Diseño de maquinaria integrada para la fabricación de tuberías de PRFV

Arrabal, Luisina
Mangiaterra, Marcelo

Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Escuela de Ingeniería Mecánica

Rosario, Argentina

Año 2026

Diseño de maquinaria integrada para la fabricación de tuberías de PRFV

Arrabal, Luisina
Mangiaterra, Marcelo

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

Ingeniero/a Mecánico/a

Director/a:

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

2026

“Entre una idea y una realidad existe un desafío.

La ingeniería es el conocimiento y la determinación necesarios para convertirlo en una solución.”

“La fortuna favorece a la mente preparada” - Louis Pasteur

Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos profundamente a nuestros padres por su apoyo incondicional, por acompañarnos durante todos estos años de estudio y por brindarnos la confianza, el esfuerzo y la motivación necesarios para alcanzar esta etapa. Su acompañamiento fue fundamental no solo durante la realización de este proyecto, sino también a lo largo de todo nuestro recorrido universitario.

A nuestras parejas, por la paciencia, la comprensión y el apoyo constante durante las numerosas horas dedicadas al estudio, al diseño y al desarrollo de esta tesis. Agradecemos especialmente haber contado con su compañía y aliento en los momentos de mayor exigencia.

Luisina desea agradecer especialmente a sus abuelas Liliana y Claudia, por el cariño, el acompañamiento y el apoyo brindado a lo largo de toda su formación, siendo una parte muy importante de este camino y de los logros alcanzados.

Agradecemos también a aquellos compañeros con quienes compartimos largas jornadas de estudio y preparación, así como momentos de alegría, frustraciones y logros. Muchos de estos vínculos trascendieron el ámbito académico y se transformaron en amistades que llevaremos con nosotros más allá de esta etapa.

A todos nuestros amigos, tanto dentro como fuera de la facultad, por comprender nuestras ausencias, acompañarnos durante los momentos de mayor exigencia y compartir con nosotros cada avance y cada logro alcanzado a lo largo de estos años.

Finalmente, queremos agradecer a la institución, a sus docentes y a todas las personas que forman parte de ella, por habernos brindado el espacio, los conocimientos y las herramientas necesarias para crecer tanto en el ámbito académico como personal. La formación recibida nos permitió enfrentar este trabajo como una instancia de integración y aplicación de los conocimientos adquiridos, contribuyendo de manera fundamental a nuestro desarrollo como futuros profesionales.

A todos ellos, nuestro más profundo agradecimiento por haber formado parte de este camino y por contribuir, de distintas maneras, a que la realización de este trabajo haya sido posible.

Resumen

El presente proyecto aborda el diseño de una maquinaria integrada para la fabricación de tuberías de PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio), con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso de bobinado del filamento. El diagnóstico realizado identificó problemas asociados a variaciones de tensión en los filamentos, acumulación de fibra en los sistemas de guiado, consumo excesivo de resina, interrupciones operativas y dificultades para adaptarse a distintos diámetros de tubería.

Como respuesta a estas problemáticas, se planteó el desarrollo de un sistema capaz de mantener una tensión uniforme del filamento, controlar el ángulo de bobinado mediante sincronización carro-mandril, optimizar la impregnación de resina y facilitar las tareas de mantenimiento. Se generaron tres alternativas conceptuales y se evaluaron mediante una matriz de decisión ponderada considerando criterios funcionales, de seguridad, higiene, adaptabilidad e innovación.

La solución seleccionada consiste en una estructura tipo pórtico con cabezal distribuidor suspendido. Esta configuración permite trabajar con distintos diámetros de mandril, mejora la accesibilidad, reduce el riesgo de contaminación de los mecanismos por derrames de resina y aumenta la seguridad de los operarios al mantener las partes móviles alejadas de la zona de trabajo.

Se concluye que la alternativa elegida proporciona un adecuado equilibrio entre desempeño, adaptabilidad, seguridad e innovación, constituyendo una base sólida para el desarrollo de una máquina más eficiente para la fabricación de tuberías de PRFV.

Palabras clave: PRFV; Bobinado de filamento; Tuberías; Fibra de vidrio; Resina poliéster; Diseño de maquinaria; Automatización.

Abstract

This project addresses the design of an integrated machine for the manufacturing of GRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) pipes, with the aim of improving the efficiency of the filament winding process. The diagnosis identified problems associated with filament tension variations, fiber accumulation in the guiding systems, excessive resin consumption, operational interruptions, and difficulties in adapting to different pipe diameters.

In response to these issues, a system was proposed to maintain uniform filament tension, control the winding angle through carriage-mandrel synchronization, optimize resin impregnation, and facilitate maintenance tasks. Three conceptual alternatives were developed and evaluated using a weighted decision matrix based on functional, safety, hygiene, adaptability, and innovation criteria.

The selected solution consists of a gantry-type structure with a suspended distributor head. This configuration allows the machine to operate with different mandrel diameters, improves accessibility, reduces the risk of contamination of the mechanisms caused by resin spills, and enhances operator safety by keeping moving components away from the working area.

It is concluded that the selected alternative provides an appropriate balance between performance, adaptability, safety, and innovation, constituting a solid basis for the development of a more efficient machine for GRP pipe manufacturing.

Keywords: GRP; Filament winding; Pipes; Glass fiber; Polyester resin; Machinery design; Automation.

