

Desarrollo de una conexión tipo cuña para tirantes en tanques de hidrógeno conformables fabricados en material compuesto de fibra de carbono

Sianca, Lucas Primo

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina
28 de julio de 2025

Desarrollo de una conexión tipo cuña para tirantes en tanques de hidrógeno conformables fabricados en material compuesto de fibra de carbono

Sianca, Lucas Primo

Proyecto Final de Ingeniería Mecánica presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Directores:

Ing. Pedro Sismondi – Ing. Guillermo Rodríguez – Ing. Juan Sismondi

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina

28 de julio de 2025

Dedicatoria

A mi familia, que me brindó contención y apoyo incondicional.

Gracias por acompañarme a lo largo de la vida, ayudarme a ser quien soy
y darme las herramientas para alcanzar mis objetivos.

Agradecimientos

Agradezco a la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario, especialmente a la Escuela de Ingeniería Mecánica. Gracias a los profesores Dr. Ing. Guillermo Rodríguez e Ing. Pedro Sismondi por supervisar y guiar el desarrollo de este trabajo.

Agradezco al Ministerio de Educación de la Nación Argentina y al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) por darme la oportunidad de acceder a la beca ALEARG 2024–2025, en el marco de la cual llevé a cabo este proyecto.

Finalmente, agradezco a la Universidad Técnica de Múnich, especialmente a la M. Sc. Elisabeth Gleis, por haberme recibido en la Cátedra de Compuestos del Carbono (LCC) y por su valiosa supervisión. Sus aportes, ideas y acompañamiento durante largas horas de discusión fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

Resumen

La presente tesis fue realizada en la Cátedra de Compuestos del Carbono (LCC) de la Universidad Técnica de Múnich (TUM), Alemania, en el marco de una estancia académica internacional ALEARG. El trabajo se desarrolló como tesis de máster en ingeniería en dicha institución, y fue presentado en una instancia oral formal ante los integrantes de la cátedra. En este contexto, se abordó el desafío de integrar recipientes a presión en los espacios reducidos de vehículos propulsados por hidrógeno, lo que requiere repensar el diseño convencional de tanques cilíndricos. En el proyecto ADAPT-H2 Tanks [1], el uso de revestimientos internos poliméricos (liners) en tanques Tipo IV —que dependen de un liner interno para garantizar la impermeabilidad— limita la inclusión de canales de pequeño diámetro, haciendo necesaria la adopción de tirantes de Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP) de mayor diámetro que en investigaciones previas. Los métodos tradicionales de anclaje no son adecuados para estos diámetros, ya que no garantizan una transferencia de carga adecuada. Estos tirantes son utilizados para contrarrestar tensiones que surgen por momento flector en las paredes planas de tanques de forma cuboide.

Este trabajo presenta una conexión mecánica por cuña como solución alternativa para anclar tirantes CFRP de gran diámetro en la pared compuesta de un recipiente a presión. Se desarrolló una estrategia de bobinado sobre placa plana para fabricar especímenes tipo cupón representativos, minimizando el uso de material. Se llevaron a cabo dos campañas de bobinado, con mejoras en la alineación de la herramienta, la inserción de conos y el manejo de la resina.

Se diseñó y fabricó un banco de ensayos mecánicos para evaluar la resistencia a tracción de la conexión por cuña en futuras investigaciones. Se diseñaron fijaciones de acero para sujetar las muestras de forma segura, incorporando factores de seguridad y permitiendo condiciones de ensayo repetibles.

Se analizaron micrografías, obteniéndose los siguientes resultados: el área de conexión cercana al agujero cónico mostró una compactación mejorada, mientras que la porosidad en otras regiones indicó la necesidad de métodos de compactación más eficaces para laminados planos. Este trabajo sienta las bases para estudios posteriores.

Palabras clave: Conexión por cuña, tirantes de CFRP, recipientes a presión de hidrógeno conformables, bobinado de filamento, proceso de bolsa de vacío, contenido de volumen de fibra, ensayo de tracción.

Abstract

This thesis was carried out at the Chair of Carbon Composites (LCC) of the TUM, Germany, as part of an international academic exchange under the ALEARG program. The work was developed as a master's thesis in engineering at said institution and was presented in a formal oral defense before the members of the chair.

Within this context, the challenge of integrating pressure vessels into the confined spaces of hydrogen-powered vehicles was addressed, requiring a rethinking of conventional cylindrical tank designs. In the ADAPT-H2 Tanks project [1], the use of polymer liners in Type IV tanks — which rely on an internal liner to ensure impermeability — limits the inclusion of small-diameter channels. This makes it necessary to adopt CFRP struts with larger diameters than those used in previous research. Traditional anchoring methods are not suitable for these dimensions, as they do not provide adequate load transfer. These struts are used to counteract tensile stresses resulting from bending moments in the flat walls of cuboid-shaped tanks.

This work presents a mechanical wedge connection as an alternative solution for anchoring large-diameter CFRP struts into the composite wall of a pressure vessel. A flat-plate winding strategy was developed to manufacture representative coupon specimens while minimizing material usage. Two winding campaigns were conducted, improving tool alignment, cone insertion, and resin handling.

A mechanical test bench was designed and manufactured to evaluate the tensile strength of the wedge connection in future research. Steel fixtures were developed to securely hold the samples, incorporating safety factors and enabling repeatable test conditions.

Micrographs were analyzed, yielding the following results: the connection area near the conical hole showed improved compaction, while porosity in other regions indicated the need for more effective compaction methods for flat laminates. This work lays the groundwork for future studies.

Keywords: Wedge connection, CFRP struts, conformable hydrogen pressure vessels, filament winding, vacuum bagging, fiber volume content, tensile testing.

Índice

Dedicatoria II

Agradecimientos III

Abstract V

Nomenclatura IX

Lista de abreviaturas X

1. Introducción 1

2. Estado del arte 4

2.1. Introducción general a los tanques compuestos 4

2.2. Proceso de enrollado de filamentos 5

2.2.1. Bobinado CNC 6

2.2.2. Compactación del laminado en el bobinado filamentario 7

2.2.3. Bobinado de placas 9

2.3. Proceso de Vacuum Bagging 11

2.4. Recipientes a presión conformables 11

2.5. Métodos de conexión para unir elementos de refuerzo a la pared del recipiente en recipientes de CFRP 15

2.5.1. Conexión mediante bucles de fibra 15

2.5.2. Principios de integración mediante cuñas en el diseño estructural 16

2.6. Diferenciación respecto a trabajos previos 19

3. Análisis detallado del concepto de conexión en cuña 22

3.1. Concepto de fabricación de las muestras con conexión en cuña 24

3.1.1. Proceso general de fabricación de un recipiente a presión Tipo IV con liner interno 24

3.1.2. Fabricación de cupones de ensayo 25

3.2. Diseño y fabricación de la herramienta de enrollado 27

3.3. Diseño del dispositivo de ensayo mecánico para la conexión en cuña 29

4. Materiales, máquinas y métodos 33

4.1. Materiales . . . 33
4.2. Máquinas . . . 34
4.3. Fabricación de muestras tipo cupón para conexiones en cuña . . . 34
4.3.1. Preparación del mandril . . . 35
4.3.2. Preparación de la máquina y programa de enrollado . . . 37
4.3.3. Enrollado . . . 41
4.3.4. Separación de fibras para integración de la cuña . . . 43
4.3.5. Preparación y proceso de embolsado al vacío . . . 44
4.3.6. Curado . . . 47
4.3.7. Desmoldeo . . . 47
4.3.8. Corte . . . 48
4.3.9. Preparación y ensamblaje de las probetas de ensayo . . . 50
4.4. Imagen de sección transversal . . . 54

5. Mejoras logradas y desafíos detectados en las conexiones en cuña 57
5.1. Ajustes del proceso entre el primer y segundo enrollado . . . 57
5.1.1. Mejora en el uso de resina y reducción en la cantidad de capas en el segundo enrollado . . . 57
5.1.2. Rediseño de la herramienta de localización de agujeros . . . 58
5.1.3. Mejora en la alineación de fibras y conos para las conexiones . . . 60
5.1.4. Implementación de un recubrimiento de fieltro para el manejo interno de la resina . . . 63
5.1.5. Modificación de la herramienta de enrollado para cambios rápidos de dirección a 90 grados . . . 65
5.2. Mejoras futuras y recomendaciones . . . 66
5.2.1. Problemas de alineación de fibras y mejora del patrón de agujeros . . . 67
5.2.2. Mejora en la alineación de la herramienta con los ejes de la máquina de enrollado para facilitar los cambios de dirección de 90 grados . . . 68
5.3. Resultados y discusión . . . 69
5.3.1. Fabricación de las muestras . . . 69
5.3.2. Imágenes en corte transversal . . . 71
5.4. Resumen y recomendaciones para el desarrollo futuro de conexiones en cuña . . . 74

6. Resumen y recomendaciones 77
6.1. Resumen . . . 77

6.2. Recomendaciones 79

Referencias bibliográficas **82**

Lista de figuras **86**

Apéndice 1: Estructura del directorio de datos **93**

Apéndice 2: Cálculos para definir el dispositivo de fijación **94**

Apendice 3: Calculo de resistencia para tornillos M12 (Clase 8.8) **96**

Apendice 4: Planos **98**

Nomenclatura

Símbolo	Unidad	Descripción
$\boldsymbol{V_f}$	[%]	Fracción en volumen
$\boldsymbol{\alpha}$	[°]	Ángulo de la cuña
$\boldsymbol{l}$	$[mm]$	Longitud
$\boldsymbol{r}$	$[mm]$	Radio de la cuña
$\boldsymbol{d_1}$	$[mm]$	Diámetro del tirante
$\boldsymbol{d_2}$	$[mm]$	Diámetro de la cuña
$\boldsymbol{t}$	$[mm]$	Espesor de la capa
$\mathbf{A}_{\text{rod}}$	[mm^2]	Área del tirante
$\mathbf{A}_{\text{outer}}$	[mm^2]	Área de la parte externa del cono
$\mathbf{A}_{\text{wedge}}$	[mm^2]	Área de la parte superior de la cuña
$\mathbf{r}_{\text{rod}}$	[mm]	Radio del tirante
$\mathbf{r}_{\text{outer}}$	[mm]	Radio de la parte externa del cono
$\mathbf{r}_{\text{wedge}}$	[mm]	Radio de la parte superior de la cuña

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Significado
FCEV	Vehículo Eléctrico de Celda de Combustible
FCEVs	Vehículos Eléctricos de Celda de Combustible
PV	Recipiente a Presión
PVs	Recipientes a Presión
BEVs	Vehículos Eléctricos a Batería
CFRP	Polímero Reforzado con Fibra de Carbono
UTM	Máquina Universal de Ensayos
TUM	Universidad Técnica de Múnich
CNC	Control Numérico por Computadora
RTM	Moldeo por Transferencia de Resina
GFRP	Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio
FDM	Modelado por Deposición Fundida
MSLA	Aparato de Estereolitografía enmascarada
PLA	Ácido Poliláctico
FVC	Contenido de Volumen de Fibra
W_1	Primer Bobinado
W_2	Segundo Bobinado
ROI	Región de Interés

1 Introducción

La decisión de la Unión Europea de prohibir los motores de combustión en 2035 resalta la necesidad urgente de desarrollar nuevos sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones automotrices [2].

Un avance destacado en este ámbito es la exploración del hidrógeno, un recurso abundante en la Tierra, para su uso en el transporte. El hidrógeno representa una alternativa a los motores de combustión interna, ya que sólo genera vapor de agua como subproducto. Gracias a la implementación de normativas y estrategias adecuadas, las industrias pueden producir hidrógeno sin emitir gases de efecto invernadero, promoviendo así el concepto de "hidrógeno verde" [2].

La integración de tanques de hidrógeno en Vehículos Eléctricos de Celda de Combustible (FCEVs) presenta múltiples requisitos. A diferencia de la forma rectangular de las baterías de automóviles —que ya exige un diseño de chasis diferente al de los vehículos con motor de combustión—, la instalación de tanques de hidrógeno requiere además una disposición estructural única que incrementa considerablemente los costos [3]. No obstante, adoptar una geometría cúbica para los Recipientes a Presión (PVs), que usualmente son cilíndricos, podría simplificar su integración en el chasis de Vehículos Eléctricos a Batería (BEVs) [4]. Unificar estos elementos de diseño entre distintas plataformas puede reducir significativamente los costos y mejorar la viabilidad general de los vehículos propulsados por hidrógeno, contribuyendo así a un futuro sostenible.

Los recipientes a presión cilíndricos convencionales, que operan a presiones de trabajo entre 350 y 700 bar, están disponibles en varios tamaños, siendo la capacidad estándar de aproximadamente 125 litros [5].

Sin embargo, debido a los estrictos requisitos de resistencia de los PVs, solo existen algunas soluciones conceptuales que abordan las concentraciones de tensiones que surgen en diseños no cilíndricos [7] [8] [9], particularmente en las paredes planas. En estas, actúan elevadas fuerzas de flexión generadas por la presión interna. No obstante, en los conceptos actuales de recipientes a presión conformables, los refuerzos internos contrarrestan estas fuerzas, evitando que las paredes se deformen. Una de las estrategias propuestas consiste en insertar tirantes como refuerzos entre las paredes planas exteriores e incrustar sus extremos dentro del laminado para distribuir mejor la carga y reducir la flexión.

En trabajos anteriores, se ha demostrado la viabilidad inicial de este concepto mediante investigaciones más detalladas, incluyendo una caracterización de propiedades mecánicas [10] [11] [12]. En dicho enfoque, se aplica conformado térmico para anclar la cabeza del tirante, generando una conexión pretensada entre el tirante y la pared del recipiente. Este proceso consiste en calentar la cabeza del tirante y el material circundante, provocando una deformación controlada que mejora el ajuste mecánico y la transferencia de carga. Si bien este método ayuda

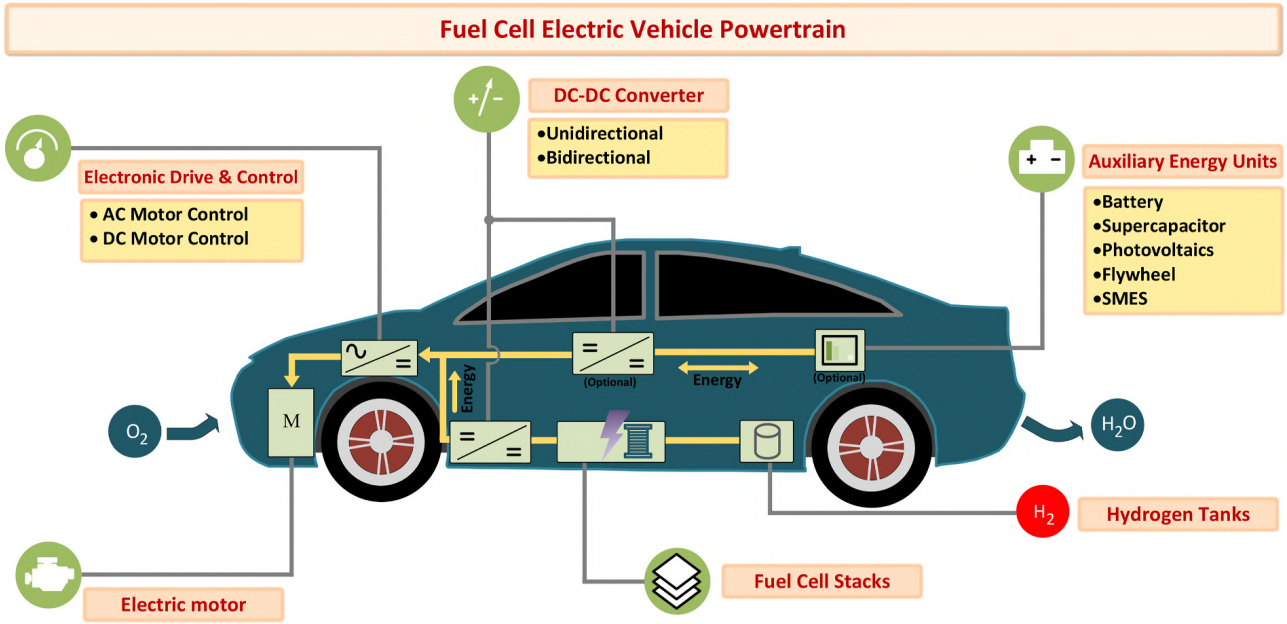


Figura 1.1: Representación esquemática de un tren motriz de un Vehículo Eléctrico de Celda de Combustible (FCEV) con sistemas auxiliares de potencia [6].

a reducir las concentraciones de tensión en la unión, también limita el diámetro máximo del tirante debido a restricciones térmicas y de material. En el presente trabajo, se introduce un nuevo enfoque basado en el uso de cuñas como método de unión, lo cual permite la integración de tirantes de mayor diámetro.

La Figura 1.2 ilustra cómo se ancla el tirante mediante el método de conformado térmico.

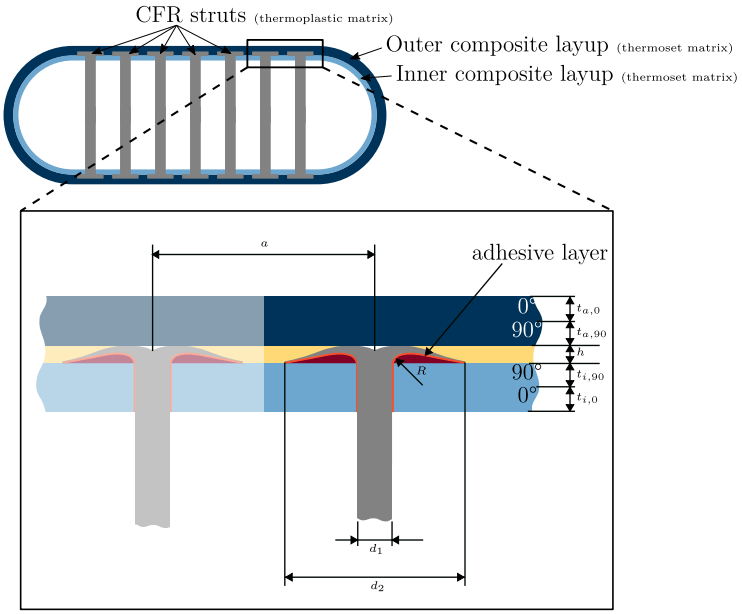


Figura 1.2: Esquema del concepto de Recipiente a Presión (PV) con un detalle ampliado del tirante anclado y los parámetros geométricos [10].

Los tres objetivos principales de esta tesis son:

1. Evaluar y validar un enfoque basado en una conexión por cuña para identificar los desafíos asociados.

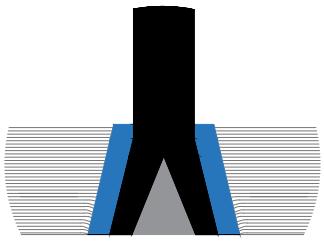


Figura 1.3: Esquema de la conexión por cuña.

2. Desarrollar un método adecuado para la fabricación de probetas tipo cupón y un dispositivo para su caracterización mecánica en la máquina universal de ensayos.

3. Producir muestras de ensayo mediante el proceso desarrollado y analizarlas a través de ensayos mecánicos y cortes metalográficos.

2 Estado del arte

Este capítulo aborda la fabricación de tanques de hidrógeno a presión, comenzando con una introducción a los tanques compuestos y al proceso de bobinado filamentario, incluyendo el bobinado Control Numérico por Computadora (CNC) y la compactación del laminado, destacando su importancia para mejorar la integridad estructural y la eficiencia del proceso de manufactura. También se analiza el proceso de vacío (vacuum bagging) y los recipientes a presión conformables, ya que desempeñan un papel clave en el aumento del rendimiento y la durabilidad del producto final. El capítulo concluye con un análisis de los métodos de conexión utilizados en CFRP para unir estos elementos de refuerzo a la pared del recipiente, lo cual es fundamental para garantizar la estabilidad mecánica bajo alta presión, junto con una comparación de trabajos previos para identificar avances y brechas en la tecnología actual.

2.1 Introducción general a los tanques compuestos

Los recipientes a presión de hidrógeno pueden clasificarse en cinco tipos según su configuración. Estas disposiciones se muestran en la Tabla 2.1. Un aspecto fundamental en el diseño de estos recipientes es la reducción efectiva de la permeación de hidrógeno a través de sus paredes. Para ello, los recipientes a presión actuales utilizan liners. Los liners pueden estar hechos de metal o plástico, y pueden consistir en un material polimérico, formando así un tanque de tipo IV. [13]

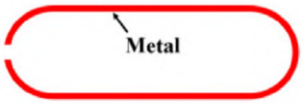
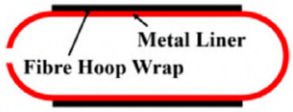
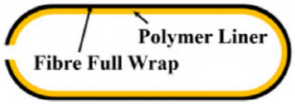
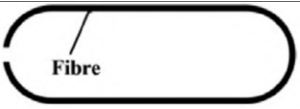
Tipo de tanque	Esquema
I	
II	
III	
IV	
V	

Tabla 2.1: Clasificación de los diferentes tipos de tanques de hidrógeno con esquemas [13].

Desde el Tipo I hasta el Tipo IV, el potencial para una construcción liviana aumenta a medida que disminuye el contenido metálico. A partir del Tipo II, la incorporación de CFRP contribuye a mejorar las propiedades mecánicas, como una mayor resistencia, lo que permite alcanzar presiones de trabajo más elevadas. [3]

Tipo de tanque	**Metal**	**Compuesto**	**Polímero**	**Presión máx. (bar)**	**Aplicaciones**
I	Acero/Al	/	/	Al: 175, Acero: 200	Aplicaciones submarinas
II	Revestimiento de acero/Al	Enrollamiento filamentario alrededor de la parte cilíndrica	/	Al/vidrio: 263, Acero/fibra de carbono: 299	Pilas de combustible estacionarias y tecnologías de hidrógeno (FCH)
III	Revestimiento de Al/Acero	Envoltura compuesta (fibra de vidrio/aramida o fibra de carbono)	/	Al/vidrio: 305, Al/aramida: 438, Al/carbono: 700	Vehículos
IV	/	Envoltura compuesta (fibra de carbono)	Revestimiento de polímero	350 (buses), 700	Vehículos
V	/	Compuesto	/	1000	Aplicaciones aeroespaciales

Tabla 2.2: Materiales, presión máxima y aplicaciones de los diferentes tipos de tanques de hidrógeno [13].

Los tanques Tipo IV se utilizan actualmente en aplicaciones móviles, mientras que los tanques Tipo V representan una etapa más avanzada de desarrollo. Como se muestra en la Tabla 2.2, a diferencia de los tanques Tipo IV, los tanques Tipo V no poseen revestimientos internos; en su lugar, emplean métodos avanzados, como resinas modificadas, para evitar la permeación de hidrógeno. [3]

2.2 Proceso de enrollado de filamentos

El enrollamiento filamentario es una técnica para la fabricación de materiales compuestos que consiste en impregnar continuamente las fibras con resina. Luego, estas fibras se enrollan sobre un mandril rotatorio para obtener estructuras cilíndricas o esféricas, como recipientes a presión o tuberías. La orientación de las fibras puede controlarse para mejorar la resistencia y la rigidez del componente. [14]

2.2.1 Bobinado CNC

La Figura 2.1 ilustra la técnica de bobinado húmedo utilizada en la fabricación por filamento. Las fibras se impregnan continuamente con resina a través de un baño antes de ser enrolladas sobre un mandril rotativo. Gracias a la resina empleada en este método, las fibras quedan recubiertas de manera efectiva, lo que proporciona una fuerte adherencia y uniformidad en la estructura de material compuesto. El bobinado húmedo se utiliza para fabricar recipientes a presión compuestos y productos tubulares. [15]

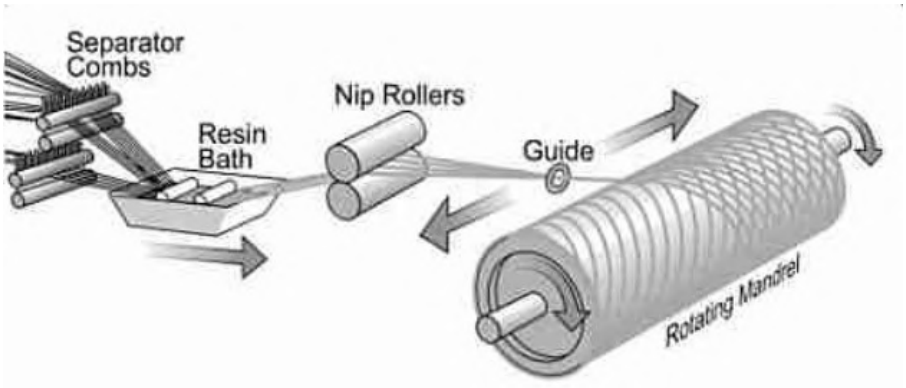


Figura 2.1: Sistema de bobinado por filamento, en el que las fibras atraviesan peines, un baño de resina, rodillos de presión y se enrollan sobre un mandril rotativo para formar una estructura de material compuesto [15].

Los parámetros del proceso y la geometría del mandril desempeñan un papel fundamental en la calidad y el rendimiento de los compuestos fabricados mediante bobinado filamentario. Una mayor tensión en las fibras durante el proceso de bobinado ayuda a mejorar la compactación, lo que reduce el contenido de vacíos y mejora propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción. Sin embargo, una tensión excesiva puede provocar desalineación de las fibras o deformación del mandril. [16]

La geometría del mandril añade además complejidad al proceso, especialmente en formas no cilíndricas. Bordes afilados o cambios bruscos en la curvatura pueden generar defectos como puentes de fibra o arrugas, comprometiendo la integridad estructural del laminado. Las geometrías irregulares requieren patrones de bobinado precisos para evitar espesores no uniformes o vacíos en la colocación de las fibras. Esto exige una optimización de los parámetros del proceso, como la tensión de la fibra, el contenido de resina y las condiciones de curado, con el fin de obtener un laminado uniforme, sin defectos y que cumpla con los requisitos de propiedades mecánicas deseados. [16]

La incorporación de la técnica de apertura de fibras (fiber spreading) en el proceso de enrollado filamentario permite reducir el peso y el crecimiento de fisuras, además de mejorar las propiedades mecánicas. Al extender las fibras, se garantiza una distribución más uniforme, lo que facilita una mejor impregnación con la resina y reduce la posibilidad de acumulaciones

o vacíos entre las fibras [17]. El ensanchado de fibras impacta directamente en la calidad de los patrones de bobinado, influyendo en qué tan bien se adaptan las fibras a la superficie del mandril y en su capacidad para cubrir la geometría deseada [15].

Como se muestra en la Figura 2.2, existen tres patrones principales de bobinado: el bobinado circunferencial, donde las fibras se disponen en un ángulo cercano a 90°; el bobinado helicoidal, donde el mandril rota mientras el suministro de fibra se desplaza a lo largo de su eje para generar el ángulo de bobinado deseado; y el bobinado polar, donde las fibras se enrollan de un polo al otro mientras el mandril gira alrededor de su eje longitudinal [15].

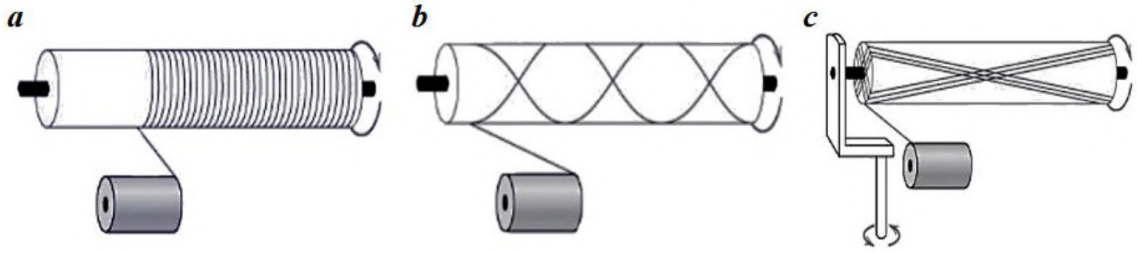


Figura 2.2: Representación esquemática de los tres tipos principales de patrones de bobinado [15]; a) Bobinado circunferencial; b) Bobinado helicoidal; c) Bobinado polar.

En un PV, las distintas capas (con sus respectivos ángulos de orientación) se apilan de manera tal que se logra la secuencia de apilamiento deseada, ya que, como muestra la Figura 2.3, las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción del laminado bobinado, dependen en gran medida del ángulo de bobinado.

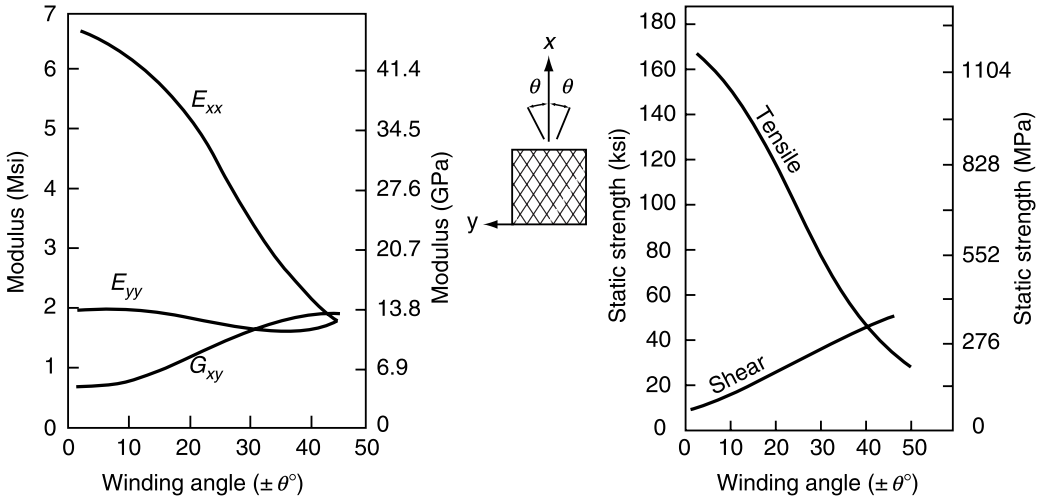


Figura 2.3: Variación de las propiedades mecánicas en una pieza fabricada por enrollado filamentario en función del ángulo de bobinado [18].

2.2.2 Compactación del laminado en el bobinado filamentario

La compactación del laminado en el proceso de bobinado filamentario está fuertemente influenciada por la geometría del mandril y por los parámetros del proceso, como la tensión de

bobinado, la velocidad de deposición y la secuencia de capas. Aunque la máquina controla la tensión del hilo y esta se mantiene constante incluso al bobinar sobre superficies no cilíndricas, la presión de compactación resultante (en la dirección del espesor del laminado) depende de la curvatura de la superficie. La compactación tiende a ser más uniforme en superficies cilíndricas debido a la distribución de presión constante, lo que facilita una distribución homogénea de las capas de fibra y minimiza los defectos. Esta geometría permite un mayor control sobre la fracción volumétrica de fibra en comparación con superficies planas, y reduce la probabilidad de problemas como arrugas o acumulación excesiva de material [19].

La compactación se vuelve más desafiante en superficies con curvaturas variables, como geometrías cúbicas o irregulares. Las diferencias en los gradientes de superficie pueden generar variaciones localizadas en la compactación y alineación de las fibras, lo que reduce la eficiencia de compactación y provoca la formación de defectos en la estructura del laminado. [19] [20]

Como se muestra en la Figura 2.4 (b), el bobinado sobre un mandril circular suele dar lugar a mayores fracciones volumétricas de fibra (V_f) debido a la compactación natural inducida por la tensión durante la deposición de las fibras [20]. Los mandriles de mayor diámetro permiten una distribución más uniforme de las fuerzas de tensión y compactación, lo que reduce las concentraciones de tensión. En cambio, los mandriles de menor diámetro generan presiones de compactación más altas en zonas específicas, lo que mejora la alineación de las fibras y la adhesión entre capas, aunque también incrementa el riesgo de deformación o daño en las fibras si no se controla adecuadamente la tensión. [19]

Como se muestra en la Figura 2.4 (a), el bobinado sobre superficies planas representa un desafío mayor, ya que la presión de compactación (P) generada por la tensión de las fibras es prácticamente nula debido a la ausencia de curvatura en la superficie. Como resultado, la tensión natural aplicada durante el proceso de bobinado no genera una compactación suficiente para consolidar las fibras ni mejorar la adhesión entre capas. Por lo tanto, alcanzar una fracción volumétrica de fibra adecuada y una buena adhesión entre capas en superficies planas requiere la aplicación de una fuerza normal externa (por ejemplo, mediante presión mecánica) para compensar la falta de compactación natural. Esta limitación explica por qué la fracción volumétrica de fibra en superficies planas permanece por debajo del 50 %, salvo que se emplee un método de compactación externo. [19]

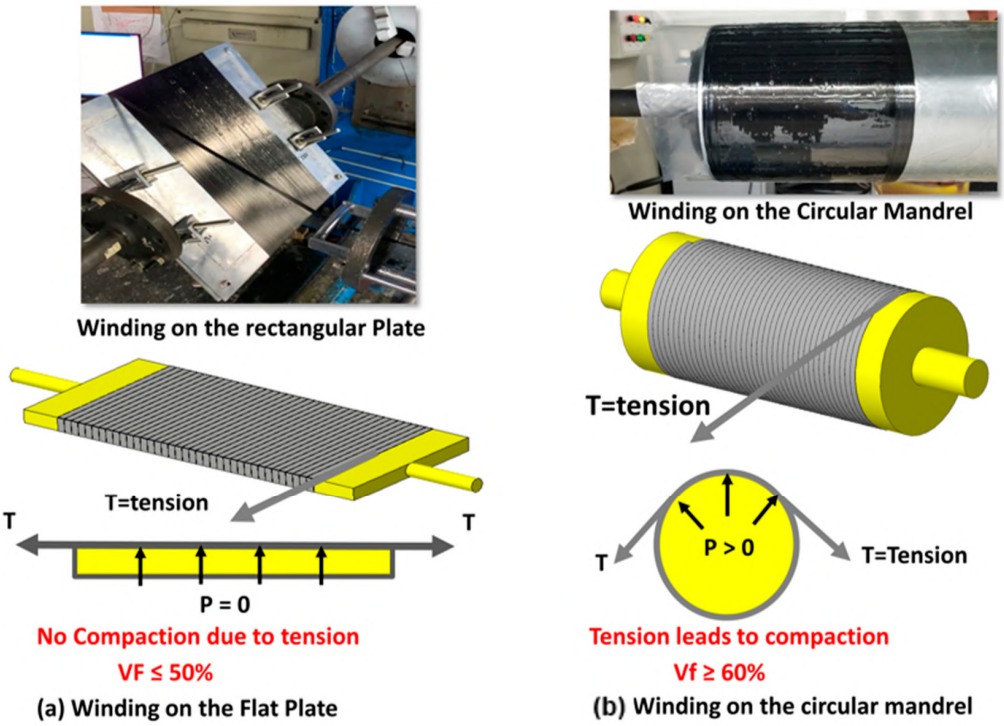


Figura 2.4: Comparación entre el bobinado sobre una placa plana y sobre un mandril circular. Las superficies planas (a) no generan compactación por tensión de la fibra ($P = 0$), mientras que los mandriles circulares (b) sí lo hacen ($P > 0$), aumentando la fracción volumétrica de fibra y mejorando la adhesión. [20].

