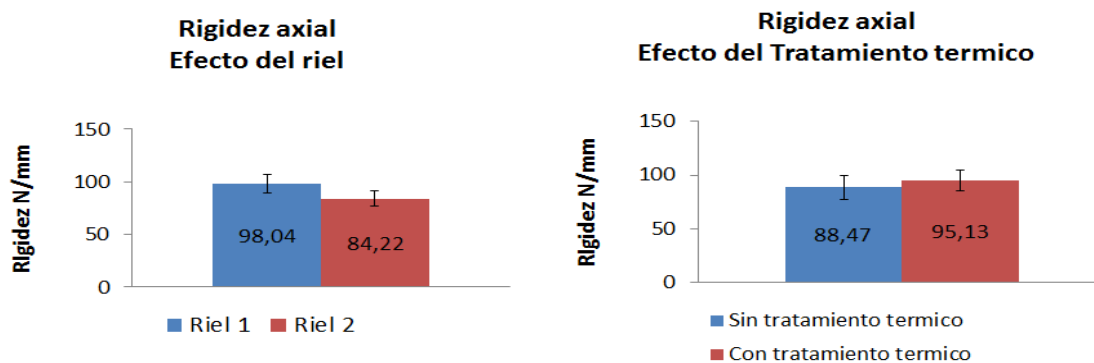


FIGURA 52 RESULTADOS DE RIGIDEZ AXIAL SEPARADOS SEGUN EL EFECTO DEL RIEL Y DEL TRATAMIENTO TERMICO

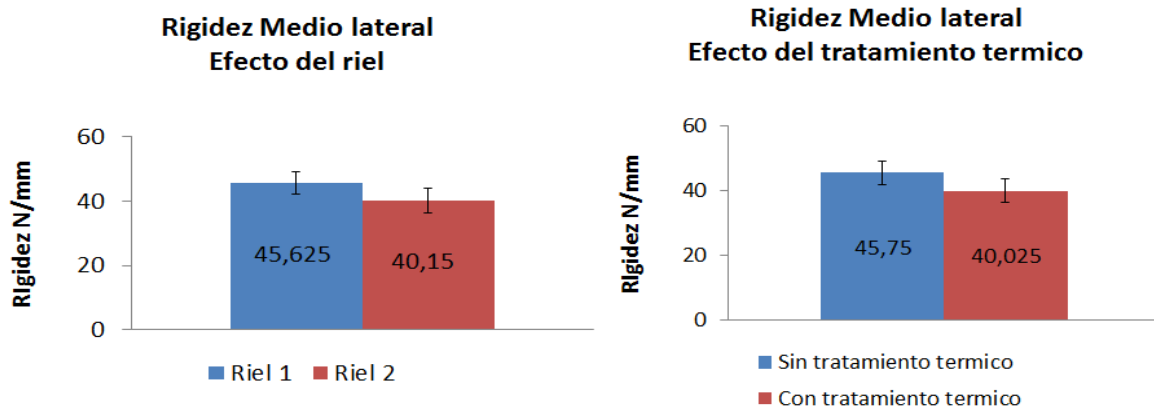


FIGURA 53 RESULTADOS DE RIGIDEZ MEDIO LATERAL SEPARADOS SEGUN EL EFECTO DEL RIEL Y DEL TRATAMIENTO TERMICO

En la Figura 54 se muestra la rigidez en el plano antero posterior y se observa que el riel con resina de West System es mejor por un 20%. Esta diferencia es significativa dada la desviación estándar de esta prueba. En este plano el efecto del tratamiento térmico es indistinto ya que los promedios son muy similares y la desviación es alta. En la prueba de torsión que muestra la Figura 54 se puede notar un incremento de 7% en la rigidez torsional del dispositivo con las probetas tratadas térmicamente nuevamente esta diferencia no es significativa.

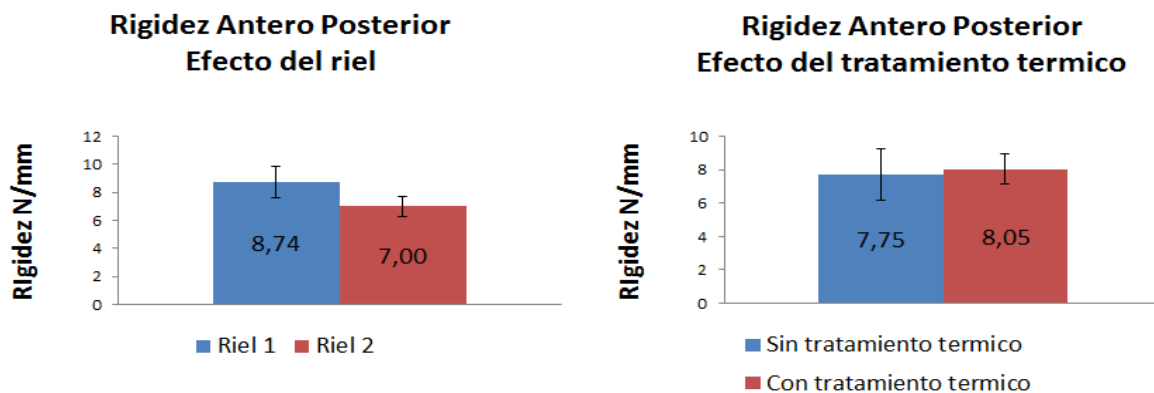


FIGURA 54 RESULTADOS DE RIGIDEZ ANTERO POSTERIOR SEPARADOS SEGUN EL EFECTO DEL RIEL Y DEL TRATAMIENTO TERMICO.

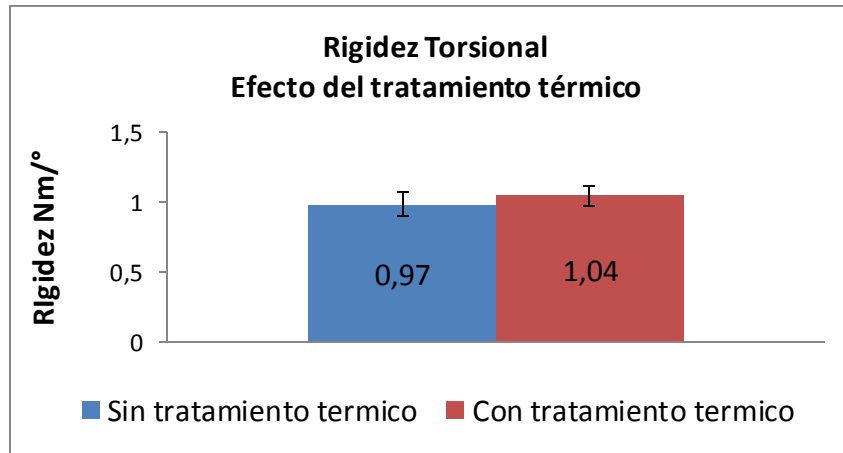


FIGURA 55 RESULTADOS DE RIGIDEZ TORSIONAL SEGÚN EL EFECTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO

Finalmente, se compara la rigidez promedio, con los valores de referencia mínimos [28] y con otros dispositivos [29], ver Figura 57 y 57. El sistema fijador fabricado se encuentra por encima del mínimo requerido en rigidez torsional superando a los demás prototipos tanto el de aluminio como el de PLA. Por otro lado, el sistema fabricado se encuentra levemente por debajo de los valores del riel de aluminio de Orthofix en carga axial (ver Figura 58), y es mejor que este, en los demás planos. Además es mejor que los otros dispositivos fabricados anteriormente en PLA en todos los planos [33].