Contenido

Agradecimientos.....4
Resumen.....5
Abstract.....6
Contenido.....7
Introducción.....11
Capítulo 1: Marco Teórico.....14
1.1 Aplicaciones de las tuberías de PRFV.....14
1.1.1 Abastecimiento y distribución de agua.....14
Ilustración 1: Acueducto San Javier-San Cristobal-Ceres-Tostado, Santa Fe, Argentina.....15
1.1.2 Sistemas de riego y aplicaciones agrícolas.....15
1.1.3 Saneamiento, alcantarillado y drenaje pluvial.....15
Ilustración 2: Colector Noroeste en la ciudad de Santa Fe. Sistema de drenaje pluvial. [17].....16
1.1.4 Plantas desalinizadoras y conducción de agua de mar.....16
1.1.5 Centrales térmicas y sistemas de refrigeración.....16
Ilustración 3: Sistema de tuberías de PRFV empleado en el circuito de refrigeración de una central de ciclo combinado. [18].....17
1.1.6 Centrales hidroeléctricas.....17
Ilustración 4: Instalación de una tubería forzada de PRFV DN 1000 en la central hidroeléctrica de Ovadas, Portugal. [19].....18
1.1.7 Industria química y de procesos.....18
1.1.8 Industria del petróleo y del gas.....19
1.1.9 Rehabilitación de conducciones y tecnologías sin zanja.....19
1.1.10 Consideraciones generales para la selección de la aplicación.....19
1.2 Proceso de fabricación de tuberías de PRFV.....20
1.2.1 Materias primas utilizadas.....20
1.2.1.1 Refuerzo [13].....20
Tabla 1: Propiedades de diversos refuerzos.....21
Ilustración 5: Roving directo.....22
1.2.1.2 Matriz.....22
1.2.2 Métodos de fabricación.....22
1.2.2.1. Enrollamiento de Filamentos (Filament Winding) [16].....23
Ilustración 6: Proceso de filament winding esquemático.....24
1.2.2.2. Centrifugado (Centrifugal Casting).....24
1.2.2.3. Pultrusión [17].....24
1.2.2.4. Artesanal/ Manual (Hand Lay-Up / Spray-Up).....24
1.2.2.5. Infusión por vacío.....25
1.2.3 Proceso de fabricación.....25
1.2.3.1 Preparación del mandril.....25

1.2.3.2 Formación de la capa interior....26
1.2.3.3 Alimentación e impregnación de las fibras....26
1.2.3.4 Bobinado de las capas estructurales....27
Ilustración 7: Tipos de bobinado....27
1.2.3.4.1 Bobinado circunferencial....27
1.2.3.4.2 Bobinado helicoidal....27
Ilustración 8: Bobinado helicoidal....28
1.2.3.4.2.1 Ángulo óptimo de bobinado....28
1.2.3.4.3 Bobinado polar....31
1.2.3.5 Curado....31
1.2.3.6 Desmoldeo y terminación....32
1.2.3.7 Control de calidad....32
1.3. Relevamiento del sistema actual en TARCO....32
Ilustración 9: Maquina devanadora empresa TARCO....33
1.3.1 Problemáticas....34
1.3.1.1 Variación de la tensión de las mechas....34
1.3.1.2 Paradas por re-enhebrado....34
1.3.1.3 Desviaciones en el ángulo de bobinado....34
1.3.1.4. Desgaste y mantenimiento por abrasión....35
1.3.1.5. Deficiencia o exceso de impregnación de resina....35
1.3.1.6. Contaminación de componentes y riesgos de seguridad....35
1.4. Objetivos del proyecto....36
1.4.1. Objetivo general....36
1.4.2. Objetivos específicos....36
1.5. Alcance del trabajo....37
Capítulo 2. Generación y selección de alternativas de diseño....38
2.1. Acciones de mejora propuestas....38
2.2. Propuesta 1: carro integrado tipo “C”....39
Ilustración 10: Diseño en SolidWorks - carro integrado tipo C....40
2.3. Propuesta 2: unidad móvil integrada convencional....40
Ilustración 11: Diseño en SolidWorks - unidad móvil integrada convencional....40
2.4. Propuesta 3: carro integrado tipo pórtico....40
Ilustración 12: Diseño a mano alzada - carro integrado tipo pórtico....41
2.5. Elección de la propuesta....41
Tabla 2: Matriz de Pugh....43
Tabla 3: Resultados....43
Tabla 4: Matriz de decisión ponderada....45
Capítulo 3. Desarrollo y diseño de la solución seleccionada....46
3.1. Parámetros geométricos y productivos....46
3.1.1. Definición de pasada y cobertura....46
3.1.2. Circunferencia de la tubería....46
3.1.3. Cantidad de pasadas por cobertura....46

3.1.4. Título TEX del roving..... 47
3.1.5. Espesor depositado por cobertura..... 47
Ilustración 13: Representación del ancho de banda, el solapamiento entre pasadas consecutivas y el espesor generado por cobertura..... 48
3.1.6. Cantidad de coberturas necesarias..... 49
3.1.7. Cantidad total de pasadas..... 49
3.1.8. Longitud de fibra utilizada por pasada y total..... 49
3.1.9. Tiempo de fabricación en casos extremos..... 50
Ilustración 14: Memoria de cálculo de tiempos de fabricación para el diámetro mínimo..... 51
Ilustración 15: Memoria de cálculo de tiempos de fabricación para el diámetro máximo..... 51
3.2. Diseño del carro móvil integrado..... 52
3.2.1. Configuración del carro, selección de perfiles y materiales..... 52
Ilustración 16: Vista isométrica del carro guia..... 52
3.2.2. Determinación de la masa total..... 53
3.3. Sistema portacarreteles..... 54
3.3.1. Cantidad de carreteles adoptada..... 54
3.3.2. Diseño de los ejes de soporte..... 55
3.3.3. Sistema de fijación..... 56
Ilustración 17: Collar de fijación..... 57
3.4. Sistema de tensionado y guiado de las fibras..... 57
3.4.1. Determinación de la tensión de trabajo..... 57
3.4.2. Sistema de regulación individual..... 59
3.4.3 Selección de materiales de las guías..... 59
3.5. Sistema de impregnación..... 60
3.5.1. Diseño de la cubeta..... 60
3.5.2. Rodillos de inmersión..... 61
3.6. Sistema de desplazamiento longitudinal del carro..... 61
3.6.1. Selección de las guías lineales..... 61
Ilustración 18: Patines y guias seleccionados marca HIWIN..... 63
3.6.2 Dimensionamiento de la fuerza de accionamiento..... 63
3.6.2.1 Velocidad máxima del carro:..... 63
3.6.2.2 Aceleracion del carro:..... 64
3.6.2.3 Fuerza para acelerar el carro movil:..... 64
3.6.2.4 Peso del conjunto móvil:..... 64
3.6.2.5 Fuerza ejercida por las fibras:..... 64
3.6.2.6 Fuerza longitudinal nominal:..... 65
3.6.2.7 Fuerza de diseño:..... 65
3.6.3 Cálculos para la selección del piñón y cremallera..... 65
3.6.3.1 Diámetro primitivo:..... 65
3.6.3.2 Diámetro exterior..... 66
3.6.3.3 Avance por revolución..... 66