El aumento de la fracción volumétrica de fibra (V_f) mediante una mayor tensión en las fibras durante el proceso de bobinado filamentario mejora significativamente las propiedades mecánicas de los recipientes a presión compuestos, tales como la resistencia a la tracción, la rigidez y la resistencia al corte interlaminar [21]. Las investigaciones indican que incrementar V_f del 45 % al 63 % mejora estas propiedades al mismo tiempo que reduce el espesor del material, lo que incrementa la eficiencia gravimétrica [22]. Sin embargo, este efecto no se observa al bobinar sobre superficies planas, ya que una mayor tensión en la fibra por sí sola no genera compactación debido a la falta de curvatura en la superficie (véase Figura 2.4(a)). Para aumentar V_f en superficies planas, es necesario aplicar métodos externos de compactación.

2.2.3 Bobinado de placas

El bobinado sobre mandriles con superficies planas presenta desafíos específicos en comparación con las geometrías cilíndricas, particularmente en lo que respecta a lograr una compactación uniforme y una adecuada alineación de las fibras.

A diferencia de las formas cilíndricas, donde la curvatura natural favorece la compactación, como se explicó en la Sección 2.2.2, las superficies planas requieren medidas adicionales, como la aplicación de presión de compresión, por ejemplo, mediante placas laterales durante el curado.

La distribución uniforme de tensiones a lo largo de las capas se vuelve considerablemente más difícil en geometrías planas. [23]

Ökten et al. [24] sugieren emplear una alta tensión en la fibra, del orden de 50 N, combinada con la aplicación manual de presión mediante un rodillo, para el bobinado de placas con material towpreg.

Lograr una compactación adecuada en placas planas durante el proceso de bobinado filamentario requiere técnicas específicas para abordar los desafíos asociados a la limitada fuerza normal inherente. Ökten et al. [24] sugiere utilizar una alta tensión en la fibra, del orden de 50 N, en combinación con la aplicación manual de presión mediante un rodillo, para el bobinado de placas con material towpreg, con el fin de evitar la desalineación de las fibras y asegurar una estructura compuesta uniforme. Además, la aplicación manual de presión durante el bobinado contribuye a consolidar las fibras, mejorando la adhesión entre capas. [24]

Es fundamental gestionar la interacción entre las características de la superficie y el movimiento de la fibra para abordar los problemas de desalineación durante el bobinado filamentario sobre placas planas. Las investigaciones muestran que reducir la rugosidad superficial puede aumentar el coeficiente de fricción, lo cual ayuda a estabilizar la fibra durante la deposición, especialmente cuando se realiza un bobinado en ángulos oblicuos en lugar de un bobinado puramente circunferencial. El uso de recubrimientos superficiales específicos, como resinas epoxi con rugosidad controlada, puede mejorar la adherencia y minimizar los defectos causados por el desplazamiento lateral de las fibras. [25]

La elección del ángulo de bobinado desempeña un papel fundamental y debe adaptarse a la aplicación específica. Los ángulos cercanos a la ortogonalidad (cercanos a 90°) se utilizan predominantemente en superficies planas, ya que corresponden al bobinado circunferencial. Este enfoque maximiza la resistencia a la tracción y minimiza las tensiones entre capas [18]. Las placas suelen bobinarse a 90° o en sus cercanías porque generalmente se fabrican para producir probetas destinadas a la caracterización mecánica, donde los ensayos se realizan en la dirección de la fibra o perpendicular a ella para evaluar con la resistencia a la tracción y la rigidez de las mismas. Aunque ocasionalmente se emplean patrones de bobinado alternativos en placas, el bobinado circunferencial sigue siendo el más común debido a su capacidad para generar propiedades mecánicas consistentes y minimizar la desalineación de las fibras.

Una relación fija entre la rotación del mandril y el movimiento lineal del carro es esencial para asegurar una colocación uniforme de las fibras y una cobertura de capas constante, evitando huecos como solapes o discontinuidades durante el proceso de bobinado. Una relación fija garantiza una alineación precisa de las fibras según el ángulo de bobinado deseado. Ökten et al. [24] sugieren una velocidad de avance de 25 mm/min para el bobinado de towpregs en ángulo helicoidal, a fin de lograr una deposición uniforme de las fibras y evitar irregularidades en la tensión.

2.3 Proceso de Vacuum Bagging

El proceso de vacuum bagging, una técnica de baja presión, se utiliza predominantemente para piezas laminadas a mano. La Figura 2.5 ilustra el principio fundamental de este proceso. [26]

El proceso de vacuum bagging se lleva a cabo después de que la última capa de fibras ha sido completamente impregnada con resina. En este proceso, el laminado se cubre inicialmente con una película de desmoldeo perforada y, posteriormente, con una tela absorbente, lo que asegura una distribución uniforme de la presión durante la aplicación del vacío. [27] [28]

espués de colocar estas dos capas, se sella al vacío todo el conjunto —la pieza junto con su molde— utilizando una lámina adecuada para vacío y una junta periférica. Una bomba genera el vacío, creando una diferencia de presión respecto a la presión atmosférica (aproximadamente 1 bar), lo que compacta las fibras impregnadas con resina. El exceso de resina es absorbido por la tela respirable absorbente o es dirigido, a través de un canal integrado en el molde, hacia un recipiente colector. [28] [29]

La presión de vacío contribuye al desgasificado y a la compresión del laminado, y se mantiene durante todo el proceso de curado de la matriz. Este método permite la fabricación de componentes con un contenido reducido de vacíos y un aumento significativo en el Contenido de Volumen de Fibra (FVC). [28] [30]

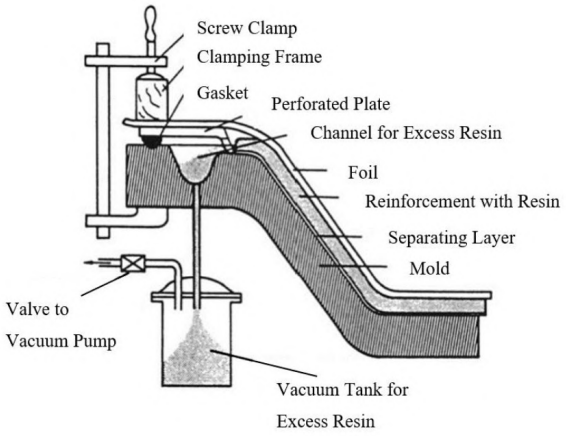


Figura 2.5: Principio del proceso de vacuum bagging [26].

2.4 Recipientes a presión conformables

El uso de un diseño cúbico para tanques conformables permitiría aumentar la eficiencia del espacio de instalación en aplicaciones móviles propulsadas por hidrógeno (por ejemplo, automóviles). Los tanques conformables mejoran el aprovechamiento del espacio porque su

forma no cilíndrica les permite adaptarse de manera más eficiente a la estructura del vehículo, reduciendo el volumen no utilizado. Sin embargo, este enfoque presenta el desafío de que las fuerzas de compresión dentro del tanque se transforman solo parcialmente en fuerzas de tracción en la pared del recipiente [31]. En su lugar, aparecen momentos flectores en las zonas planas del tanque [7], lo que puede comprometer la integridad estructural. Como se muestra en la Figura 2.6, las tensiones resultantes son significativamente mayores en las paredes planas del tanque debido a estos momentos flectores. Existen diferentes enfoques para reforzar los tanques en estas áreas y mitigar estos efectos.

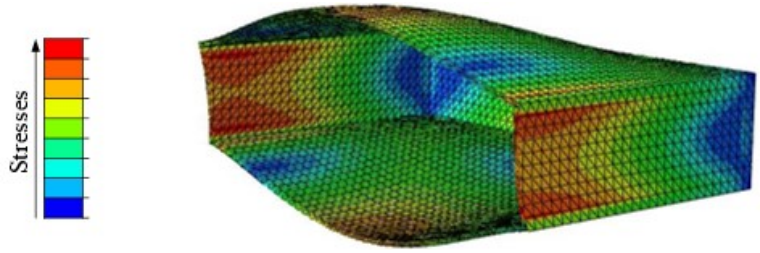
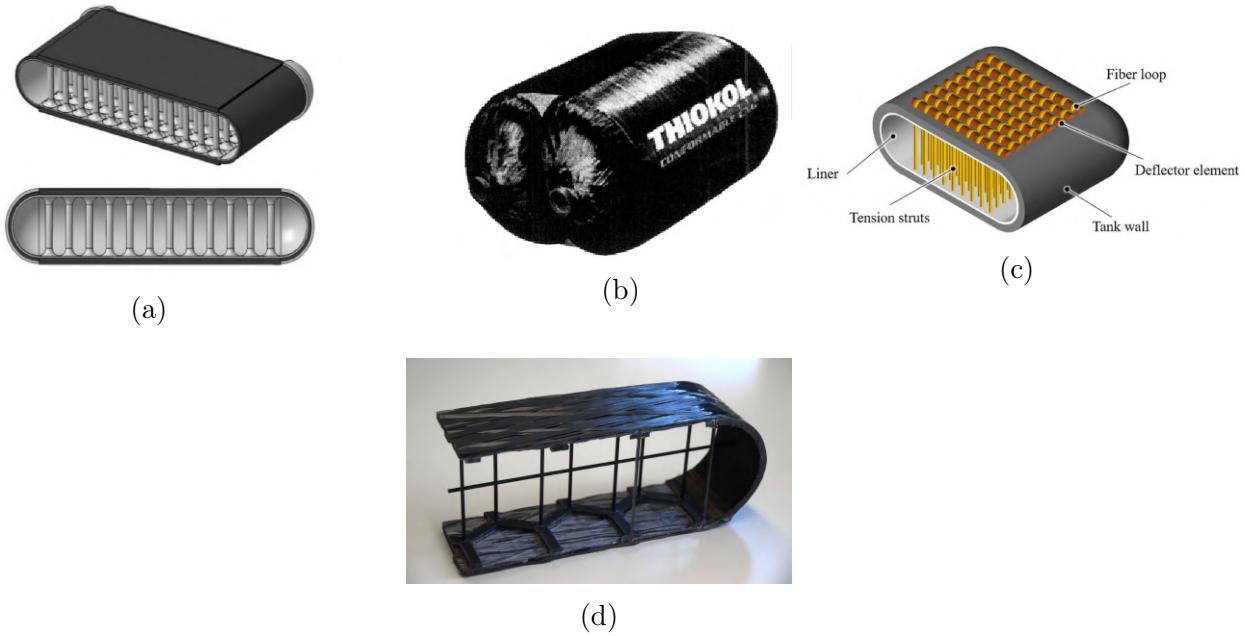


Figura 2.6: Vista en seccion de un recipiente a presión con forma cúbica – Representación cualitativa de la simulación numérica de las tensiones y deformaciones debidas a la carga por presión interna [32].



(a) (b) (c)

(d)

Figura 2.7: (a) Recipiente a presión tipo II de forma cúbica con tirantes internos [33]. (b) Combinación de subunidades compuestas por pequeños cilindros para formar un recipiente a presión de forma cúbica mayor [34]. (c) Tanque de forma cúbica reforzado con fibras de aramida [4]. (d) Demostrador con inserciones de tirantes de CFRP con matriz termoplástica [7].

Los recipientes de forma cúbica con conexiones internas utilizan tirantes de tracción internos para soportar cargas de alta presión dentro de un diseño compacto. El tanque equilibra la eficiencia volumétrica y la reducción de peso al integrar estos tirantes, lo que lo hace adecuado

para sistemas avanzados de almacenamiento de hidrógeno en espacios de diseño restringidos [33]. Un ejemplo se muestra en la Figura 2.7a.

Los recipientes de forma cúbica construidos a partir de una combinación de subunidades, como se muestra en la Figura 2.7b —por ejemplo, subceldas cilíndricas con extremos abombados—, ofrecen un enfoque modular y escalable para el almacenamiento de hidrógeno a alta presión. Este método consiste en el bobinado y la unión de subceldas individuales, seguido de un proceso adicional de recubrimiento para formar una unidad cúbica de mayor tamaño. Los huecos formados entre las subceldas generan volúmenes no utilizados que reducen la eficiencia volumétrica total. [35]

Continuando con el principio de tirantes de tracción, este implica el uso de tirantes delgados para conectar paredes opuestas, como se muestra en la Figura 2.7d. La Figura 2.8 ilustra la secuencia de fabricación de un recipiente a presión cúbico, extraída de un artículo de investigación del mismo departamento de la TUM donde se desarrolla esta tesis [7]. Como se muestra en la secuencia, la fabricación aditiva construye primero un núcleo. A este núcleo se adhieren tirantes continuos reforzados con fibra, impregnados con una matriz termoplástica, los cuales se integran en el sistema de bobinado. Los extremos sobresalientes de los tirantes se moldean con un soldador después de aplicar las primeras capas, y todas las capas subsiguientes se depositan sobre los extremos reformados.

Otro método consiste en insertar mechas de fibra de aramida seca a través de un preformado seco de fibra de carbono de un recipiente a presión bobinado, como se muestra en la Figura 2.7c, conectando las superficies planas exteriores. Las fibras se redirigen y se perforan nuevamente a través del laminado en el lado opuesto, creando bucles que definen un recorrido estructurado de las fibras. Luego, se insertan componentes en estos bucles para estabilizar el recorrido. Toda la estructura se infunde con resina utilizando el proceso Moldeo por Transferencia de Resina (RTM). Este enfoque garantiza la consolidación a pesar de los desafíos que plantean los laminados gruesos necesarios para soportar presiones de hasta 700 bar [36].

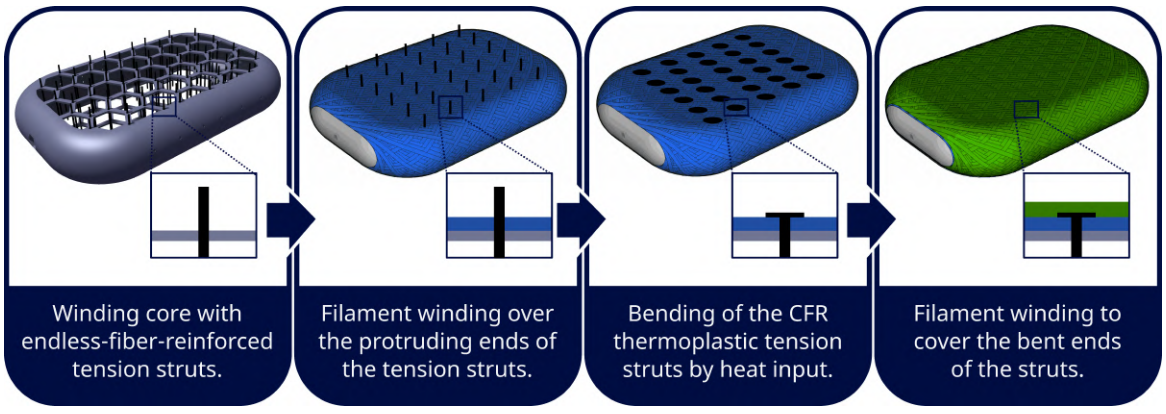


Figura 2.8: Etapas principales del proceso de fabricación de un PV con tirantes de refuerzo [7].

En la secuencia descrita anteriormente, los tirantes atraviesan las fibras, dañando la estructura del refuerzo. Por ello, se colocan pequeñas tapas sobre los tirantes para facilitar la

perforación, como se muestra en la Figura 2.9.

Se fabricó un demostrador del proceso para evaluar la viabilidad del concepto de fabricación, tal como se muestra en la Figura 2.8. Además del daño a las fibras, el demostrador reveló otros desafíos adicionales del concepto:

- La conexión entre el laminado y los tirantes moldeados no fue lo suficientemente fuerte, por lo que se requirió una mejora.
- El proceso de bobinado en dos pasos utilizado en el recipiente del demostrador resultó en una adhesión insuficiente entre los dos laminados y una separación geométrica causada por la altura de la cabeza doblada del tirante.
- No fue posible utilizar enrollado filamentario para cubrir las secciones del domo del tanque conformable.

Johannes Drexler llevó a cabo investigaciones adicionales para resolver estos problemas. Véase la Sección 2.6.

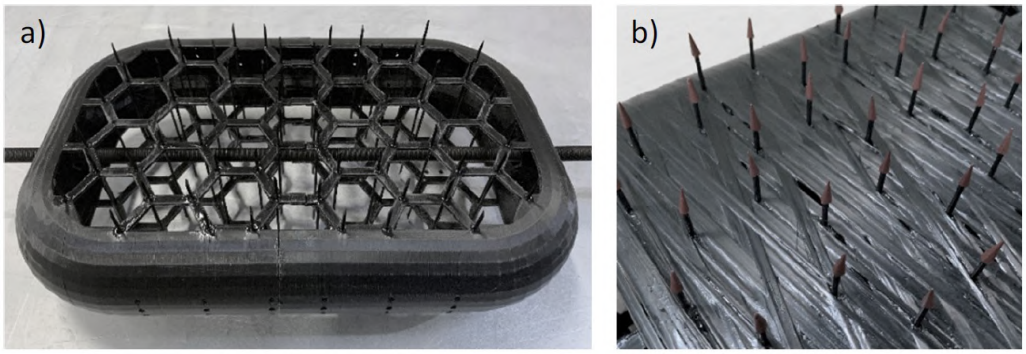


Figura 2.9: a) Estructura esquelética antes del bobinado. b) Laminado con extremos de tirantes sobresalientes [7].

Aunque este trabajo de investigación [7] presenta una base teórica, en el proyecto ADAPT-H2 Tanks [1] se están desarrollando avances adicionales en las metodologías de fabricación para recipientes a presión conformables. Este proyecto tiene como objetivo colaborar con socios industriales para desarrollar técnicas de fabricación viables para sistemas de almacenamiento de hidrógeno, ampliando los conceptos introducidos en la investigación inicial.

Uno de los desafíos asociados a los conceptos presentados en este capítulo es la integración de un revestimiento polimérico para fabricar un tanque conformable de Tipo IV. En el proyecto ADAPT-H2-Tanks, actualmente se está desarrollando un recipiente conformable con liner polimérico. Esto requiere la integración de tirantes de mayor diámetro, lo cual a su vez demanda el desarrollo de nuevos métodos de conexión que garanticen la integridad estructural y una transferencia de carga fiable [1] [7].

2.5 Métodos de conexión para unir elementos de refuerzo a la pared del recipiente en recipientes de CFRP

En muchas aplicaciones donde se utiliza CFRP en configuraciones estructurales, no resulta sencillo unir los componentes a otras partes para aprovechar plenamente el potencial del material. En la mayoría de los casos, se perforan orificios para realizar uniones atornilladas o remachadas, las cuales se emplean principalmente para refuerzos longitudinales en aplicaciones aeroespaciales. Como alternativa, los componentes pueden unirse mediante adhesivos [18]. El uso de adhesivos puede resultar útil para reforzar las uniones de tirantes más gruesos en las paredes del tanque, pero no representa una solución definitiva debido a las elevadas tensiones que deben transferirse a través de ellos.

En comparación con el concepto anterior, en el que se utilizaban tirantes más delgados para distribuir la carga, el enfoque actual busca soportar mayores exigencias de transferencia de carga mediante tirantes de mayor diámetro. Este cambio está impulsado por la transición hacia un tanque de Tipo IV con un liner polimérico interno, lo cual incrementa las demandas estructurales sobre los tirantes. Por lo tanto, se requieren tirantes más gruesos para resistir las fuerzas superiores generadas por la presión interna.

El siguiente capítulo explorará distintos métodos de conexión para unir elementos de refuerzo a la pared del recipiente en recipientes de CFRP. Esto incluye conexiones mediante bucles de fibra, varillas embebidas y el principio de integración mediante cuñas. También se presentará una comparación con trabajos previos para evaluar las ventajas y limitaciones de cada enfoque.

2.5.1 Conexión mediante bucles de fibra

La técnica descrita para crear una conexión mediante bucles de fibra en recipientes a presión de forma cúbica consiste en guiar tirantes de aramida a través de la pared del tanque compuesto, formando bucles asegurados mediante elementos de desvío en ambos extremos. Esta estructura en bucle garantiza una transferencia de carga eficiente y refuerza la conexión entre las superficies superior e inferior del tanque. La Figura 2.10 ilustra el proceso de fabricación, mostrando la inserción de fibras de aramida mediante un método de tufting, la formación de los bucles de fibra y la integración de elementos metálicos de desvío para estabilizar la estructura [4].

Las conexiones mediante bucles de fibra han sido ampliamente estudiadas por su capacidad para lograr una transferencia de carga eficiente en estructuras compuestas. Se utilizan tanto en recipientes a presión como en ingeniería civil, por ejemplo, en puentes tipo arco con redes, donde las correas de tracción de CFRP han reemplazado a los colgantes de acero convencionales. Estas correas están sometidas a cargas de tracción cíclicas elevadas, por lo que la resistencia a la fatiga es un factor crítico en el desempeño estructural [37].

Vidrih et al. [38] investigaron el comportamiento a fatiga de correas de tracción continuas de CFRP impresas en 3D con una matriz de poliamida (PA12). Su estudio mostró que el límite de resistencia a fatiga de estas correas impresas en 3D fue un 20 % inferior al de las correas de CFRP producidas convencionalmente, aunque aún aceptable en comparación con los tirantes de acero. La investigación sugiere que mejorar la interfaz fibra-matriz y reducir el desgaste por fricción en los puntos de conexión podría aumentar la durabilidad de las conexiones mediante bucles de fibra bajo cargas cíclicas [38].

En recipientes a presión, las conexiones mediante bucles de fibra son particularmente beneficiosas para afrontar estados de carga complejos, como los generados por la presión interna y la expansión térmica. La configuración en bucle permite una transferencia de carga directa a través del espesor del compuesto, reduciendo la probabilidad de delaminación y fisuras en la matriz. La capacidad de los bucles de fibra para seguir trayectorias de carga optimizadas también mejora el rendimiento mecánico bajo condiciones de carga multiaxial [4].

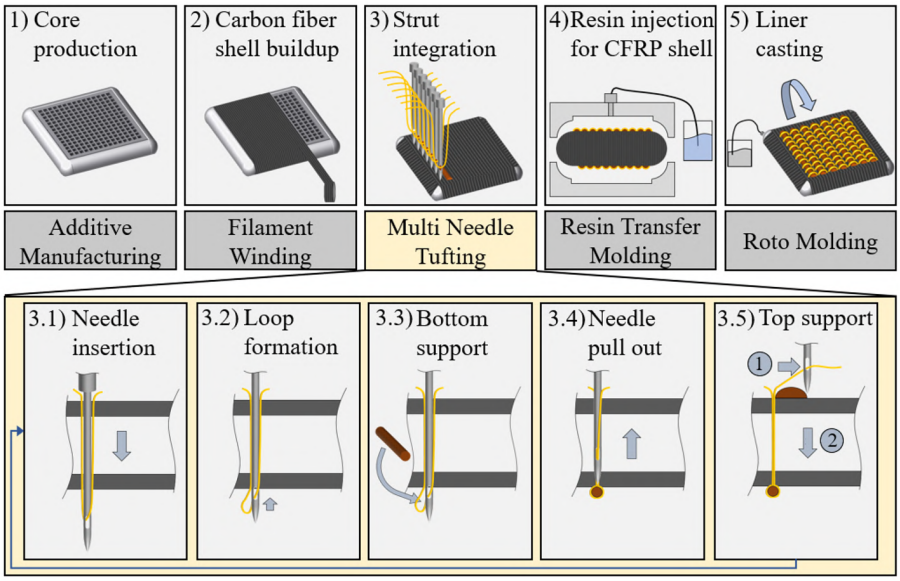


Figura 2.10: Proceso de fabricación de recipientes a presión con geometría cúbica mediante conexiones de bucles de fibra. La técnica consiste en guiar tirantes de aramida a través de la pared del tanque compuesto utilizando un método de *tufting*, formando bucles asegurados con elementos de desvío. Esto garantiza una transferencia de carga eficiente y refuerza la conexión entre las superficies superior e inferior del tanque [4].

2.5.2 Principios de integración mediante cuñas en el diseño estructural

El método de conexión mediante cuña es una técnica de transferencia de carga que puede utilizarse para mejorar la integración estructural de componentes compuestos reforzados con fibra. Este método minimiza las concentraciones de tensión y mejora la capacidad de carga mediante el uso de cuñas con parámetros controlados, como ángulos inferiores a 30 grados,

secciones transversales anchas y poco profundas, y un radio de cuña maximizado [39].

Krebs [39] desarrolló una tesis doctoral sobre el diseño de conexiones mediante cuñas en estructuras de polímero reforzado con fibra altamente solicitadas. Su trabajo investiga los mecanismos de transferencia de carga y los modos de fallo en conexiones compuestas por cuñas, optimizando la fricción interfacial y la resistencia adhesiva para mejorar la capacidad de soportar cargas. Los resultados experimentales indican que los laminados de capas finas, como los de CFRP, logran hasta un 25 % más de capacidad de carga en comparación con los de Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio (GFRP), debido a su mayor rigidez longitudinal. En el estudio de Krebs, se aplicaron superficies de apriete rugosas en la cara interna de la cuña para aumentar el coeficiente de fricción y mejorar la eficiencia del bloqueo por forma. El incremento de la rugosidad superficial mejora la fricción en los puntos de contacto, lo cual mejora el anclaje mecánico y ayuda a evitar deslizamientos bajo cargas elevadas [39].

Una conexión en cuña opera según el principio de convertir cargas de tracción en fuerzas de compresión mediante fricción en la interfaz. Cuando la cuña se inserta en la ranura o cavidad correspondiente, la carga de tracción aplicada genera una fuerza normal sobre las superficies de contacto, lo que incrementa la fricción y mejora la capacidad de transferencia de carga. La Figura 2.11 ilustra el principio básico de funcionamiento de una conexión en cuña, mostrando cómo una fuerza de tracción aplicada en la dirección de la fibra resulta en una fuerza de compresión hacia el exterior sobre las superficies de la cuña.

El proceso de fabricación típicamente implica el moldeo o mecanizado de los componentes de cuña a partir de materiales compuestos como el CFRP. Las superficies de contacto suelen ser tratadas para aumentar su rugosidad o recubiertas con una capa adhesiva para mejorar la fricción y el anclaje mecánico. La variación del ángulo de la cuña y de la rugosidad superficial permite ajustar la eficiencia de transferencia de carga y optimizar el desempeño estructural bajo diferentes condiciones de carga.

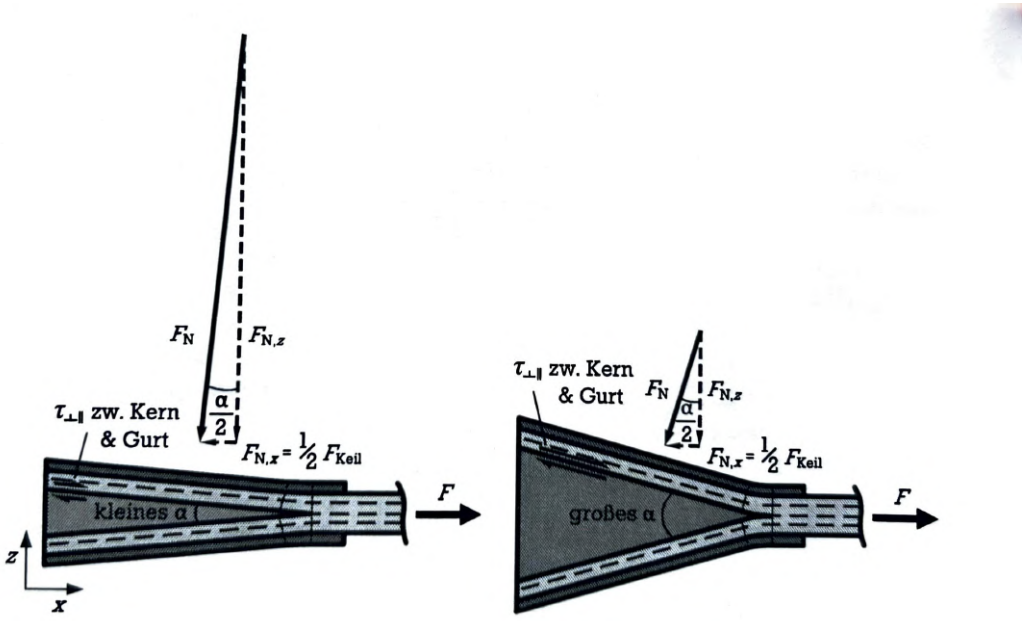


Figura 2.11: Principio básico de una conexión en cuña. La carga de tracción aplicada (F) genera una fuerza normal hacia el exterior (F_N) sobre las superficies de la cuña, lo que incrementa la fricción y mejora la transferencia de carga. El ángulo de la cuña (α) determina la eficiencia del mecanismo de transferencia de carga. [39].

El ángulo de la cuña (α) desempeña un papel fundamental en la efectividad de la conexión. Para condiciones de carga cuasi-estática, se prefieren ángulos mayores de hasta 30 grados, ya que ayudan a distribuir las fuerzas de manera más eficiente. Sin embargo, en escenarios con cargas oscilantes o por fatiga, se recomiendan ángulos de cuña menores a 10 grados para mejorar la resistencia frente a esfuerzos cíclicos. Además, si se garantiza una transferencia de carga efectiva, las conexiones en cuña pueden soportar hasta un 60 % de la fuerza de tracción aplicada en la unión, asegurando así una transferencia de carga adecuada. [39]

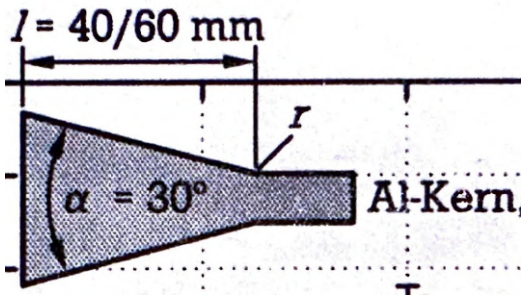


Figura 2.12: Ejemplo de una conexión en cuña con un núcleo de aluminio, que ilustra parámetros como el ángulo de cuña (α), la longitud de sujeción (l) y el radio (r), esenciales para mejorar la rigidez estructural y la transferencia de carga [39].

2.6 Diferenciación respecto a trabajos previos

Este estudio presenta una diferencia en la metodología de conexión de los tirantes a la pared del PV, enfocándose en el uso de una conexión en cuña para la transferencia de carga. A diferencia de trabajos anteriores [10], que se basaban en el moldeo del extremo del tirante con una geometría plana, la conexión en cuña propuesta busca mejorar la integridad estructural mediante una distribución de las fuerzas y un aumento en la resistencia de la interfaz. Los tirantes utilizados en este trabajo son de mayor diámetro que los empleados en diseños previos, lo cual vuelve impráctico el enfoque basado en moldeo debido a los mayores requerimientos de transferencia de carga y a las restricciones geométricas. El desarrollo de un método fiable para integrar la cuña en la conexión entre el tirante y la pared del PV constituye un eje central de esta investigación, ya que permite superar las limitaciones de los diseños anteriores.

El proceso de enrollado filamentario debe adaptarse significativamente para acomodar la conexión de cuña. A diferencia de otros procesos donde el tirante se inserta directamente durante el enrollado [10], este estudio propone un enfoque en dos etapas para crear la conexión. Primero, se enrollará un tanque utilizando la técnica de enrollado filamentario. Luego del curado, se realizarán orificios precisos en las paredes planas del tanque para permitir la inserción del tirante. Durante el curado, se insertará un espaciador cónico en el orificio para asegurar la alineación adecuada y crear la cavidad necesaria para la cuña. El tirante se posicionará a través del orificio, y la cuña se introducirá desde el lado opuesto, donde anteriormente estaba ubicado el espaciador. La cuña hará contacto con la superficie cónica creada por el espaciador, generando una fuerza normal que incrementa la fricción y mejora la eficiencia en la transferencia de carga.

La conexión en cuña tiene el potencial de soportar fuerzas mayores que otros métodos, principalmente debido al mayor diámetro de los tirantes más que al propio método de conexión. Los tirantes más gruesos son necesarios para soportar los mayores requerimientos de transferencia de carga asociados con la transición hacia un tanque Tipo IV con un liner polimérico interno. Esta mayor capacidad de carga requiere un sistema de ensayos más robusto para validar el diseño.

El dispositivo de ensayo será diseñado para evaluar la transferencia de carga de la conexión en cuña, midiendo las cargas aplicadas y la deformación resultante o los modos de fallo. Deberá resistir estas cargas elevadas sin comprometer la precisión de la medición ni la seguridad. Esto resalta la necesidad de un diseño cuidadoso del sistema de ensayo, ya que desempeñará un papel fundamental en la evaluación del desempeño global de la conexión en cuña.

En un trabajo previo, Drexler [10] investigó la influencia de diversos parámetros del proceso en la conexión de los tirantes al laminado enrollado, en particular el efecto sobre el rendimiento estructural y la calidad de fabricación de probetas tipo *coupon* que replican la unión entre tirante y pared. Mediante este estudio paramétrico, el experimento logró mejorar la unión de un tirante a un laminado plano (fabricado por enrollado filamentario), con el objetivo de alcanzar mejores

propiedades mecánicas, como la resistencia a tracción y la precisión dimensional en recipientes de presión fabricados con CFRP.

Para mejorar la conexión entre los tirantes y el laminado de la pared del tanque, el investigador demostró lo siguiente:

- La adición de una capa de resina pura en la zona de unión duplicó la fuerza máxima transferida.
- El espesor del laminado y el proceso de moldeo térmico de los tirantes son factores críticos para aumentar la resistencia de la conexión.
- La compactación anisotrópica en el laminado sugiere que los distintos grados de compactación según la orientación de las fibras pueden aprovecharse deliberadamente para mejorar el rendimiento del diseño. Esto significa que áreas específicas del laminado pueden optimizarse en términos de resistencia o rigidez, dependiendo de cómo se compacten las fibras durante el proceso de enrollado.

Drexler [10] y Kloiber [12] realizaron estudios relacionados con la integración de tirantes durante el proceso de enrollado filamentario. Los estudios de Drexler sobre la conexión de los tirantes con el laminado enrollado sentaron las bases de esta investigación. A partir de los aportes de Drexler, Kloiber amplió la investigación mediante un estudio exhaustivo de parámetros, explorando sistemáticamente variaciones en las trayectorias de enrollado, la tensión aplicada y las características del material. Su investigación proporcionó directrices para perfeccionar el proceso de enrollado, especialmente en geometrías no cilíndricas, lo que mejora la aplicabilidad de estos métodos en estructuras compuestas avanzadas.