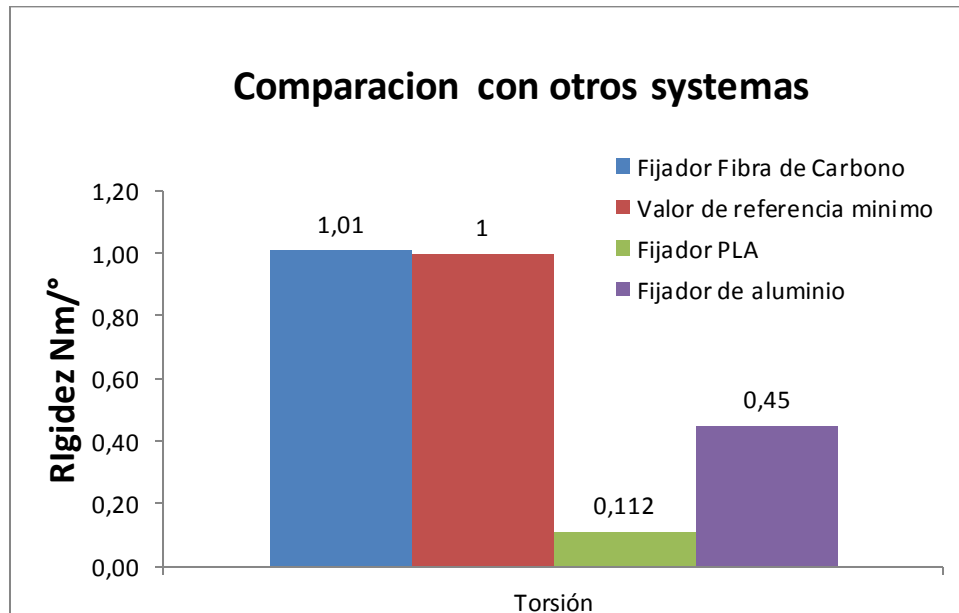


FIGURA 56 RESULTADOS DE RIGIDEZ TORSIONAL COMPARADO CON OTROS SISTEMAS. [28][29][33]

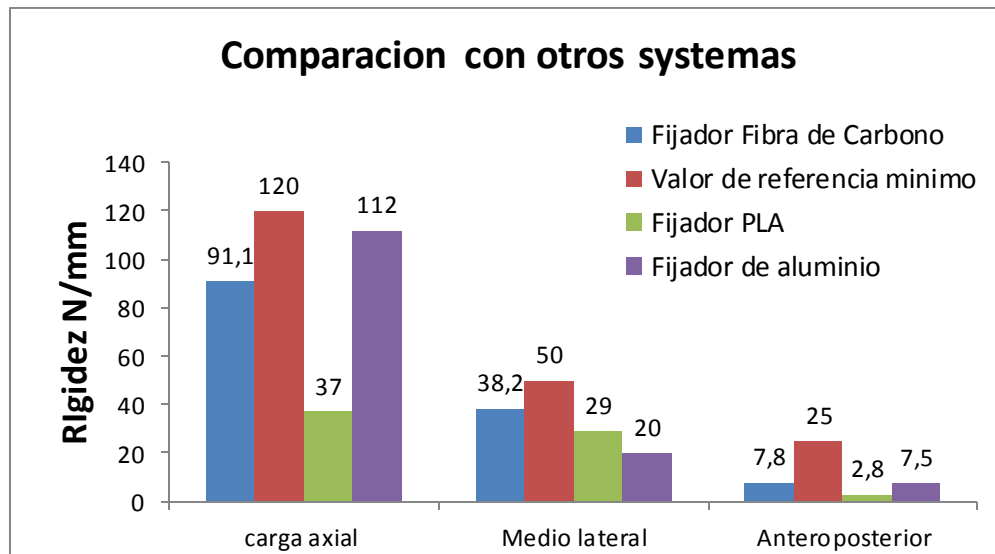


FIGURA 57 COMPARACIÓN DE RIGIDEZES CONTRA LOS VALORES DE REFERENCIA Y OTROS MODELOS [28][29][33]

Para mayor claridad los otros sistemas de fijación comparados en los resultados anteriores se muestran en la figura 58.

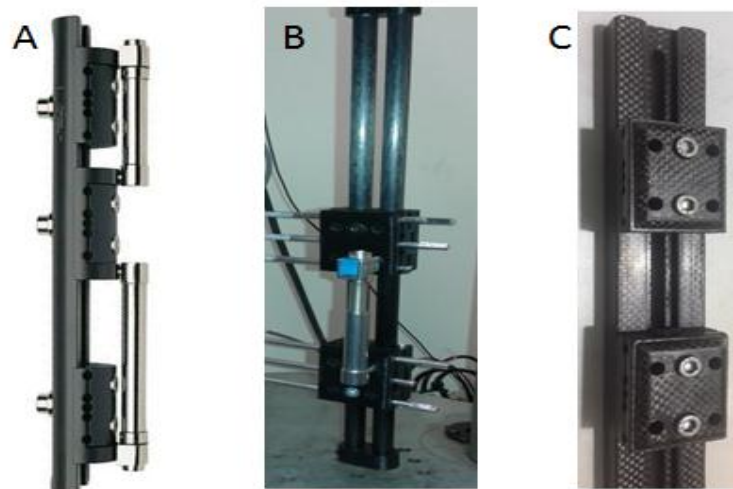


FIGURA 58 PROTOTIPOS COMPARADOS A) LRS ORTHOFIX DE ALUMINIO. B) PROTOTIPO PLA. C) PROTOTIPO DE FIBRA DE CARBONO.

6.2 ELABORACIÓN DE UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Se desarrolló un modelo de elementos finitos en Ansys, en donde se identificaron los componentes y las zonas de mayor esfuerzo y se pudo determinar qué zonas críticas coinciden con elementos de baja resistencia.

El modelo se corrió en un equipo con ocho procesadores y 20GB de memoria RAM. El tipo de análisis fue estático estructural y se resolvió con un solucionador directo especificando su asimetría como control no lineal. Se consideró el compuesto como un material ortótropo, las propiedades se tomaron de la librería de Ansys. Se tuvieron dos pasos uno para las precargas y otro para la aplicación del desplazamiento. El resumen se muestra en la Figura 59.

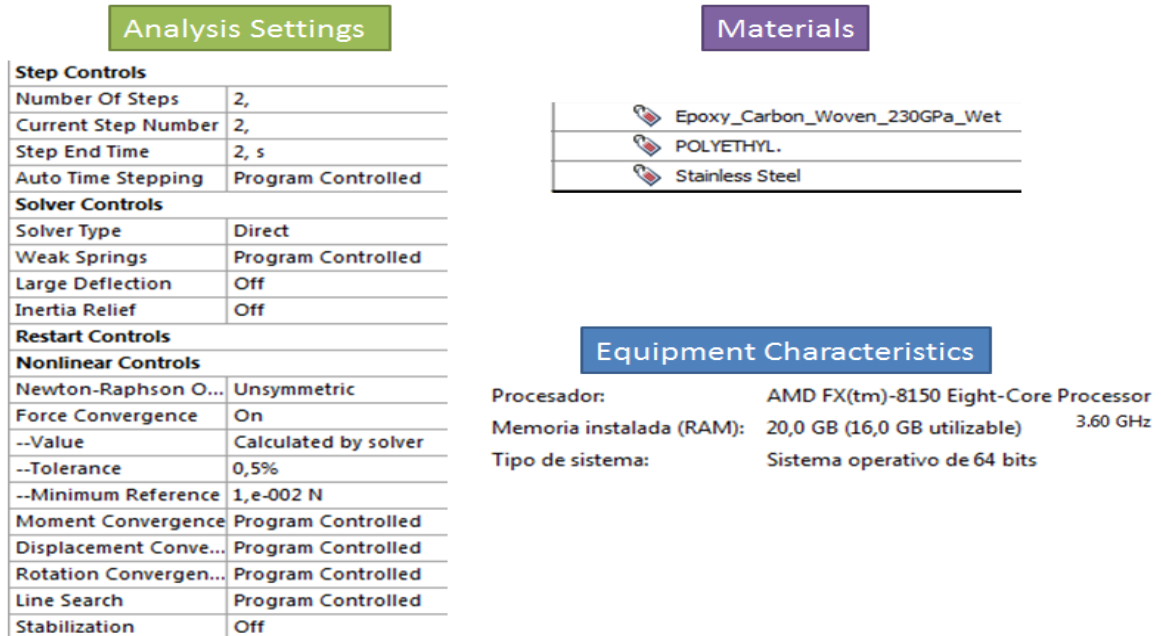


FIGURA 59 CONFIGURACIÓN DEL ANÁLISIS, MATERIALES UTILIZADOS Y EQUIPO DE TRABAJO.

6.2.1 MALLA

Para construir la malla se utilizaron diferentes métodos para reducir la cantidad de elementos cuidando tener un tamaño de malla fino en las zonas de los contactos y agrandar los elementos de las zonas menos críticas como lo son los huesos y el riel en los puntos donde no hay contacto. Se trató de conformar una malla con elementos hexagonales y se hicieron barridos en las piezas donde fue posible, el tamaño promedio de los elementos en las zonas críticas fue de 1.7 mm. Así se obtuvo una malla con 88969 elementos la cual semuestra en la Figura 60.