3.6.3.4 Velocidad de rotación del piñón..... 66
3.6.3.5 Par transmitido..... 67
3.6.3.6 Potencia mecánica..... 67
3.6.3.7 Verificación del factor de seguridad del piñón..... 67
3.6.3.8 Seleccion del piñón..... 68
Ilustración 19: Selección de piñón de Poleas Industriales. [22]..... 68
Ilustración 20: Selección de cremallera de Poleas Industriales [21]..... 69
3.6.4. Cálculos para la selección del motor..... 69
3.6.4.1 Velocidad de salida del reductor..... 69
3.6.4.2 Velocidad lineal del carro correspondiente a la velocidad nominal del motor:..70
3.6.4.3 Velocidad requerida del servo motor para la velocidad lineal máxima..... 70
3.6.4.4 Par nominal del servomotor..... 70
3.6.4.5 Par disponible a la salida del reductor..... 71
3.6.4.6 Seleccion de servomotor y reductor..... 71
Ilustración 21: Servomotor SINAMICS V90 [24]..... 72
Ilustración 22: Reductor SIMOGEAR Z39 [23]..... 73
3.7. Diseño de la estructura tipo pórtico..... 73
3.7.1. Configuración estructural..... 73
Ilustración 23: Vista isométrica del pórtico..... 75
Ilustración 24: Imagen extraída de tablas y equivalencias grupo Arcelor Mittal.... 75
3.7.2 Verificación de la estructura..... 76
Ilustración 25: Simulación de carga aplicada sobre patines..... 76
Ilustración 26: Simulación de carga sobre el pórtico - desplazamiento..... 77
Ilustración 27: Simulación de carga sobre el pórtico - Tensiones Máximas Von Mises..... 78
Conclusiones..... 79
Referencias bibliográficas..... 81
ANEXO 1..... 83

Introducción

El Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio, conocido como PRFV, es un material compuesto muy utilizado en aplicaciones industriales debido a su correcta combinación entre resistencia mecánica, bajo peso relativo y resistencia frente a ambientes corrosivos. Este material está conformado principalmente por fibras de vidrio y una matriz polimérica de resina, donde las primeras aportan resistencia a la tracción y a la presión interna, mientras que la segunda cumple la función de unir las fibras, transmitir los esfuerzos entre ellas y proteger el material frente a la acción de agentes químicos. Por estas características, el PRFV se utiliza en la fabricación de tuberías, tanques, conductos, piezas especiales y estructuras destinadas a industrias químicas, alimenticias, metalúrgicas y de tratamiento de aguas, actividades donde se requiere resistencia a la corrosión y durabilidad.

En el caso de las tuberías de PRFV, su uso resulta de gran interés debido a que permiten transportar fluidos corrosivos o trabajar en ambientes agresivos con un menor peso comparado con las soluciones metálicas tradicionales. Sin embargo, la calidad final del tubo depende en gran medida del proceso de fabricación empleado, especialmente de la correcta orientación de las fibras, de la cantidad de resina incorporada y de la tensión aplicada al filamento. Por esta razón, el diseño de la maquinaria utilizada en el proceso adquiere un impacto fundamental en la producción, ya que puede afectar el peso, el costo, la resistencia mecánica y la repetibilidad del producto terminado.

La idea del presente Proyecto Final surge a partir de una visita realizada a la empresa **TARCO S.A**, ubicada en Av. Génova 2373, Rosario. La empresa se dedica al desarrollo y fabricación de soluciones industriales en materiales compuestos de fibra de vidrio. Dentro de sus actividades se incluyen la fabricación de productos en PRFV, piezas especiales, moldes, matrices, cañerías, tanques, estructuras y servicios vinculados al montaje, mantenimiento y reparación de componentes industriales.

Durante la visita, el propietario de la empresa presentó el proceso utilizado para la fabricación de tubos de PRFV mediante la técnica de bobinado de filamento, conocido internacionalmente como **filament winding**. Esta técnica consiste en enrollar filamentos continuos de fibra de vidrio, previamente impregnados con resina, sobre un mandril giratorio que define la geometría interna de la tubería. Mientras el mandril rota, un sistema de guiado desplaza el filamento a lo largo de su longitud, generando distintas capas con un determinado ángulo de cruce. La relación entre la

velocidad de giro del mandril y la velocidad de avance del carro guía permite modificar dicho ángulo, influyendo directamente en las propiedades mecánicas del tubo.

A partir de la observación del proceso en planta y del intercambio con la empresa se identificaron distintas desventajas asociadas al sistema de fabricación actual. Una de las problemáticas principales corresponde a la variación de tensión del filamento durante el recorrido de fabricación, dado que en configuraciones donde los carreteles permanecen fijos y el sistema de guiado se desplaza longitudinalmente, la longitud libre del filamento cambia constantemente. Consecuentemente, se generan zonas de mayor y menor tensión, lo que puede producir irregularidades en el bobinado y afectar la distribución de las capas sobre el mandril.

Otra dificultad heredada de la problemática anterior es la acumulación de fibra deshilachada antes de los orificios de guiado. Cuando el filamento trabaja a gran velocidad o con una tensión inadecuada, puede producirse una acumulación de material comúnmente denominada “galleta”. Este inconveniente obliga a detener el proceso de rolado, parar el mandril, cortar el filamento afectado y volver a enhebrar el sistema. Estas interrupciones generan una mayor frecuencia de paradas, aumentan la intervención manual del operario y entorpecen al proceso de fabricación.

También se han detectado inconvenientes vinculados con el consumo de resina. Una impregnación excesiva del filamento puede incrementar el peso del tubo y elevar el costo de materia prima, sin necesidad de que esto represente una mejora proporcional en la resistencia mecánica. Por el contrario, una dosificación inadecuada puede generar acumulación superficial, desperdicio de material y mayores tareas de limpieza. En este sentido, el controlar la impregnación resulta un aspecto clave para lograr un producto más eficiente desde el punto de vista técnico y económico.

Frente a estas problemáticas, el proyecto plantea el diseño de una maquinaria integrada para la fabricación de tuberías de PRFV que las contemple y solucione.
Entre los objetivos principales se encuentran mantener una tensión uniforme del filamento durante todo el recorrido de fabricación, evitar acumulaciones de fibra en los puntos de guiado, controlar el ángulo de cruce mediante la sincronización entre el mandril y el sistema de desplazamiento, disminuir paradas por trabas o re-enhebrado, asegurar una distribución uniforme de capas y reducir el consumo de resina mediante una impregnación controlada.