Los estudios de Lettl [40] analizaron la influencia de dos parámetros clave: la longitud de los extremos moldeados de los tirantes y la fuerza de tracción que puede soportar la conexión entre el tirante y la pared del recipiente. Lettl observó que extremos más cortos —entre 4 mm y 12 mm— resultaban en mejores propiedades de unión debido a una distribución más homogénea de la resina y una reducción en las inclusiones de aire. Esto se debe a que los tirantes más cortos permiten una evacuación más eficiente del aire atrapado durante el curado, generando una estructura laminada más compacta y uniforme.

Además, la fuerza de tracción en la conexión entre el tirante y la pared del recipiente fue mayor en los tirantes de mayor diámetro, lo cual redujo la cantidad de vacíos entre las fibras y aumentó la capacidad de carga efectiva de la conexión. Esto sugiere que optimizar la longitud y el diámetro del tirante puede mejorar significativamente el desempeño mecánico de la unión.

Schenk [11] investigó qué configuraciones angulares son las más adecuadas. Demostró que las configuraciones $[90°/0°]$ y $[90°/80°]$ mostraron un rendimiento similar entre sí, pero superaron a la configuración $[90°/45°/0°/-45°]$. Esto sugiere que una distribución no uniforme de fibras

alrededor del tirante es ventajosa, ya que permite que la resina espesada penetre mejor en las capas, mejorando así la integridad estructural general.

Schenk también exploró otros parámetros clave que afectan la resistencia de la conexión en laminados reforzados con fibra y su integridad estructural general. Además de las configuraciones angulares de las fibras, investigó variaciones en el espesor del laminado interno y en el porcentaje de masa de fibra. El estudio evaluó configuraciones con 7, 9, 11 y 13 capas internas, y encontró que la configuración de 9 capas con un ángulo de 80 grados presentó la mayor resistencia a un fuerza de tracción promedio, alcanzando 2319 N, superando al resto de las configuraciones.

Además, Schenk analizó el impacto de la distribución de la resina en la calidad de la conexión. Por ejemplo, la configuración $[90°/45°/0°/-45°/...]$ generó más barreras alrededor del tirante, lo que impidió que la resina llenara correctamente las ranuras, dando como resultado una conexión más débil. En cambio, las configuraciones $[90°/0°/...]$ y $[90°/80°/...]$ mostraron una distribución de resina más homogénea y una mejor adhesión entre fibra y matriz.

En resumen, los estudios previos han establecido la importancia de optimizar la longitud y el diámetro del tirante, la orientación de las fibras y la distribución de la resina para mejorar la capacidad de carga de las uniones en materiales compuestos. El trabajo de Lettl [40] destacó la relevancia de utilizar extremos de tirante cortos moldeados y diámetros mayores para mejorar la resistencia de la conexión. Al mismo tiempo, el estudio de Schenk [11] demostró las ventajas de una distribución no uniforme de las fibras y un espesor optimizado del laminado. Basándose en estos antecedentes, esta tesis propone un nuevo enfoque basado en una conexión en cuña para mejorar la eficiencia en la transferencia de carga y el rendimiento estructural. Los hallazgos de investigaciones anteriores ofrecen información valiosa sobre el comportamiento del material y la mecánica de la unión, que servirán de base para el diseño y la validación del sistema de conexión por cuña propuesto.

3 Análisis detallado del concepto de conexión en cuña

Los PVs de hidrógeno en vehículos eléctricos con celda de combustible (FCEVs) requieren un liner interno impermeable para evitar fugas de hidrógeno. En el proyecto en curso ADAPT-H2-Tanks [1], se está desarrollando un tanque Tipo IV que incluye dicho liner. Sin embargo, este liner no puede fabricarse con canales de pequeño diámetro para permitir el paso de tirantes delgados, ya que ello comprometería su integridad. En su lugar, solo pueden integrarse tirantes más gruesos, lo cual incrementa los requerimientos de transferencia de carga en los puntos de conexión. Esto plantea un nuevo desafío: desarrollar un método confiable para conectar tirantes continuos reforzados con fibra de mayor diámetro a la pared del tanque sin comprometer la integridad estructural. El concepto de conexión en cuña presentado en esta sección busca abordar este problema, mejorando la capacidad de carga y la estabilidad mecánica de la conexión.



Figura 3.1: Boceto 3D de una conexión en cuña.

Una conexión en cuña convierte cargas de tracción en fuerzas de compresión mediante la fricción en la interfaz entre la cuña y el material circundante. Cuando se aplica una fuerza sobre el tirante, la cuña presiona contra la pared del material compuesto, generando una fuerza normal en la superficie de contacto. Esto incrementa la fricción, lo que ayuda a asegurar la conexión y le permite soportar cargas más elevadas sin deslizarse. La Figura 3.1 muestra un modelo 3D renderizado de una conexión en cuña.

El mecanismo de cuña sujeta firmemente el tirante mediante un enclavamiento mecánico, que se refiere al acoplamiento físico entre la cuña y las superficies adyacentes, como se muestra en la Figura 3.2. Este enclavamiento se logra gracias a la forma de la cuña, la cual aplica una presión aumentada sobre el material circundante cuando se ejerce una fuerza sobre el tirante. Dicha presión incrementa la fricción y genera un efecto de autoajuste, asegurando una conexión estable y confiable bajo cargas elevadas.

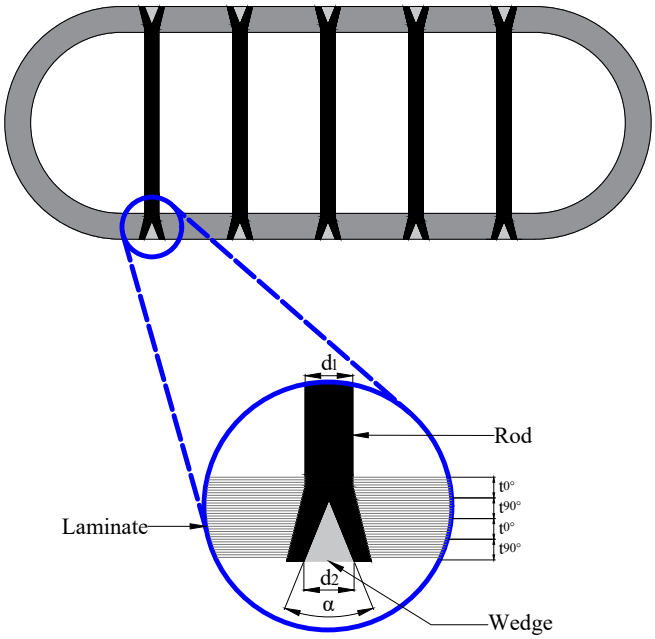


Figura 3.2: Corte transversal de un PV conformable que emplea conexiones en cuña para unir los tirantes de refuerzo a la pared del recipiente, mostrando las capas del material compuesto junto con los parámetros relevantes para el estudio.

Parámetro	**Descripción**
d_1	Diámetro de la varilla
d_2	Diámetro de la cuña
α	Ángulo de la cuña

Tabla 3.1: Parámetros geométricos importantes de la conexión en cuña.

En la Figura 3.2, el espesor de las capas t a 0 y 90 grados es crítico, ya que la resistencia total de la conexión en cuña depende en gran medida del espesor del laminado. La Tabla 3.1 resalta además los tres parámetros principales de diseño para esta conexión. [39]

3.1 Concepto de fabricación de las muestras con conexión en cuña

3.1.1 Proceso general de fabricación de un recipiente a presión Tipo IV con liner interno

La fabricación de un recipiente a presión Tipo IV con un liner interno implica cuatro pasos principales: enrollado filamentario, separación de fibras para la inserción del cono, curado e inserción de la varilla con sus respectivas conexiones. El proceso general se ilustra en la Figura 3.3.

El proceso comienza con la fabricación de un liner interno de polímero. El liner actúa como una barrera de gas, evitando la permeación de hidrógeno. En algunos diseños, el liner incluye canales preformados para permitir la integración de tirantes estructurales.

En el siguiente paso, se utiliza el proceso de enrollado de filamentos, explicado en la Sección 2.2, para aplicar capas de CFRP sobre el liner. En este proceso, las fibras se impregnan con resina y se enrollan sobre un mandril giratorio utilizando una máquina de enrollado de filamentos.

Después del proceso de enrollado, las fibras se separan mientras aún están húmedas para permitir la inserción de conos que las mantendrán apartadas durante los pasos siguientes. La separación de las fibras debe realizarse cuidadosamente para evitar daños.

Luego, el recipiente se cura bajo presión controlada. Esto permite que la resina endurezca y una las capas de fibra. Se utiliza el proceso de vacío (vacuum bagging) para eliminar burbujas de aire y mejorar la calidad del laminado, con el objetivo de asegurar un espesor constante y una distribución uniforme de la resina. En el último paso mostrado en la Figura 3.3, se retiran los conos temporales utilizados para separar las fibras, dejando un orificio cónico en el que se inserta la varilla de CFRP. Luego, se inserta una cuña de aluminio desde la parte superior, expandiendo la punta de la varilla y presionándola firmemente contra la pared del PV.

El método de conexión en cuña adoptado en esta tesis se aplica en este paso final. Es importante destacar que los conos de aluminio no se insertan mientras el compuesto aún está húmedo antes del curado, ya que esto podría causar desalineación de la conexión y de la varilla. En esta etapa, las capas del laminado todavía están blandas, y la inserción de varillas de gran diámetro dificultaría el control de la geometría y la alineación perpendicular de la conexión.



Figura 3.3: Resumen del proceso de fabricación de un recipiente a presión Tipo IV con liner interno.

3.1.2 Fabricación de cupones de ensayo

El objetivo es fabricar cupones de ensayo para evitar la necesidad de enrollar un tanque completo, lo que reduce el consumo de material. Además, este enfoque acelera el proceso de producción de muestras, ya que solo se enrolla una placa plana que luego puede cortarse en especímenes más pequeños. También ofrece una mejor repetibilidad, permitiendo obtener muestras de tamaño personalizado.

Se enrolla una superficie plana, generando secciones rectangulares que pueden cortarse en muestras individuales. El proceso sigue los mismos pasos que la fabricación completa del tanque descrita en la sección anterior, pero con la diferencia de que se utiliza una placa más plana para reducir el uso de material. Además, se cortan secciones cuadradas alrededor de los orificios cónicos para extraer las muestras destinadas a ensayo.

Después del enrollado, se utiliza una punta afilada para atravesar las fibras y separarlas, como se muestra en la Figura 3.4. Posteriormente, se insertan conos, como se ve en la Figura 3.5, en estas posiciones para mantener las fibras separadas y evitar que vuelvan a su posición original.



Figura 3.4: Proceso de separación de fibras utilizando una punta afilada. La punta penetra las capas de fibra, creando un espacio para ajustar su alineación [41].

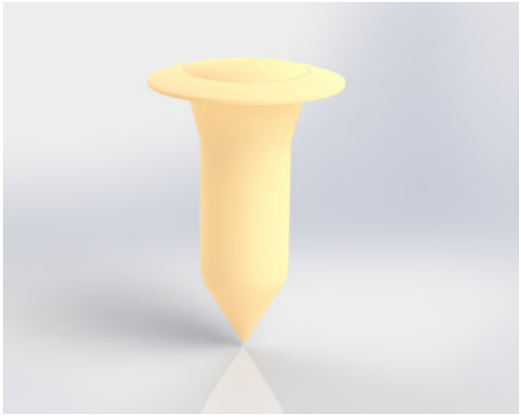


Figura 3.5: Cono para insertar en el laminado compuesto y mantener las fibras separadas.

Se realiza un proceso de vacío, en el cual el laminado con los orificios cónicos sellados mediante los respectivos conos se coloca dentro de una bolsa de vacío. La presión negativa se utiliza para desgasificar y comprimir el laminado. Durante este paso también se incluye una prueba de sellado, la cual se explica en detalle más adelante.

Después del curado, las muestras se cortarán en forma de cuadrados y se procederá al ensamblaje de las conexiones en cuña. Este proceso comienza utilizando un soldador para fundir las varillas con matriz termoplástica, seguido de la inserción de la cuña. Todo el procedimiento se lleva a cabo sobre una estructura diseñada específicamente para este fin, asegurando una alineación adecuada de las conexiones y repetibilidad entre las muestras. Estos pasos se muestran en la Figura 3.6.

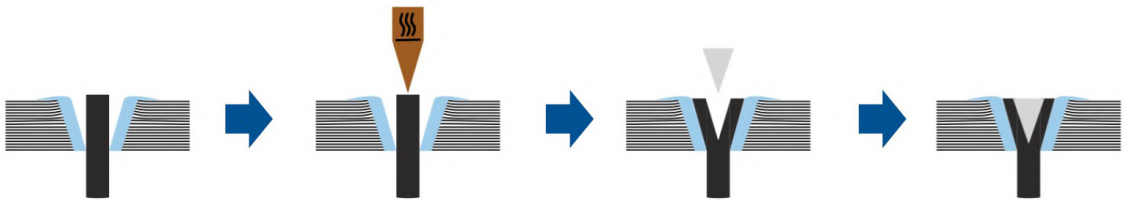


Figura 3.6: Proceso de ensamblaje de la conexión en cuña. Los pasos incluyen la inserción de la varilla a través del laminado, la fusión del material termoplástico de la varilla con un soldador, y la inserción de la cuña para asegurar la conexión [41].

3.2 Diseño y fabricación de la herramienta de enrollado

Se optó por una herramienta de enrollado personalizada en lugar de un tanque completo, ya que enrollar un tanque entero es un proceso que consume mucho material. Este enfoque permite ahorrar material y posibilita la creación de una herramienta que facilita la repetibilidad en la producción de muestras para futuras investigaciones sobre conexiones en cuña.

Dado que la herramienta debe desmontarse y rotarse 90 grados periódicamente para realizar enrollados perpendiculares, fue esencial maximizar la eficiencia mediante la producción simultánea de múltiples especímenes. Se eligió una configuración de 3 por 3, lo que permite producir nueve muestras en una sola operación.

Para este estudio, se seleccionó una distancia entre orificios de 60 mm, como se indica en el esquema de la Figura 3.7, para asegurar la producción de muestras de 50 mm × 50 mm, considerando que la separación entre tirantes en el proyecto ADAPT-H2-Tanks [1] es de 50 mm. Los 10 mm adicionales contemplan el material que se elimina con la sierra durante el corte.

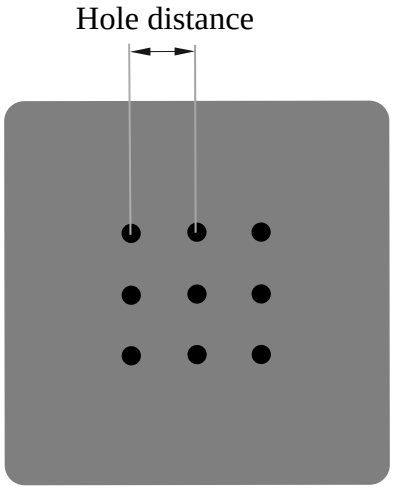
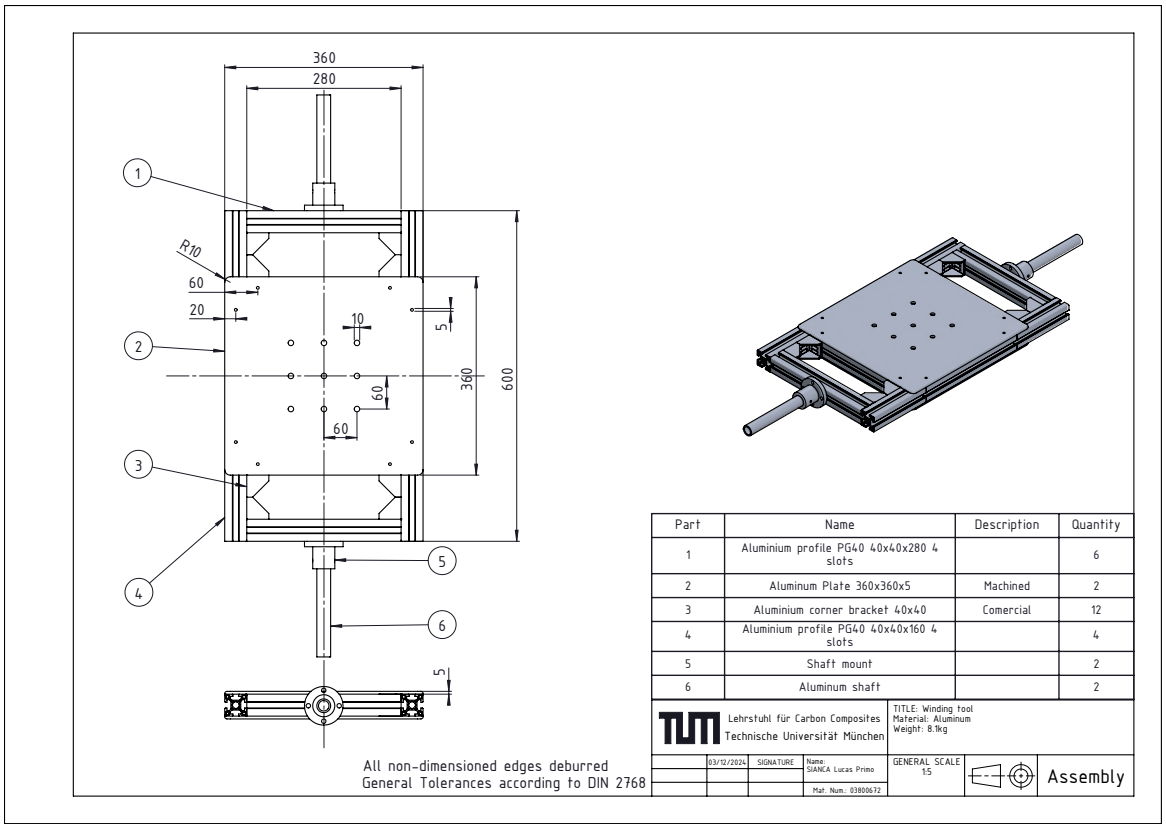


Figura 3.7: Esquema de la placa de enrollado, donde se indica la distancia entre orificios.

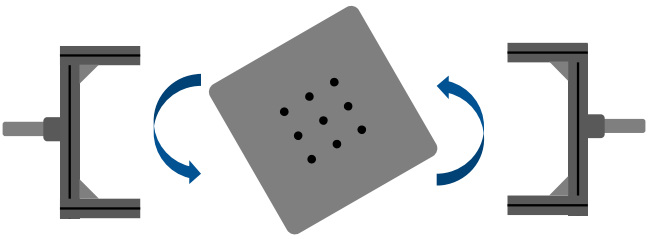
Toda la herramienta fue diseñada para ensamblarse mediante tornillos, considerando que el enrollado se realizará inicialmente a 0 grados. Una vez que se forma una capa con el espesor suficiente, la herramienta debe desmontarse y rotarse 90 grados para permitir el enrollado en la dirección perpendicular, como se muestra en el esquema de la Figura 3.9a. Se eligió aluminio como material para reducir el peso.

Esta herramienta fue completamente cortada, perforada y ensamblada en el taller de la cátedra, reflejando un enfoque práctico orientado a garantizar su funcionalidad y adaptabilidad para los experimentos previstos. En la Figura 3.8 se muestra el plano técnico de la herramienta.

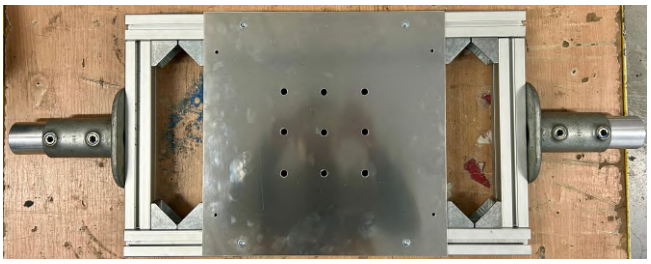


Part	Name	Description	Quantity
1	Aluminium profile PG40 40x40x280 4 slots		6
2	Aluminum Plate 360x360x5	Machined	2
3	Aluminium corner bracket 40x40	Comercial	12
4	Aluminium profile PG40 40x40x160 4 slots		4
5	Shaft mount		2
6	Aluminum shaft		2

Figura 3.8: Plano técnico de la herramienta de enrollado diseñada para el proceso de enrollado de filamentos, fabricada con perfiles y placas de aluminio.



(a)



(b)

Figura 3.9: (a) Esquema que muestra cómo la herramienta se rota 90 grados para permitir el enrollado en direcciones perpendiculares entre sí. (b) Herramienta de enrollado finalizada, fabricada con perfiles y placas de aluminio, con una placa central giratoria que permite el enrollado en dirección 0 y 90 grados.

Los pasos a seguir para la fabricación de las muestras utilizando esta herramienta se detallan

en la Sección 4.3, con una explicación más profunda en las secciones posteriores.

3.3 Diseño del dispositivo de ensayo mecánico para la conexión en cuña

Un dispositivo de ensayo adecuado es esencial para evaluar el comportamiento mecánico de la conexión en cuña. Esto se debe a que debe soportar las altas fuerzas aplicadas sobre los tirantes durante el ensayo de la conexión, y debe estar diseñado para sujetar de forma segura ambos extremos de la misma.

El dispositivo desarrollado en esta tesis para los ensayos mecánicos de los cupones con conexión en cuña se basa en el diseño de Drexler [10], aunque se realizaron algunos ajustes debido a la necesidad de ensayar tirantes más gruesos (de 8 mm de diámetro) y de adaptarse a los requerimientos particulares de las muestras con conexión en cuña. El sistema consistía en un tipo de mordaza, con una placa superior conectada a la Máquina Universal de Ensayos (UTM) y una placa inferior con una ranura donde se inserta la muestra a ensayar.

Basándose en el concepto de Drexler, esta tesis presenta un diseño modificado compuesto por dos mordazas iguales, como se muestra en la Figura 3.10, para cumplir con los requisitos específicos del ensayo.

El espesor de las placas internas h_1 de la Figura 3.10 se dimensiona según la fuerza que deben resistir dichas placas. Esta fuerza se define en función del diámetro y la resistencia a tracción del material del tirante. Finalmente, se dimensionan los tornillos y se determina su longitud. Se verifica que el conjunto sea mecánicamente viable, y así se definen h_2, que corresponde a la longitud del tornillo, y h_3, que representa el espacio libre entre tornillos. Este espacio se selecciona para permitir un despeje suficiente, manteniéndolo lo suficientemente reducido como para evitar la necesidad de una longitud libre excesiva del tirante l. La longitud libre (l) se elige lo más corta posible para ahorrar material en la fabricación y el ensayo.

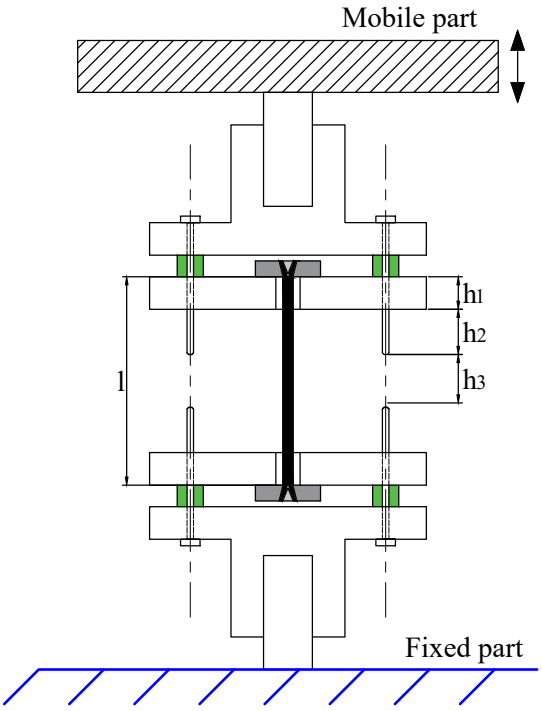


Figura 3.10: Dispositivo de fijación con dos mecanismos de sujeción idénticos: uno conectado a la parte estática y otro a la parte móvil de la UTM, con placas externas para la conexión y placas internas con ranuras para sujetar la muestra de ensayo.

El diseño de cuatro piezas consta de las siguientes partes:

- Pieza externa: Funciona como elemento de conexión con la UTM.
- Pieza interna: Atornillada a la pieza externa e incluye una ranura para la inserción de la muestra.
- Inserciones: Colocadas entre la muestra y el conjunto interno para maximizar el contacto entre el laminado y la zona de la pieza inferior, permitiendo a su vez una fácil inserción de la muestra. Estas consisten en:
  - Placas metálicas: Actúan como elementos transmisores de carga.
  - Placas elásticas: Simulan fluido presurizado en aplicaciones futuras.
- Espaciadores: Aseguran una distancia predefinida y repetible entre las piezas superior e inferior.

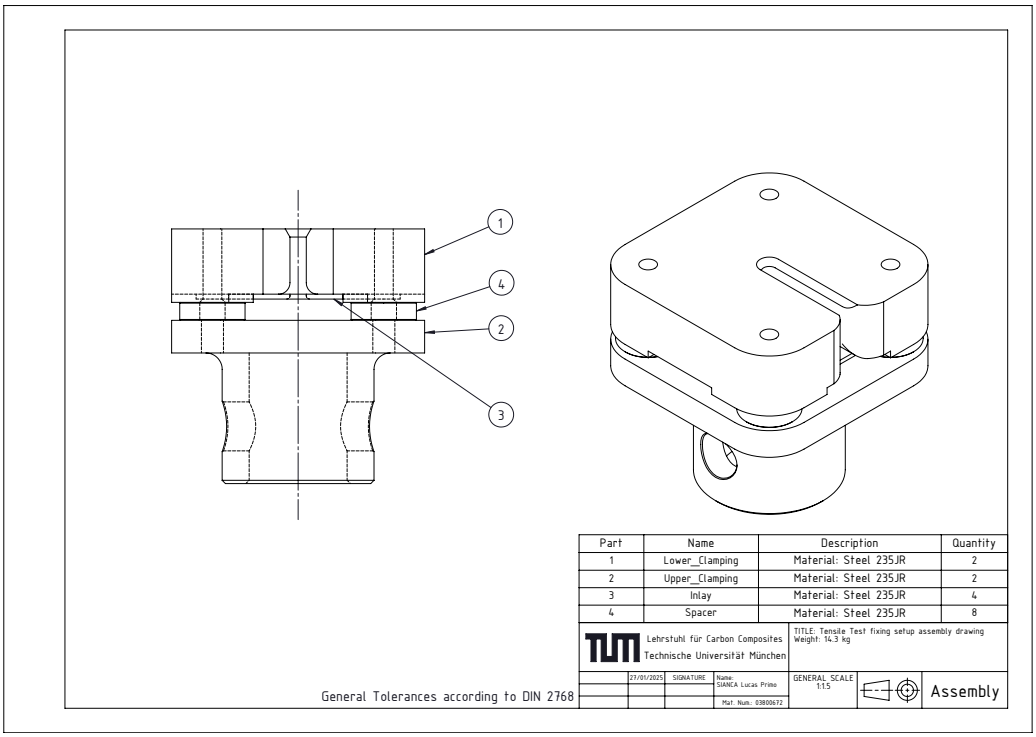


Figura 3.11: Plano conjunto del dispositivo de ensayo a tracción. El diseño incluye componentes como los sistemas de sujeción superior e inferior, espaciadores e inserciones, todos fabricados en acero 235JR. Este dispositivo fue adaptado específicamente para ensayar varillas de CFRP de 8 mm de diámetro y garantiza compatibilidad con la UTM.

Para garantizar un correcto acoplamiento de la cuña, la altura h_1 se determina en base a consideraciones de equilibrio estático y a las propiedades de fricción en la interfaz entre la cuña y la varilla. En primer lugar, se definen las fuerzas esperadas que actúan sobre las muestras con conexión en cuña, considerando una capacidad de carga de 40 kN. Luego, se calcula h_1 para que resista dichas fuerzas con un factor de seguridad adecuado. Los pasos detallados de la deducción, junto con las ecuaciones de soporte y las suposiciones realizadas, se presentan en el Apéndice 2.

Un análisis del tornillo M16 (Apéndice 3) confirma que los tornillos seleccionados de clase 8.8 pueden soportar de forma segura la carga de diseño tanto bajo tensiones axiales como bajo posibles tensiones de corte. Con un factor de seguridad calculado de aproximadamente 5.4, los tornillos permanecen muy por debajo de su límite elástico, lo que garantiza un rendimiento fiable en el montaje final.

La Figura 3.12 muestra los distintos componentes del dispositivo de ensayo tal como fueron entregados por el fabricante, destacando las cuatro piezas principales del conjunto. La Figura 3.13a muestra la placa inferior de acero, robusta y con bordes redondeados, diseñada para minimizar concentraciones de tensiones. La Figura 3.13b presenta el montaje con la inserción colocada, lo cual maximiza la superficie de contacto entre la placa de CFRP y la placa de acero interior. Finalmente, la Figura 3.13c muestra el conjunto completamente ensamblado,

incluyendo los espaciadores y la inserción del cupón con conexión de cuña.

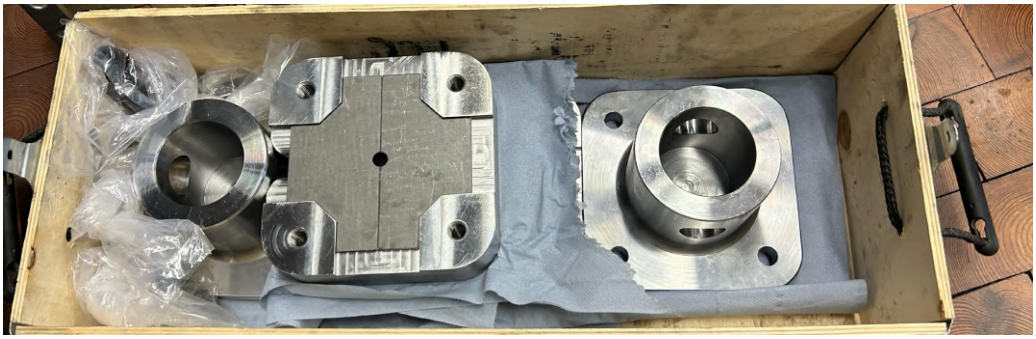
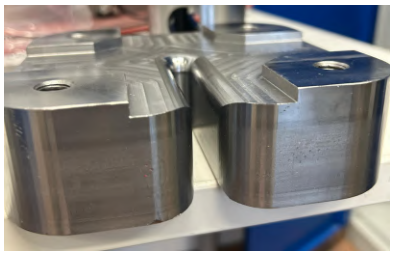


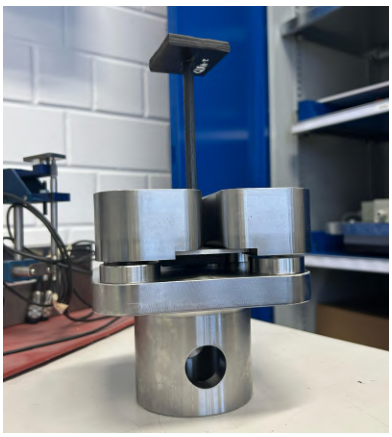
Figura 3.12: Componentes del dispositivo de ensayo mecánico tal como fueron entregados por el fabricante, mostrando las cuatro piezas principales de acero mecanizadas necesarias para el ensamblaje del sistema de prueba.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.13: Vistas del dispositivo de ensayo mecánico, destacando características de diseño como los bordes redondeados para reducir concentraciones de tensiones, el uso de una inserción para maximizar el contacto entre componentes, y el ensamblaje completo con espaciadores y la conexión en cuña insertada.

4 Materiales, máquinas y métodos

Este capítulo aborda los materiales, máquinas y dispositivos utilizados, así como los métodos empleados para la fabricación y los ensayos.

4.1 Materiales

La Tabla 4.1 resume los principales materiales utilizados, junto con las tareas asignadas a cada uno.

#	**Material**	**Fabricante**	**Descripción**	**Tareas**
Materiales fibrosos				
1	T700SC-24000-50C CF-tow	Toray	Filamentos utilizados para el enrollado	4.3.3
2	CF/PA6 - varillas	SGL	Varilla con matriz termoplástica de 8 mm	4.3.9
Materiales de matriz				
3	CR-80/10	Sika	Resina para el enrollado	4.3.2; 4.3.3
4	Filamento PLA	3D-Jake	Para impresión FDM	4.3.4
5	Resina estándar	Anycubic	Para impresión MSLA	4.3.1; 4.3.4
6	DP 490	3M	Adhesivo estructural para reforzar conexiones	4.3.9
Materiales auxiliares				
7	Cera PARTALL®Hi-Temp-Wax	Rexco	Para evitar la adhesión de resina al aluminio	4.3.1; 5.1.4
8	Tela de vidrio recubierta con PTFE	Hightechflon	Para evitar la adhesión de resina al aluminio	4.3.1; 5.1.4
9	Cinta adhesiva para vacío	-	Sellado durante el proceso de embolsado al vacío	4.3.5
10	Película para vacío	-	Película utilizada en el proceso de embolsado al vacío	4.3.5
11	Película perforada	-	Permite el flujo de resina durante el embolsado al vacío	4.3.5

Tabla 4.1: Resumen de los materiales y las tareas asignadas.

Las hojas de datos correspondientes al material CR80 se encuentran en el apéndice.

4.2 Máquinas

La Tabla 4.2 resume las principales máquinas utilizadas, junto con las tareas asignadas a cada una.

#	**Máquina**	**Fabricante**	**Descripción**	**Tareas**
Fabricación				
1	Máquina de enrollado	Hille Engineering	Máquina de enrollado de 5 ejes	4.3.3
2	Mandril de enrollado	Taller de la cátedra	Conjunto de placas y perfiles de aluminio	4.3.1; 4.3.3
3	Soldador RDS 80	ERSA	Soldador para uniones eléctricas	4.3.9
4	Punta ERSADUR LF-Lötspitze, bleistiftspitz 1.0 mm	ERSA	Punta de 30 grados para soldador	4.3.9
5	Horno VT 6130 M	Thermo Scientific	Horno para curado térmico de compuestos	4.3.6
6	Sierra de diamante	Tiger	Corte preciso de materiales	4.3.8
7	Amoladora angular	Bosch	Acabado y corte de superficies	4.3.7; 4.3.8
8	Lijadora de banda KSM 2740 C	Bernardo	Pulido y preparación de superficies	3.2; 4.3.8
9	Pulidora TegraForce-5	Struers	Pulido de superficies compuestas	4.4
10	Impresora FDM MK3S	Prusa	Impresión 3D de piezas	4.3.4
11	Impresora Photon m5s	Anycubic	Impresión de resina de alta precisión	4.3.1
12	Carro de vacío	—	—	4.3.5
Ensayo				
13	inspekt100 table UTM	Hegewald & Peschke	UTM	3.3
14	Dispositivo de sujeción	Diseño propio; fabricación externa	Ensamble superior e inferior para ensayar tirantes en la UTM	3.3
15	Microscopio BX 41M LED	OLYMPUS	Inspección de muestras con luz LED	4.4; 5.3.2

Tabla 4.2: Máquinas utilizadas y sus tareas asignadas.