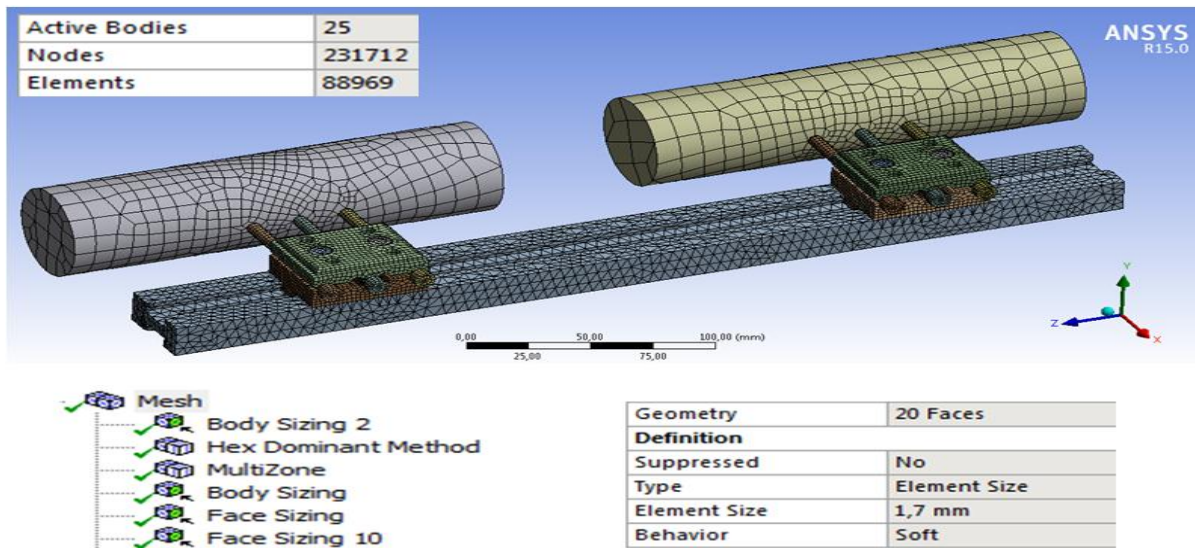


FIGURA 60 MALLA Y MÉTODOS UTILIZADOS PARA SU CONFORMACIÓN.

6.2.2 CONTACTOS

Se utilizaron contactos tipo bonded y frictional los cuales se separaron en 6 grupos: 1.Clavos y tapas; 2.clavos y prensa A; 3. Clavos y prensa B; 4. Clavos y huesos de PVC; 5. Riel y prensas; 6. Insertos y prensas. Los grupos 1, 2 y 3 utilizaron un contacto friccional cuyo coeficiente de fricción fue 0,2 tomado de [32]. La formulación para este contacto fue Lagrange aumentado con detección en los puntos de Gauss y como condición inicial del contacto se seleccionó ajustar al contacto. Para el grupo 5 entre el riel y las prensas, se usa el contacto friccional con formulación penalty puro al que se le aplica como condición inicial un offset que corresponde con la separación que existe entre las dos superficies del riel y de la prensa que es en algunos casos 0.15 mm y en otros 0.1 mm. Finalmente, entre los huesos y los clavos y los insertos y las prensas fueron tratados como contacto adherido o bonded en donde también se usó la formulación de Lagrange aumentado con detección en los puntos de Gauss. La Figura 61 muestra los detalles de los diferentes contactos utilizados.

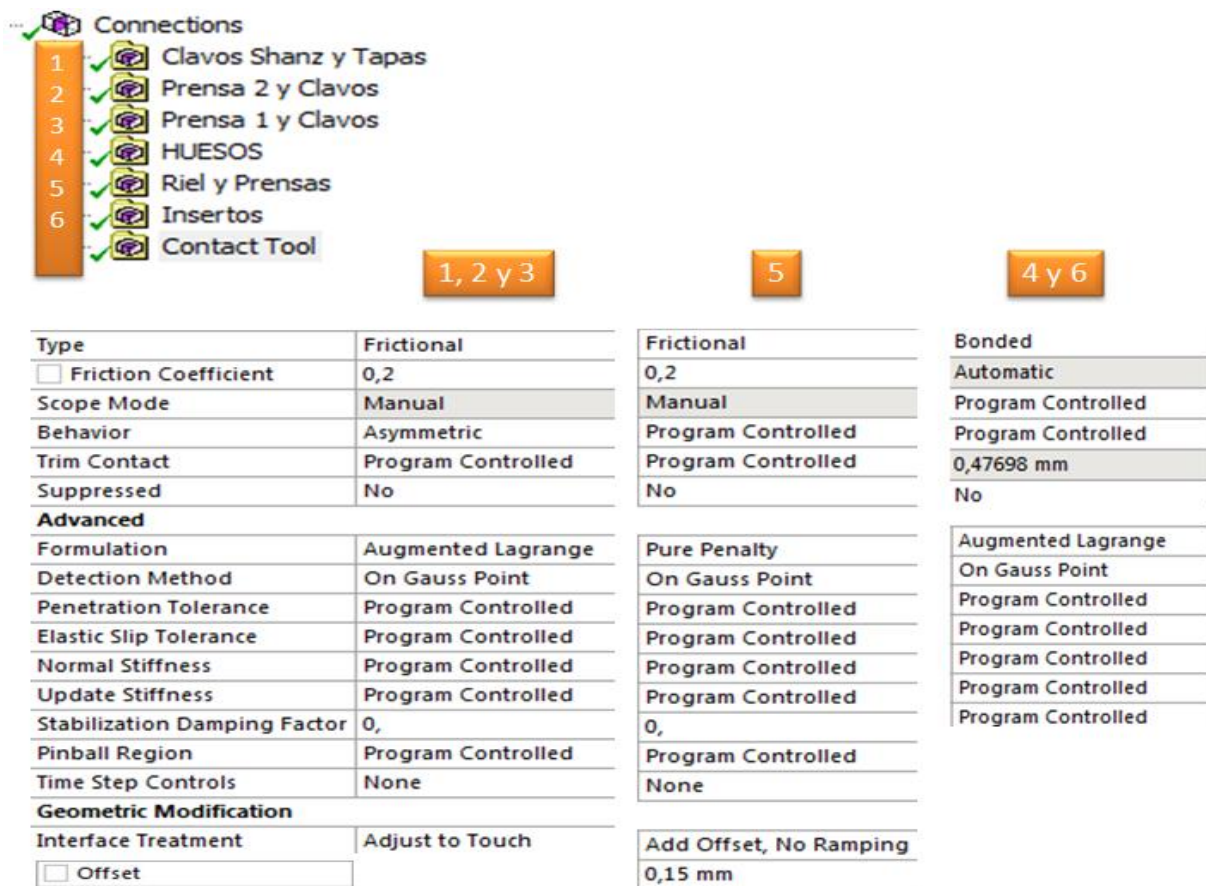


FIGURA 61 CONTACTOS Y DEFINICIONES.

6.2.3 CONDICIONES DE BORDE

Primero se aplicó la precarga a los 6 tornillos de la prensa con 800 N de fuerza, los cuales fueron aplicados desde el primer paso del análisis. Luego se aplicó una carga axial, en el extremo de uno de los fragmentos de hueso, por medio de un desplazamiento controlado de 2 mm en la dirección Z, los cuales se aplicaron en el

segundo paso. Para fijar el modelo, en el otro fragmento de hueso se sostuvo en el extremo inferior con una restricción de solo compresión. Adicionalmente se fijaron dos puntos, el punto central de la cara inferior del hueso y uno del cuadrante de esa misma cara. A estos puntos no se les permitió moverse en X o Y pero se dejaron libres en Z. en la Figura 62 se muestra la ubicación de las condiciones y los valores y tiempos de la aplicación de los desplazamientos mencionados.