Además se busca que el sistema sea adaptable a distintos diámetros y longitudes de tubería. Esta condición resulta fundamental, ya que en la fabricación de tubos de PRFV pueden requerirse diferentes dimensiones según la aplicación final del producto. Una máquina limitada a

un único diámetro reduce la flexibilidad productiva, por lo tanto, el diseño propuesto debe contemplar una estructura capaz de trabajar con distintos formatos de tubería, facilitar el montaje y desmontaje de componentes y permitir futuras adaptaciones sin alterar de manera significativa la configuración general del equipo.

El alcance del proyecto comprende el desarrollo conceptual y técnico de una solución de maquinaria orientada a mejorar el proceso de bobinado filamentario de tuberías de PRFV. Se considera el diseño del sistema de desplazamiento, la disposición general del cabezal distribuidor, la relación de sincronización entre el mandril y el carro, la adaptabilidad a distintos diámetros y la mejora de las condiciones de mantenimiento y seguridad. El trabajo no pretende resolver la totalidad de los aspectos productivos de una planta industrial, sino concentrarse en el diseño de un equipo que atienda las principales dificultades observadas durante la fabricación de tubos.

Entre las limitaciones se reconoce que el desarrollo se encuentra condicionado por los recursos disponibles, el nivel de avance del prototipo y la información relevada durante la visita técnica. No obstante, el diseño planteado constituye una base técnica para avanzar hacia una máquina más eficiente.

En este sentido, el significado del proyecto radica en proponer una mejora aplicada a una problemática real de fabricación. La solución buscada no se limita a reproducir configuraciones existentes, sino que intenta integrar criterios de funcionamiento, seguridad, higiene, mantenimiento e innovación en una misma propuesta. De esta manera, el trabajo contribuye al desarrollo de una maquinaria capaz de fabricar tuberías de PRFV con mayor control del proceso, menor cantidad de interrupciones, mejor aprovechamiento de materiales y condiciones de operación más seguras para los trabajadores.

Capítulo 1: Marco Teórico

1.1 Aplicaciones de las tuberías de PRFV

Las tuberías de plástico reforzado con fibra de vidrio son utilizadas en un amplio abanico de instalaciones hidráulicas e industriales. Su campo de aplicación comprende el transporte de agua potable, agua cruda, aguas residuales, fluidos industriales, agua de mar, productos químicos y fluidos vinculados con la industria petrolera. Esta diversidad se relaciona principalmente con su resistencia a la corrosión, su bajo peso en comparación con las tuberías metálicas, su elevada resistencia mecánica específica y la posibilidad de adaptar su composición y estructura a diferentes presiones, diámetros y condiciones de servicio.
[1, 4]

1.1.1 Abastecimiento y distribución de agua

Estas tuberías pueden emplearse para transportar agua potable, agua cruda proveniente de ríos o embalses y agua previamente tratada desde las plantas potabilizadoras hasta los centros de consumo. Pueden instalarse tanto en conducciones que trabajan por gravedad como en sistemas sometidos a presión, por lo que resultan adecuadas para acueductos, redes troncales, estaciones de bombeo y grandes líneas de distribución. La norma ISO 23856 contempla expresamente su utilización en diferentes sistemas de suministro de agua, mientras que la norma AWWA C950 establece requisitos específicos para tuberías de fibra de vidrio utilizadas en conducciones a presión. [1, 3].

En estas instalaciones, la superficie interior relativamente lisa de las tuberías de PRFV permite reducir las pérdidas de carga ocasionadas por la fricción entre el fluido y la pared de la tubería. Esta característica adquiere especial importancia en conducciones de gran longitud, dado que una disminución de las pérdidas hidráulicas puede reducir la altura de bombeo requerida y, en consecuencia, el consumo energético de las estaciones de impulsión. Además, al no depender de recubrimientos metálicos para resistir la corrosión, las características hidráulicas internas pueden mantenerse durante períodos prolongados cuando la tubería es seleccionada, fabricada e instalada correctamente. [4, 9].

Ilustración 1: Acueducto San Javier-San Cristobal-Ceres-Tostado, Santa Fe, Argentina.

1.1.2 Sistemas de riego y aplicaciones agrícolas

Las tuberías de PRFV también se utilizan en proyectos de riego agrícola, especialmente en conducciones principales destinadas a transportar grandes volúmenes de agua desde embalses, canales, estaciones de bombeo o pozos hasta las zonas productivas. La disponibilidad de tuberías de gran diámetro y diferentes clases de presión permite utilizarlas en sistemas de riego por gravedad, redes presurizadas y estaciones de distribución. Su bajo peso facilita el transporte y la instalación en áreas rurales, donde el acceso de maquinaria pesada puede ser limitado o costoso. Al utilizarse uniones estancas y tramos de gran longitud permite disminuir la cantidad de juntas necesarias y reducir las pérdidas de agua durante la conducción. Esta condición resulta relevante en regiones donde el recurso hídrico es limitado y se busca mejorar la eficiencia de los sistemas de riego. Asimismo, la resistencia del PRFV frente a la corrosión del suelo y del agua transportada disminuye la necesidad de aplicar protecciones externas o sistemas de protección catódica, habitualmente requeridos en determinadas tuberías metálicas enterradas. [2, 5].

1.1.3 Saneamiento, alcantarillado y drenaje pluvial

La norma ISO 10467 establece los requisitos aplicables a sistemas de tuberías de PRFV destinados específicamente al drenaje y al saneamiento con o sin presión, principalmente en

instalaciones enterradas. En las redes de aguas residuales, la resistencia química del material resulta especialmente importante debido a la posible presencia de sustancias corrosivas y gases generados por la descomposición de materia orgánica. [4, 6].

Ilustración 2: Colector Noroeste en la ciudad de Santa Fe. Sistema de drenaje pluvial. [17]

1.1.4 Plantas desalinizadoras y conducción de agua de mar

Estas tuberías son utilizadas en plantas desalinizadoras para la captación de agua de mar, la alimentación de los procesos de tratamiento y la descarga de salmuera o efluentes. En este tipo de instalaciones, los materiales metálicos pueden experimentar procesos intensos de corrosión debido a la presencia de cloruros. El PRFV constituye entonces una alternativa adecuada para determinadas etapas del proceso debido a su resistencia frente al agua salada y a la posibilidad de seleccionar sistemas de resina compatibles con las características químicas y térmicas del fluido transportado. [1, 7, 4, 9].