4.3 Fabricación de muestras tipo cupón para conexiones en cuña

Esta sección proporciona información detallada sobre los pasos necesarios para fabricar los especímenes de ensayo. El proceso consiste en enrollar un laminado con un orificio cónico en su interior, en el cual posteriormente se insertará el tirante, y en anclar dicho tirante al laminado mediante una deformación en cuña del extremo de la varilla termoplástica reforzada con fibra de carbono. Se realizaron dos enrollados para mejorar la técnica, los parámetros y las propiedades, los cuales se denominarán en esta tesis como Primer Bobinado (W_1) y Segundo Bobinado (W_2). Los procesos y mejoras alcanzadas se describen en el Capítulo 5.

Antes de profundizar en las subsecciones específicas, se presenta una visión general del proceso.

El primer paso consiste en preparar el mandril para asegurar que el sistema esté listo para el proceso de enrollado. Esta etapa de enrollado se repite tantas veces como sea necesario hasta alcanzar un espesor de capa de aproximadamente 10 mm.

Una vez alcanzado el espesor deseado, se utilizarán una herramienta localizadora de orificios y una herramienta para separación de fibras, ambas diseñadas y fabricadas en el marco de esta tesis, para localizar los orificios originales perforados en la placa de aluminio y separar las fibras. Las fibras se separarán cuidadosamente utilizando la herramienta hasta formar un orificio completamente abierto en el laminado aún húmedo. A continuación, se insertará un cono de resina fabricado a medida en el orificio para mantener la forma cónica de las fibras, evitando que regresen a su posición original.

Seguidamente, el mandril se desmonta de la máquina de enrollado y la estructura compuesta se somete a un proceso de embolsado al vacío para lograr compactación y desgasificación de la resina. Si en esta etapa no se logra un curado completo, el laminado se colocará en un horno a 40 °C durante 2 horas para asegurar una polimerización adecuada.

Una vez curado, el laminado de fibra de carbono se desmolda y se corta en especímenes de 50 mm × 50 mm. El paso final consiste en ensamblar las conexiones en cuña utilizando una herramienta de montaje personalizada. Se inserta una varilla con matriz termoplástica en los orificios preformados, y se utiliza un soldador para formar una cavidad en forma de cuña cónica de 30 grados en los extremos del tirante. Finalmente, se inserta una cuña de aluminio para completar la conexión, dejando los especímenes completamente preparados para los ensayos. Todos los pasos son acompañados por documentación continua.

4.3.1 Preparación del mandril

Como primer paso, el mandril debe prepararse siguiendo las siguientes indicaciones:

1. Se cortó y aplicó teflón marrón autoadhesivo en los bordes de la herramienta para proteger las fibras durante el proceso de enrollado. La película de teflón también evita que la resina se adhiera a la herramienta, lo que facilita el desmoldeo, y bloquea el flujo de resina hacia espacios no deseados—como entre la placa y los perfiles o dentro de las ranuras del perfil de aluminio—donde su eliminación tras el curado sería difícil. Como se muestra en la Figura 4.2a, el adhesivo de teflón es visible en pequeñas cantidades, cubriendo solo las zonas críticas de los bordes. En contraste, la Figura 4.2b muestra una aplicación más extensa del teflón adhesivo, cubriendo una mayor superficie para proporcionar mayor protección y minimizar el daño a las fibras durante el enrollado.

2. Se aplicó cinta azul sobre los orificios preexistentes no utilizados en la placa de aluminio para evitar que la resina fluya a través de ellos durante el enrollado. Además, se colocó

cinta sobre las cabezas de los tornillos que fijan la placa para impedir la infiltración de resina. Esta precaución asegura que, si la resina fluye sobre esa zona, no entre en las cabezas de los tornillos, lo que dificultaría su extracción una vez endurecida la resina.

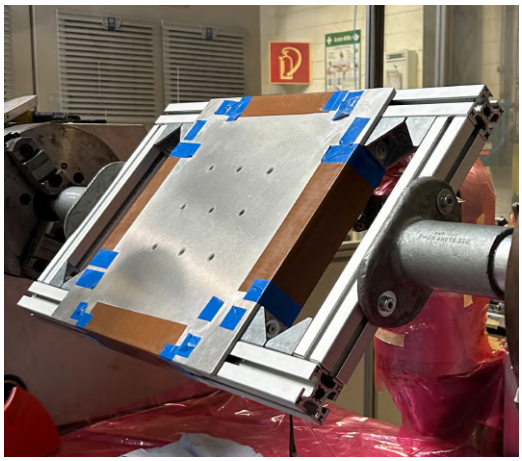
3. Se aplicaron tres capas de cera desmoldante Rexco Partall Hi-Temp sobre la superficie de la placa de aluminio para evitar que la resina se adhiera a ella. Esto permite que la resina fluya adecuadamente a través de las fibras sin impregnar la placa de aluminio, facilitando el desmoldeo del laminado de fibra de carbono una vez curado.

Se colocaron bujes o casquillos impresos en resina en la cara interna del mandril, como se muestra en la Figura 4.1, desmontando la placa y fijándolos con cinta azul, la cual proporciona suficiente resistencia para mantenerlos en posición durante el proceso de enrollado. Los casquillos fueron impresos mediante una impresora 3D de resina por tecnología de Aparato de Estereolitografía enmascarada (MSLA), la cual ofrece alta precisión y un acabado superficial suave—significativamente mejor que la impresión FDM—para evitar daños a las fibras de carbono durante el enrollado.

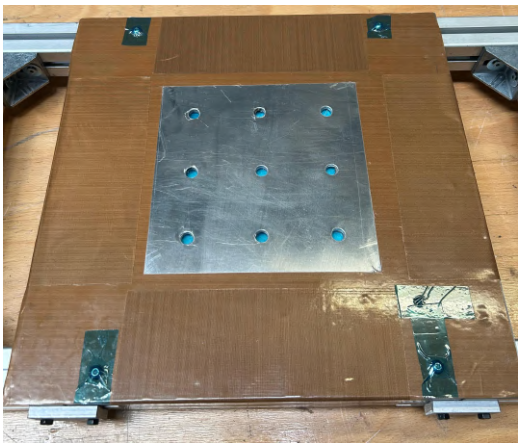
La impresora MSLA se utilizó para fabricar adaptadores tipo casquillo que se insertan en los orificios de 10 mm, reduciéndolos a 8 mm para que coincidan con el diámetro de las varillas utilizadas en el montaje. Este método se aplicó únicamente en W_1 para asegurar una alineación correcta de las varillas. En W_2, se utilizó un método diferente para adaptar el diámetro, eliminando así la necesidad de casquillos. Los detalles de este enfoque alternativo se describen en la Sección 5.1.3. La configuración de la impresora se encuentra en el apéndice.



Figura 4.1: Instalación de casquillos impresos en 3D en la parte posterior de la placa de aluminio.



(a)



(b)

Figura 4.2: (a) Mandril completamente preparado y montado en la máquina de enrollado previo a W_1. El sistema incluye cinta azul para sellar los orificios en la placa de aluminio, teflón autoadhesivo en los bordes y casquillos impresos en 3D para ajustar el diámetro de los orificios. (b) Herramienta preparada para W_2, con cobertura extendida de teflón marrón autoadhesivo aplicado en los bordes—principalmente para evitar la adhesión y el flujo de resina hacia los huecos, y en segundo lugar para proteger las fibras durante el enrollado.

Antes de aplicar la primera capa del agente desmoldante en cera, toda la superficie fue limpiada con isopropanol y secada cuidadosamente para eliminar cualquier suciedad, grasa o residuo del proceso de fabricación. Luego, se aplicaron tres capas sucesivas de cera sobre los componentes metálicos donde se debía evitar la adhesión de la resina, siguiendo las instrucciones del fabricante. En cada aplicación, la cera se esparció sobre la superficie y luego se pulió para restablecer la suavidad de la placa. Este proceso se repitió tres veces para asegurar una cobertura uniforme, minimizando el riesgo de zonas sin proteger.

4.3.2 Preparación de la máquina y programa de enrollado

La máquina de enrollado de filamentos requiere varios pasos previos antes de comenzar con el proceso de enrollado. Se aplicó un procedimiento idéntico para ambos enrollados.

La primera tarea consiste en configurar la máquina de enrollado para trabajar con fibras secas y resina húmeda, a diferencia de otros proyectos en los que la máquina se utiliza para enrollado con tow-preg. Para ello, se reemplazan los rodillos del cabezal de enrollado por uno con forma cóncava y otro fabricado en teflón, como se muestra en la Figura 4.4a. Además, deben instalarse los componentes del baño de impregnación, y la abertura de la cuchilla—que influye directamente en el FVC—debe ajustarse con precisión. Una representación visual de esta unidad se muestra en la Figura 4.3, ilustrando las modificaciones necesarias para este montaje específico de enrollado.

La abertura de la cuchilla fue ajustada gradualmente durante las primeras pasadas del proceso de enrollado para asegurar una aplicación óptima de la resina, proporcionando suficiente cantidad para impregnar las fibras sin provocar goteos excesivos, y evitando que queden demasiado secas. A través de este ajuste, se determinó que una abertura final de 0.15 mm era la configuración más efectiva.

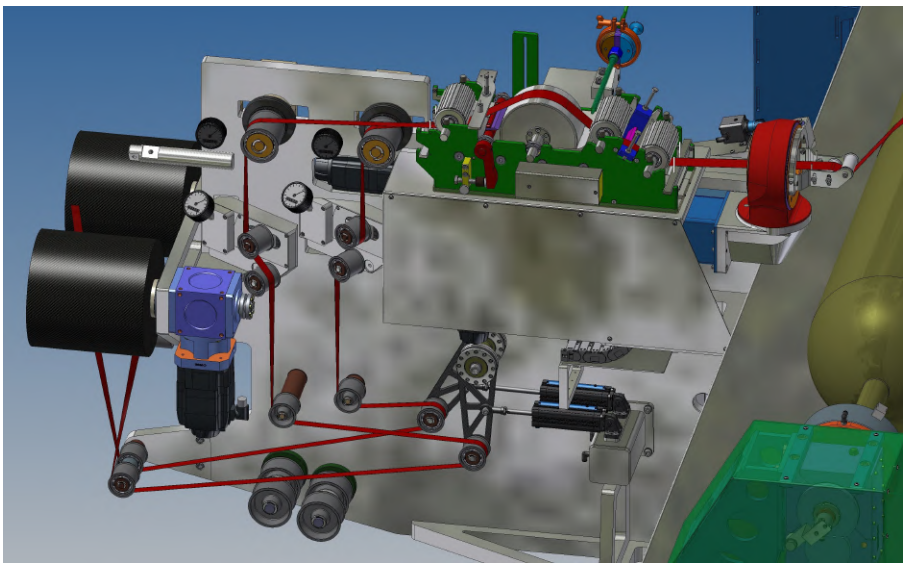
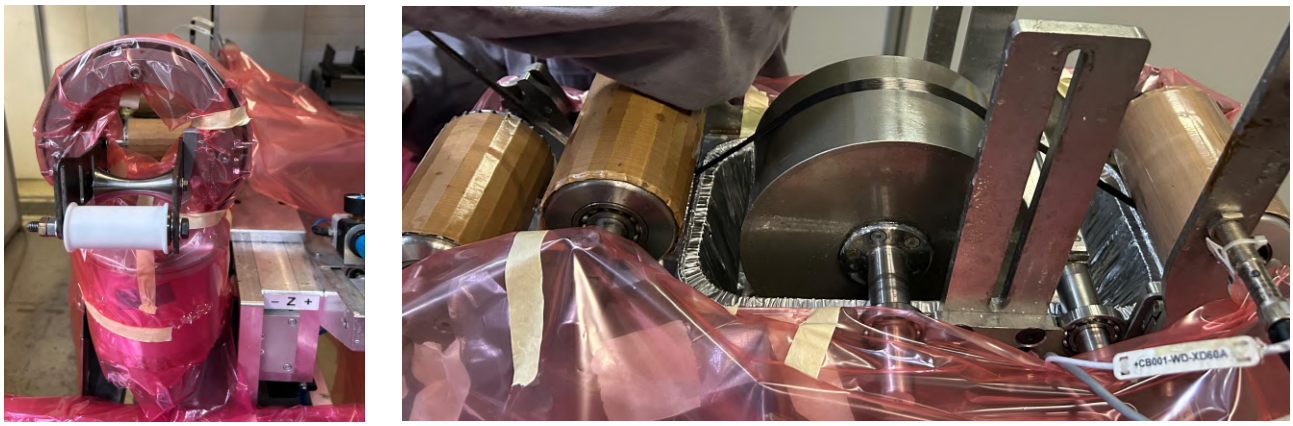


Figura 4.3: Sistema de la máquina de enrollado de filamentos, que muestra el mecanismo de alimentación de fibras, el sistema de tensión y la unidad de impregnación. El montaje incluye múltiples rodillos guía y manómetros de control para regular la tensión de las fibras.



(a) (b)

Figura 4.4: (a) Rodillos de alimentación. El montaje incluye un rodillo metálico con forma cóncava y un rodillo plástico blanco. (b) Vista superior del baño de resina en la máquina de enrollado de filamentos.

Como se muestra en la Figura 4.4, toda la máquina se cubre con una película plástica para protegerla de la resina contaminante. La resina utilizada en este proceso tiende a extenderse con facilidad y puede manchar rápidamente la máquina. Una vez seca, se endurece, lo que dificulta considerablemente su limpieza.

La mecha de fibra se enhebra en la máquina siguiendo el procedimiento estándar descrito en la documentación del equipo. Una vez completado, se monta el mandril prestando especial atención a la alineación de las mordazas. Para asegurar una posición axial constante y repetibilidad en los programas de enrollado, la alineación se realiza utilizando marcas de referencia. Estas marcas se crean posicionando primero la herramienta en orientación horizontal y colocando un nivel de burbuja en la parte superior para verificar su nivelación. Una vez confirmada, se trazan marcas de alineación tanto en la herramienta como en el cabezal de tres mordazas, como se muestra en la Figura 4.5.

Esta posición horizontal se toma luego como referencia cero en la máquina CNC, asegurando que cada programa de enrollado comience desde el mismo punto, incluso después de haber desmontado y vuelto a instalar la herramienta. Se utilizó un nivel de burbuja para garantizar una nivelación precisa de la herramienta en posición horizontal.

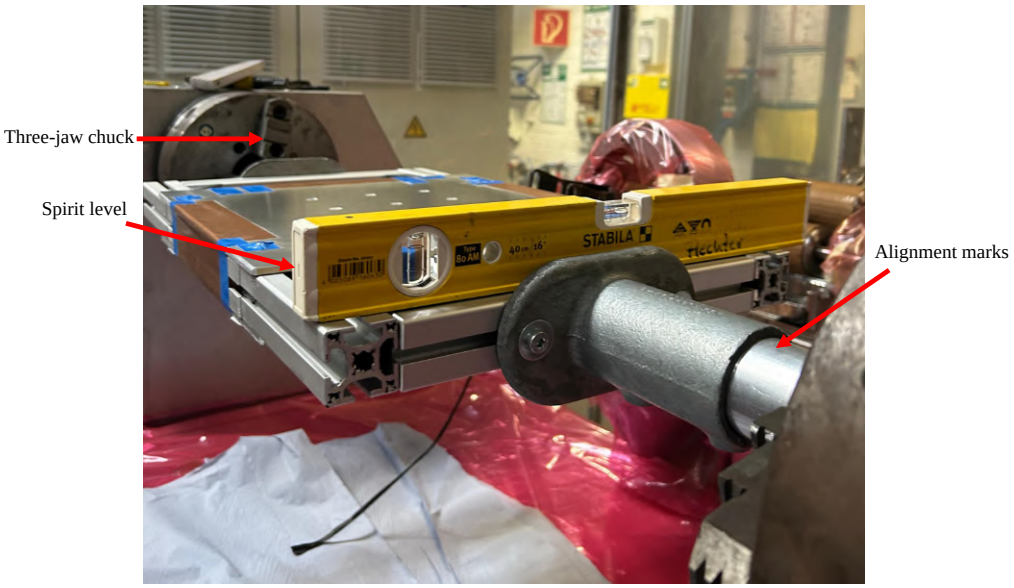


Figura 4.5: Nivelación de la herramienta de enrollado sobre el mandril utilizando un nivel de burbuja.

Para finalizar la preparación de la máquina, se debe verter la resina en la unidad de impregnación. La resina CR-80/10 se mezcló en una proporción 100:30 con el endurecedor, con un total de 2 kg utilizados a lo largo del proceso. Por precaución y de forma conservadora, debido a la naturaleza exotérmica de la resina, la mezcla se preparó en lotes de 300 gramos para evitar una generación excesiva de calor que pudiera afectar el proceso.

Después de la mezcla, la resina se sometió a un proceso de desgasificación al vacío para eliminar las burbujas de aire introducidas durante el mezclado. Esto se realizó a 300 mBar, permitiendo que las burbujas subieran y explotaran, con un tiempo de desgasificación aproximado de 15 minutos, asegurando un proceso de impregnación homogéneo y libre de defectos. Como se muestra en la Figura 4.6, la desgasificación se llevó a cabo en una cámara de vacío, evitando que el aire atrapado afecte la calidad final del compuesto.

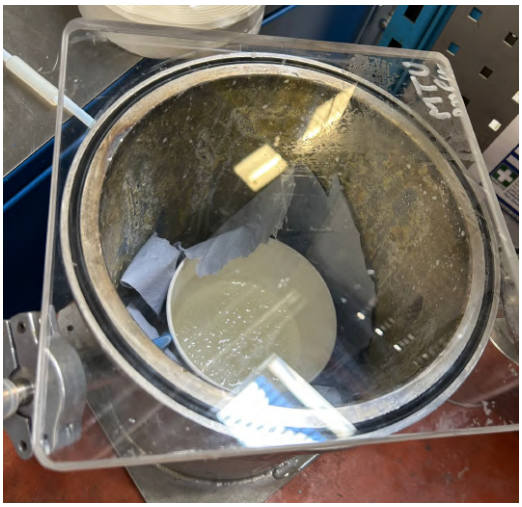


Figura 4.6: Desgasificación de la resina mezclada en una cámara de vacío.

Se debe generar un programa G-code para la capa de laminado utilizando CADWind. Al ingresar la configuración del mandril, las propiedades del material y los parámetros de la máquina, el software genera las instrucciones G-code que controlan los movimientos de los diferentes ejes de la máquina.

En CADWind se definió un mandril cilíndrico con un diámetro tal que su circunferencia coincida con el perímetro de la superficie real de enrollado en la herramienta. Esto asegura que la trayectoria de la fibra en CADWind corresponda con precisión a la geometría real del enrollado. Esta configuración circular se eligió porque permite movimientos más suaves de la máquina en CADWind en comparación con una geometría no simétrica respecto al eje de rotación. Como solo se realiza enrollado circunferencial, el factor clave es que la circunferencia del mandril cilíndrico en CADWind coincida con la de la herramienta real—asegurando que la trayectoria del enrollado sea precisa, independientemente de las diferencias en la geometría. La longitud de enrollado se estableció en 180 mm, correspondiente al área de enrollado requerida sobre el mandril.

Respecto a los parámetros del material, se definió el filamento T-700 para el proceso de enrollado con los siguientes valores:

- Ancho de fibra: 8 mm
- Tensión de la fibra: 10 N
- Ángulo de enrollado: 90° (ajustado a 89° en la práctica, ya que CADWind requiere una leve desviación para permitir la transición entre capas sin superposición)
- FVC: 60 %

La configuración detallada de los parámetros y los archivos G-code generados por CADWind se encuentran en el Apéndice.

4.3.3 Enrollado

Se ejecutó un programa completo de enrollado sin rotar la placa central del mandril, aplicando primero cuatro capas a 0 grados. Luego, se rotó 90 grados la parte central del mandril y se ejecutó otro programa para aplicar cuatro capas adicionales a 90 grados.

Por cada dos capas—definidas aquí como dos capas completas con una cobertura del 100 % en la dirección circunferencial, equivalentes a medio programa de enrollado—se agregó un espesor de aproximadamente 0,47 mm a la placa. Se utilizó un calibre para medir los bordes del mandril de enrollado y determinar este espesor, donde solo había una única dirección de fibras. Luego, se restó el espesor del mandril cuadrado en sí mismo. Al correlacionar estos valores con la cantidad de ciclos de enrollado realizados, se determinó el aporte de espesor de cada capa de fibra.

Al alcanzar la mitad del espesor final del laminado compuesto, se repitió la dirección de enrollado ejecutando dos programas adicionales en la misma dirección, dando como resultado un total de ocho capas a 90 grados. Este enfoque aseguró un depósito simétrico de capas, ayudando a equilibrar las tensiones internas durante el curado y proporcionando estabilidad estructural, como se muestra en la Tabla 4.3, donde se documentan las direcciones de enrollado repetidas para mantener la simetría. Este proceso corresponde a W_1.

Para W_2, se utilizaron menos capas para alcanzar un espesor final más cercano a los 10 mm, tras observar que el laminado en W_1 alcanzó aproximadamente 11,3 mm. Se eliminaron las primeras y últimas capas para mantener la simetría durante el proceso de enrollado. Este ajuste aseguró una deposición de fibras más uniforme y una mejor distribución estructural, como se muestra en la Tabla 4.4.

Capa	Ángulo	Espesor (mm)	Capa	Ángulo	Espesor (mm)
2	0°	0.47	**26**	**90°**	**6.11**
4	0°	0.94	**28**	**90°**	**6.58**
6	90°	1.41	30	0°	7.05
8	90°	1.88	32	0°	7.52
10	0°	2.35	34	90°	7.99
12	0°	2.82	36	90°	8.46
14	90°	3.29	38	0°	8.93
16	90°	3.76	40	0°	9.40
18	0°	4.23	42	90°	9.87
20	0°	4.70	44	90°	10.34
22	**90°**	**5.17**	46	0°	10.81
24	**90°**	**5.64**	48	0°	11.28

Tabla 4.3: W_1: número de capas, ángulos y espesor acumulado. El proceso de enrollado a 90° fue repetido en las capas 22, 24, 26 y 28, como se resalta en la tabla.

Capa	Ángulo	Espesor (mm)	Capa	Ángulo	Espesor (mm)
2	0°	0.47	**24**	**90°**	**5.64**
4	90°	0.94	**26**	**90°**	**6.11**
6	90°	1.41	28	0°	6.58
8	0°	1.88	30	0°	7.05
10	0°	2.35	32	90°	7.52
12	90°	2.82	34	90°	7.99
14	90°	3.29	36	0°	8.46
16	0°	3.76	38	0°	8.93
18	0°	4.23	40	90°	9.40
20	**90°**	**4.70**	42	90°	9.87
22	**90°**	**5.17**	44	0°	10.34

Tabla 4.4: W_2: número de capas, ángulos y espesor acumulado.

Para cada capa de fibra, se aplicó presión manualmente utilizando un rodillo de mano para mejorar la compactación del laminado. Esta operación se realizó de forma continua durante todo el proceso de enrollado. Para asegurar una consolidación efectiva y seguridad operativa sin comprometer la eficiencia temporal, se seleccionó una velocidad de avance del 10–20 %, ajustada mediante la perilla de control de alimentación de la máquina. Esta velocidad permitió una deposición constante de la fibra, brindando a su vez el tiempo necesario para aplicar presión manualmente con el rodillo después de cada rotación del mandril. La Figura 4.7 ilustra este procedimiento, mostrando la técnica de compactación manual empleada durante el enrollado.



Figura 4.7: Compresión de las capas de fibra utilizando un rodillo durante el proceso de enrollado de filamentos.

Para cada cambio entre 0° y 90° (cada cuarta capa), fue necesario desmontar manualmente la parte central de la herramienta de enrollado y girarla. En W_1, esta rotación se realizaba desenroscando tornillos hexagonales fijados en ángulo a la estructura. En cambio, en W_2 se

implementó un sistema más eficiente utilizando una barra plana de aluminio con un mecanismo de ajuste de liberación rápida. Esto permitió un ajuste y reacoplamiento de la herramienta más rápido y sencillo, como se explica en la Sección 5.1.5.

4.3.4 Separación de fibras para integración de la cuña

Al completar el proceso de enrollado en húmedo, utilizando una punta de resina impresa en 3D con un mango impreso en Ácido Poliláctico (PLA) y un localizador de agujeros también impreso en PLA, se localizaron y crearon los agujeros separando cuidadosamente las fibras sin dañarlas (Figura 4.8). Luego, se insertaron espaciadores impresos en resina para mantener la separación de las fibras durante el curado (Figura 4.9). Estos conos fueron moldeados específicamente para coincidir con el contorno exterior de la forma de la cuña que se utilizará posteriormente (Figura 4.10). En W_2, la geometría del cono fue optimizada para generar una forma más precisa y uniforme tras el curado, mejorando la interfaz con la cuña. La impresión de alta precisión en resina garantiza superficies lisas, evitando daños a las fibras de carbono durante la interacción. Los detalles de estas modificaciones aplicadas en W_2 se explican en la Sección 5.1.3.

Para facilitar su extracción tras el curado, los conos fueron recubiertos con tres capas de cera de alta temperatura, siguiendo el mismo procedimiento aplicado a la placa de aluminio.



(a)



(b)

Figura 4.8: (a) Cono y punta impresos en resina justo después de la impresión, aún adheridos a la base de impresión para W_1. (b) Cono y punta impresos en resina para W_2.

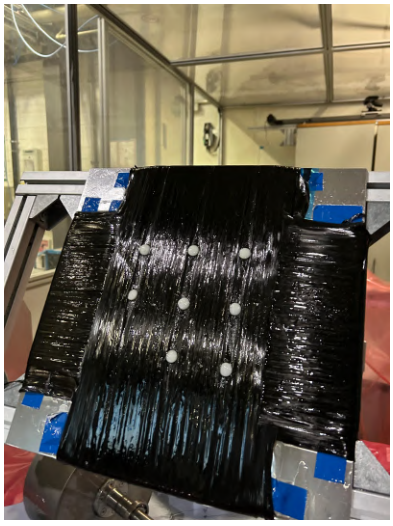


(a)

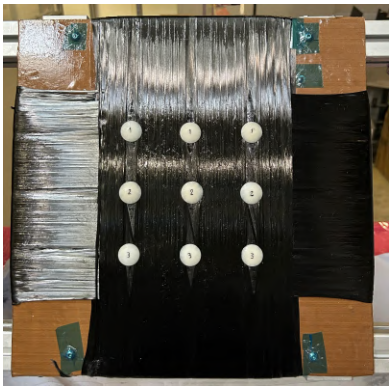


(b)

Figura 4.9: (a) Localización y apertura de un agujero utilizando un localizador de agujeros. La herramienta asegura una alineación precisa con el agujero previamente perforado en la placa de aluminio, mientras que la punta afilada con mango facilita la separación de las fibras sin dañarlas. (b) Herramienta localizadora de agujeros modificada para W_2.



(a)



(b)

Figura 4.10: (a) Conos insertados en la placa para mantener la separación de las fibras durante el proceso de curado en W_1. La colocación uniforme de los conos coincide con el patrón de agujeros predefinido. (b) Conos insertados en la placa para mantener la separación de las fibras en W_2, mostrando los diferentes tipos de conos etiquetados.

4.3.5 Preparación y proceso de embolsado al vacío

Antes de comenzar el proceso de embolsado al vacío, se retiraron las partes laterales de la herramienta de enrollado y la placa central—que contenía el laminado enrollado—fue envuelta con una película plástica perforada para permitir que el exceso de resina pasara a través de

la película durante la aplicación del vacío (Figura 4.11). Posteriormente, se envolvió con una tela absorbente (breather) que sirvió para absorber el exceso de resina drenada, asegurando un proceso de curado limpio y controlado.

Además, se insertaron cubos en las esquinas de la parte central de la herramienta, en los espacios entre las placas, para evitar que la bolsa de vacío quedara atrapada o se rompiera en esas zonas. Los cubos, cubiertos con película perforada azul, pueden verse en la Figura 4.11.

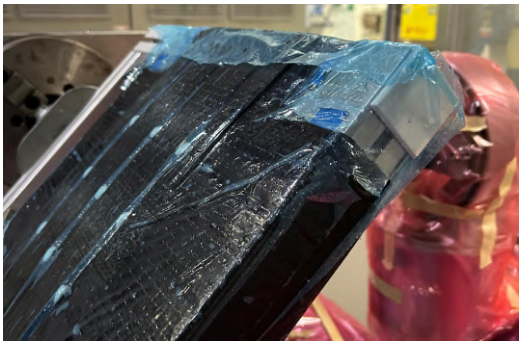


Figura 4.11: Aplicación de la película de liberación perforada sobre las capas del compuesto. Además, se inserta un cubo en la esquina para evitar que la bolsa de vacío se desgarre.

Luego, se conectaron dos mangueras—ambas funcionando como salidas en este caso—una colocada en la parte superior y la otra en la parte inferior de la herramienta, para asegurar una extracción de aire uniforme y mejorar la distribución del vacío durante el proceso de embolsado (Figura 4.13a). Es importante destacar que la herramienta de enrollado tiene dos orificios perforados de 5 mm en sus placas, que conectan el interior de la placa con el exterior. Este diseño asegura que el interior y el exterior de la herramienta permanezcan comunicados. Si el aire quedara atrapado en el interior sin posibilidad de escape, podría ser forzado a través del espesor del laminado durante la aplicación del vacío, generando porosidad en el compuesto.

Finalmente, todo el conjunto fue colocado entre dos láminas plásticas de vacío, selladas adecuadamente antes de iniciar el proceso de embolsado al vacío (Figura 4.13b). El sellado se realizó utilizando cinta adhesiva Tacky Tape para vacío, la cual unió ambas películas plásticas y proporcionó un cierre hermético. Se prestó especial atención a alisar cualquier arruga a lo largo de la cinta, ya que estas podrían crear espacios por donde entraría aire, comprometiendo la integridad del vacío, como se ilustra en el esquema de la Figura 4.12.

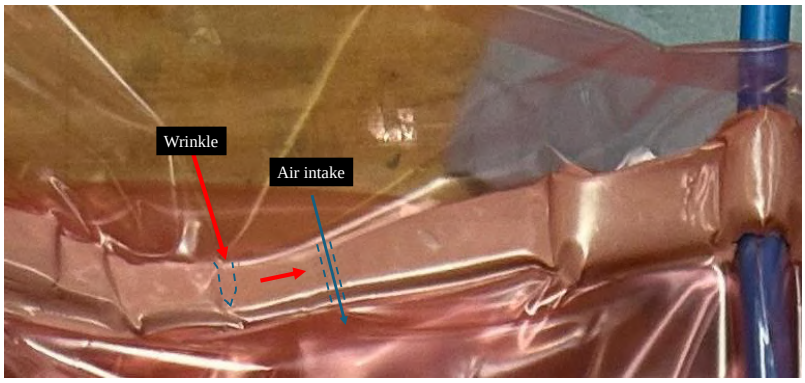


Figura 4.12: Cómo una arruga puede generar una fuga.

Antes de comenzar con el embolsado al vacío, se realizó una prueba de sellado a 600 mBar con la bomba de vacío desconectada. Se monitoreó la presión para asegurarse de que no descendiera más de 5 mBar por minuto, lo cual confirmaría que el sistema estaba sellado correctamente. Como la prueba fue exitosa, se procedió a iniciar el proceso de embolsado al vacío.



(a)



(b)

Figura 4.13: (a) Disposición de la tela absorbente (felt) y la manguera de vacío para el proceso de embolsado al vacío. (b) Configuración final del embolsado, donde se observa cómo la lámina plástica se ajusta herméticamente a la forma de la placa debido a la aplicación del vacío.

El embolsado al vacío se realizó sobre la placa para desgasificar la resina impregnada en las fibras y asegurar una correcta compactación de las capas del compuesto, aplicando una presión de 600 mBar durante 10 horas durante la noche.

4.3.6 Curado

Después del proceso de vacío de 10 horas, el laminado aún estaba pegajoso, ya que las fibras seguían húmedas debido a un curado incompleto. La pieza fue colocada en un horno a 40°C durante 2 horas. Este tiempo adicional de curado permitió que la resina se endureciera completamente, asegurando que las fibras estuvieran totalmente fijadas y listas para el desmoldeo.

4.3.7 Desmoldeo

Se utilizó una amoladora angular para cortar el compuesto durante el proceso de desmoldeo. El conjunto se trasladó fuera del taller para minimizar la dispersión de polvo de fibra de carbono, que se genera en grandes cantidades al cortar en seco, como se muestra en la Figura 4.14b. Además, se utilizó equipo de protección, incluyendo gafas de seguridad y mascarillas especializadas para protección contra polvo de fibra de carbono.



(a)



(b)

Figura 4.14: (a) Laminado curado tras el proceso de embolsado al vacío, mostrando los conos impresos en resina que mantienen la separación de las fibras. La superficie refleja el flujo de resina excedente y los efectos de compactación del curado. (b) Configuración para el proceso de desmoldeo, donde la placa compuesta curada se sujeta en una prensa. El soporte de madera ayuda a distribuir la presión, evitando daños.

La extracción de las capas no fue sencilla, incluso después del corte. Se debió utilizar un destornillador como palanca, no porque la capa se hubiera adherido al aluminio, sino porque los conos estaban fuertemente trabados, posiblemente debido al flujo de resina sobre la placa

de aluminio. Como resultado, cuando finalmente se retiraron las capas, estas se separaron exactamente en la interfaz entre la capa compuesta y la superficie de aluminio.

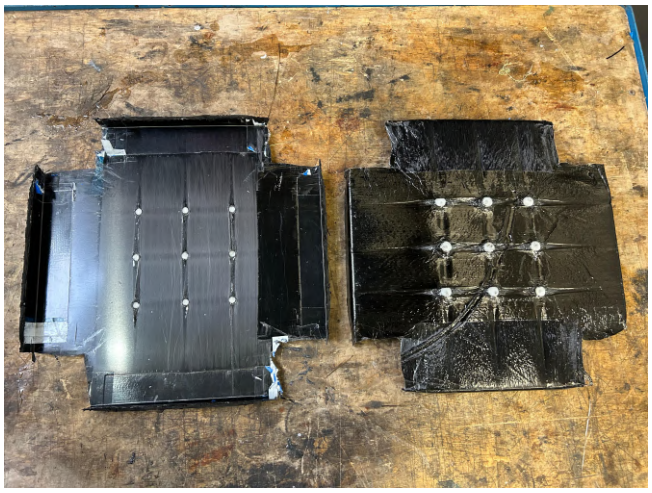


Figura 4.15: Capas compuestas extraídas de W_2 tras el desmoldeo. La capa de la izquierda muestra una superficie más lisa donde estuvo en contacto con la placa de aluminio, mientras que la capa de la derecha conserva los conos insertados.