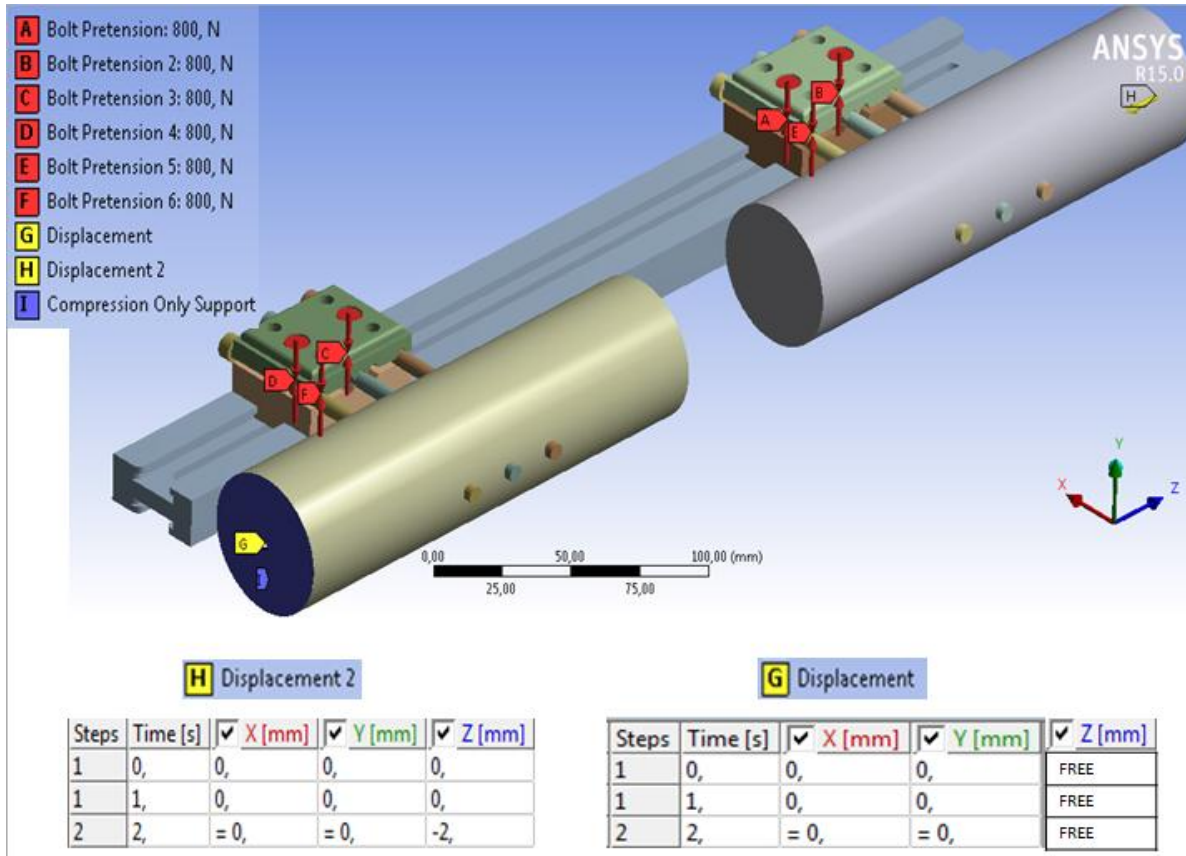


FIGURA 62 CONDICIONES DE BORDE

6.4 RESULTADOS NUMÉRICOS

El modelo se tardó en resolver aproximadamente 24 horas. Para validar los resultados se obtuvo la fuerza de reacción en el lugar de la aplicación del desplazamiento, ver Figura 63.

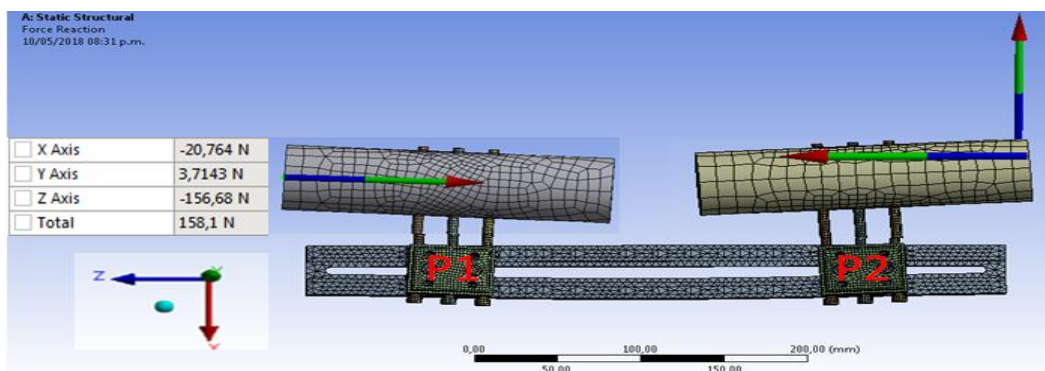


FIGURA 63 FUERZA DE REACCION EN LA POSICION DEL DESPLAZAMIENTO APLICADO.

Esta fuerza se comparó con los resultados experimentales obtenidos en el mismo punto. Se hizo un promedio de la fuerza obtenida por la celda de carga al alcanzar un desplazamiento de 2 mm, así se obtuvo el valor de 182 N promedio, lo cual no dista mucho de los 158 N calculados en el modelo, esto corresponde a un 13% de error.

El estado final de deformaciones se muestra en la figura 64. Se puede ver como ambas prensas se giran y como el riel se abre por la acción de las prensas.

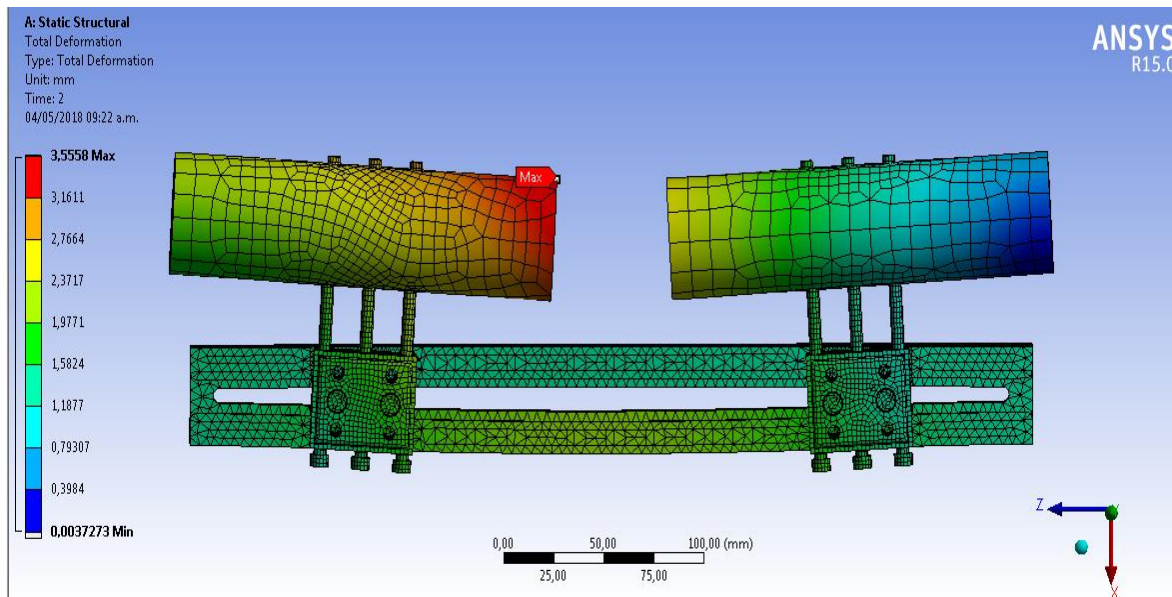


FIGURA 64 ESTADO DE DEFORMACION BAJO CARGA AXIAL.

La Figura 65 muestra el estado de esfuerzos de la prensa de la izquierda del fijador, es decir la prensa cuyo fragmento de hueso lleva la aplicación de la carga, se muestra una vista superior y una inferior para cada dirección de esfuerzos. En A se pueden ver los esfuerzos normales en la dirección de X, en donde los esfuerzos son más altos y el punto crítico está ubicado en las esquinas del riel, en la zona donde hace contacto con el riel cuando se gira, el esfuerzo es de compresión y tiene una magnitud de 88 MPa. En B se muestran los esfuerzos normales en la dirección Y, para este caso los esfuerzos máximos y mínimos corresponden con el contacto entre los clavos y la prensa con valores entre -34 y 15 MPa, se supone que es por el apriete de los tornillos. En esta dirección es crítica la ranura de la prensa ya que debido al maquinado las fibras están orientadas perpendiculares a Y, entonces la resina es la responsable de aguantar este esfuerzo. Sin embargo en este punto el esfuerzo es bajo llegando a 10 MPa. Finalmente en la parte C de la Figura 65 se muestran los esfuerzos normales a Z, donde los esfuerzos más elevados son de compresión del orden de los 30 MPa y se encuentran en la zona de contacto con clavos, esta vez se asume que es debido a la transferencia de la carga de compresión. En la otra prensa, la de la derecha, que está más lejos de la carga aplicada, se encontró que los mayores esfuerzos se presentan en puntos análogos y están por debajo de sus homólogos aproximadamente un 10%. Cabe destacar que en esta prensa los esfuerzos en los insertos son más elevados llegando a los 16 MPa comparados con los 11 MPa de la otra prensa.