1.1.5 Centrales térmicas y sistemas de refrigeración

En las centrales termoeléctricas, nucleares y otras instalaciones industriales, las tuberías de PRFV suelen utilizarse en circuitos de agua de refrigeración, líneas de reposición, purga y retorno de agua. Estos sistemas generalmente transportan grandes caudales y pueden estar expuestos permanentemente al agua de mar, agua salobre o agua industrial tratada. La resistencia a la corrosión y la posibilidad de fabricar grandes diámetros hacen que el PRFV sea utilizado en conducciones que conectan las tomas de agua, las estaciones de bombeo, los intercambiadores de calor y los puntos de descarga. [1, 4].

Ilustración 3: Sistema de tuberías de PRFV empleado en el circuito de refrigeración de una central de ciclo combinado. [18].

En estas aplicaciones, la eficiencia hidráulica de la conducción influye directamente sobre la energía necesaria para hacer circular el agua de refrigeración. Además, el bajo peso de los componentes puede facilitar el montaje de tuberías de gran diámetro dentro de instalaciones industriales, siempre que se diseñen correctamente los apoyos, anclajes, cambios de dirección y juntas sometidas a cargas térmicas o hidráulicas. [7, 4].

1.1.6 Centrales hidroeléctricas

Estas tuberías pueden emplearse como tuberías forzadas o conductos de presión en centrales hidroeléctricas. Su función consiste en transportar el agua desde una cámara de carga, embalse o sistema de captación hasta la turbina. En estas instalaciones, las tuberías deben soportar la presión estática generada por el desnivel y las sobrepresiones transitorias producidas durante las maniobras de apertura o cierre de válvulas y equipos de generación. La norma ISO 10639 incluye las tuberías forzadas de centrales eléctricas dentro de las aplicaciones previstas para los sistemas de PRFV destinados al transporte de agua. [2].

Ilustración 4: Instalación de una tubería forzada de PRFV DN 1000 en la central hidroeléctrica de Ovadas, Portugal. [19].

El bajo peso de las tuberías de PRFV puede resultar ventajoso en proyectos hidroeléctricos ubicados en regiones montañosas o de difícil acceso, ya que facilita el traslado de los tramos hasta el lugar de instalación. Asimismo, la superficie interior lisa puede contribuir a disminuir las pérdidas de energía hidráulica antes de que el agua llegue a la turbina. No obstante, la utilización del PRFV en estos proyectos requiere un diseño cuidadoso frente a la presión interna, el golpe de ariete, las cargas del terreno, los apoyos, los anclajes y las condiciones de instalación. [8].

1.1.7 Industria química y de procesos

Las tuberías de PRFV se utilizan en plantas químicas, petroquímicas, papeleras, mineras y de tratamiento de agua para transportar fluidos que pueden resultar corrosivos para los materiales metálicos convencionales. Entre sus aplicaciones se encuentran las líneas de ácidos diluidos, soluciones alcalinas, agua clorada, efluentes industriales, lodos, salmueras y productos utilizados en procesos de purificación. La composición de la matriz polimérica puede modificarse mediante la selección de resinas de poliéster, viniléster o epoxi, según la temperatura y la compatibilidad química requerida. La selección de una tubería para servicio químico no debe realizarse únicamente a partir de su denominación genérica. Es necesario verificar la

compatibilidad entre la resina, el revestimiento interior, la concentración del producto, la temperatura de operación y las condiciones de presión. [9].

1.1.8 Industria del petróleo y del gas

En la industria petrolera, las tuberías reforzadas con fibra de vidrio se emplean en líneas de producción, conducción de petróleo crudo, transporte de gas, inyección de agua, manejo de salmueras y disposición de agua producida. Estas aplicaciones aprovechan especialmente la resistencia del material frente a medios que pueden contener agua salada, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y otros agentes corrosivos. La especificación API 15HR establece requisitos para tuberías de fibra de vidrio destinadas a líneas de alta presión utilizadas en actividades de producción de petróleo y gas. [10, 11, 12].

1.1.9 Rehabilitación de conducciones y tecnologías sin zanja

Las tuberías de PRFV también pueden emplearse para rehabilitar conducciones existentes mediante técnicas de instalación sin zanja, como el *relining*, el *sliplining* y el microtunelado. En estos procedimientos, una nueva tubería de PRFV se introduce dentro de una conducción deteriorada o se instala mediante empuje desde pozos de ataque, reduciendo la necesidad de abrir zanjas a lo largo de toda la traza. Esta aplicación resulta especialmente útil en zonas urbanas, cruces de carreteras, cursos de agua y sectores donde las excavaciones convencionales producirían interferencias importantes. [4, 14].

En las instalaciones mediante microtunelado, las tuberías deberán resistir las fuerzas axiales de empuje aplicadas durante la colocación, además de las cargas externas del terreno y las cargas hidráulicas de operación. Por ello, se utilizan diseños específicos con elevada resistencia a compresión axial y uniones preparadas para transmitir los esfuerzos entre tramos. Una vez instalada, la baja rugosidad interior de la nueva conducción permite conservar una capacidad hidráulica elevada, aun cuando el diámetro interno disponible sea menor que el de la tubería original. [15].

1.1.10 Consideraciones generales para la selección de la aplicación

La diversidad de aplicaciones de las tuberías de PRFV demuestra que no existe una única configuración adecuada para todos los servicios. El tipo de fibra, la orientación del refuerzo, la resina utilizada, el revestimiento interior, el espesor de pared, la rigidez circunferencial y el

sistema de unión deben seleccionarse de acuerdo con la presión interna, las cargas externas, la temperatura y la agresividad química del fluido. También deben considerarse las condiciones de instalación, como el tipo de suelo, la profundidad de enterramiento, las cargas de tránsito, los apoyos y las posibles variaciones de presión. [1, 3, 4, 10].

1.2 Proceso de fabricación de tuberías de PRFV

Las tuberías de plástico reforzado con fibra de vidrio se fabrican a partir de un material compuesto constituido principalmente por una matriz polimérica termoestable y un refuerzo de fibra de vidrio. A estos componentes pueden agregarse cargas minerales, velos superficiales, pigmentos, aditivos y agentes de curado. La combinación de estos materiales permite obtener una estructura cuya resistencia mecánica, rigidez y espesor pueden adaptarse a las condiciones de servicio a las que será sometida.

El proceso productivo no consiste solamente en recubrir una forma cilíndrica con fibra y resina. La pared de la tubería se construye mediante una secuencia controlada de capas, controlando a la par la orientación de las fibras, la cantidad de resina, el espesor del laminado, el grado de impregnación y las condiciones de curado, las cuales influyen directamente sobre las propiedades finales del producto.