Después de eso, los conos fueron extraídos utilizando un punzón de punta plana y un martillo, lo cual permitió retirarlos fácilmente. Sin embargo, algunos pequeños fragmentos permanecieron dentro de los agujeros, los cuales se eliminaron posteriormente pasando una mecha de 8 mm. Este inconveniente ocurrió en W_1. En W_2, la extracción fue más limpia y sencilla debido al mayor uso de cera desmoldante y a una mejor manipulación de la resina, como se explica en la Sección 5.1.4.

4.3.8 Corte

Después del desmoldeo, las superficies de los laminados fueron marcadas con cuadrados de 60 mm × 60 mm. Cada cuadrado fue etiquetado siguiendo un sistema de codificación: W-XXTX, donde W representa el número de enrollado (primero o segundo), el segundo conjunto de dígitos corresponde al número de muestra dentro de la placa (1–9), seguido del identificador de la placa (A o B), y el carácter final indica el tipo de cono (T) (1, 2 o 3). Este sistema asegura que cada muestra tenga un identificador único y se empareje correctamente con su contraparte en la placa opuesta durante el ensamblaje. Este enfoque facilita el seguimiento de los componentes y mantiene un registro claro del origen de cada muestra, como se ilustra en la Figura 4.16.



(a) (b)

Figura 4.16: (a) Identificación de los cuadrados sobre las capas compuestas extraídas. (b) Marcado de los cuadrados sobre las capas compuestas extraídas.

Primero, se cortaron los bordes curvos que contenían principalmente una única orientación de fibras en los extremos exteriores de los cuadrados utilizando la sierra Tiger (Figura 4.17a). Esta sierra fue elegida porque ofrece un mejor agarre y permite cortes lineales más precisos que la sierra Batisti, gracias a su sistema de guiado.

Posteriormente, se utilizó la sierra Batisti para cortar las líneas de división internas de los cuadrados (Figura 4.17b). La sierra de diamante fue preferida para estos cortes debido a que su hoja tiene un espesor de sólo 1.4 mm, lo que minimiza la pérdida de material. En contraste, la sierra Tiger tiene un espesor de hoja de 4 mm, por lo que es más adecuada para los cortes exteriores donde hay más material disponible.

A continuación, los cuadrados se lijaron hasta alcanzar un tamaño final de 50 mm × 50 mm para asegurar que encajaran dentro de las dimensiones del dispositivo de ensayo de tracción.



(a) (b)

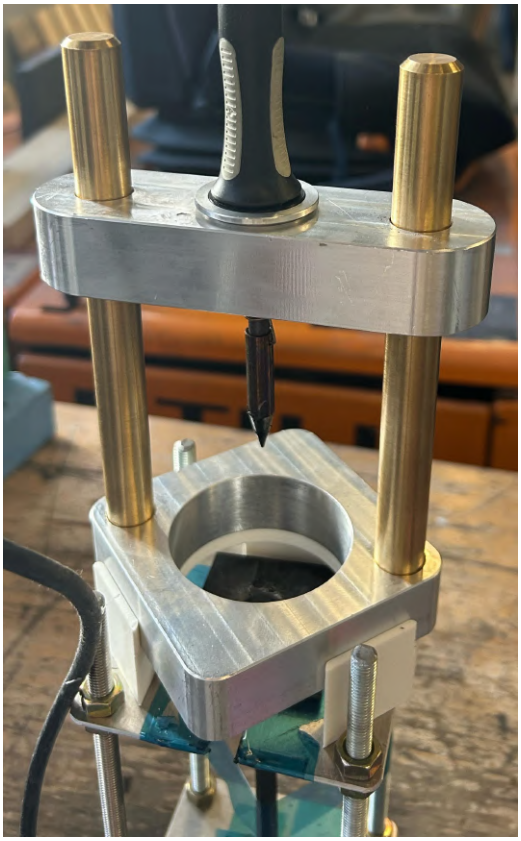
Figura 4.17: (a) Corte de los bordes curvos exteriores de las placas compuestas utilizando la sierra Tiger. (b) Corte de precisión de los cuadrados con la sierra Batisti.

4.3.9 Preparación y ensamblaje de las probetas de ensayo

Se construyó un dispositivo de soporte en el taller para preparar las probetas de ensayo. Este dispositivo consiste en dos placas y cuatro varillas roscadas, lo que permite una fácil inserción de la varilla de fibra de carbono en el laminado enrollado y su posterior unión con la cuña. Se utilizó una herramienta de guiado para dirigir el soldador en un movimiento recto hacia abajo durante el termoformado. Se diseñó e imprimió una herramienta de alineación en PLA que permite alinear la herramienta de guiado con el dispositivo de soporte. Esto aseguró que la varilla permaneciera bien posicionada con respecto al soldador, como se muestra en las Figuras 4.18a y 4.18b.



(a)



(b)

Figura 4.18: (a) Primer plano de la herramienta de alineación impresa en PLA. (b) Dispositivo de soporte con la varilla insertada y la herramienta de alineación para un posicionamiento correcto durante el termoformado.

Además, la longitud de la varilla fue determinada en función de los requisitos del ensayo de tracción para asegurar un montaje adecuado. En esta etapa, es necesario definir la longitud de las varillas (l), como se discutió en la Sección 3.3. Sin embargo, ahora que se ha definido el espesor de la placa inferior del dispositivo de ensayo de tracción h_1, el único paso restante es analizar los tornillos disponibles en el taller (h_2) y determinar la distancia libre requerida entre los tornillos (h_3), como se ilustra en la Figura 3.10.

Esto da como resultado que la longitud de la varilla (l) se establezca en 180 mm, lo cual coincide convenientemente con la longitud de la varilla, correspondiente al ancho del tanque cuboide en el proyecto ADAPT-H2-Tank [1].

Para las cuñas de aluminio, el cálculo del ángulo no fue directo, ya que era necesario garantizar que el área de sección transversal de la varilla en la parte inferior —donde ingresa al laminado compuesto— se mantuviera igual al área distribuida en la parte superior. Esto es esencial para crear una cuña que abarque completamente la superficie designada. Se utilizó el diagrama en la Figura 4.19a para lograr esto, aplicando un enfoque de conservación de área para determinar la geometría correcta de la cuña.

$$A_{rod} = A_{outer} - A_{wedge} \tag{4.1}$$

$$\pi \times r_{rod}^2 = \pi \times r_{outer}^2 - \pi \times r_{wedge}^2 \tag{4.2}$$

$$r_{wedge} = \sqrt{r_{outer}^2 - r_{rod}^2} \tag{4.3}$$

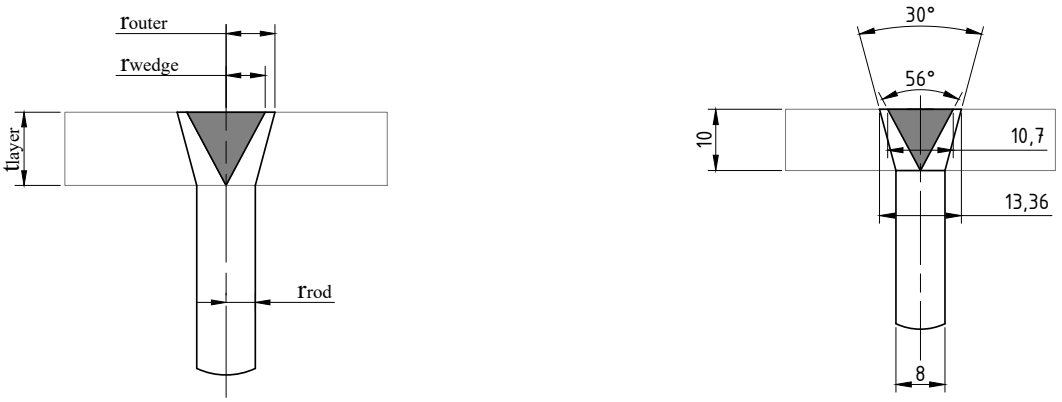


Figura 4.19: (a) Boceto del ángulo de la cuña con definición de parámetros. (b) Mismo boceto con los valores numéricos aplicados a los parámetros.

Luego, se aplicaron los valores para determinar el radio de la cuña, considerando que el cono formado por la capa compuesta tendrá un ángulo de 30 grados, como se explicó anteriormente en la Sección 2.5.2. Utilizando cálculos geométricos básicos, se puede determinar el radio de este cono.

Para determinar el radio exterior r_{outer} a partir de la geometría de la cuña, se considera el triángulo formado por la mitad del ángulo total de la cuña. El ángulo total dado es de 30°, por lo tanto, el ángulo medio utilizado en el triángulo rectángulo es:

$$\theta = \frac{30^\circ}{2} = 15^\circ \tag{4.4}$$

El radio de base de la varilla es:

$$r_{\text{rod}} = \frac{8}{2} = 4\,\text{mm} \tag{4.5}$$

Utilizando la función tangente y una altura vertical de 10 mm:

$$\tan(\theta) = \frac{r_{\text{outer}} - r_{\text{rod}}}{10} \tag{4.6}$$

Resolviendo para r_{outer}:

$$r_{\text{outer}} = r_{\text{rod}} + 10 \cdot \tan(15^\circ) \tag{4.7}$$

$$r_{\text{outer}} = 4 + 10 \cdot 0{,}2679 = \boxed{6{,}68\,\text{mm}} \tag{4.8}$$

Dado:

- Radio exterior: $r_{\text{outer}} = 6{,}68\,\text{mm}$
- Radio de la varilla: $r_{\text{rod}} = 4\,\text{mm}$

$$r_{\text{wedge}} = \sqrt{r_{\text{outer}}^2 - r_{\text{rod}}^2} = \sqrt{6{,}68^2 - 4^2} = \sqrt{44{,}62 - 16} = \sqrt{28{,}62} = \boxed{5{,}35\,\text{mm}} \tag{4.9}$$

Entonces, para el ángulo de la cuña α, utilizando trigonometría:

Se considera el triángulo rectángulo formado entre r_{wedge} y la altura de la cuña ($h = 10\,\text{mm}$), lo que da:

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{r_{\text{wedge}}}{h} = \frac{5{,}35}{10} = 0{,}535 \tag{4.10}$$

Resolviendo para el ángulo:

$$\frac{\alpha}{2} = \arctan(0{,}535) = 28{,}14^\circ \quad \Rightarrow \quad \alpha = 2 \cdot 28{,}14^\circ = \boxed{56{,}29^\circ} \tag{4.11}$$

Las cuñas fueron fabricadas externamente utilizando un torno. Los conos pueden verse en la Figura 4.20.

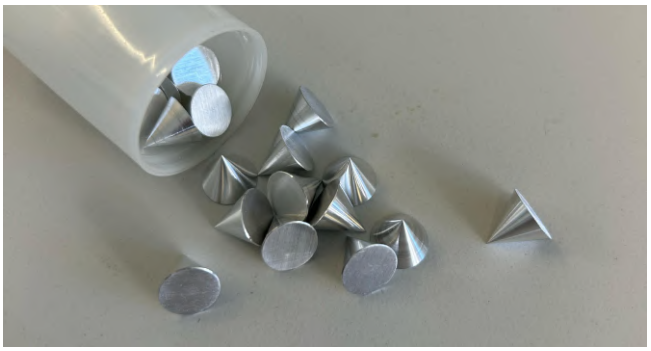


Figura 4.20: Conos de aluminio fabricados por un taller externo.

El primer paso del ensamblaje consiste en termoformar la varilla de fibra de carbono. Se monta una punta para soldador con un ángulo de 30 grados (Tabla 4.2) sobre el soldador para asegurar una transferencia de calor eficiente y una correcta conformación de la varilla termoformable. El soldador, ajustado a 450 grados Celsius, como se muestra en la Figura 4.21a, se baja cuidadosamente usando la herramienta de guiado, asegurando que siga una trayectoria recta. Luego se aplica calor para dar forma cónica a la varilla, como se muestra en la Figura 4.21b. Mantener una alineación precisa durante este paso es importante para asegurar que las conexiones ofrezcan buena resistencia a tracción.



(a)



(b)

Figura 4.21: (a) Soldador ajustado a 450 grados Celsius con una punta de 30 grados para la termoformación de la varilla compuesta. (b) Vista en detalle del agujero cónico creado durante el proceso de termoformado.

Una vez conformada la varilla, se inserta la cuña de aluminio y se retira el soldador. Luego, la cuña se coloca cuidadosamente dentro del agujero. Para fijarla en su lugar, se utiliza la punta plana del soldador para presionar la cuña hacia abajo, manteniendo la presión durante

30 segundos.

Finalmente, se inspecciona visualmente la conexión para confirmar que la cuña esté bien alineada.



Figura 4.22: Tirante final con la cuña insertada, sobre la herramienta de ensamblaje.

4.4 Imagen de sección transversal

Para la imagen de sección transversal, se cortaron dos muestras de W_1 y W_2 con la forma mostrada en la Figura 4.23. Se obtuvieron dos muestras — una etiquetada como A y la otra como B — cortadas en direcciones opuestas para proporcionar una vista completa de las secciones transversales.

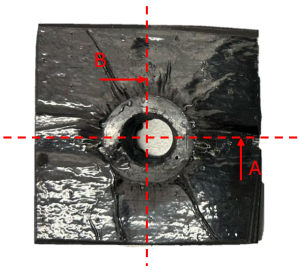


Figura 4.23: Esquema que muestra el patrón de corte de las muestras de W_1 y W_2.

Después del corte, las muestras fueron embebidas en resina CR-80/10, mezclada en una

proporción 100:30 con el endurecedor. La mezcla fue desgasificada en una cámara de vacío para eliminar burbujas de aire. Como se muestra en la Figura 4.24, la resina se vertió en moldes impresos en 3D y se dejó curar durante 12 horas.



Figura 4.24: Muestras embebidas en resina CR-80/10 luego del curado. Las muestras fueron preparadas para el pulido y análisis de la distribución de fibras y la geometría de la sección transversal.

Se llevó a cabo un proceso de lijado utilizando la máquina de esmerilado y pulido Struers. El procedimiento consistió en múltiples etapas de lijado, comenzando con lija de grano 80 y progresando hasta grano 4000. El proceso se realizó utilizando agua como lubricante. Luego del lijado, se efectuó un pulido en dos etapas utilizando un agente de pulido como lubricante. La Figura 4.25 muestra una de las muestras terminadas.



Figura 4.25: Muestra finalizada luego del proceso de lijado y pulido, mostrando una sección transversal limpia.

Después del lijado y pulido, las muestras fueron analizadas utilizando el microscopio BX 41M LED. Se realizó un escaneo general de la imagen, seguido por el uso del software Stream Motion y la herramienta de umbralización integrada para analizar la fracción de área de poros y medir el ángulo del agujero cónico. La Figura 4.26 muestra que la muestra debió ser fijada sobre una base de plastilina para mantener el paralelismo con la lente, facilitando un enfoque adecuado sobre la muestra.

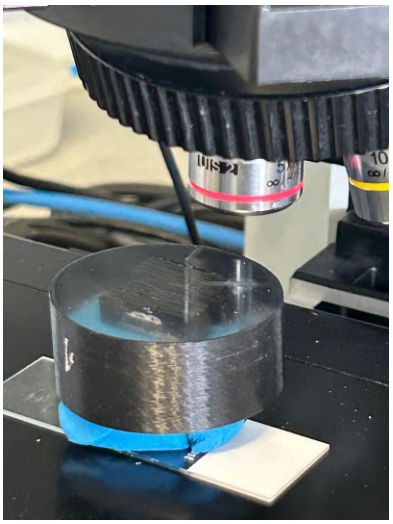


Figura 4.26: Muestra posicionada bajo el microscopio BX 41M LED. La muestra está fijada sobre una base de plastilina para mantener el paralelismo con la lente.

5 Mejoras logradas y desafíos detectados en las conexiones en cuña

Este capítulo presenta las mejoras y los desafíos abordados durante la fabricación de las conexiones en cuña. Luego del primer intento de enrollado, se discuten los ajustes realizados, abordando las principales modificaciones del proceso. A continuación, se analizan los desafíos encontrados y las mejoras implementadas en el segundo ensayo de enrollado. Finalmente, se ofrece una evaluación integral del proceso optimizado, destacando los aprendizajes obtenidos y la metodología final para lograr conexiones en cuña confiables.

5.1 Ajustes del proceso entre el primer y segundo enrollado

En esta sección se describen las diferencias entre ambos procesos de enrollado, destacando qué aspectos funcionaron correctamente y cuáles presentaron inconvenientes. Además, se discuten algunas modificaciones a considerar en el futuro para lograr mejoras adicionales.

5.1.1 Mejora en el uso de resina y reducción en la cantidad de capas en el segundo enrollado

En el segundo enrollado (W_2) se utilizó menos resina y se aplicaron menos capas que en el primero (W_1). Esta modificación, en particular la reducción de resina, tuvo como objetivo evitar la acumulación excesiva observada previamente en W_1. La disminución en el número de capas se realizó para ajustar mejor el espesor objetivo del laminado.

Al reducir el contenido de resina, la placa final obtenida presentó un acabado mucho más limpio y controlado, como se observa en la Figura 5.1. Esta mejora no solo optimizó el aspecto del compuesto, sino que también facilitó el proceso de desmontaje, ya que no hubo exceso de resina que dificultara la separación de las placas.

Una comparación de los parámetros utilizados en ambos enrollados se presenta en la Tabla 5.1.



Figura 5.1: Vista frontal del laminado compuesto mostrando el patrón de enrollado de fibras y los insertos cónicos embebidos. Se observan marcadores numerados que indican la posición de los insertos.

Parámetros del primer enrollado (29.01.25)			**Parámetros del segundo enrollado (05.03.25)**		
Parámetro	**Valor**	**Unidad**	**Parámetro**	**Valor**	**Unidad**
Programa CADwind	Winding_tool_plate_8mm.MPF	-	Programa CADwind	Winding_tool_plate_8mm.MPF	-
Separación de cuchilla	0.15	mm	Separación de cuchilla	0.10	mm
Ancho de fibra	8	mm	Ancho de fibra	8	mm
Tensión de fibra	10	N	Tensión de fibra	10	N
Ángulo de enrollado	90 (89)	°	Ángulo de enrollado	90 (89)	°
FVC	60	%	FVC	60	%
Velocidad de avance	10–20	%	Velocidad de avance	20	%
Resina total utilizada	2	kg	Resina total utilizada	1.5	kg
Espesor teórico de capa	11.28	mm	Espesor teórico de capa	10.34	mm
Hora de inicio del enrollado	14:20	h	Hora de inicio del enrollado	13:50	h
Hora de finalización del enrollado	18:00	h	Hora de finalización del enrollado	16:30	h
Tiempo total aproximado de enrollado	03:40	h	Tiempo total aproximado de enrollado	02:40	h

Tabla 5.1: Comparación de parámetros de enrollado entre los dos ensayos W_1 (izquierda) y W_2 (derecha).

5.1.2 Rediseño de la herramienta de localización de agujeros

Se observaron problemas de desalineación en W_1, como se muestra en la Figura 5.2, donde algunos separadores cónicos quedaron mal posicionados debido a que la punta afilada de la herramienta utilizada para la separación de fibras ingresó con cierto ángulo. Además, los bujes empleados en el primer enrollado también contribuyeron a esta desalineación. Para resolver estos inconvenientes y mejorar la precisión del proceso, se rediseñó la herramienta de localización de agujeros.

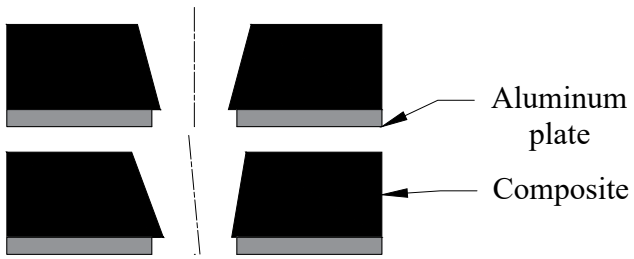


Figura 5.2: Diagrama que muestra la desalineación de los conos durante la inserción, ilustrando el laminado compuesto y la placa de aluminio.

La herramienta de localización de agujeros utilizada en W_1 (ver Figura 4.9a) fue rediseñada para mejorar su alineación y facilidad de uso luego del enrollado de filamentos. El nuevo diseño, mostrado en la Figura 5.3, permite sujetarse sobre los cuatro lados de la placa de aluminio de la herramienta de enrollado de manera simultánea, eliminando la necesidad de mantenerla manualmente y asegurando que todos los agujeros queden correctamente alineados.

Se incorporó una placa central que permite localizar todos los agujeros de forma simultánea, en contraste con la herramienta de localización anterior, que sólo abarcaba cuatro agujeros por vez.

Además, se añadió un escalón como tope para la punta afilada, lo que mejora la estabilidad del sistema y asegura que el movimiento de inserción sea recto y perpendicular al laminado compuesto.

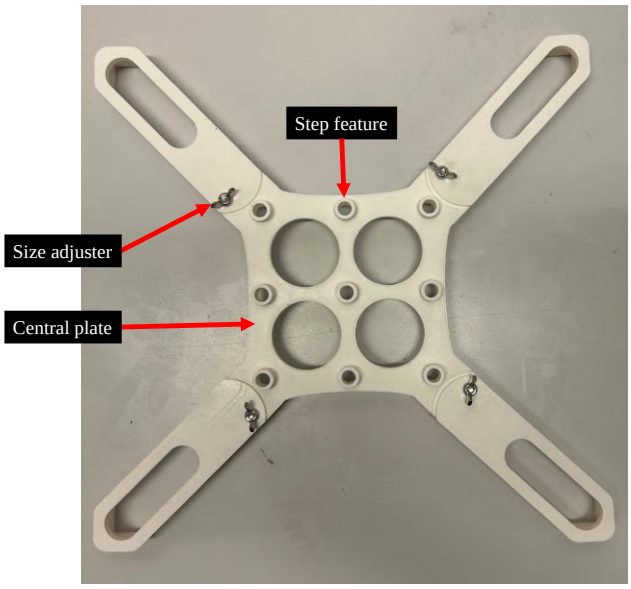


Figura 5.3: Herramienta de localización de agujeros rediseñada, que permite la alineación simultánea de los agujeros.

5.1.3 Mejora en la alineación de fibras y conos para las conexiones

En el primer ensayo de enrollado, se observó un problema en el que los conos, al tener la misma altura que el espesor de la capa depositada, permitieron que algunos haces de fibra de carbono se superpusieran, generando defectos (Figura 5.4). Para solucionar esto en W_2, los separadores cónicos impresos por SLA fueron modificados añadiendo una cúpula en la parte superior, como se muestra en la Figura 5.5. Esta modificación evitó el desplazamiento de fibras sobre el cono, mejorando la alineación de las mismas.

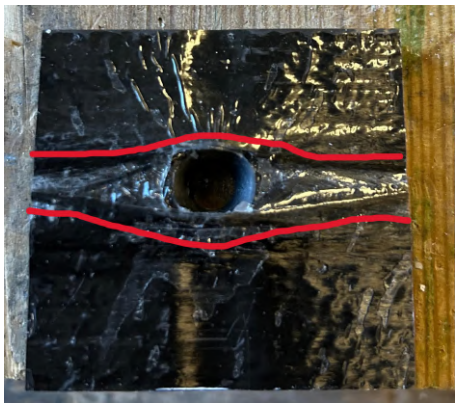


Figura 5.4: Muestra donde las fibras se superponen sobre el agujero cónico.

Además, se ajustó la sección recta de los separadores cónicos —que se inserta en la placa de aluminio— a un diámetro de 10 mm para que coincidiera con el diámetro de los agujeros en dicha placa. En W_1, algunos conos quedaron desalineados debido al desprendimiento del reborde inferior (collar), que actuaba como tope en la interfaz con la placa de aluminio, como se representa en la Figura 5.6. Al incrementar este diámetro de inserción a 10 mm, los conos se mantuvieron firmemente en su lugar.

Esta modificación requirió revisar la geometría del cono para conservar el ángulo de cuña de 56 grados, esencial para una conexión adecuada. En W_2 se ensayaron tres tipos distintos de conos con el fin de evaluar el diseño más efectivo, asegurando que el área de contacto con la varilla en la interfaz superior se mantuviera constante. Este enfoque permitió un análisis comparativo, garantizando la geometría más práctica para una conexión en cuña exitosa.

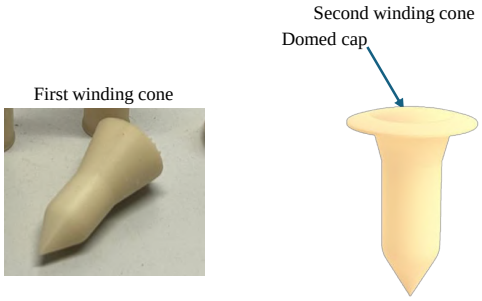


Figura 5.5: Comparación de los separadores cónicos utilizados en W_1 y W_2. El separador de W_2 incluye una tapa abovedada rediseñada (indicada por la flecha).

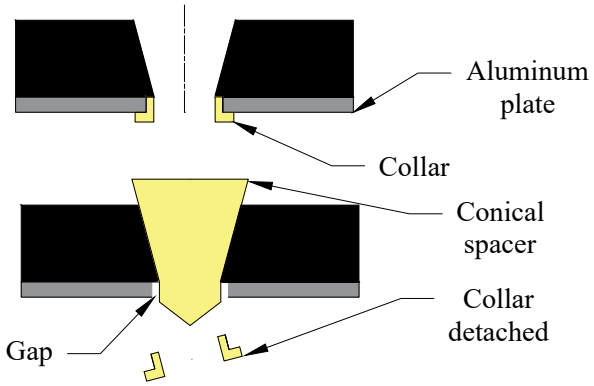
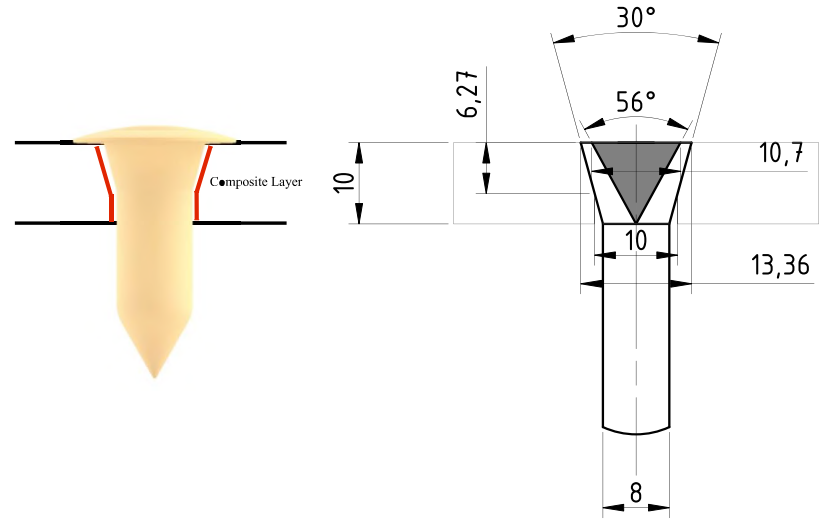
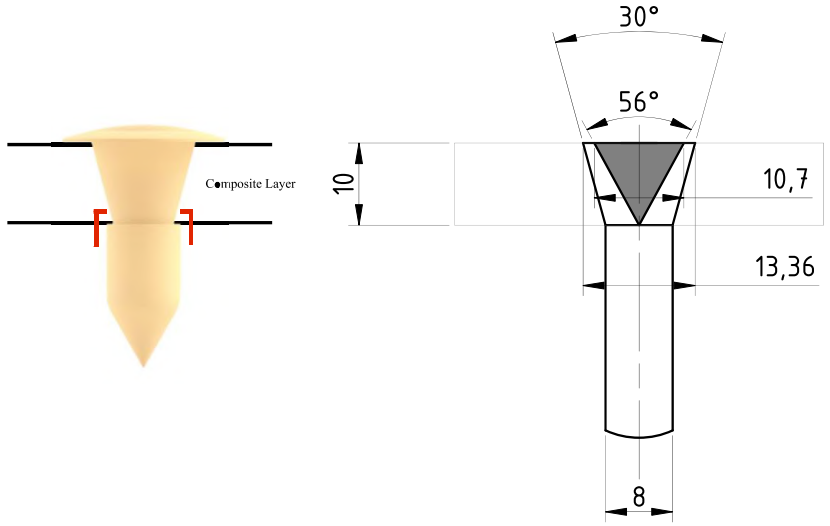


Figura 5.6: Ilustración del problema de ensamblaje causado por el desprendimiento del collar. Una vez que el collar se separa del separador cónico, se forma un espacio entre el separador y la placa de aluminio, aumentando el riesgo de desalineación.

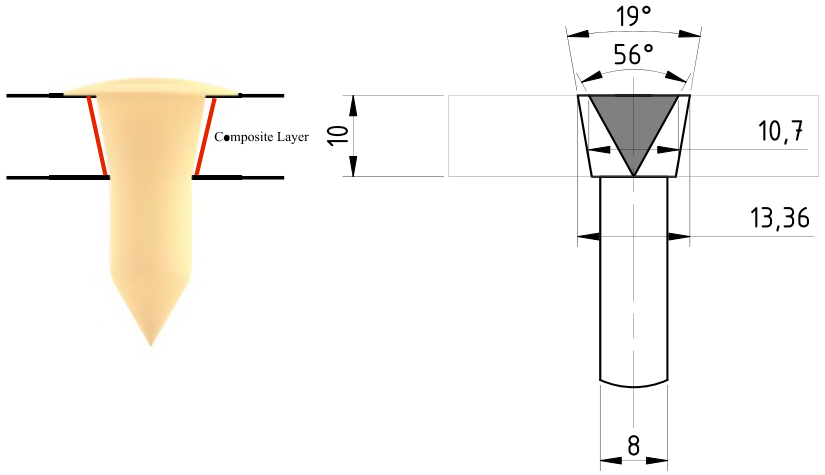
El desarrollo de estos tres diseños de conos tuvo como objetivo mantener el área de sección transversal de la varilla de 8 mm, garantizando al mismo tiempo el contacto adecuado con los agujeros de 10 mm en la placa de aluminio. Dado que la conexión en cuña debe apoyarse siempre sobre un agujero de 10 mm en la superficie dentro del laminado compuesto, se exploraron diferentes geometrías para mejorar la alineación de las fibras y facilitar el desmoldeo de los conos impresos por SLA del laminado. El Tipo 1 (Figura 5.7a) fue diseñado como un cono truncado, que pasa de 8 mm a 10 mm en la base, lo que permite una remoción sencilla. El Tipo 2 (Figura 5.7b) incorporó un resalto para evitar el movimiento dentro del agujero de la placa de aluminio; sin embargo, esta característica complicó el desmoldeo, requiriendo el corte del cono. El Tipo 3 (Figura 5.7c) presentó un cono con inclinación de 19 grados, lo que permitió una transición suave de 10 mm hasta la parte superior del cono, manteniendo contacto completo con el laminado compuesto.



(a) Tipo 1



(b) Tipo 2



(c) Tipo 3

Figura 5.7: Distintos tipos de conos separadores con capas compuestas y sus respectivas representaciones geométricas marcadas en rojo, mostrando la colocación e interacción del tirante en cuña.

Este enfoque garantizó que la conexión en cuña se acoplara adecuadamente con la superficie del laminado compuesto sin comprometer la continuidad de las fibras. Los insertos cónicos colocados tras el proceso de enrollado, junto con su numeración correspondiente, pueden verse en la Figura 5.1.

Como se observó tras W_2, estos orificios cónicos se produjeron con éxito, presentando una superficie interna con un alto nivel de compactación y replicando con precisión la forma deseada impresa por los conos. Como se muestra en la Figura 5.8, estos conos con la parte superior redondeada permitieron que la bolsa de vacío ejerciera mayor presión sobre ellos en comparación con W_1, asegurando una buena compactación en la superficie del laminado compuesto alrededor del orificio.

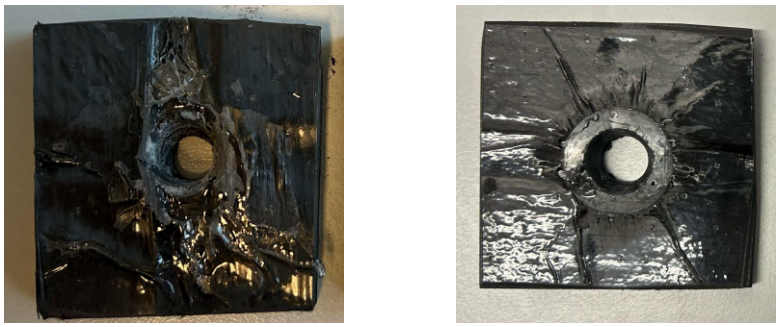


Figura 5.8: Muestra compuesta de W_1 a la izquierda y muestra de W_2 a la derecha, donde se destaca una superficie interna bien definida y una alta compactación alrededor del orificio.

5.1.4 Implementación de un recubrimiento de fieltro para el manejo interno de la resina

Como se muestra en la Figura 5.9, tras el primer ensayo de enrollado, se observó que al desmontar la herramienta de enrollado para el siguiente ensayo, una cantidad significativa de resina había fluido hacia el interior y se había acumulado en un lado. Esto ocurrió porque el proceso de bolsa de vacío se realizó con la placa apoyada de costado y, además, debido al exceso de resina, lo que provocó que se solidificara una capa de aproximadamente 3 mm dentro de la herramienta. Para el segundo ensayo de enrollado W_2, se aplicó una capa de tela de fieltro respirable en el interior de la herramienta, como se ve en la Figura 5.10, específicamente alrededor de los orificios, para absorber cualquier exceso de resina que pudiera fluir. Esta modificación permitió una fácil extracción del exceso de resina al abrir la herramienta, ya que fue absorbida por el fieltro, eliminando la necesidad de limpieza manual. En el ensayo W_1, donde no se utilizó fieltro respirable y se empleó más resina, fue necesario remover la resina endurecida con cincel y martillo.