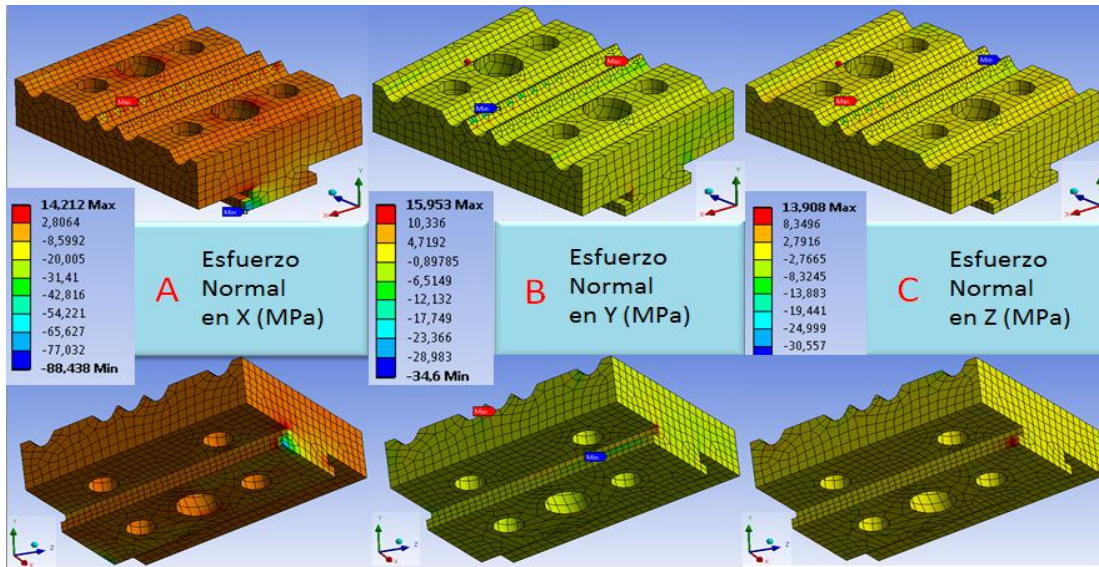


FIGURA 65 ESTADO DE ESFUERZOS NORMALES PARA LA PRENSA CERCANA A LA CARGA.

Por otro lado, en la Figura 66 se muestra el estado de esfuerzos de la tapa de la prensa cercana a la carga. En A se muestra el esfuerzo normal en X el cual registra un esfuerzo de compresion elevado en la zona de contacto con los clavos con valor de 25 MPa, paralelamente los esfuerzos de tension máximos se presentan en los agujeros de los tornillos. En la direccion Y se registra el esfuerzo máximo de compresión en la zona de contacto con el clavo central, el cual equivale a 35 MPa el esfuerzo de maximo de tracción que se registra en esta dirección corresponde con el lugar donde se apoya un tornillo de la tapa. En la dirección de Z los esfuerzos son mas bajos y se presentan en la zona de contacto de la tapa y los clavos. de igual manera los esfuerzos máximos se siguen registrando en puntos análogos de la otra tapa.

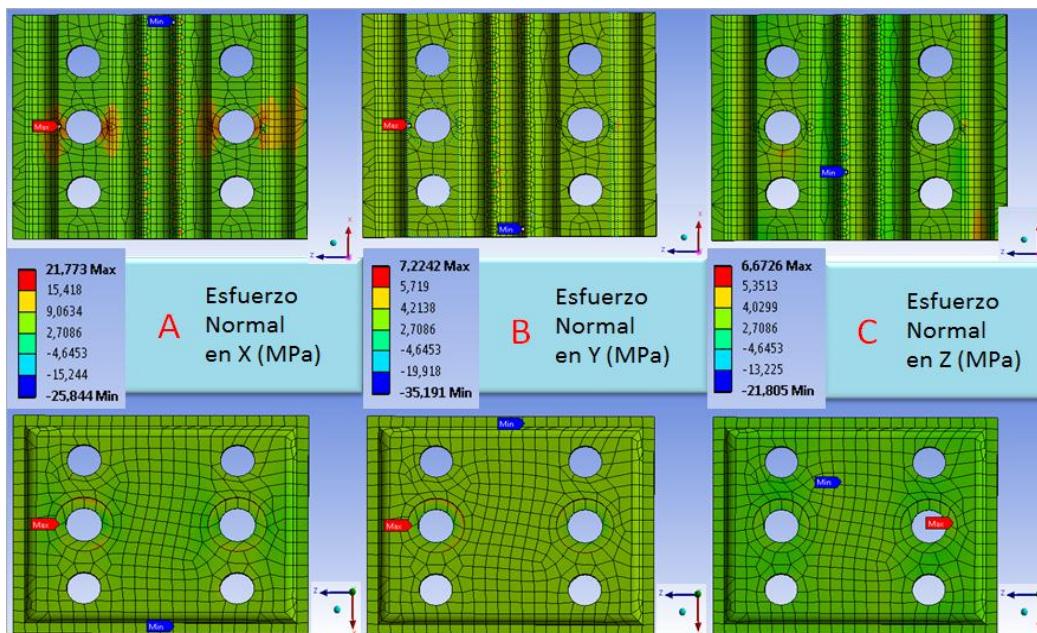


FIGURA 66 ESTADO DE ESFUERZOS NORMALES EN LA TAPA CERCANA A LA CARGA.

Por último se analizaron los esfuerzos en el riel, ver Figura 67. Esta vez se separó en los esfuerzos normales en las tres direcciones. En las direcciones Y y Z los esfuerzos fueron bastante bajos llegando a los 16 MPa mientras que en la dirección de X se presentaron esfuerzos del orden de los 67 MPa los cuales se presentaron en el extremo de la ranura del riel producto de la apertura de la que se habló al comienzo de esta sección. Los esfuerzos en Z corresponden con el esfuerzo de flexión que se genera al doblarse el riel y toma valores de hasta 10 MPa en la cara lateral del mismo. Por último el esfuerzo máximo en Y se da en el lugar donde la prensa talla el riel.