1.2.1 Materias primas utilizadas

1.2.1.1 Refuerzo [13]

Las fibras o refuerzos son filamentos de origen natural, artificial o sintético, aptas para ser hiladas y tejidas, que generalmente presentan gran finura y buena flexibilidad. Las principales fibras usadas como refuerzos son: de vidrio, aramida, carbono y boro. En tabla 1 pueden observarse sus propiedades.

Materiales	Peso especifico, ρ (kN/m^3)	Tensión limite en tracción, $\sigma_{lim,t}$ (GN/m^2)	$\sigma_{lim,t}$ / ρ 10^3 m	Módulo elástico, E (GN/m^2)	E / ρ 10^6 m
Aluminio	26,3	0,62	24	73	2,8
Titanio	46,1	1,9	41	115	2,5
Acero	76,6	4,1	54	72	2,7
Vidrio E	25,0	3,4	136	86	2,9
Vidrio S	24,4	4,8	197	190	3,5
Carbono	13,8	1,7	123	190	14
Berilio	18,2	1,7	93	300	16
Boro	25,2	3,4	137	400	16
Grafito	13,8	1,7	123	250	18

Tabla 1: Propiedades de diversos refuerzos

La fibra de vidrio se caracteriza por presentar elevada resistencia a la tracción, buena flexibilidad y resistencia frente a numerosos agentes químicos. Funcionan muy bien como aislante térmico, acústico y eléctrico. Es un material con propiedades isotrópicas. Se obtiene principalmente a partir de sílice combinada con otros componentes, cuya proporción varía según las propiedades que se desean alcanzar. Su fabricación empieza en un reactor, donde la materia prima en polvo es fundida. Luego de esto, el vidrio fundido fluye a través de unos canales que contienen pequeños agujeros. El vidrio fundido pasará por estos agujeros en forma de hilo continuo, donde posteriormente estará listo para la impregnación de un recubrimiento químico gracias a un aplicador. Este recubrimiento le otorgara la propiedad de adherirse fácilmente a otros materiales. Por último, la fibra es sometida a un horno a determinada temperatura para el proceso de curado.

Entre las diferentes clases disponibles, la fibra de vidrio tipo E es una de las más utilizadas para el refuerzo de materiales compuestos debido a su equilibrio entre resistencia mecánica, propiedades eléctricas y costo.

Para la fabricación mediante bobinado filamentario se utiliza principalmente el denominado *roving* directo, técnica diseñada específicamente para filament winding, formado por una agrupación de filamentos continuos sin torsión. Este formato ofrece una masa lineal relativamente uniforme, buena impregnación y una tensión constante durante el desenrollado. Puede observarse en ilustración 5.

Ilustración 5: Roving directo

1.2.1.2 Matriz

La resina constituye la matriz del material compuesto. En tuberías de PRFV destinadas al transporte de agua se emplean principalmente resinas de poliéster insaturado y, cuando se requiere una mayor resistencia química, resinas viniléster. Una vez curadas, estas resinas forman una estructura tridimensional rígida e irreversible, por lo que no vuelven a fundirse al aumentar la temperatura como sucede con los materiales termoplásticos.

Para iniciar y controlar el endurecimiento de la resina se incorporan catalizadores, iniciadores y, dependiendo del sistema utilizado, acelerantes. Estos productos permiten que la resina pase de un estado líquido o viscoso a un estado sólido mediante una reacción de entrecruzamiento. La cantidad añadida debe controlarse, ya que influye directamente sobre el tiempo disponible para realizar el bobinado y sobre la velocidad de curado del laminado.

1.2.2 Métodos de fabricación

Las tuberías de PRFV pueden fabricarse principalmente mediante bobinado filamentario continuo, bobinado discontinuo sobre mandril y moldeo por centrifugación. La elección del proceso depende del diámetro, la longitud, el volumen de producción, la estructura de pared requerida y la aplicación final de la tubería. Aunque todos estos métodos combinan fibra de vidrio y resina termoestable, difieren en la forma de colocar los materiales y construir las distintas capas.

En el moldeo por centrifugación, la fibra cortada, la resina y las cargas minerales se introducen dentro de un molde metálico que gira a gran velocidad. La pared se construye desde el exterior

hacia el interior y las fuerzas centrífugas compactan los materiales contra la superficie del molde. Este procedimiento permite obtener un diámetro exterior preciso, un espesor uniforme y una pared de alta compactación.

En el bobinado filamentario, las fibras continuas impregnadas con resina se depositan sobre un mandril giratorio siguiendo trayectorias controladas. El movimiento de rotación del mandril se combina con el desplazamiento longitudinal de un carro distribuidor, permitiendo variar la orientación de las fibras y formar sucesivamente las capas de la tubería. Debido a que la maquinaria desarrollada en este proyecto se basa en este principio, el proceso se describe con mayor profundidad en los apartados siguientes.

1.2.2.1. Enrollamiento de Filamentos (Filament Winding) [16]

El proceso comienza con un mandril cilíndrico de acero que gira continuamente sobre su propio eje a velocidad controlada. Al mismo tiempo, varios hilos continuos de fibra de vidrio se desenrollan de sus bobinas y pasan a través de un contenedor lleno de resina líquida para quedar completamente empapados. Un carro guía mecánico se desplaza horizontalmente de izquierda a derecha a lo largo del cilindro, distribuyendo y cruzando los hilos mojados sobre la superficie giratoria con un ángulo exacto. Una vez alcanzado el espesor necesario, todo el conjunto se introduce en un horno donde el calor endurece la resina por completo o se deja endurecer en el lugar. Finalmente, el mandril de acero se extrae del interior, dejando un tubo de alta resistencia mecánica listo para ser pulido y cortado en los extremos.