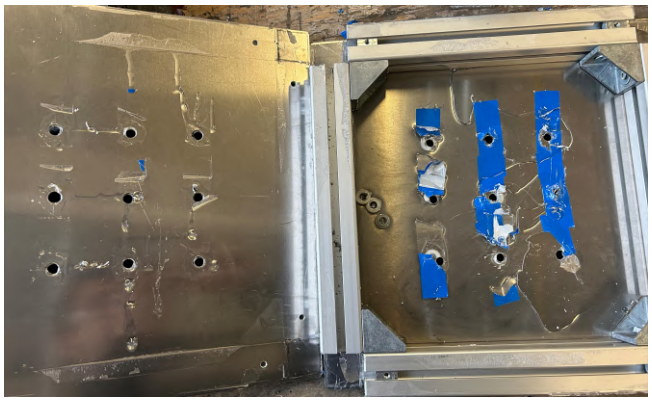


Figura 5.9: Acumulación de resina dentro de la herramienta de enrollado tras el desmontaje en el ensayo W_1, mostrando capas gruesas de resina curada formadas por el exceso de flujo de resina durante el proceso de bolsa de vacío.

Además, durante W_2, se aplicaron tres capas de cera desmoldante Exco Partall Hi-Temp sobre las superficies interiores para facilitar la eliminación de cualquier resina que pudiera ingresar durante el proceso de bolsa de vacío. Asimismo, como se explicó en la Sección 5.1.3, los orificios en W_2 estaban completamente cubiertos por los conos (no se utilizaron collares impresos en 3D), lo que redujo significativamente el flujo de resina hacia el interior de la herramienta de enrollado.

Se aplicó una película de teflón autoadhesiva sobre las superficies interiores y exteriores en una zona más amplia, como se muestra en la Figura 5.12a. Esto sirvió no solo para prevenir aún más la adhesión de la resina, sino también para compensar el hecho de que, durante el ensayo W_2, las superficies de las placas de aluminio ya no estaban tan pulidas como antes. El uso de herramientas durante el desmontaje del ensayo W_1 había causado pequeñas imperfecciones en las placas, las cuales fueron cubiertas con el teflón autoadhesivo, asegurando una superficie más lisa y uniforme para el siguiente proceso de enrollado.

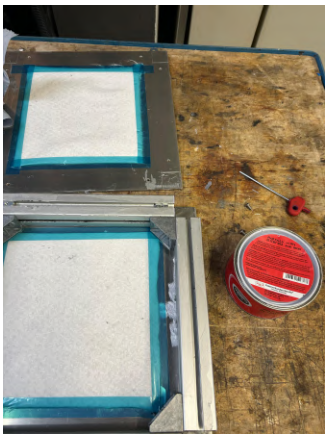


Figura 5.10: Tela de fieltro interior cubriendo las superficies internas de la herramienta de enrollado antes del segundo proceso de enrollado W_2.



(a) (b)

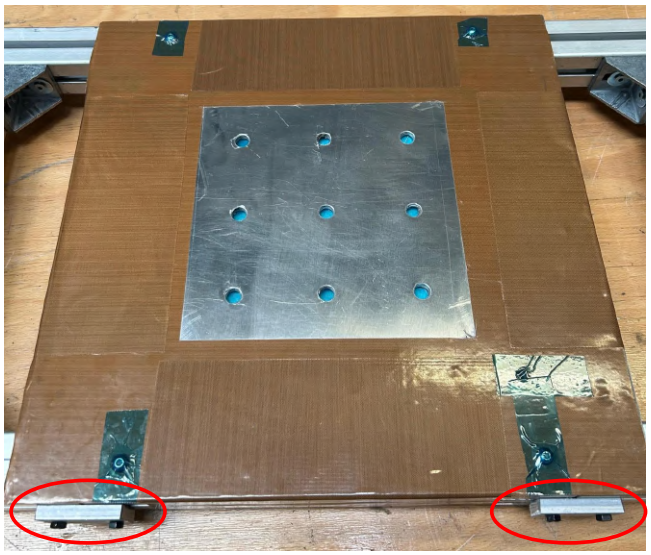
Figura 5.11: (a) Espaciadores cónicos con menor presencia de resina debido al uso de tela de fieltro respirable. (b) Placa limpia tras la extracción de la capa compuesta en el ensayo W_2.

5.1.5 Modificación de la herramienta de enrollado para cambios rápidos de dirección a 90 grados

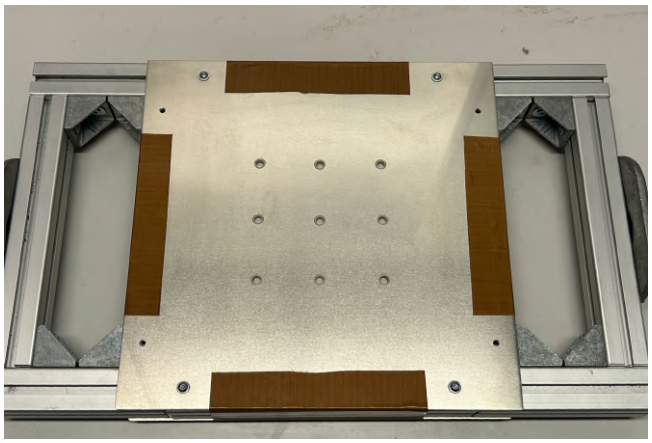
Para el ensayo de enrollado W_2, se incorporó un sistema de cuatro placas de aluminio a la herramienta de enrollado, como se muestra en la Figura 5.12a. Estas placas fueron fijadas externamente a la herramienta y sujetadas con tornillos de cabeza hexagonal, lo que permitió una transición mucho más rápida al cambiar la dirección de enrollado a 90 grados. Esta modificación fue uno de los factores que redujo el tiempo de enrollado en comparación con W_1.

En el ensayo de enrollado W_1, el sistema de sujeción utilizado para fijar la placa central a las partes fijas montadas en los mandriles universales de tres mordazas se basaba en escuadras de aluminio sujetas con tornillos Allen posicionados en la cara interna de los perfiles de aluminio, como se observa en la Figura 5.12b. Esta configuración dificultaba y hacía más lenta la tarea de desmontaje.

La sujeción de la herramienta de enrollado mediante placas de aluminio mejoró la seguridad y permitió al operario cambiar la dirección de enrollado sin necesidad de asistencia adicional. Esta mejora no solo redujo el tiempo de enrollado, sino también la mano de obra requerida.



(a)



(b)

Figura 5.12: (a) Configuración de las placas de aluminio utilizadas en la herramienta de enrollado para W_2. La placa central está asegurada mediante planchuelas de aluminio externas que la fijan firmemente al bastidor, garantizando la alineación con los ejes. (b) Placa central del montaje de W_1, fijada con escuadras de aluminio en las esquinas para su sujeción al bastidor circundante. Aunque esta configuración es estructuralmente estable, dificultaba el desmontaje debido a la posición interna de las escuadras y tornillos.

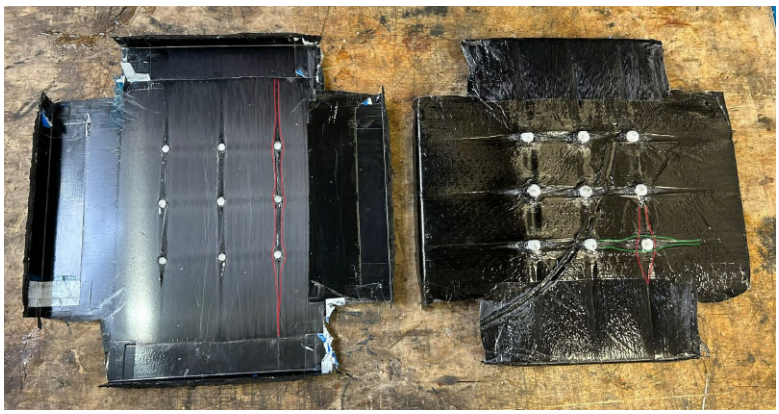
5.2 Mejoras futuras y recomendaciones

Esta sección presenta modificaciones propuestas que fueron identificadas durante los ensayos de enrollado, pero que aún no se han implementado. Estos ajustes tienen como objetivo mejorar la alineación de las fibras y optimizar el control de la resina, así como el proceso de fabricación. Su aplicación en futuras investigaciones podría refinar aún más la repetibilidad y la calidad en la producción de conexiones en cuña.

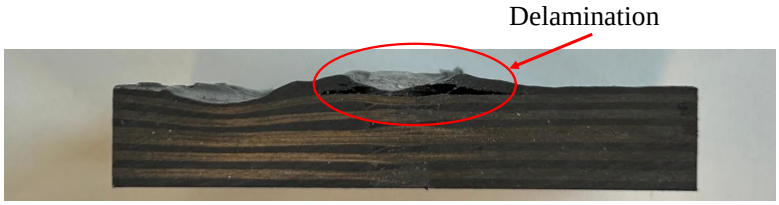
5.2.1 Problemas de alineación de fibras y mejora del patrón de agujeros

En la W_1, los haces de fibras se dividieron excesivamente debido a la inserción de los espaciadores cónicos. Si bien cierta división es esperable durante esta etapa, el efecto se vio amplificado por el patrón de agujeros cuadrados en la placa de aluminio. Como los agujeros estaban alineados a 0/90° respecto a la herramienta—y el enrollado también se realizó en un patrón 0/90°—esta coincidencia intensificó la perturbación en las fibras. Esta alineación provocó que los haces de fibra que atravesaban esas zonas se desplazaran de sus posiciones previstas.

Como se muestra en la Figura 5.13a, la desalineación está resaltada en color. Este problema derivó posteriormente en delaminación de las capas exteriores de fibra al cortar los cuadrados, como se observa en la Figura 5.13b. La separación de los haces durante la inserción de los espaciadores desplazó localmente las fibras, reduciendo la cobertura de resina en esas zonas. Cuando el laminado se cortó en cuadrados más pequeños, las capas más externas—ya debilitadas por la distribución desigual de fibras—comenzaron a separarse, resultando en delaminación entre capas de fibra.



(a)



(b)

Figura 5.13: (a) Desalineación de fibras observada en la W_1 debido al patrón de agujeros lineales en la placa de aluminio. Las zonas marcadas indican cómo los haces de fibras se desvían de su posición prevista. (b) Vista en corte transversal que muestra la delaminación en las capas exteriores de fibra de la W_1.

Para abordar este problema en futuros procesos de enrollado, se recomienda modificar el patrón de agujeros para minimizar el desplazamiento de las fibras, asegurando una mejor alineación y reduciendo el riesgo de delaminación.

Una solución propuesta es rotar el patrón de agujeros 15 grados en sentido antihorario. Esta modificación requeriría reducir las dimensiones de los cuadrados de 60 mm × 60 mm a 55 mm × 55 mm para asegurar que todas las zonas de las muestras queden completamente cubiertas por el enrollado en ambas direcciones. Sin este ajuste, algunos bordes de los cuadrados podrían quedar expuestos, recibiendo fibras solo en una dirección. La rotación de 15 grados ha sido identificada como un enfoque óptimo para minimizar el desperdicio de material manteniendo capas compuestas en dos direcciones en las muestras. Además, reducir el tamaño de los cuadrados eliminaría la necesidad de un paso de posprocesado con lijado mediante lijadora de banda.

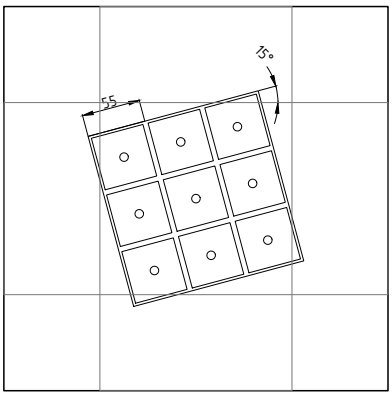


Figura 5.14: Patrón de agujeros propuesto rotado en la placa de aluminio.

Otra recomendación es utilizar agujeros de 8 mm en lugar de los anteriores de 10 mm, eliminando así la necesidad de casquillos adaptadores y simplificando el proceso de ensamblaje. Estas modificaciones propuestas buscan mejorar aún más la eficiencia del proceso y la consistencia en futuras investigaciones.

5.2.2 Mejora en la alineación de la herramienta con los ejes de la máquina de enrollado para facilitar los cambios de dirección de 90 grados

Una herramienta de enrollado bien alineada se refiere a una herramienta que está alineada con precisión con el eje de rotación de la máquina de enrollado. Lograr una alineación adecuada permitiría mantener una tensión uniforme en las fibras y facilitaría el proceso de desmontaje y rotación de la placa central de la herramienta en 90 grados. Se observó que, cuando la herramienta no estaba perfectamente alineada, volver a insertarla en las estructuras que sujetan los ejes —las cuales ya estaban ajustadas mediante el mandril universal de tres mordazas— se volvía un proceso complicado y que requería mucho tiempo.

Una alineación más precisa entre la herramienta y los ejes de la máquina de enrollado permitiría una reinserción instantánea y fluida de la herramienta luego de la rotación de la placa central. Una posible solución sería instalar rieles guía ajustables con un mecanismo de pasador deslizante para permitir un ajuste fino de la alineación. Las direcciones de movimiento que proporcionarían los rieles pueden verse en la Figura 5.15.

Este sistema podría funcionar integrando un reloj comparador analógico posicionado a lo

largo del recorrido de la máquina de enrollado. A medida que la herramienta se rota y pasa por el comparador, este proporciona una lectura sobre la desalineación, permitiendo realizar ajustes incrementales. Esto permitiría al operario afinar gradualmente la alineación con mayor precisión.

Implementar este sistema mejoraría la repetibilidad, reduciría el esfuerzo necesario para el reposicionamiento y aumentaría la eficiencia y calidad general del proceso de enrollado.

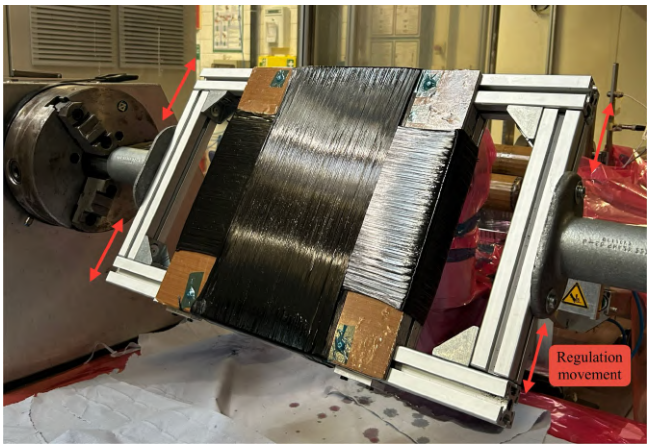


Figura 5.15: Concepto del movimiento de la placa central en relación con el bastidor de aluminio (flechas rojas) para permitir una alineación más fluida y cambios de dirección de 90 grados.

5.3 Resultados y discusión

En esta sección se presentan y analizan los resultados del proceso de fabricación. Se discuten los hallazgos en relación con la calidad de fabricación del método de conexión propuesto. La compactación, la porosidad y el ángulo de los agujeros cónicos se evalúan mediante análisis visual y, posteriormente, a través de imágenes en corte transversal. También se examina el impacto de las modificaciones introducidas entre los ensayos de enrollado W_1 y W_2. Los resultados se interpretan en el contexto de la literatura existente y estudios previos, proporcionando una base para comprender el potencial de mejora futura.

5.3.1 Fabricación de las muestras

Se observan varias mejoras entre W_1 y W_2, tales como una reducción en el tiempo de enrollado, un mejor manejo del exceso de resina y una mejora en la calidad geométrica de los agujeros cónicos en los laminados, con menos desalineaciones.

El proceso de fabricación mostró las siguientes mejoras visuales y generales de W_1 a W_2:

- **Reducción de capas y control del espesor:** En W_1 se utilizaron 48 capas, lo que

resultó en un espesor final de 11,28 mm, superando el valor objetivo de 10 mm. En W_2, el número de capas se redujo a 44, lo que permitió un mejor control del espesor. Esta reducción llevó a un espesor final de 10,34 mm, más cercano al valor deseado de 10 mm.

- **Conos y separación de fibras:** Los conos utilizados en W_2 fueron rediseñados para mejorar la calidad del agujero tras el curado. La forma modificada del cono, con una cabeza redondeada, permitió una mejor distribución de la presión del vacío, como se muestra en la Figura 5.16. En W_1, los casquillos mostrados en la Figura 5.6 mantenían los conos en posición, pero se unían con la resina, dificultando su extracción. En W_2, el nuevo diseño de cono (Figura 5.5) eliminó la necesidad de casquillos, facilitando la extracción tras el curado y resultando en menos defectos en las fibras.

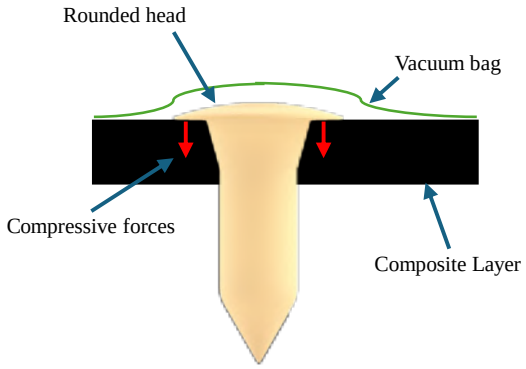


Figura 5.16: Cono comprimiendo el laminado a medida que la bolsa de vacío presiona contra la cabeza redondeada.

- **Gestión del exceso de resina:** La mejora en la gestión de la resina, que consistió en cubrir los agujeros donde se insertaron los separadores cónicos con fieltro de absorción y aplicar capas adicionales de desmoldeante, minimizó el flujo de resina. Esta reducción del exceso de resina permitió reutilizar la herramienta en múltiples ocasiones sin necesidad de una limpieza intensiva de residuos curados.

- **Preparación de la máquina de enrollado:** Una preparación adecuada de la máquina de enrollado—incluyendo el recubrimiento con film plástico protector, la carga anticipada del programa de enrollado y el ajuste correcto de la herramienta—ofrece beneficios significativos. Esta preparación ahorra tiempo el día del enrollado y reduce el tiempo de limpieza posterior, ya que el film protector facilita la remoción de la resina residual.

- **Reducción del tiempo:** El tiempo de fabricación se redujo aproximadamente en 1 hora en W_2, gracias a la menor cantidad de capas, a la mejora en la alineación de la herramienta al rotar la placa central 90 grados (como se explicó en la Sección 5.1.5), a una inserción de conos más eficiente gracias al nuevo localizador de agujeros con cuatro puntos de apoyo (Sección 5.1.2), y a una mejor gestión del exceso de resina, como se mencionó anteriormente.

5.3.2 Imágenes en corte transversal

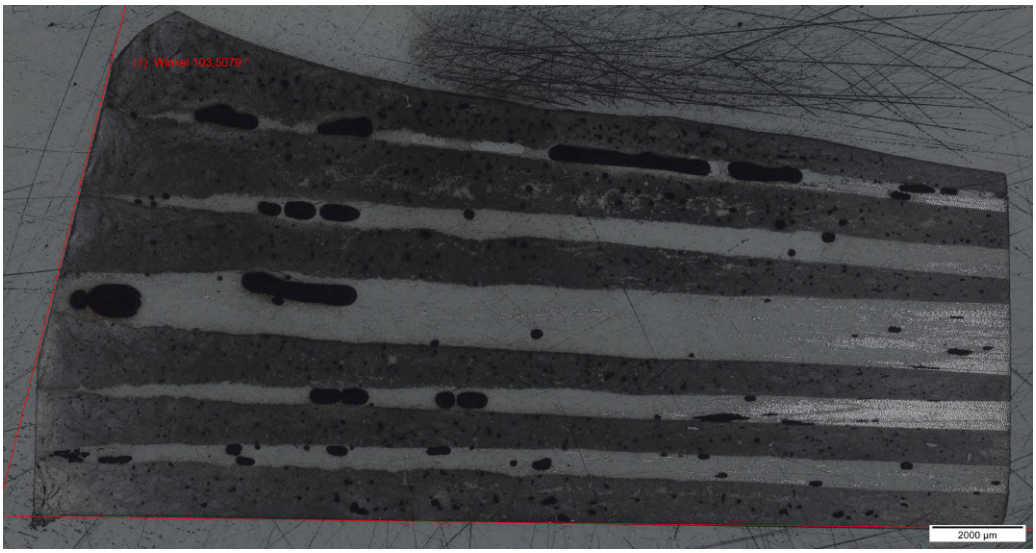
Las imágenes microscópicas obtenidas durante el proceso de preparación en la Sección 4.4 revelan algunos hallazgos. En W_1, el nivel de porosidad es de aproximadamente 10 %, lo cual indica posibles problemas de distribución de la resina o de compactación. El ángulo medido del agujero cónico es de 27 grados, valor relativamente cercano al objetivo de 30 grados, lo que representa un resultado aceptable. La Figura 5.17a muestra un corte transversal detallado de la muestra de laminado, donde se midió dicho ángulo.

Sin embargo, se observan vacíos y zonas ricas en resina que sugieren variaciones durante el proceso de enrollado. La Figura 5.17b resalta la porosidad presente a lo largo de las capas del laminado, lo cual indica problemas de compactación de las fibras durante el enrollado, como ya se preveía y explicó en el estado del arte en la Sección 2.2.2. La compactación manual mediante rodillo no fue suficiente para mejorar la consolidación del laminado. Estos valores se obtuvieron utilizando el sistema de posprocesamiento de imágenes del microscopio (Olympus Stream Motion).

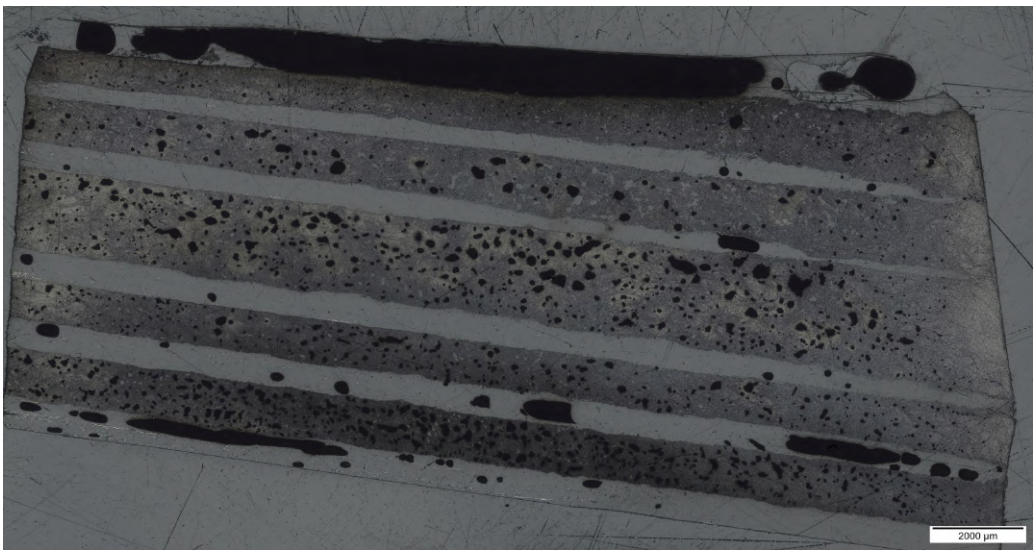
En las muestras correspondientes a W_2, mostradas en la Figura 5.18a, se observó un mayor contenido de vacíos, lo cual fue confirmado mediante el posprocesamiento de imágenes del microscopio, arrojando un nivel de porosidad del 25 %. Este incremento en la porosidad no se debe únicamente a una compactación deficiente durante el proceso de enrollado. También podría estar relacionado con una velocidad de enrollado un 10 % mayor respecto al proceso anterior y, posiblemente, con una desgasificación insuficiente de la resina antes de su carga en la máquina de enrollado.

Asimismo, se puede observar que el tamaño y la cantidad de poros aumentan al pasar de las capas internas—las más cercanas a la placa de aluminio—hacia las capas externas, donde se aplicó la presión mediante la bolsa de vacío. Esto podría deberse a que el aire es lentamente extraído desde las capas internas hacia la superficie exterior durante el proceso de vacío, pero la pieza comienza a curar antes de que todo el aire haya escapado del laminado. No obstante, esta hipótesis requiere de una investigación más detallada para su validación.

En los casos analizados de W_2, los ángulos medidos del agujero cónico oscilaron entre 28 y 35 grados. Sin embargo, en la zona cercana al cono se observó buena compactación y baja porosidad, debido al contacto con el cono impreso en SLA, lo cual resulta beneficioso dado que es en esa zona donde se transmiten las fuerzas del tirante a través de la cuña bajo carga.

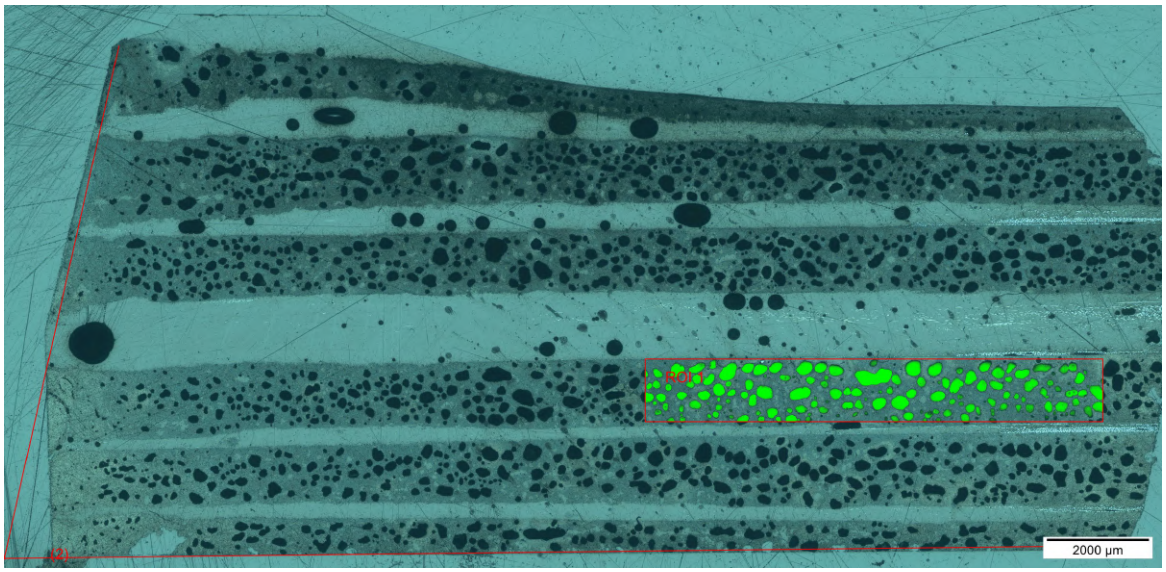


(a)

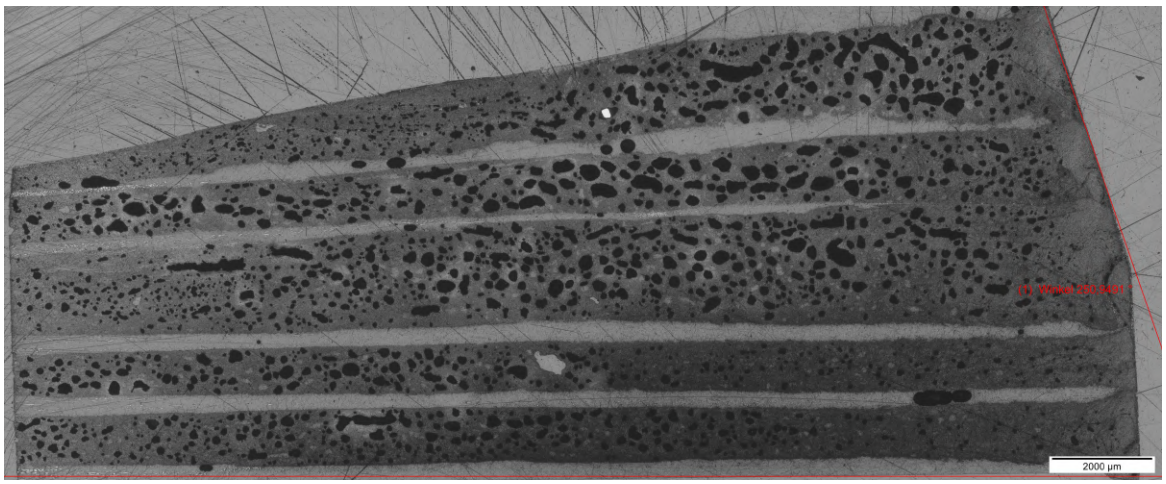


(b)

Figura 5.17: (a) Imagen en corte transversal de la muestra de laminado con medición del ángulo correspondiente a W_1. (b) Imagen en corte transversal de otra muestra con conexión en cuña, que evidencia una porosidad significativa a lo largo de las capas del laminado en W_1.



(a)

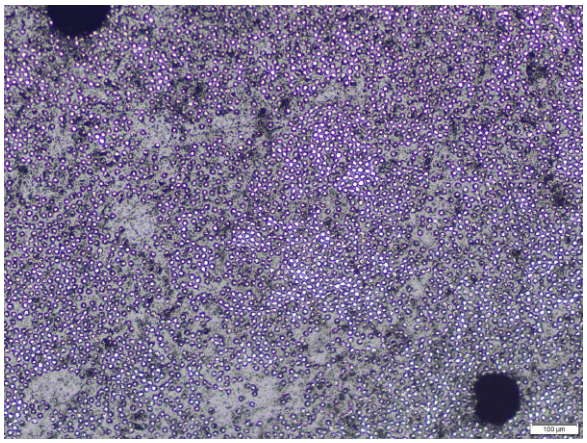


(b)

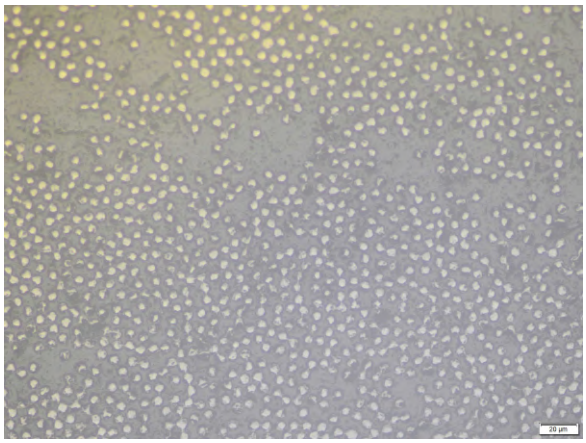
Figura 5.18: (a) Imagen en corte transversal de una muestra tipo cupón, donde se observa una porosidad significativa en las capas del laminado de W_2, así como la zona denominada Región de Interés (ROI). (b) Imagen en corte transversal de una muestra con conexión en cuña, con medición del ángulo correspondiente a W_2.

Se observan imágenes de W_1 con mayores aumentos. En la Figura 5.19a, las fibras perpendiculares al lente aparecen como círculos blancos con un contorno grisáceo, y entre las fibras, la resina se visualiza como una zona blanca, plana y sin relieve. La Figura 5.19b muestra la misma estructura, pero con un mayor aumento de 20x. Finalmente, en la Figura 5.19c, el límite entre fibras orientadas perpendicularmente al lente aparece como círculos. En contraste, el inicio de las fibras paralelas al lente se presenta como una zona sólida, que podría confundirse con resina, pero que en realidad está compuesta por fibras paralelas que no se distinguen completamente. Los óvalos blancos en la parte superior de la imagen corresponden a fibras alineadas paralelamente al lente.

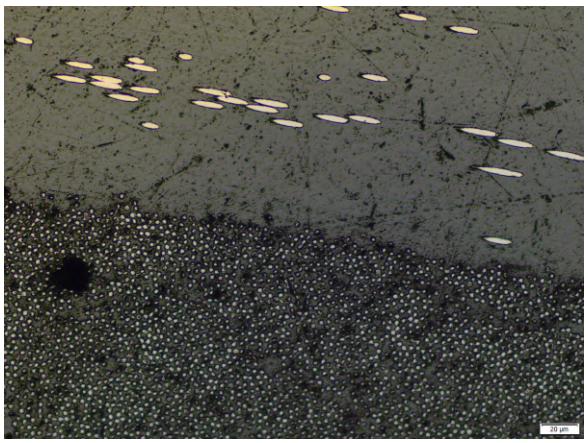
Esto da lugar a una recomendación para futuras investigaciones: cortar las muestras en un ángulo de 45 grados respecto a la dirección de las fibras permitiría una visualización más clara de ambas capas.



(a) Fibras orientadas perpendicularmente al lente de W_1 con aumento de 10x.



(b) Fibras orientadas perpendicularmente al lente de W_1 con aumento de 20x.



(c) Frontera entre fibras orientadas paralela y perpendicularmente al lente, con aumento de 10x.

Figura 5.19: Diferentes imágenes obtenidas de W_1.

5.4 Resumen y recomendaciones para el desarrollo futuro de conexiones en cuña

El análisis de las muestras fabricadas revela varios hallazgos clave y áreas con potencial de mejora:

- La mejora en la cantidad de resina utilizada en W_2 dejó menos resina en los alrededores del laminado compuesto, lo que resultó en un acabado más limpio y controlado al ser

inspeccionado visualmente, y además redujo el flujo de resina excedente hacia el interior de la herramienta.

- La desalineación de los espaciadores cónicos puede corregirse asegurando que la punta penetrante entre perpendicularmente a la superficie del laminado aún húmedo. Esto puede lograrse utilizando una herramienta localizadora de agujeros con un escalón de cambio donde el se cambie de diámetro, junto con espaciadores cónicos que se ajusten correctamente a los agujeros de la placa de aluminio, sin necesidad de casquillos.

- En cuanto al tiempo de producción para la fabricación de muestras, las mejoras más efectivas fueron la modificación de la herramienta de enrollado —que permitió una rotación más rápida de 90 grados de la placa central— y el manejo optimizado del exceso de resina. El uso de fieltro absorbente en el interior de la herramienta permitió absorber la resina excedente, y la aplicación adicional de cera desmoldeante redujo al mínimo la necesidad de limpieza de la herramienta tras el curado del laminado compuesto.

- Se observó un alto nivel de porosidad a lo largo del laminado. Esto indica una compactación deficiente durante el proceso de enrollado en la parte plana del mandril. La compactación manual con rodillo no fue suficiente para mejorar la consolidación de las fibras, lo que resultó en vacíos visibles y defectos evidentes en las imágenes de corte transversal.

- La compactación en la zona cercana al agujero cónico mostró buenos resultados. Esto se atribuye al contacto con el cono impreso en SLA, que permitió que la bolsa de vacío distribuyera la presión de manera más uniforme sobre la superficie. Esta mejora en la compactación es importante, ya que el cono es la zona principal donde se transfieren las fuerzas desde la conexión en cuña cuando se encuentra bajo carga.

A partir de los hallazgos, se proponen las siguientes recomendaciones para mejorar la calidad de fabricación y la consistencia de la conexión en cuña:

- Se recomienda continuar utilizando los conos modificados y evitar el uso de casquillos en todos los casos, ya que tienden a aflojarse, lo que no solo provoca que los conos se inclinen, sino que también permite que la resina fluya hacia el interior de la herramienta.