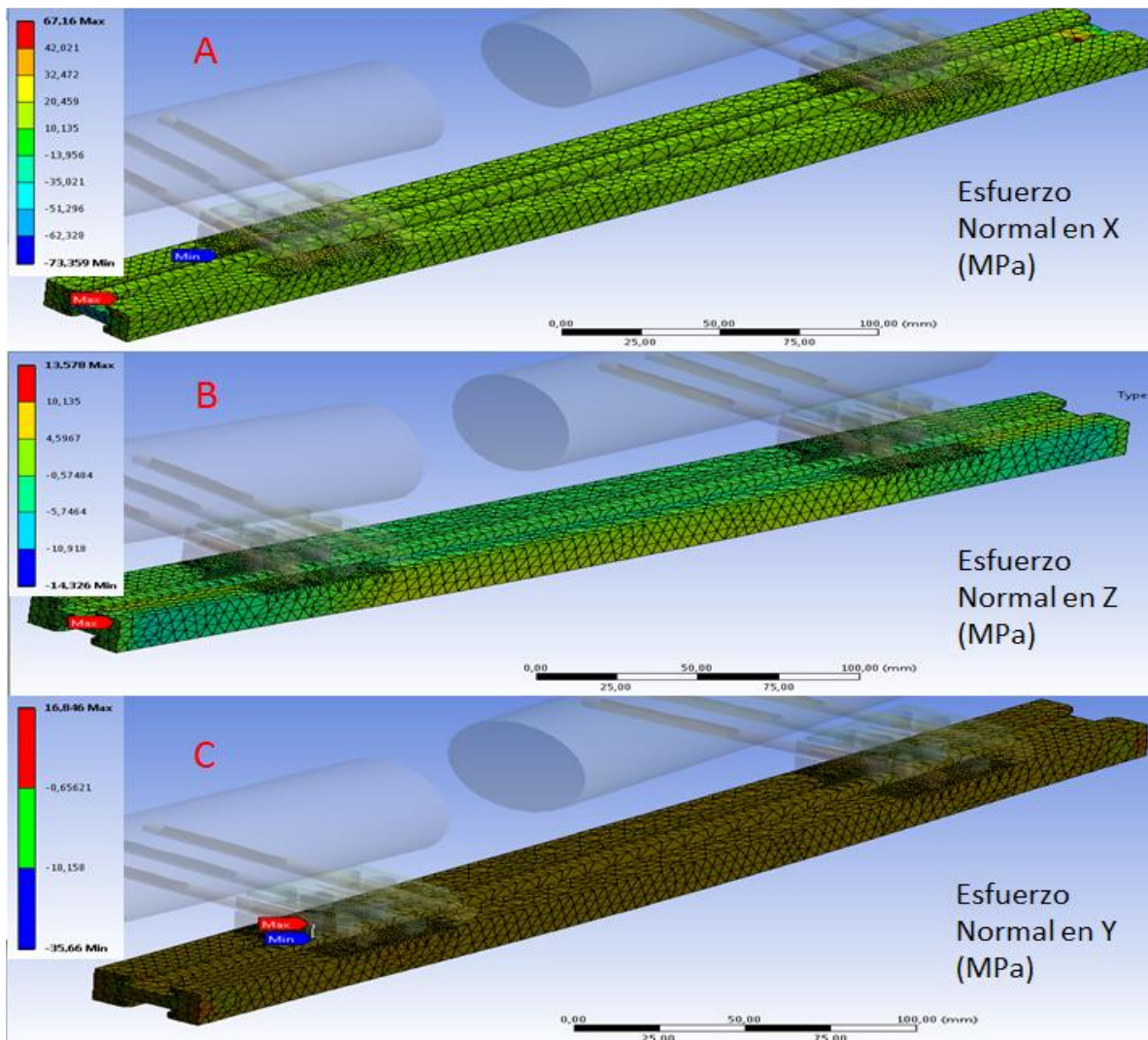


FIGURA 67 ESFUERZOS NORMALES EN EL RIEL EN LAS DIRECCIONES PRINCIPALES.

Después de este análisis se puede concluir que: es posible determinar el modo en que reacciona el transportador óseo bajo cargas específicas. Los esfuerzos que sufre el transportador al ser sometido a un desplazamiento de 2 mm son relativamente bajos y se encuentran muy por debajo de los valores de falla del compuesto; también se comprobó que al aumentar la precarga en los tornillos favorece significativamente la rigidez del transportador; el riel se separa bajo la carga axial generando esfuerzos elevados en los extremos. Estos pueden mitigarse al incluir en el riel de la prensa una pestaña externa que restrinja esta separación; Los insertos se encuentran en un lugar crítico y su resistencia no debe depender de adhesivos.

7. CONCLUSIONES

Fue posible manufacturar un fijador externo de fibra de carbono en las instalaciones de la Universidad del Valle, con características mecánicas similares a los elementos distribuidos comercialmente. En la fabricación se realizaron varias contribuciones propias, tal como se describe a continuación. Se desarrolló un procedimiento para mejorar la distribución de fibra basado en el análisis volumétrico y la distancia vertical de las piezas. Se trata de conservar un enrollado continuo de las fibras y se agrega material en las zonas donde existe más distancia vertical proporcional al volumen ocupado. También fue importante calcular la longitud lineal de caras del molde con protuberancias o cavidades, y reservar esta longitud de tela en la preforma, para que se adapte al recorrido. Esto evitó esquinas sin tela y lugares con baja densidad de fibra.

Se realizó un estudio para determinar la influencia de las vibraciones para reducir el contenido de burbujas. Al tratar un compuesto con vibraciones de 25Hz de frecuencia se observó un aumento en la cantidad de burbujas atrapadas hasta el 16 %, con una desviación estándar de ± 2 . De esta manera podemos determinar que el tratamiento con vibraciones a 25Hz es perjudicial para la calidad del compuesto haciendo que se incremente el porcentaje de vacíos.

Existe una disminución de macro-vacíos atrapada a medida que se aumenta el porcentaje de fibra lo cual aumenta la compactación. La presencia de poros y zonas de exceso de resina disminuyen al aumentar el porcentaje de fibra. Se midió el tamaño de los poros más frecuentes alrededor de los 100 μm

Los insertos de fibra de carbono ayudan a la tela a amoldarse a las superficies del molde generando mayor compactación en las zonas críticas del moldeo y generando fuerzas de compactación diferentes a la dirección de cierre del molde lo cual se evidencia en la compactación de dichas zonas.

Con un molde usado se puede ejercer presiones internas de hasta 8 MPa lo cual supera por un orden de magnitud la presión estándar en autoclave de 0.5 MPa. La proporción de fibra y resina está directamente relacionada con la presión real experimentada en el molde.

Cuando solo hay una dirección de compactación se debe pensar en términos del espacio vertical, es decir, cuanto más espacio vertical tenga más capas se debe poner para encontrar la misma densidad de fibra.

Es fundamental que toda la pieza tenga una densidad de fibra uniforme, lo cual se logra con la reducción de los macro y micro vacío y las zonas ricas en resina. Así se obtiene un compuesto mucho más resistente.

El peso de un dispositivo completo sin distractor es de 545 g con lo cual se tiene una disminución en el peso de aproximadamente el 10% al cambiar las prensas de aluminio por prensas de fibra de carbono. Si comparamos todo el prototipo en fibra de carbono respecto a un modelo idéntico de aluminio, puede tener un ahorro en peso hasta de 40%. Esto reemplazando los tornillos metálicos por tornillos de fibra de carbono o PEEK.

El costo de la mano de obra para construir el prototipo fue el 70% del costo total de COP\$2.237.000. Este costo es aproximadamente siete veces menor que el precio comercial del prototipo Orthofix, que ronda los COP\$15.000.000. Por tanto, existe un margen para que se pueda completar el desarrollo de un fijador nacional a un precio competitivo, comparado con los importados.

La adhesión de la fibra de carbono y el PEEK mediante pegantes convencionales necesita ser estudiada y hasta el momento no se ha tenido resultados satisfactorios.

Se pudo notar una diferencia en la rigidez del prototipo en función del riel utilizado. El riel con resina de West System fue mejor que su contraparte de Sumiglass por hasta un 15% en las direcciones axial y medio lateral y un 20% mayor en rigidez en el plano anteroposterior

El efecto del curado térmico en las probetas no se ve reflejado en los resultados de la caracterización biomecánica lo cual puede deberse a que otros factores oculten este efecto, como por ejemplo la estabilidad de los insertos y las tolerancias dimensionales del maquinado.

Fue posible desarrollar un modelo de elementos finitos para predecir el comportamiento del transportador. Los resultados mostraron que el riel se separa bajo la carga axial generando esfuerzos elevados en los extremos y grandes deflexiones en la parte central. De otro lado, los insertos se encuentran en un lugar crítico y su resistencia no debe depender de adhesivos.

En este proyecto se desarrollaron avances importantes para lograr una adecuada calidad en el proceso de fabricación de un prototipo. No obstante, es necesario complementar este proyecto con otros orientados a mejorar la versatilidad del sistema y a garantizar la uniformidad geométrica y propiedades mecánicas de las piezas en líneas de fabricación.