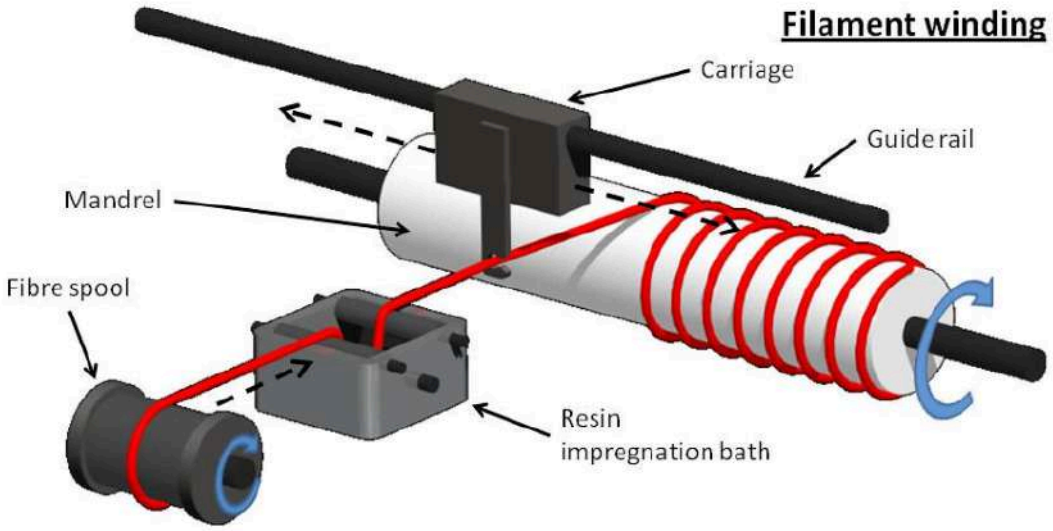


Ilustración 6: Proceso de filament winding esquemático

1.2.2.2. Centrifugado (Centrifugal Casting)

Este método utiliza un molde cilíndrico exterior que se hace girar sobre rodillos a velocidades extremadamente altas. Mientras el molde gira, un brazo mecánico alargado se introduce en su interior y se desplaza de punta a punta arrojando fibra de vidrio cortada, resina líquida y cargas minerales como arena fina. Debido a la altísima velocidad de rotación, la fuerza centrífuga empuja y aplasta violentamente todos estos componentes contra la pared interna del molde. Este empuje elimina por completo cualquier burbuja de aire y compacta los materiales en capas perfectas y densas desde el exterior hacia el centro. Sin dejar de girar, el molde se calienta externamente para acelerar el curado de la resina, y una vez solidificado el plástico, la rotación se detiene para extraer el tubo ya terminado.

1.2.2.3. Pultrusión [17]

La fabricación se realiza de forma ininterrumpida mediante un sistema de tracción mecánica que tira del material hacia adelante en línea recta. El proceso arranca con miles de filamentos de fibra de vidrio que viajan juntos y se sumergen en un baño de resina líquida termoestable para impregnarse por completo. Las pinzas del sistema siguen tirando de este haz de fibras húmedas y lo obligan a meterse a presión dentro de una matriz de acero caliente que tiene la forma exacta del tubo. Al pasar por este molde caliente, la resina se activa químicamente y se cura de manera casi instantánea, logrando que el material entre blando por un extremo y salga totalmente rígido por el otro. Una sierra automática, sincronizada con el movimiento continuo de la línea, corta el tubo al vuelo a la longitud exacta solicitada sin detener jamás la producción.

1.2.2.4. Artesanal/ Manual (Hand Lay-Up / Spray-Up)

Es un proceso manual que se realiza sobre un molde cilíndrico o mandril previamente cubierto con una cera especial para evitar que el plástico se pegue. Un operario aplica primero una capa de resina superficial y luego va acomodando con sus manos mantas de tela de fibra de vidrio secas sobre la estructura. Con la ayuda de un rodillo manual, el trabajador empapa la tela con resina líquida y la presiona con firmeza para expulsar las burbujas de aire atrapadas entre los filamentos, no obstante se vuelve a pasar un rodillo de acero para terminar la expulsión del aire atrapado.. Este ciclo de colocar tela, verter resina y pasar el rodillo se repite sucesivamente capa tras capa hasta que las paredes alcanzan el grosor diseñado. Al terminar, la estructura se deja

reposar a temperatura ambiente durante varias horas para que la mezcla química se endurezca de forma natural antes de retirar el tubo del molde.

1.2.2.5. Infusión por vacío

El método emplea un molde metálico rígido de dos piezas cerradas que definen con total precisión las dimensiones internas y externas del tubo. Al principio, los operarios colocan las telas de fibra de vidrio completamente secas en el espacio vacío que queda entre las dos caras metálicas y cierran el molde herméticamente con prensas hidráulicas. Una bomba de vacío se conecta a la estructura para succionar todo el aire atrapado en la cavidad interna, creando una presión negativa absoluta. Inmediatamente después, se inyecta la resina líquida a presión, la cual viaja con rapidez llenando cada espacio libre y mojando la fibra de vidrio de manera uniforme gracias a la ausencia de aire. El molde se calienta mediante resistencias eléctricas para cocinar la resina y, tras unos minutos de curado, se abre para extraer un tubo con un acabado liso y perfecto en ambas superficies.

1.2.3 Proceso de fabricación

1.2.3.1 Preparación del mandril

El mandril es el elemento sobre el cual se forma la tubería y su diámetro exterior determina aproximadamente el diámetro interior del producto terminado. Puede estar fabricado en acero, aluminio u otros materiales capaces de conservar su geometría durante el bobinado y el curado. Antes de comenzar el proceso, debe verificarse su alineación, limpieza y estado superficial para evitar que las irregularidades se reproduzcan sobre la superficie interna de la tubería.

Sobre el mandril se aplica un agente desmoldante o una película de separación (cera). Su función es impedir que la resina se adhiera permanentemente a la superficie metálica y facilitar la extracción de la tubería después del curado. En los procesos continuos, la película desmoldante se coloca automáticamente antes de la deposición de las fibras y avanza junto con el mandril.

Para el proceso de desmoldado, el mandril al ser **colapsable** (cilindro metálico articulado que se utiliza como molde interno para fabricar los tubos de PRFV) permite contraerse o "achicarse" en diámetro mediante un sistema mecánico o neumático una vez que el plástico se ha endurecido. Esto reduce la fricción y rompe el vacío, permitiendo extraer el tubo terminado de forma rápida,

segura y sin dañar sus paredes internas. Al finalizar la extracción, el mecanismo vuelve a expandir el mandril a su tamaño original para iniciar una nueva fabricación.

1.2.3.2 Formación de la capa interior

La primera parte de la pared corresponde al revestimiento interior o *liner*. Esta capa suele contener una elevada proporción de resina e incorpora un velo de fibra de vidrio y posterior una manta de fibra de vidrio de 300 o 450g/m^2 a elección. Su objetivo es generar una superficie lisa, continua, evitando porosidad y resistente al contacto con el fluido, separando el medio transportado de las capas que cumplen principalmente una función estructural.