- Se recomienda utilizar la separación de cuchilla (knive gap) del rodillo dosificador de la máquina de enrollado especificada en W_2, ya que da como resultado un laminado con menor exceso de resina, lo que mejora la limpieza y reduce el tiempo de limpieza posterior al enrollado.

- Es necesario fabricar nuevas placas de aluminio con un patrón de agujeros rotado 15 grados para evitar que las fibras se dividan excesivamente al insertar los conos.

- Como se demostró en la Sección 4.3.9, al cambiar el ángulo de la cuña de 30 grados a un nuevo valor, también debe ajustarse y recalcularse el ángulo del cono de aluminio en consecuencia.
- Para reducir los niveles generales de porosidad, se recomienda mejorar el proceso de compactación durante el enrollado. Esto podría implicar un aumento de la presión aplicada durante el enrollado o el uso de un rodillo automatizado con mayor capacidad de fuerza.
- Durante el proceso de embolsado al vacío, se debe tener especial cuidado al aplicar la Tacky Tape entre las dos láminas plásticas para sellar la bolsa de vacío. También se recomienda realizar la prueba de vacío descrita en la Sección 4.3.5 para asegurar un sellado adecuado. De lo contrario, si entra aire en el sistema, la resina será aspirada por ese punto de fuga, lo que provocará una distribución desigual de presión en todo el laminado y comprometerá su calidad final.
- El aumento de la porosidad de W_1 a W_2 podría atribuirse a la mayor velocidad de enrollado utilizada en W_2, que fue aproximadamente un 10 % superior. Este incremento en la velocidad podría ser un factor que contribuyó a la menor compactación y al mayor contenido de vacíos observado.

6 Resumen y recomendaciones

6.1 Resumen

Esta tesis presenta el desarrollo y la fabricación de un nuevo concepto de conexión en cuña para tirantes a tracción en recipientes de presión conformables para hidrógeno, fabricados en CFRP. La motivación surge de la necesidad de integrar tirantes de gran diámetro, de 8 mm, en tanques Tipo IV—específicamente en el contexto del proyecto ADAPT-H2 Tanks [1]—donde el liner de polímero no puede fabricarse con canales finos debido a limitaciones del proceso. Como consecuencia, deben emplearse tirantes más gruesos, los cuales no pueden ser sujetados de forma segura mediante métodos de conexión tradicionales. Esta limitación requiere una solución mecánica robusta, como lo es la conexión en cuña.

El mecanismo de conexión en cuña se basa en el enclavamiento mecánico y la fricción. Cuando la cuña se inserta en un agujero cónico junto con la varilla, las cuñas transforman las fuerzas de tracción en fuerzas de compresión, generando un efecto de autoajuste. Se desarrolló una metodología para fabricar muestras ensayables (especímenes tipo cupón) con el fin de evaluar este concepto. Estas muestras replican la interfaz entre la pared del PV y el tirante, permitiendo realizar ensayos repetibles sin necesidad de enrollar un tanque completo.

Se realizaron dos ensayos de enrollado—W_1 y W_2—para evaluar y mejorar el método de fabricación de laminados con agujero cónico destinados a muestras de conexión en cuña. Ambos procesos siguieron el mismo flujo de trabajo general: sobre una herramienta desarrollada en el marco de esta tesis, con superficies planas para crear un laminado compuesto, del cual luego se cortaron muestras cuadradas alrededor de agujeros cónicos predefinidos. Este enfoque permitió reducir el uso de material, acelerar la producción y obtener dimensiones de muestra más repetibles en comparación con el enrollado de un tanque completo.

En W_1, los conos se colocaron en agujeros pretaladrados de una placa base de aluminio y se sujetaron mediante casquillos utilizados para compensar la diferencia de diámetros. Sin embargo, los casquillos se unieron con la resina durante el curado, lo que dificultó la extracción de los conos y, en algunos casos, provocó desalineación de los agujeros cónicos debido a roturas. Este problema llevó al rediseño de los espaciadores cónicos para W_2. En el segundo enrollado, los espaciadores cónicos fueron modificados incorporando una parte cilíndrica que encajaba firmemente en los agujeros, eliminando la necesidad de casquillos y mejorando significativamente tanto el posicionamiento como la extracción tras el curado.

El resto del proceso se mantuvo constante: antes de colocar los conos, se realizó el enrollado de la placa utilizando una máquina de enrollado de filamentos. Una vez completado el enrollado e insertados los espaciadores cónicos en el laminado, se selló el conjunto y se aplicó embolsado

al vacío. Tras el curado, los espaciadores cónicos fueron retirados, dejando agujeros cónicos. Luego, se insertaron varillas de CFRP—con matriz termoplástica—en estas cavidades. En cada extremo de las varillas se moldeó un agujero cónico utilizando un soldador, para adaptarlo a la geometría de la cuña, y se insertaron cuñas de aluminio para asegurar la conexión.

El desarrollo y la modificación de la herramienta de enrollado fueron esenciales para lograr una calidad de muestra consistente, y la incorporación de una herramienta localizadora de agujeros con rebordes permitió una colocación más precisa de los espaciadores cónicos sin necesidad de casquillos, lo que simplificó el proceso de inserción y facilitó la extracción de los conos después del curado. La aplicación controlada de la resina resultó en una herramienta más limpia y en un tiempo de posprocesado más corto.

Un aspecto importante de la fabricación interna de la herramienta de enrollado fue la posibilidad de personalizarla según los requerimientos del proceso. Esto incluyó la producción de la herramienta con las dimensiones deseadas y la incorporación de los accesorios necesarios para los procesos de enrollado.

Se diseñó un dispositivo de ensayos para evaluar la resistencia a tracción de la conexión en cuña utilizando una máquina universal de ensayos. Las dimensiones de las placas internas y los pernos del montaje fueron ajustadas para soportar las cargas esperadas e incorporar un factor de seguridad, de modo que el conjunto pueda resistir las fuerzas aplicadas.

El sistema está preparado para investigaciones futuras, permitiendo ensayos repetibles de distintos diseños de conexión y materiales. Esto proporciona una base sólida para seguir mejorando el concepto de conexión en cuña mediante pruebas adicionales.

Durante el proceso de fabricación se implementaron mejoras. Una mejor preparación de superficie y una gestión optimizada del exceso de resina redujeron el tiempo de posprocesado posterior al enrollado. En particular, el uso de fieltro absorbente en el interior de la herramienta para absorber la resina excedente, junto con la aplicación incrementada de al menos tres capas de cera desmoldeante, permitió que la herramienta permaneciera prácticamente limpia después del enrollado. Además, modificaciones en la herramienta de enrollado—como las que permitieron una rotación más rápida de 90 grados de la placa central—mejoraron la consistencia general del proceso de enrollado.

La calidad de las muestras mejoró en términos de geometría y compactación en la zona cercana al agujero cónico. La mejor compactación en las cercanías del cono se atribuyó a la forma modificada del mismo, que permitió una distribución más uniforme de la presión ejercida por la bolsa de vacío. Sin embargo, la alta porosidad general continuó siendo un desafío, principalmente porque las muestras fueron producidas sobre una superficie plana y, como se discute en la Sección 2.2.2, la compactación en ese caso es deficiente.

Estudios enfocados en los ensayos mecánicos de la conexión en cuña y en la mejora continua

del proceso de fabricación podrían contribuir a mejorar aún más la calidad de las muestras.

6.2 Recomendaciones

Los resultados de esta tesis proporcionan una base para futuras investigaciones y desarrollos del concepto de conexión en cuña. Se han identificado varias áreas que requieren mayor estudio y optimización:

Mejora de la compactación

Deben explorarse técnicas adicionales para mejorar la compactación del laminado sobre superficies planas. Una mayor compactación ayudaría a reducir la porosidad y a mejorar el desempeño mecánico general de la conexión. Además de ajustes en el proceso de enrollado o en los métodos de distribución de presión, podría ser beneficioso considerar un sistema de resina alternativo. Propiedades de la resina como la viscosidad, el tiempo de curado y el comportamiento frente a la desgasificación influyen en los niveles de porosidad y deberían ser consideradas en futuras investigaciones.

Estudio paramétrico, ensayos y consideraciones de materiales

Las investigaciones futuras deberían centrarse en un estudio paramétrico detallado, combinado con ensayos mecánicos, para comprender y validar mejor el rendimiento de la conexión en cuña. Los parámetros a investigar incluyen:

- El ángulo de la cuña y su impacto en la eficiencia de transferencia de carga.
- El espesor del laminado compuesto.
- El uso de un elemento intermedio entre la varilla con forma de cuña y el laminado.

Deben realizarse ensayos mecánicos sobre las muestras fabricadas para evaluar el comportamiento de la conexión bajo carga. Estas pruebas ayudarán a validar las hipótesis teóricas y a mejorar la fiabilidad general del diseño. Además, el análisis de los modos de fallo—cómo y dónde fallan las muestras—puede proporcionar información valiosa sobre los puntos débiles de la conexión y orientar mejoras futuras en el diseño.

Asimismo, debe considerarse la compatibilidad de materiales, en particular el uso de conos de aluminio en una conexión en cuña dentro de un tanque Tipo IV en vehículos impulsados por hidrógeno. El aluminio y la fibra de carbono tienen coeficientes de expansión térmica diferentes,

lo cual puede generar tensiones debido a las variaciones de temperatura. Esta incompatibilidad podría comprometer la conexión con el tiempo, provocando potencialmente desprendimientos o fallos de funcionamiento. Trabajos futuros deberían investigar materiales alternativos o soluciones de diseño que compensen las diferencias de expansión térmica para garantizar una fiabilidad a largo plazo en condiciones reales de operación.

Mejoras en el proceso

Son necesarias mejoras adicionales en la preparación de las muestras y en la precisión del proceso de fabricación. Se han identificado dos áreas clave:

- Para el análisis mediante microscopía, se recomienda cortar las muestras en un ángulo de 45 grados para mejorar la visualización de las fibras tanto en dirección longitudinal como transversal. Esto permitirá un análisis más preciso de la alineación de las fibras y de la calidad estructural del laminado.

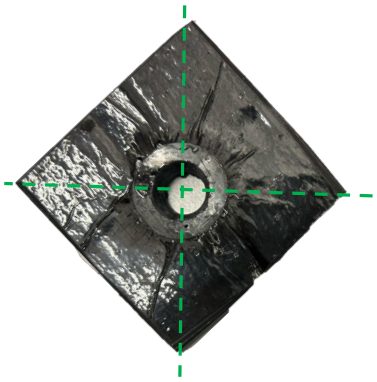


Figura 6.1: Corte propuesto de las muestras a 45 grados, que permite una mejor visualización de la alineación de fibras en direcciones longitudinal y transversal durante el análisis microscópico.

- Es necesario un mayor perfeccionamiento en la forma y alineación de los espaciadores cónicos para mejorar la consistencia de la geometría final. Mejorar el patrón de agujeros en la herramienta de aluminio y la alineación de la herramienta de enrollado con la máquina de enrollado contribuirá a una deposición de fibras más uniforme.

- Durante la etapa de ensamblaje de las muestras, es importante tener en cuenta que existe un anillo que actúa como adaptador—como se muestra en la Figura 6.2—entre el soldador y las guías de aluminio. Este anillo tiene una ligera holgura con el soldador. Aunque se utilizó un adaptador adicional impreso en 3D mediante tecnología Modelado por Deposición Fundida (FDM) para reducir esta holgura, aún se requiere un mayor ajuste para eliminarla completamente. Si no se asegura correctamente, el soldador puede inclinarse levemente sin que el operario lo note.



Figura 6.2: Anillo adaptador montado sobre el soldador para acoplarlo con las guías de aluminio.

Referencias bibliográficas

[1] M.Sc. Elisabeth Gleis y Dr.-Ing. Swen Zaremba. *ADAPT-H2-Tanks – Adaptive Design for Advanced Performance of Type 4 H2 Tanks*. Ed. por Public Project - TUM. URL: https://www.asg.ed.tum.de/en/lcc/public-projects/processing-technologies/adapt-h2-tanks-adaptive-design-for-advanced-performance-of-type-4-h2-tanks/.

[2] European Parliament - www.europarl.europa.eu. «EU ban on sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained | News | European Parliament». En: ().

[3] Etienne Rivard, Michel Trudeau y Karim Zaghib. «Hydrogen Storage for Mobility: A Review». En: *Materials (Basel, Switzerland)* 12.12 (2019). ISSN: 1996-1944. DOI: 10.3390/ma12121973.

[4] Michael Ruf et al. «Analysis of the Integration of Aramid Fiber Tension Struts in a Box-shaped Pressure Vessel». En: *Applied Composite Materials* 29.4 (2022), págs. 1733-1745. ISSN: 1573-4897. DOI: 10.1007/s10443-022-10037-0.

[5] Technology Collaboration Programme. *Hydrogen as fuel for fuel cell electric vehicles*. URL: https://www.ieafuelcell.com/index.php?id=33#:~:text=Hydrogen%20can%20be%20stored%20physically,%2D700%20bar%20tank%20pressure)..

[6] Mustafa İnci et al. «A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 137 (2021), pág. 110648. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110648.

[7] Elisabeth Gleis, Jongwon Kim, Swen Zaremba, Klaus Drechsler. *DEVELOPMENT OF A MANUFACTURING PROCESS FOR A CUBOIDAL PRESSURE VESSEL WITH TENSION STRUTS: Proceedings of the 20th European Conference on Composite Materials - Composites Meet Sustainability*. Garching, Germany, 2022. DOI: 10.5075/EPFL-298799{\textunderscore}978-2-9701614-0-0.

[8] Michael Ruf et al. «Neue Bauweisen Von Wasserstoffdruckbehältern Für Die Integration in Zukünftige Fahrzeugarchitekturen». En: *Proceedings of the Munich Symposium on Lightweight Design 2020*. Ed. por Simon Pfingstl et al. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, págs. 74-85. ISBN: 978-3-662-63143-0.

[9] Kutlu A. Öztas, Ruben A.J. Weerts y Michael G. Ruf. «An analytical and numerical approach to design a type I box-shaped pressure vessel with inner tension struts». En: *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 192 (2021), pág. 104441. ISSN: 0308-0161. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2021.104441. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030801612100137X.

[10] Johannes Drexler. *Process Development for the Manufacturing of a Conformable Hydrogen Pressure Vessel*. Garching bei München.

[11] Allina Victoria Schenk. *Parameter Study for the Investigation and Improvement of the Reinforcement Structure for Conformable Hydrogen Pressure Vessels Using Coupon Specimens*. Garching bei München.

[12] Kloiber Florian. *Parameterstudie zur Weiterentwicklung der Verstärkungsstruktur eines bauraumangepassten Drucktanks.* Garching bei München.

[13] Qian Cheng et al. «Review of common hydrogen storage tanks and current manufacturing methods for aluminium alloy tank liners». En: *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 7.2 (2024), págs. 269-284. ISSN: 25888404. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2023.08.002.

[14] N. Minsch et al. «Analysis of Filament Winding Processes and Potential Equipment Technologies». En: *Procedia CIRP* 66 (2017), págs. 125-130. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.284.

[15] Ma Quanjin et al. «Design of portable 3-axis filament winding machine with inexpensive control system». En: *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING AND SCIENCES* 12.1 (2018), págs. 3479-3493. ISSN: 22894659. DOI: 10.15282/jmes.12.1.2018.15.0309.

[16] Ma Quanjin , M R M Rejab , M S Idris , Bo Zhang, Nallapaneni Manoj Kumar. «Filament winding technique SWOT analysis and applied favorable factors». En: (2019).

[17] Mohammad Azeem et al. «Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review». En: *Journal of Energy Storage* 49 (2022), pág. 103468. ISSN: 2352-152X. DOI: 10.1016/j.est.2021.103468. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X2101152X.

[18] P. K. Mallick. *Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design.* third edition. 2007. ISBN: 9781420005981. URL: https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=1449431.

[19] Daniel Griffin, Sebastian Wood y Ian Hamerton. «Measurement of the glass transition temperature of an epoxy resin using principal components of Raman spectra». En: *Composites Part B: Engineering* 200 (2020), pág. 108210. ISSN: 13598368. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108210.

[20] Waseem Gul et al. «Characterization of Polymeric Composites for Hydrogen Tank». En: *Polymers* 15.18 (2023). DOI: 10.3390/polym15183716.

[21] Chiara Colombo y Laura Vergani. «Optimization of filament winding parameters for the design of a composite pipe». En: *Composites Part B: Engineering* 148 (2018), págs. 207-216. ISSN: 13598368. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.04.056.

[22] Aleksander Błachut et al. «Influence of fiber tension during filament winding on the mechanical properties of composite pressure vessels». En: *Composite Structures* 304 (2023), pág. 116337. ISSN: 02638223. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116337.

[23] P. K. Mallick. *Composites Engineering Handbook*. CRC Press, 1997. ISBN: 9781482277739. DOI: 10.1201/9781482277739.

[24] Yiğit Kemal Ökten. «Use of Carbon/Epoxy Towpregs During Dry Filament Winding of Composite Flat Specimens and Pressure Vessels». Tesis de mtría. Ankara, Turkey: Middle East Technical University.

[25] Marius Dackweiler et al. «Experimental investigation of frictional behavior in a filament winding process for joining fiber-reinforced profiles». En: *Composite Structures* 229 (2019), pág. 111436. ISSN: 02638223. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111436.

[26] Gottfried W. Ehrenstein. *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften*. 2. völlig überarbeitete Auflage. Hanser eLibrary. München: Hanser, 2006. ISBN: 9783446457546. DOI: 10.3139/9783446457546. URL: https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446457546.

[27] Vijay Kumar Singh, Nishant K. Singh y Yashvir Singh, eds. *Composites modeling and manufacturing*. First edition. Engineering tribology, manufacturing and applied energy. Boca Raton FL: CRC Press, 2025. ISBN: 9781003564355.

[28] Epoxyworks. *Vacuum Bagging Basics*. URL: https://www.epoxyworks.com/vacuum-bagging-basics/.

[29] Hemanth G., Ramya M. and Padmanabhan K. «Flexural Behaviour of Sandwich Composite Panels Fabricated Through Different Vacuum Bagging Techniques». En: (2015).

[30] Arif Isyraf. «Effects of Vacuum Bagging Techniques on Mechanical Properties of CarbonEpoxy Laminates». En: (2020).

[31] J. Kim. «Prozessentwicklung für die Herstellung eines bauraumangepassten Typ V Wasserstoffdruckbehälters». En: (2021).

[32] Michael Gerhard Ruf. «Untersuchung von neuartigen Wasserstofftankkonzepten für die Integration in zukünftige Fahrzeugarchitekturen: Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines». En: (2023).

[33] Kutlu A. Öztas et al. «A numerical approach to design a type II box-shaped pressure vessel with inner tension struts». En: *International Journal of Hydrogen Energy* 47.6 (2022), págs. 3927-3938. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.005.

[34] Gregory Iuzzolino. «Design of a Vehicular Liquefied Natural Gas Fuel Storage Vessel». En: 2005. URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138582489.

[35] Pin-Ching Maness and Paul F. Weaver: NREL. «Proceedings of the 2001 U.S. DOE Hydrogen Program Review». En: ().

[36] Simon Pfingstl et al., eds. *Proceedings of the Munich Symposium on Lightweight Design 2020*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. ISBN: 978-3-662-63143-0.

[37] Yue Liu, Bernd Zwingmann y Mike Schlaich. «Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures—A Review». En: *Polymers* 7.10 (2015), págs. 2078-2099. DOI: 10.3390/polym7101501.

[38] Tadej Vidrih et al. «Investigations on the Fatigue Behaviour of 3D-Printed Continuous Carbon Fibre-Reinforced Polymer Tension Straps». En: *Polymers* 14.20 (2022). DOI: 10.3390/polym14204258.

[39] Benjamin Krebs. *Zur Gestaltung keilförmiger Krafteinleitungen in hoch beanspruchten Faserverbundstrukturen: Dissertation.* 2014.

[40] Moritz Bastian Lettl. *Development of Coupon Specimens to Study and Improve the Reinforcement Structure of Conformable Pressure Vessels.* Garching bei München.

[41] Elisabeth Gleis. «Regular meeting ADAPT-H2 Tanks». En: (2024).

[42] Yan Ma et al. «A comparative study of the mechanical properties and failure behavior of carbon fiber/epoxy and carbon fiber/polyamide 6 unidirectional composites». En: *Composite Structures* 160 (2017), págs. 89-99. ISSN: 02638223. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.10.037.

[43] ESB. *Unlegierter Baustahl Datenblatt.* 2024. URL: https://www.esb-group.com/produkte-din-en/unlegierter-baustahl/.

Lista de figuras

1.1. Representación esquemática de un tren motriz de un FCEV con sistemas auxiliares de potencia [6]. 2

1.2. Esquema del concepto de PV con un detalle ampliado del tirante anclado y los parámetros geométricos [10]. 2

1.3. Esquema de la conexión por cuña. 3

2.1. Sistema de bobinado por filamento, en el que las fibras atraviesan peines, un baño de resina, rodillos de presión y se enrollan sobre un mandril rotativo para formar una estructura de material compuesto [15]. 6

2.2. Representación esquemática de los tres tipos principales de patrones de bobinado [15]; a) Bobinado circunferencial; b) Bobinado helicoidal; c) Bobinado polar. . . 7

2.3. Variación de las propiedades mecánicas en una pieza fabricada por enrollado filamentario en función del ángulo de bobinado [18]. 7

2.4. Comparación entre el bobinado sobre una placa plana y sobre un mandril circular. Las superficies planas (a) no generan compactación por tensión de la fibra ($P = 0$), mientras que los mandriles circulares (b) sí lo hacen ($P > 0$), aumentando la fracción volumétrica de fibra y mejorando la adhesión. [20]. 9

2.5. Principio del proceso de vacuum bagging [26]. 11

2.6. Vista en seccion de un recipiente a presión con forma cúbica – Representación cualitativa de la simulación numérica de las tensiones y deformaciones debidas a la carga por presión interna [32]. 12

2.7. (a) Recipiente a presión tipo II de forma cúbica con tirantes internos [33]. (b) Combinación de subunidades compuestas por pequeños cilindros para formar un recipiente a presión de forma cúbica mayor [34]. (c) Tanque de forma cúbica reforzado con fibras de aramida [4]. (d) Demostrador con inserciones de tirantes de CFRP con matriz termoplástica [7]. 12

2.8. Etapas principales del proceso de fabricación de un PV con tirantes de refuerzo [7]. 13

2.9. a) Estructura esquelética antes del bobinado. b) Laminado con extremos de tirantes sobresalientes [7]. 14

2.10. Proceso de fabricación de recipientes a presión con geometría cúbica mediante conexiones de bucles de fibra. La técnica consiste en guiar tirantes de aramida a través de la pared del tanque compuesto utilizando un método de *tufting*, formando bucles asegurados con elementos de desvío. Esto garantiza una transferencia de carga eficiente y refuerza la conexión entre las superficies superior e inferior del tanque [4]. 16

2.11. Principio básico de una conexión en cuña. La carga de tracción aplicada (F) genera una fuerza normal hacia el exterior (F_N) sobre las superficies de la cuña, lo que incrementa la fricción y mejora la transferencia de carga. El ángulo de la cuña (α) determina la eficiencia del mecanismo de transferencia de carga. [39]. . 18

2.12. Ejemplo de una conexión en cuña con un núcleo de aluminio, que ilustra parámetros como el ángulo de cuña (α), la longitud de sujeción (l) y el radio (r), esenciales para mejorar la rigidez estructural y la transferencia de carga [39]. . . 18

3.1. Boceto 3D de una conexión en cuña. 22

3.2. Corte transversal de un PV conformable que emplea conexiones en cuña para unir los tirantes de refuerzo a la pared del recipiente, mostrando las capas del material compuesto junto con los parámetros relevantes para el estudio. 23

3.3. Resumen del proceso de fabricación de un recipiente a presión Tipo IV con liner interno. 25

3.4. Proceso de separación de fibras utilizando una punta afilada. La punta penetra las capas de fibra, creando un espacio para ajustar su alineación [41]. 26

3.5. Cono para insertar en el laminado compuesto y mantener las fibras separadas. . 26

3.6. Proceso de ensamblaje de la conexión en cuña. Los pasos incluyen la inserción de la varilla a través del laminado, la fusión del material termoplástico de la varilla con un soldador, y la inserción de la cuña para asegurar la conexión [41]. 26

3.7. Esquema de la placa de enrollado, donde se indica la distancia entre orificios. . . 27

3.8. Plano técnico de la herramienta de enrollado diseñada para el proceso de enrollado de filamentos, fabricada con perfiles y placas de aluminio. 28

3.9. (a) Esquema que muestra cómo la herramienta se rota 90 grados para permitir el enrollado en direcciones perpendiculares entre sí. (b) Herramienta de enrollado finalizada, fabricada con perfiles y placas de aluminio, con una placa central giratoria que permite el enrollado en dirección 0 y 90 grados. 28

3.10. Dispositivo de fijación con dos mecanismos de sujeción idénticos: uno conectado a la parte estática y otro a la parte móvil de la UTM, con placas externas para la conexión y placas internas con ranuras para sujetar la muestra de ensayo. . . 30

3.11. Plano conjunto del dispositivo de ensayo a tracción. El diseño incluye componentes como los sistemas de sujeción superior e inferior, espaciadores e inserciones, todos fabricados en acero 235JR. Este dispositivo fue adaptado específicamente para ensayar varillas de CFRP de 8 mm de diámetro y garantiza compatibilidad con la UTM. 31

3.12. Componentes del dispositivo de ensayo mecánico tal como fueron entregados por el fabricante, mostrando las cuatro piezas principales de acero mecanizadas necesarias para el ensamblaje del sistema de prueba. 32

3.13. Vistas del dispositivo de ensayo mecánico, destacando características de diseño como los bordes redondeados para reducir concentraciones de tensiones, el uso de una inserción para maximizar el contacto entre componentes, y el ensamblaje completo con espaciadores y la conexión en cuña insertada. 32

4.1. Instalación de casquillos impresos en 3D en la parte posterior de la placa de aluminio. 36

4.2. (a) Mandril completamente preparado y montado en la máquina de enrollado previo a W_1. El sistema incluye cinta azul para sellar los orificios en la placa de aluminio, teflón autoadhesivo en los bordes y casquillos impresos en 3D para ajustar el diámetro de los orificios. (b) Herramienta preparada para W_2, con cobertura extendida de teflón marrón autoadhesivo aplicado en los bordes—principalmente para evitar la adhesión y el flujo de resina hacia los huecos, y en segundo lugar para proteger las fibras durante el enrollado. 37

4.3. Sistema de la máquina de enrollado de filamentos, que muestra el mecanismo de alimentación de fibras, el sistema de tensión y la unidad de impregnación. El montaje incluye múltiples rodillos guía y manómetros de control para regular la tensión de las fibras. 38

4.4. (a) Rodillos de alimentación. El montaje incluye un rodillo metálico con forma cóncava y un rodillo plástico blanco. (b) Vista superior del baño de resina en la máquina de enrollado de filamentos. 38

4.5. Nivelación de la herramienta de enrollado sobre el mandril utilizando un nivel de burbuja. 39

4.6. Desgasificación de la resina mezclada en una cámara de vacío. 40

4.7. Compresión de las capas de fibra utilizando un rodillo durante el proceso de enrollado de filamentos. 42

4.8. (a) Cono y punta impresos en resina justo después de la impresión, aún adheridos a la base de impresión para W_1. (b) Cono y punta impresos en resina para W_2. . 43

4.9. (a) Localización y apertura de un agujero utilizando un localizador de agujeros. La herramienta asegura una alineación precisa con el agujero previamente perforado en la placa de aluminio, mientras que la punta afilada con mango facilita la separación de las fibras sin dañarlas. (b) Herramienta localizadora de agujeros modificada para W_2. 44

4.10. (a) Conos insertados en la placa para mantener la separación de las fibras durante el proceso de curado en W_1. La colocación uniforme de los conos coincide con el patrón de agujeros predefinido. (b) Conos insertados en la placa para mantener la separación de las fibras en W_2, mostrando los diferentes tipos de conos etiquetados. 44

4.11. Aplicación de la película de liberación perforada sobre las capas del compuesto. Además, se inserta un cubo en la esquina para evitar que la bolsa de vacío se desgarre. 45

4.12. Cómo una arruga puede generar una fuga. 46

4.13. (a) Disposición de la tela absorbente (felt) y la manguera de vacío para el proceso de embolsado al vacío. (b) Configuración final del embolsado, donde se observa cómo la lámina plástica se ajusta herméticamente a la forma de la placa debido a la aplicación del vacío. 46

4.14. (a) Laminado curado tras el proceso de embolsado al vacío, mostrando los conos impresos en resina que mantienen la separación de las fibras. La superficie refleja el flujo de resina excedente y los efectos de compactación del curado. (b) Configuración para el proceso de desmoldeo, donde la placa compuesta curada se sujeta en una prensa. El soporte de madera ayuda a distribuir la presión, evitando daños. 47

4.15. Capas compuestas extraídas de W_2 tras el desmoldeo. La capa de la izquierda muestra una superficie más lisa donde estuvo en contacto con la placa de aluminio, mientras que la capa de la derecha conserva los conos insertados. . . . 48

4.16. (a) Identificación de los cuadrados sobre las capas compuestas extraídas. (b) Marcado de los cuadrados sobre las capas compuestas extraídas. 49

4.17. (a) Corte de los bordes curvos exteriores de las placas compuestas utilizando la sierra Tiger. (b) Corte de precisión de los cuadrados con la sierra Batisti. 49

4.18. (a) Primer plano de la herramienta de alineación impresa en PLA. (b) Dispositivo de soporte con la varilla insertada y la herramienta de alineación para un posicionamiento correcto durante el termoformado. 50

4.19. (a) Boceto del ángulo de la cuña con definición de parámetros. (b) Mismo boceto con los valores numéricos aplicados a los parámetros. 51

4.20. Conos de aluminio fabricados por un taller externo. 53

4.21. (a) Soldador ajustado a 450 grados Celsius con una punta de 30 grados para la termoformación de la varilla compuesta. (b) Vista en detalle del agujero cónico creado durante el proceso de termoformado. 53

4.22. Tirante final con la cuña insertada, sobre la herramienta de ensamblaje. 54

4.23. Esquema que muestra el patrón de corte de las muestras de W_1 y W_2. 54

4.24. Muestras embebidas en resina CR-80/10 luego del curado. Las muestras fueron preparadas para el pulido y análisis de la distribución de fibras y la geometría de la sección transversal. 55

4.25. Muestra finalizada luego del proceso de lijado y pulido, mostrando una sección transversal limpia. 55

4.26. Muestra posicionada bajo el microscopio BX 41M LED. La muestra está fijada sobre una base de plastilina para mantener el paralelismo con la lente. 56

5.1. Vista frontal del laminado compuesto mostrando el patrón de enrollado de fibras y los insertos cónicos embebidos. Se observan marcadores numerados que indican la posición de los insertos. 58

5.2. Diagrama que muestra la desalineación de los conos durante la inserción, ilustrando el laminado compuesto y la placa de aluminio. 59

5.3. Herramienta de localización de agujeros rediseñada, que permite la alineación simultánea de los agujeros. 60

5.4. Muestra donde las fibras se superponen sobre el agujero cónico. 60

5.5. Comparación de los separadores cónicos utilizados en W_1 y W_2. El separador de W_2 incluye una tapa abovedada rediseñada (indicada por la flecha). 61

5.6. Ilustración del problema de ensamblaje causado por el desprendimiento del collar. Una vez que el collar se separa del separador cónico, se forma un espacio entre el separador y la placa de aluminio, aumentando el riesgo de desalineación. . . . 61

5.7. Distintos tipos de conos separadores con capas compuestas y sus respectivas representaciones geométricas marcadas en rojo, mostrando la colocación e interacción del tirante en cuña. 62

5.8. Muestra compuesta de W_1 a la izquierda y muestra de W_2 a la derecha, donde se destaca una superficie interna bien definida y una alta compactación alrededor del orificio. 63

5.9. Acumulación de resina dentro de la herramienta de enrollado tras el desmontaje en el ensayo W_1, mostrando capas gruesas de resina curada formadas por el exceso de flujo de resina durante el proceso de bolsa de vacío. 64

5.10. Tela de fieltro interior cubriendo las superficies internas de la herramienta de enrollado antes del segundo proceso de enrollado W_2. 64

5.11. (a) Espaciadores cónicos con menor presencia de resina debido al uso de tela de fieltro respirable. (b) Placa limpia tras la extracción de la capa compuesta en el ensayo W_2. 65

5.12. (a) Configuración de las placas de aluminio utilizadas en la herramienta de enrollado para W_2. La placa central está asegurada mediante planchuelas de aluminio externas que la fijan firmemente al bastidor, garantizando la alineación con los ejes. (b) Placa central del montaje de W_1, fijada con escuadras de aluminio en las esquinas para su sujeción al bastidor circundante. Aunque esta configuración es estructuralmente estable, dificultaba el desmontaje debido a la posición interna de las escuadras y tornillos. 66

5.13. (a) Desalineación de fibras observada en la W_1 debido al patrón de agujeros lineales en la placa de aluminio. Las zonas marcadas indican cómo los haces de fibras se desvían de su posición prevista. (b) Vista en corte transversal que muestra la delaminación en las capas exteriores de fibra de la W_1. 67

5.14. Patrón de agujeros propuesto rotado en la placa de aluminio. 68

5.15. Concepto del movimiento de la placa central en relación con el bastidor de aluminio (flechas rojas) para permitir una alineación más fluida y cambios de dirección de 90 grados. 69

5.16. Cono comprimiendo el laminado a medida que la bolsa de vacío presiona contra la cabeza redondeada. 70

5.17. (a) Imagen en corte transversal de la muestra de laminado con medición del ángulo correspondiente a W_1. (b) Imagen en corte transversal de otra muestra con conexión en cuña, que evidencia una porosidad significativa a lo largo de las capas del laminado en W_1. 72

5.18. (a) Imagen en corte transversal de una muestra tipo cupón, donde se observa una porosidad significativa en las capas del laminado de W_2, así como la zona denominada ROI. (b) Imagen en corte transversal de una muestra con conexión en cuña, con medición del ángulo correspondiente a W_2. 73

5.19. Diferentes imágenes obtenidas de W_1. 74

6.1. Corte propuesto de las muestras a 45 grados, que permite una mejor visualización de la alineación de fibras en direcciones longitudinal y transversal durante el análisis microscópico. 80

6.2. Anillo adaptador montado sobre el soldador para acoplarlo con las guías de aluminio. 81

6.3. Propiedades mecánicas de laminados unidireccionales [42]. 94

6.4. Resultados del análisis de tensiones para la geometría revisada del dispositivo (mapa de tensiones de von Mises) con una carga de 40 kN. 96

6.5. Distribución del factor de seguridad (FOS) para el diseño final. Los puntos críticos permanecen por encima de FOS = 1.9. 96

Apéndice 1: Estructura del directorio de datos

El directorio de datos contiene las siguientes carpetas:

- Documento escrito, que incluye:
  - Fuentes bibliográficas
  - Figuras
  - Carpeta con archivos LaTeX
- Carpeta CAD
- Código de máquina
- Datos de ensayo
- Hojas de datos (Datasheets)

Apéndice 2: Cálculos para definir el dispositivo de fijación

En esta sección se presentan los cálculos y las decisiones de diseño finales para el dispositivo de fijación (herramienta de ensayo) requerido para soportar las cargas generadas por varillas de fibra de carbono (CF/PA6).