8. BIBLIOGRAFÍA

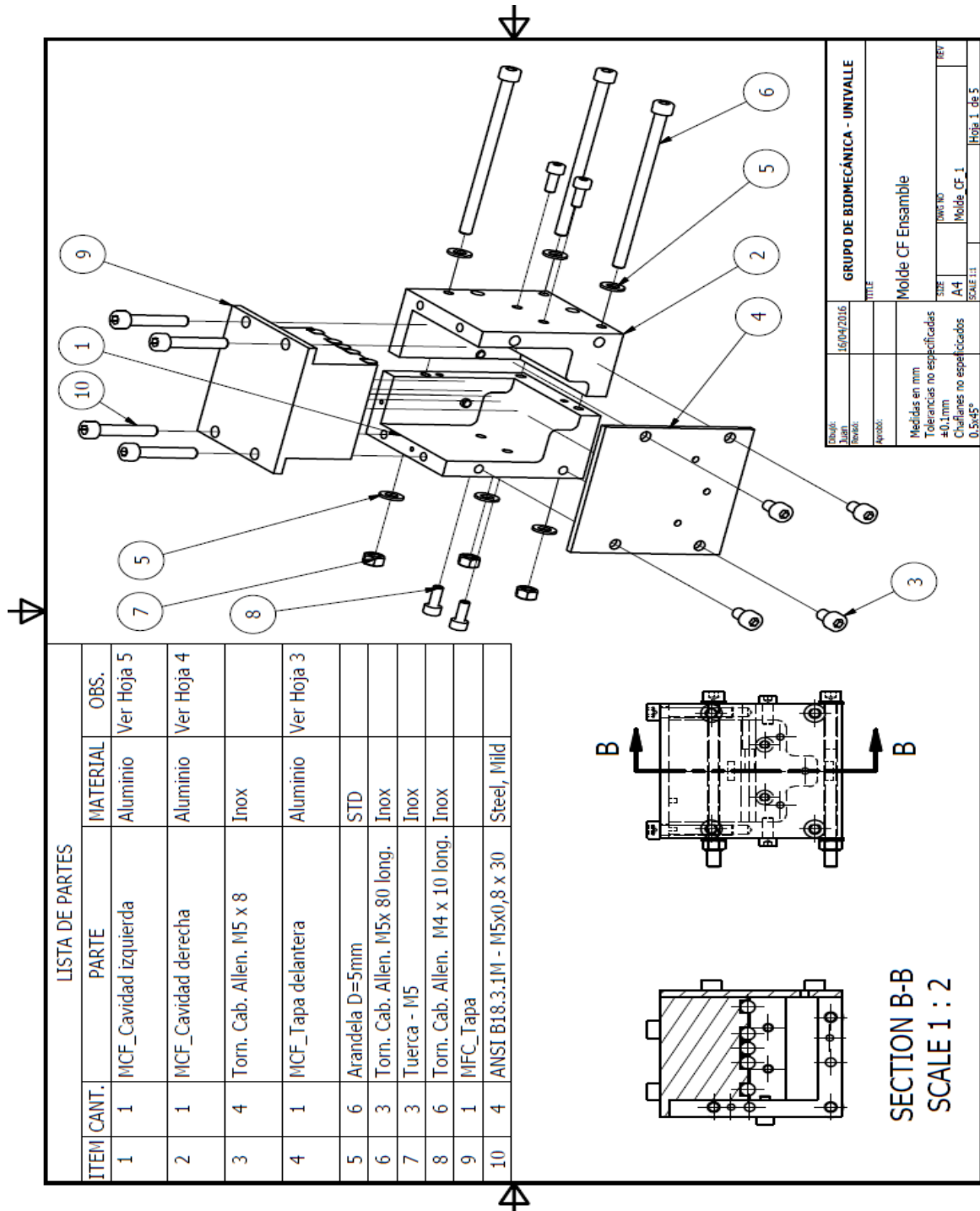
- [1] M. Saleh, *Reconstruction System General Principles*. Verona Italia, Orthofix, 1998.
- [2] B. Ortopedia, *External Fixation*, Tivoli - Roma - Italy, Maxxion, 2007.
- [3] S. F. Eduardo Ortega, "*Diseño, construcción y evaluación de un riel con material compuesto cf/ep para un fijador externo de transporte óseo*". tesis de pregrado, Universidad del valle, Cali Colombia, 2010.
- [4] C. Salcedo Cánovas, "Bone elongation using monolateral external fixation: a practical guide," *Strateg. Trauma Limb Reconstr.*, vol. 10, no. 3, pp. 175–188, 2015.
- [5] A. Goldberg and J. Scott, *Fijación Externa Orthofix*, Guildford-Surrey, England, Orthofix, 2008
- [6] F. Lavini, C. Dall'Oca, and P. Bartolozzi, "Bone transport and compression-distraction in the treatment of bone loss of the lower limbs," *Injury*, vol. 41, no. 11, pp. 1191–1195, 2010.
- [7] G. DE BASTIANI, "Limb Lengthening by callus distraction (callotaxis)," *J. Pediatr. Orthop.*, vol. 7, pp. 129–134, 1987.
- [8] K. P. Baidya, S. Ramakrishna, M. Rahman, and A. Ritchie, "Advanced textile composite ring for Ilizarov external fixator system," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part H J. Eng. Med.*, vol. 215, no. 1, pp. 11–23, 2015.
- [9] C. Migliaresi, F. Nicoli, S. Rossi, and A. Pegoretti, "Novel uses of carbon composites for the fabrication of external fixators," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, no. 6, pp. 873–883, 2004.
- [10] ASTM Standard F1541 – 02 (2015), "Standard Specification and Test Methods for External Skeletal Fixation Devices". West Conshohocken, USA, ASTM International, 2015.
- [11] W. Medical, "Fijador externo de doble anillo," Internet: <http://waston-medical.com/8-5-taylor-spatial-frame/225709/>, Oct. 5, 2002 [Ene. 2, 2018].
- [12] S. G. Advani and K. T. Hsiao, *Introduction to composites and manufacturing processes*. University of Delaware, USA and University of South Alabama, USA Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [13] S.-J. Park, *Carbon Fibers*. Dordrecht Heidelberg New York London, Springer Series in Materials Science, 2015.
- [14] V. Fiore and A. Valenza, "*5 - Epoxy resins as a matrix material in advanced fiber-reinforced polymer (FRP) composites*". University of Palermo, Italy, Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [15] F. C. Campbell, *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, vol. 1. Park Avenue South, New York, USA, Elsevier Ltd. 2004.
- [16] D. Frank-Susich, D. H. Laananen, and D. Ruffner, "Cure cycle simulation for thermoset composites," *Compos. Manuf.*, vol. 4, no. 3, pp. 139–146, 1993.
- [17] S. Bickerton, Q. Govignon, and P. Kelly, "*7 - Resin infusion/liquid composite moulding (LCM) in advanced fibre-reinforced polymer (FRP)*", The University of Auckland, New Zealand , Woodhead Publishing Limited 2013.
- [18] J. Mack and R. Schledjewski, "*Filament winding process in thermoplastics*". Montanuniversitaet

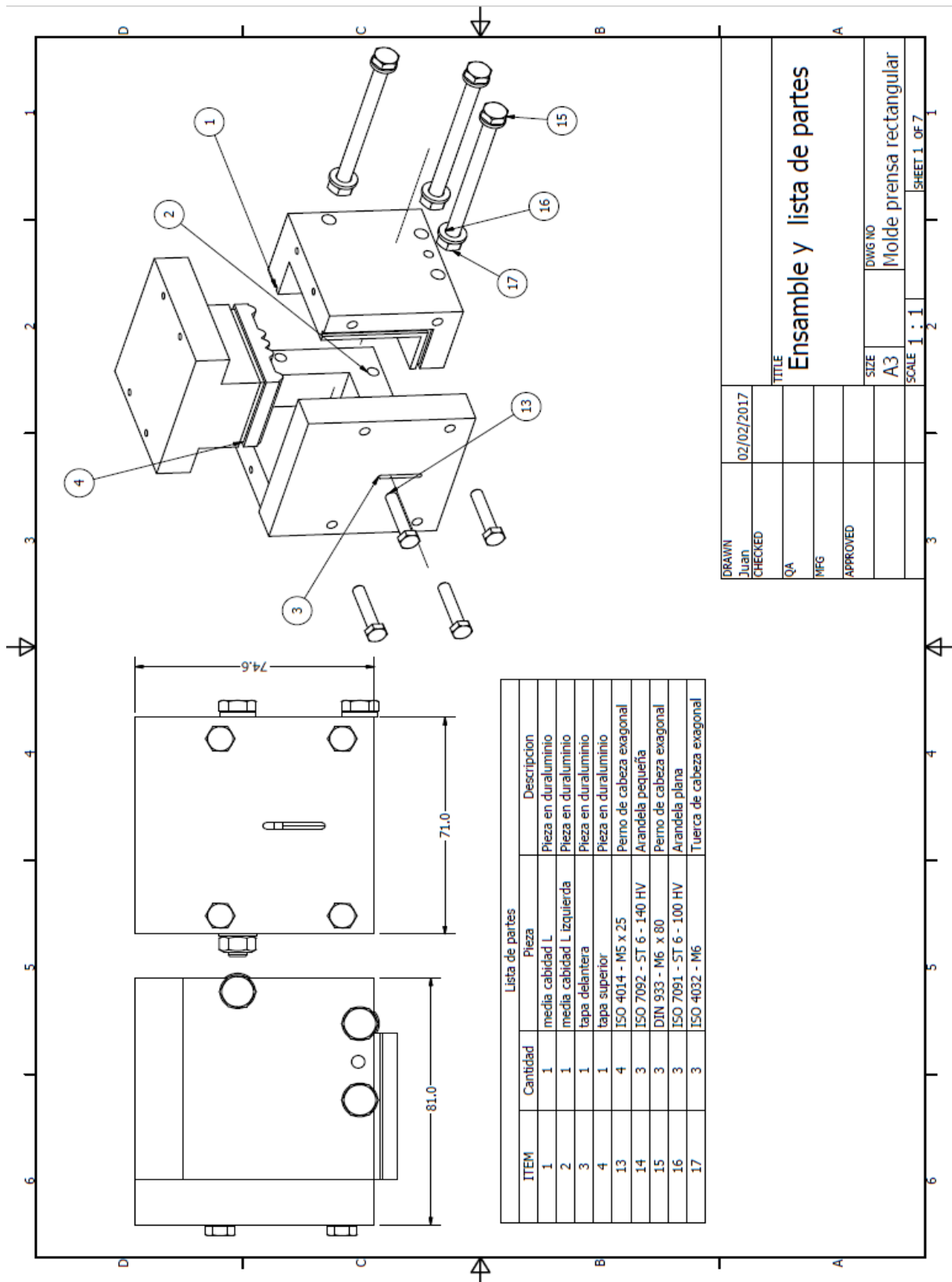
Leoben, Austria, Woodhead Publishing Limited, 2012.