Propiedades del material y fuerza máxima sobre las varillas

Según la Figura 6.3, el material CF/PA6 (laminado unidireccional) alineado a 0° presenta una resistencia a tracción aproximada de 1308.9 MPa. Se selecciona un diámetro de 8 mm para la varilla. El área de sección transversal, A, se calcula mediante:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \;=\; \frac{\pi \times (8\,\text{mm})^2}{4} \;=\; 50{,}27\,\text{mm}^2.$$

Por lo tanto, la fuerza teórica para alcanzar la rotura (suponiendo carga puramente axial) es:

$$F_{\text{rotura}} = \sigma_{\text{máx}} \times A \;=\; 1308{,}9\,\text{MPa} \;\times\; 50{,}27\,\text{mm}^2 \;\approx\; 65{,}8\,\text{kN}.$$

Composites	Alignment	Number	V_f (%)		Tensile modulus (GPa)		Tensile strength (MPa)	
			Mean	C.V. (%)	Mean	C.V.(%)	Mean	C.V. (%)
CF/PA6	0°	59	42.3	8.8	98.2	8.2	1308.9	9.2
CF/Epoxy		67	46.5	7.7	109.1	7.3	1664.0	8.3
CF/PA6	90°	20	–	–	7.4	7.3	33.0	15.7
CF/Epoxy		11	–	–	7.6	6.2	71.8	7.3

C.V.=Coefficient of variation.

Figura 6.3: Propiedades mecánicas de laminados unidireccionales [42].

Carga requerida para el dispositivo y factor de seguridad

Aunque la carga teórica de rotura para la varilla es de aproximadamente 65.8 kN, una eficiencia de la conexión en cuña del orden del 60 %, basada en una tesis doctoral [39], implica que la carga máxima efectiva sobre el dispositivo es:

$$F_{\text{efectiva}} \;=\; 0{,}60 \;\times\; 65{,}8\,\text{kN} \;\approx\; 39{,}48\,\text{kN}\;(\sim 40\,\text{kN}).$$

Para fines de diseño, se aplica un factor de seguridad (FOS) de 2. Por lo tanto, la carga de diseño que debe ser soportada completamente por el dispositivo de fijación es:

$$F_{\text{diseño}} \;=\; 2 \;\times\; 40\,\text{kN} \;=\; 80\,\text{kN}.$$

Selección del material para el dispositivo y límite elástico

El dispositivo fue fabricado en acero S235JR, cuyo límite elástico mínimo R_{eH} es de aproximadamente 225 MPa para espesores de placa de hasta 16 mm [43]. Las placas y el cuerpo principal del dispositivo deben, por lo tanto, dimensionarse de forma que los niveles de tensión no superen los 225 MPa bajo la carga de diseño de 80 kN.

Modificaciones finales de diseño

Durante el proceso de diseño se realizaron simulaciones por elementos finitos para evaluar la distribución de tensiones en las regiones críticas del dispositivo (particularmente en la ranura de sujeción y en los orificios de los tornillos). Las siguientes modificaciones resultaron efectivas para reducir las concentraciones de tensiones:

- **Chaflán en la zona de la ranura:** Se introdujo un chaflán en la región de mayor tensión en el borde de la ranura. Esto ayudó a distribuir la carga de forma más uniforme y reducir los picos de tensión local.
- **Placa interior reforzada (40 + 5 mm):** El espesor de la placa inferior se aumentó a 45 mm, con un refuerzo adicional de 5 mm en la zona de paso de los tornillos, garantizando mayor rigidez y menores tensiones.
- **Placa exterior de 20 mm:** La placa superior de sujeción se definió con un espesor de 20 mm, suficiente para resistir las fuerzas de compresión durante la sujeción de la varilla.

Resultados del análisis por elementos finitos

Las Figuras 6.4 y 6.5 resumen los resultados de las simulaciones por elementos finitos. Bajo la fuerza aplicada de aproximadamente 40 kN más el factor de seguridad (es decir, el caso de carga de diseño de 80 kN), la tensión máxima de von Mises se mantuvo por debajo del límite elástico del acero S235JR (225 MPa), y el factor de seguridad resultante en las regiones críticas superó el valor de 1.9.

En ambas figuras, las zonas de alta tensión se ven mitigadas gracias al chaflán agregado y al mayor espesor de las placas. El diseño en su conjunto soporta con éxito la carga nominal de 40 kN (con un factor de seguridad de 1.9) sin superar el límite elástico del acero S235JR.

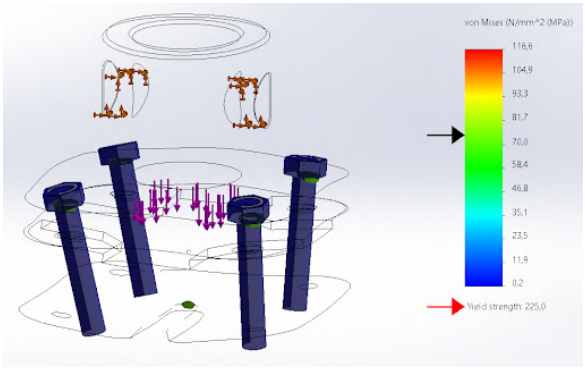


Figura 6.4: Resultados del análisis de tensiones para la geometría revisada del dispositivo (mapa de tensiones de von Mises) con una carga de 40 kN.

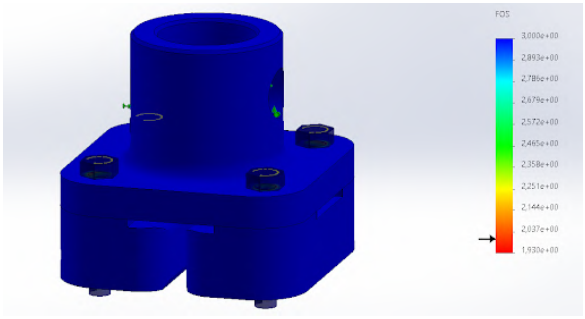


Figura 6.5: Distribución del factor de seguridad (FOS) para el diseño final. Los puntos críticos permanecen por encima de FOS = 1.9.

Apéndice 3: Cálculo de resistencia para tornillos M12 (Clase 8.8)

Este apéndice detalla los cálculos realizados para verificar la resistencia a tracción y a corte de los tornillos M12 de clase 8.8, utilizados bajo una carga axial de 40 kN distribuida entre cuatro tornillos.

Parámetros del tornillo (Norma ISO 898-1)

- **Diámetro nominal:** $d_{\text{nominal}} = 12\,\text{mm}$
- **Paso de rosca:** $P = 1{,}75\,\text{mm}$
- **Área efectiva de la rosca:** $A_{\text{minor}} = 84\,\text{mm}^2$
  (Área de sección transversal en la raíz de la rosca, crítica para carga axial)
- **Límite elástico (Clase 8.8):** $\sigma_{\text{y}} = 640\,\text{MPa}$
- **Resistencia máxima a tracción (Clase 8.8):** $\sigma_{\text{u}} = 800\,\text{MPa}$

Distribución de la carga

La carga externa total sobre el conjunto es $F_{\text{total}} = 40\,\text{kN}$. Suponiendo una distribución uniforme entre cuatro tornillos idénticos, cada tornillo soporta:

$$F_{\text{bolt}} = \frac{F_{\text{total}}}{4} = \frac{40\,000\,\text{N}}{4} = 10\,000\,\text{N}.$$

Cálculo de tensión axial

La tensión axial en cada tornillo se calcula mediante:

$$\sigma = \frac{F_{\text{bolt}}}{A_{\text{minor}}}.$$

Sustituyendo:

$$\sigma = \frac{10\,000\,\text{N}}{84\,\text{mm}^2} \approx 119{,}0\,\text{MPa}.$$

Comparación con el límite elástico

Dado que el límite elástico de los tornillos de clase 8.8 es $\sigma_{\text{y}} = 640\,\text{MPa}$, se compara:

$$\sigma = 119{,}0\,\text{MPa} < 640\,\text{MPa} \quad (\sigma_{\text{y}}).$$

Por lo tanto, el tornillo permanece por debajo de su límite elástico bajo esta carga axial y no sufrirá deformación plástica.

Factor de seguridad (FS)

Para evaluar el margen de seguridad, se calcula el factor de seguridad:

$$\text{FS} = \frac{\sigma_{\text{y}}}{\sigma} = \frac{640\,\text{MPa}}{119{,}0\,\text{MPa}} \approx 5{,}4.$$

Esto indica un nivel elevado de seguridad para los tornillos bajo carga axial.

Verificación adicional: esfuerzo cortante

En caso de carga por corte, el esfuerzo cortante se estima mediante:

$$\tau = \frac{F_{\text{bolt}}}{A_{\text{minor}}} \approx 119{,}0\,\text{MPa}.$$

Para tornillos de clase 8.8, una estimación conservadora del límite elástico a cortante es:

$$\tau_{\text{y}} \approx 0{,}6\,\sigma_{\text{y}} = 0{,}6 \times 640\,\text{MPa} = 384\,\text{MPa}.$$

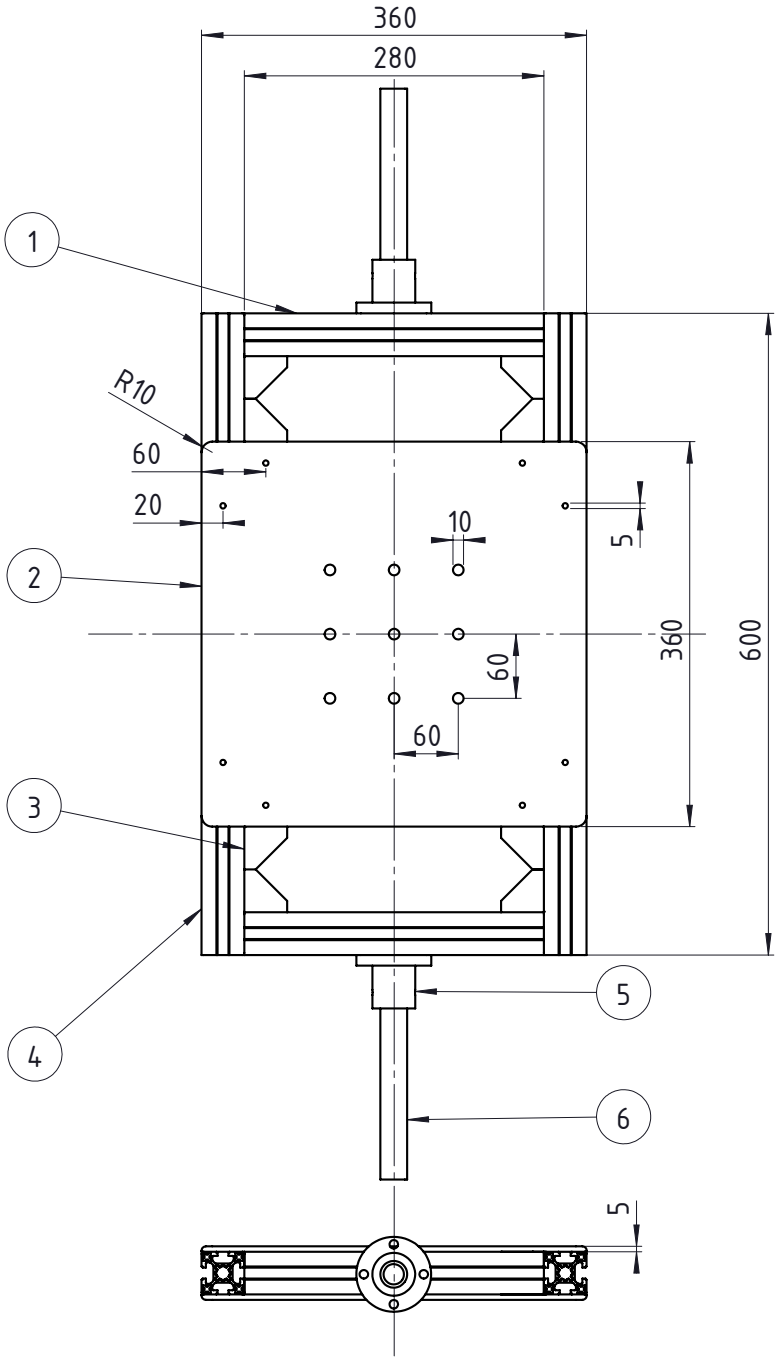
Dado que $\tau = 119{,}0\,\text{MPa} < 384\,\text{MPa}$, los tornillos también tienen capacidad suficiente para soportar cargas de corte de forma segura.

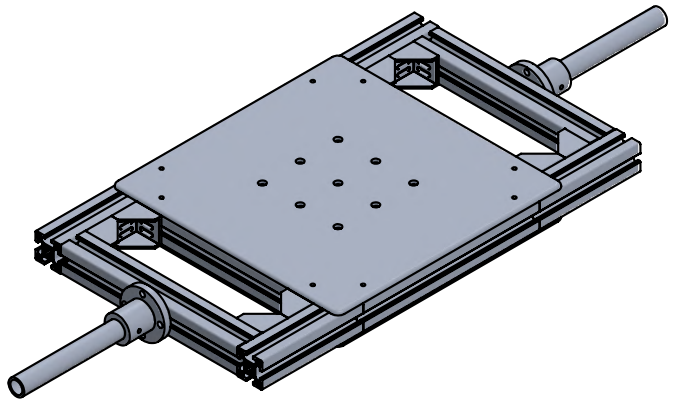
Conclusión

Los cálculos muestran que los tornillos M12 de clase 8.8 pueden soportar de forma segura una carga axial total de 40 kN (distribuida uniformemente), con un elevado factor de seguridad tanto frente a tracción como a corte.

Apéndice 4: Planos

A continuación, se adjuntan los planos de los componentes diseñados y fabricados como parte del proyecto.





Part	Name	Description	Quantity
1	Aluminium profile PG40 40x40x280 4 slots		6
2	Aluminum Plate 360x360x5	Machined	2
3	Aluminium corner bracket 40x40	Comercial	12
4	Aluminium profile PG40 40x40x160 4 slots		4
5	Shaft mount		2
6	Aluminum shaft		2

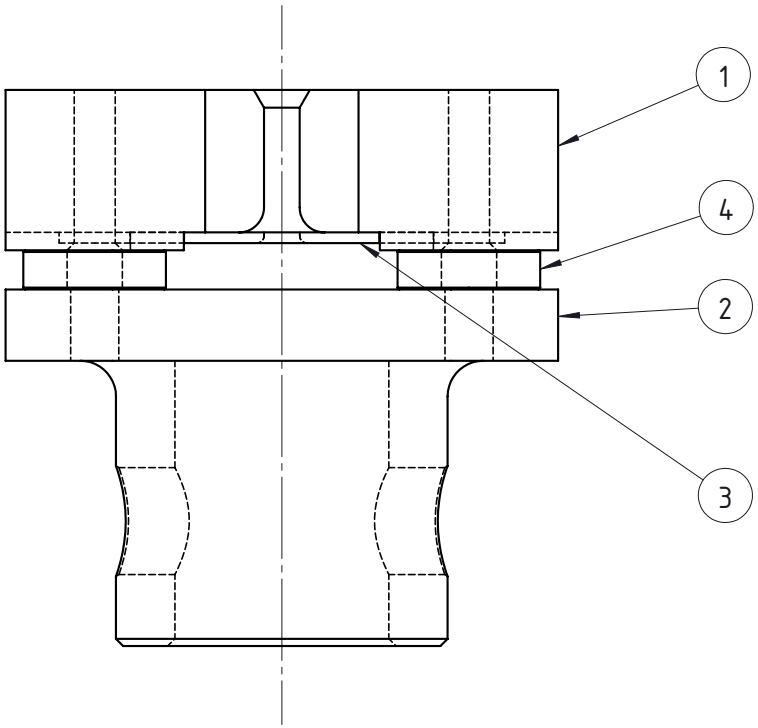
All non-dimensioned edges deburred
General Tolerances according to DIN 2768

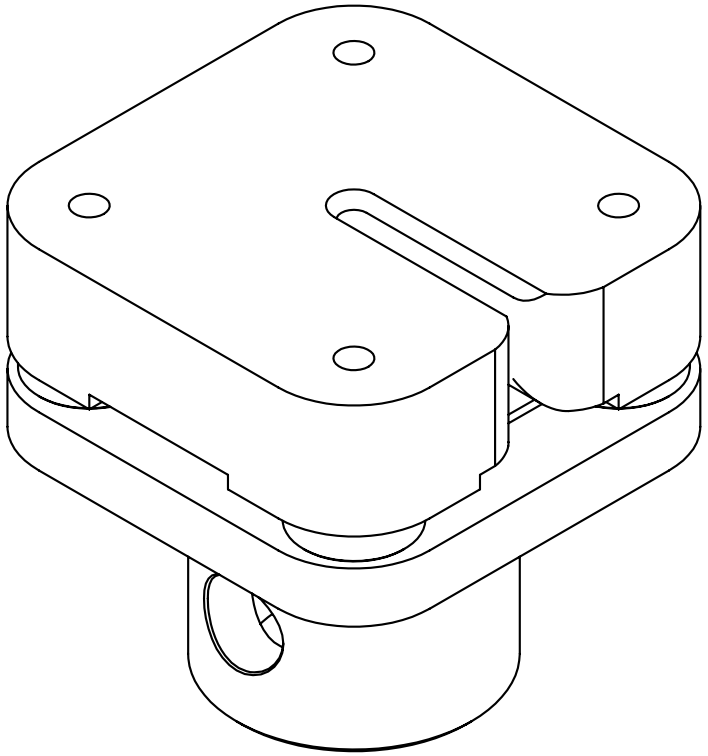
Lehrstuhl für Carbon Composites
Technische Universität München

TITLE: Winding tool
Material: Aluminum
Weight: 8.1kg

	03/12/2024	SIGNATURE	Name: SIANCA Lucas Primo	GENERAL SCALE 1:5
			Mat. Num.: 03800672	

Assembly





Part	Name	Description	Quantity
1	Lower_Clamping	Material: Steel 235JR	2
2	Upper_Clamping	Material: Steel 235JR	2
3	Inlay	Material: Steel 235JR	4
4	Spacer	Material: Steel 235JR	8

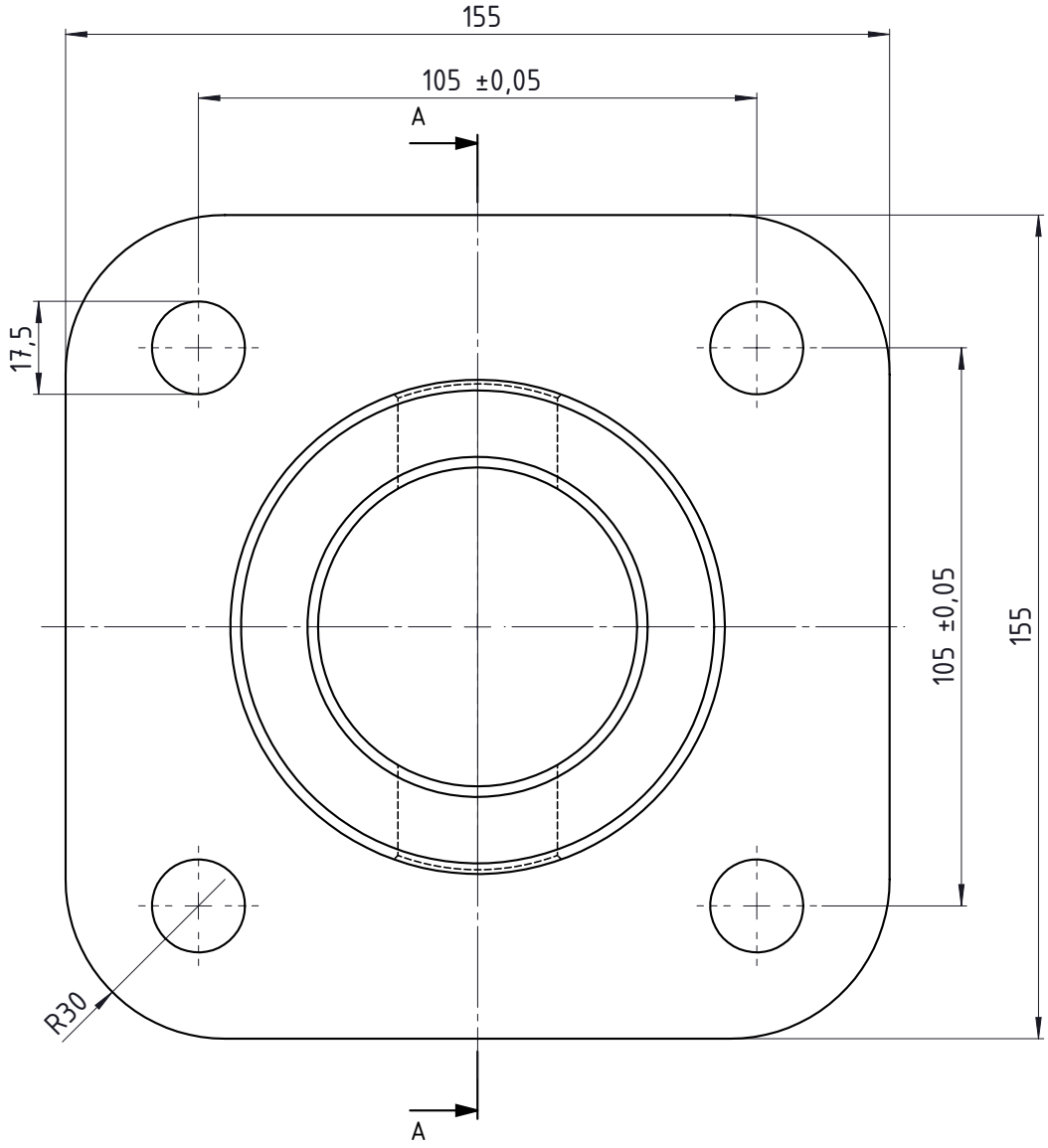
Lehrstuhl für Carbon Composites
Technische Universität München

TITLE: Tensile Test fixing setup assembly drawing
Weight: 14.3 kg

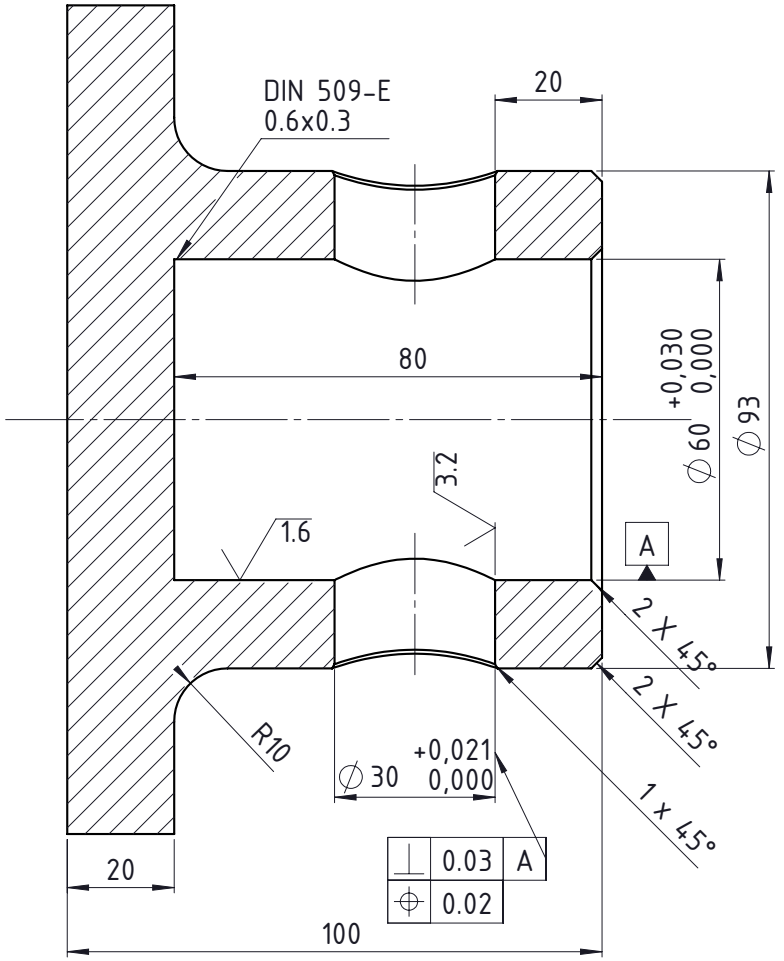
	27/01/2025	SIGNATURE	Name: SIANCA Lucas Primo	GENERAL SCALE 1:1.5
			Mat. Num.: 03800672	

Assembly

General Tolerances according to DIN 2768



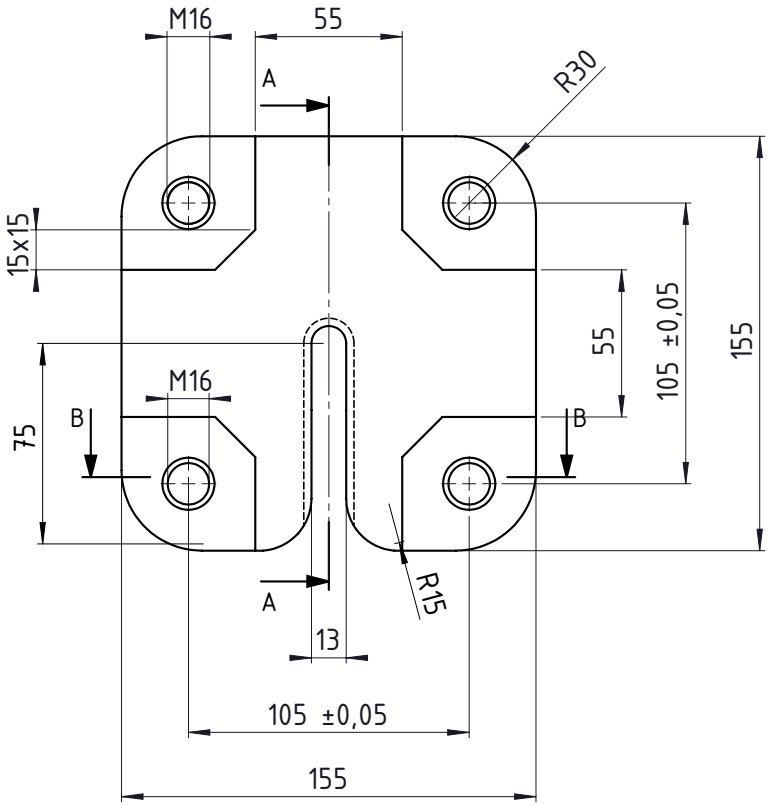
SECTION A-A
SCALE 1 : 1

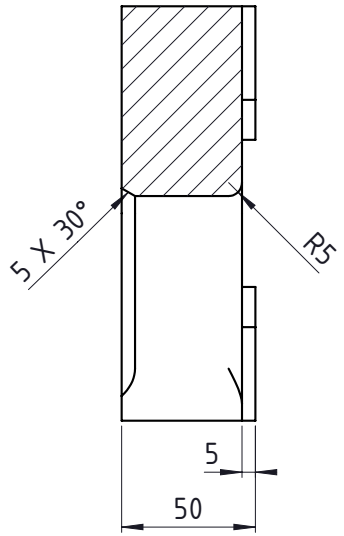


All non-dimensioned edges deburred

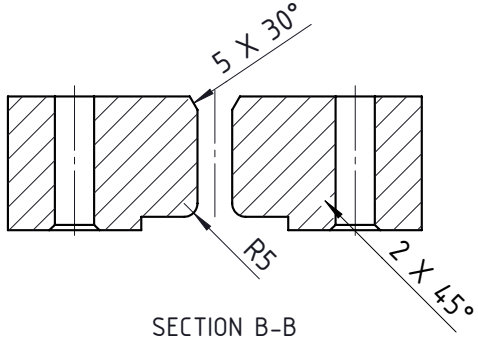
General Tolerances according to DIN 2768

Lehrstuhl für Carbon Composites Technische Universität München				TITLE: Upper Clamping Material: Steel S235JR Weight: 5.88 kg	
	27/11/2024	SIGNATURE	Name: SIANCA Lucas Primo	GENERAL SCALE 1:1	Part 1
			Mat. Num.: 03800672		





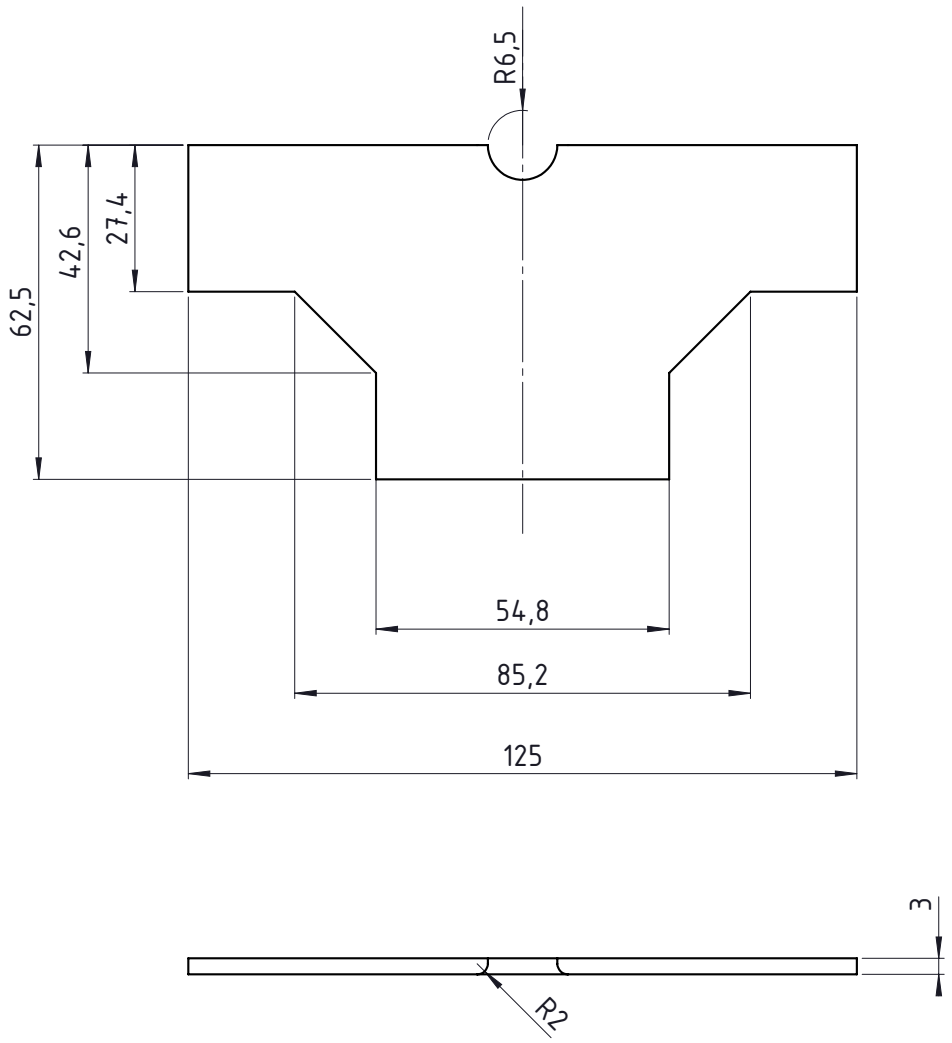
SECTION A-A



SECTION B-B

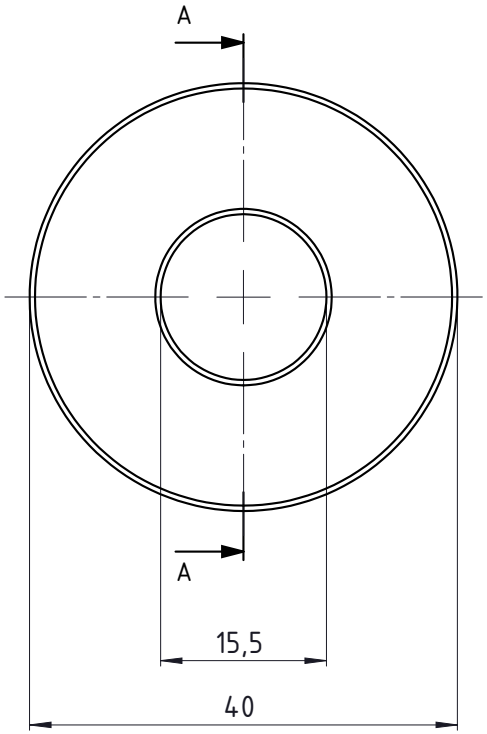
All non-dimensioned edges deburred
General Tolerances according to DIN 2768

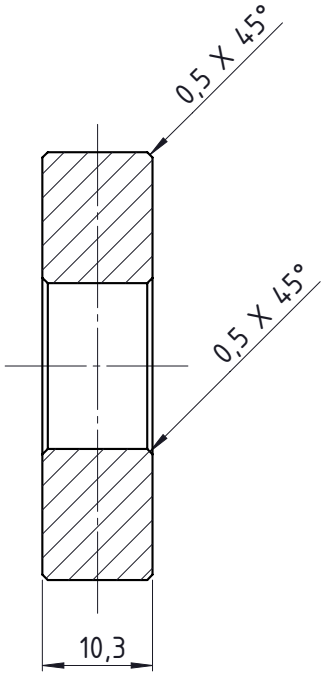
Lehrstuhl für Carbon Composites Technische Universität München				TITLE: Lower Clamping Material: Steel S235JR Weight: 7.81 kg	
	27/11/2024	SIGNATURE	Name: SIANCA Lucas Primo	GENERAL SCALE 1:2	Part 2
			Mat. Num.: 03800672		



All non-dimensioned edges deburred
General Tolerances according to DIN 2768

Lehrstuhl für Carbon Composites Technische Universität München				TITLE: Inlay Material: Commercial Steel	
	27/11/2024	SIGNATURE	Name: SIANCA Lucas Primo	GENERAL SCALE 1:1	Part 3
			Mat. Num.: 03800672		





SECTION A-A

All non-dimensioned edges deburred
General Tolerances according to DIN 2768

Lehrstuhl für Carbon Composites Technische Universität München				TITLE: Spacer Material: Commercial Steel	
	27/11/2024	SIGNATURE	Name: SIANCA Lucas Primo	GENERAL SCALE 2:1	Part 4
			Mat. Num.: 03800672		