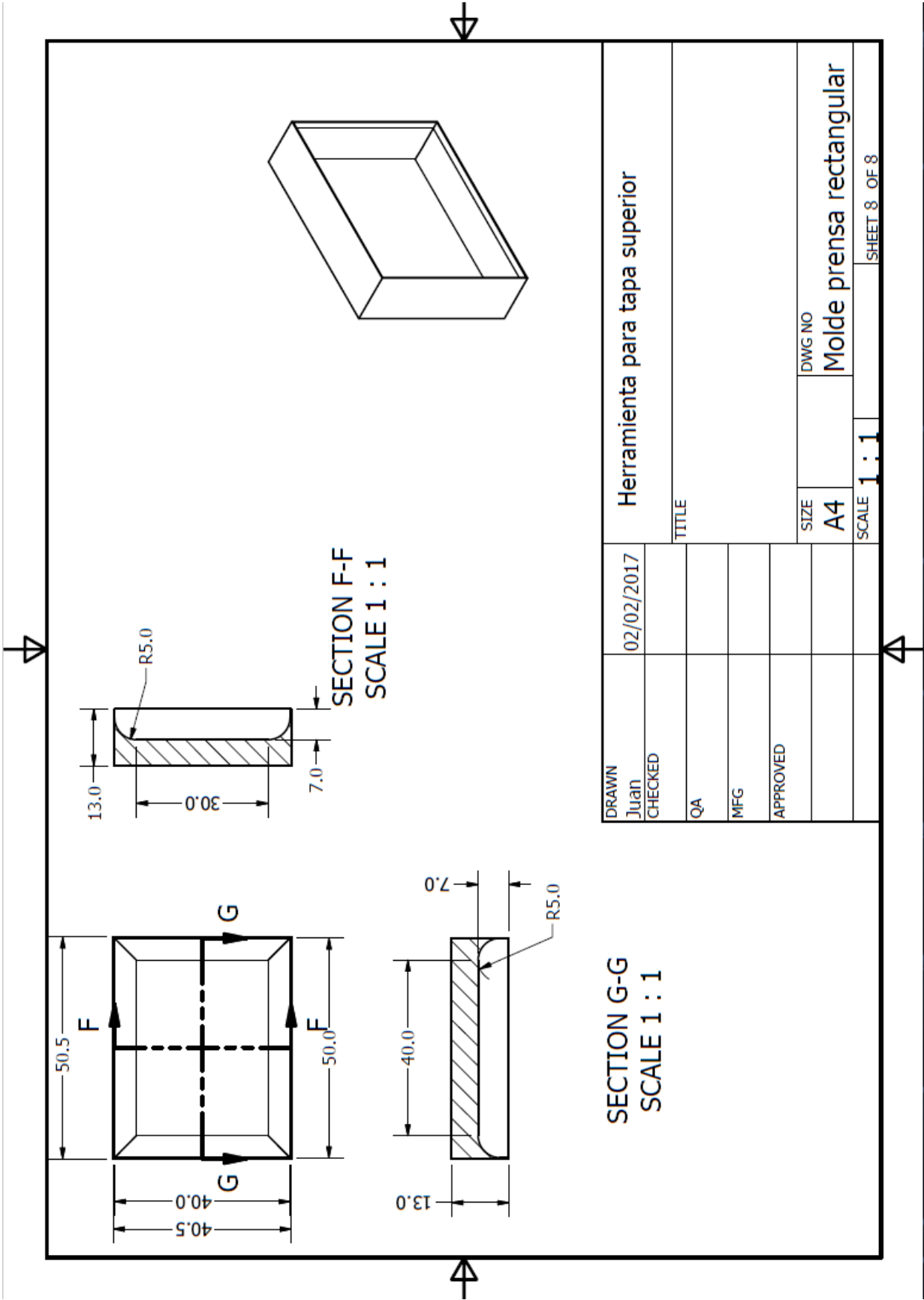
- [19] P. Mitschang and M. Christmann, "8 - Continuous fiber reinforced profiles" in *polymer matrix composites*. Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Germany, Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [20] S. Pansart, "6 - Prepreg processing" in *advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites*, vol. c. Lloyd, Industrial Services GmbH, Germany, Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [21] L. Ma, L. Wu, X. Cheng, D. Zhuo, Z. Weng, and R. Wang, "Improving the interlaminar properties of polymer composites using a situ accumulation method to construct the multi-scale reinforcement of carbon nanofibers/carbon fibers," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 72, pp. 65–74, 2015.
- [22] J. Schlimbach and A. Ogale, *Out-of-autoclave curing process in polymer matrix composites*. Schlimb@ch Business Solutions, Germany, Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [23] T. Centea, L. K. Grunenfelder, and S. R. Nutt, "Composites : Part A A review of out-of-autoclave prepregs – Material properties , process phenomena , and manufacturing considerations," *Compos. PART A*, Volume 70,, Pages 132-154, 2015.
- [24] R. Olivier, J. P. Cottu, and B. Ferret, "Effects of cure cycle pressure and voids on some mechanical properties of carbon /epoxy laminates," *Composites*, vol. 26, no. 7, pp. 509–515, 1995.
- [25] P. Compston and Z. H. Stachurski, "On the void reduction mechanisms in vibration assisted consolidation of fibre reinforced polymer composites," *Compos. Part A*, vol. 42, no. 3, pp. 320–327, 2011.
- [26] M. Ashokkumar, "The characterization of acoustic cavitation bubbles – An overview," *Ultrason. - Sonochemistry*, vol. 18, no. 4, pp. 864–872, 2011.
- [27] Y. Ahmed, G. Man, and F. J. Trujillo, "A new pressure formulation for gas-compressibility dampening in bubble dynamics models," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 32, pp. 247–257, 2016.
- [28] A. Leyton, Sintesis de requerimientos para el grupo de investigacion, Tema: "Criterios para diseño de fijador de transporte oseó," Universidad del valle, Cali, Colombia. 2017.
- [29] J. Grande, "diseño, construcción y evaluación de un prototipo de fijación externa para transporte y alargamiento óseo." Tesis de pregrado, Universidad del valle, Cali Colombia, 2015.
- [30] A. P. A. Z. Carvajal, "desarrollo de elementos tipo riel de fibra de carbono para sistemas de fijación y transporte", Tesis de pregrado, Universidad del valle, Cali Colombia, 2018.
- [32] J. Schön, "Coefficient of friction and wear", A carbon fiber epoxy matrix composite, vol. 257, pp. 395–407, 2004.
- [33] A. F. C. PINZÓN, "desarrollo de un dispositivo de fijación externa para transporte y alargamiento óseo", Tesis de pregrado, Universidad del valle, Cali Colombia, 2016.

9. ANEXOS

Se anexan los planos de los moldes y de las piezas fabricadas junto con las operaciones de maquinado.







DRAWN	02/02/2017	Herramienta para tapa superior	
Juan		TITLE	
CHECKED			
QA			
MFG			
APPROVED			
		SIZE	DWG NO
		A4	Molde prensa rectangular
		SCALE	SHEET 8 OF 8
		1 : 1	