1.2.3.3 Alimentación e impregnación de las fibras

Los carreteles de *roving* se colocan en una estructura denominada portacarreteles. Desde allí, los hilos atraviesan una serie de guías, peines, argollas y rodillos que los mantienen ordenados antes de llegar al sistema de impregnación. Estos elementos evitan que las fibras se crucen, se enreden o cambien de posición durante el funcionamiento de la máquina**.**

En el bobinado húmedo, la impregnación se realiza antes de que las fibras alcancen el mandril. Uno de los sistemas más utilizados consiste en hacer pasar los filamentos por un recipiente que contiene la resina, utilizando rodillos sumergidos para obligar a la fibra a entrar en contacto con el líquido. Otra posibilidad es emplear un tambor cuya superficie toma resina del recipiente y la transfiere a las fibras durante su movimiento.

La impregnación debe ser suficiente para que la resina penetre entre los filamentos y desplace el aire retenido. Una cantidad insuficiente puede producir zonas secas, poros o una protección incompleta de las fibras, mientras que un exceso de resina aumenta la masa y el costo del producto sin mejorar proporcionalmente su resistencia mecánica. Por esta razón se utilizan rodillos de escurrido o regulación para controlar la cantidad de resina que acompaña a la fibra.

La tensión de los filamentos también debe mantenerse dentro de un intervalo controlado. Una tensión excesiva puede dañar las fibras, deformar las capas previamente colocadas o dificultar la extracción del mandril. Por el contrario, una tensión demasiado baja puede producir ondulaciones, desplazamientos y una compactación insuficiente. El sistema de alimentación puede incorporar tensores mecánicos o dispositivos de regulación ubicados antes y después del baño de resina.

1.2.3.4 Bobinado de las capas estructurales

Una vez impregnadas, las fibras se depositan sobre el mandril. Mientras este gira, el carro guía alimentador se desplaza paralelamente a su eje. La relación entre la velocidad de rotación del mandril y la velocidad lineal del carro determina el ángulo de bobinado. El control coordinado de ambos movimientos permite formar un patrón uniforme y distribuir el refuerzo a lo largo de toda la superficie con diferentes disposiciones, las cuales pueden observarse en la ilustración 7.

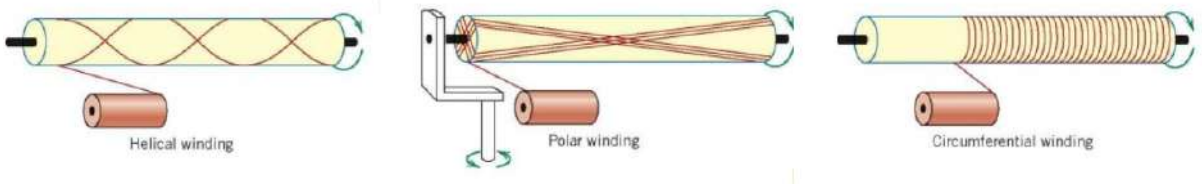


Ilustración 7: Tipos de bobinado

1.2.3.4.1 Bobinado circunferencial

En el bobinado circunferencial, las fibras se colocan con una orientación cercana a los 90° respecto del eje longitudinal de la tubería. Esta disposición permite que los filamentos contribuyan principalmente a soportar los esfuerzos circunferenciales generados por la presión interna. Por esta razón, las tuberías a presión contienen una proporción importante de refuerzo orientado en la dirección del perímetro.

1.2.3.4.2 Bobinado helicoidal

En el bobinado helicoidal, el carro se desplaza continuamente mientras el mandril gira, formando una hélice alrededor de la superficie. Al invertir el sentido del carro se genera una segunda orientación, produciendo capas cruzadas con ángulos positivos y negativos. Estas fibras presentan componentes circunferenciales y longitudinales, por lo que permiten resistir tanto la presión interna como esfuerzos axiales, cargas de manipulación y solicitaciones generadas en los extremos de la conducción.

Ilustración 8: Bobinado helicoidal

1.2.3.4.2.1 Ángulo óptimo de bobinado

La tubería de PRFV con extremos cerrados estará sometida a una presión interna p, donde aparecen principalmente dos esfuerzos: uno en dirección circunferencial y otro en dirección longitudinal.

La tensión circunferencial puede expresarse como:

$$\sigma_H = \frac{p \times D}{2t}$$

Mientras que la tensión longitudinal es:

$$\sigma_a = \frac{p \times D}{4t}$$

donde:

- p: presión interna.
- D: diámetro de la tubería.
- t: espesor de pared.
- σ_H: tensión circunferencial.

- σ_a: tensión axial o longitudinal.

De ambas expresiones se obtiene:

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_a} = 2$$

Es decir, debido únicamente a la presión interna, la tubería debe soportar aproximadamente el doble de esfuerzo en dirección circunferencial que en dirección longitudinal.

En una tubería fabricada mediante bobinado helicoidal balanceado, con fibras dispuestas en las direcciones +θ y -θ, la orientación de las fibras puede seleccionarse de manera que su capacidad resistente se distribuya de acuerdo con esta relación de cargas.

Mediante el modelo simplificado conocido como **netting analysis**, la relación entre la capacidad resistente circunferencial y axial de las fibras puede aproximarse mediante:

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_a} = tan(\theta)^2$$

Para la condición correspondiente a un cilindro cerrado sometido a presión interna:

$$tan(\theta)^2 = 2$$

Por lo tanto:

$$\theta = arctan(\sqrt{2})$$

Resultando:

$$\theta = 54,74°$$

Por razones prácticas, este valor se redondea habitualmente a 55°

Por esta razón, una disposición de fibras de **+55 grados y -55 grados** constituye una configuración apropiada para tuberías sometidas predominantemente a presión interna, ya que

permite utilizar las fibras simultáneamente para resistir las solicitaciones circunferenciales y longitudinales.

La utilización de aproximadamente 55 grados no se limita únicamente al desarrollo teórico. Diferentes estudios realizados sobre tuberías fabricadas mediante filament winding han analizado experimental y numéricamente el comportamiento de distintas orientaciones de fibra.

En el estudio **Progressive Failure Analysis of Filament Wound Composite Tubes under Internal Pressure**, se compararon tuberías con diferentes secuencias de bobinado sometidas a presión interna. [20]

Entre las configuraciones estudiadas se analizaron ángulos de:

- +/-35 grados.
- +/-45 grados.
- +/-55 grados.
- +/-65 grados.
- +/-75 grados.
- aproximadamente +/-90 grados.

Los resultados mostraron que la configuración de +/-55 grados presentó el mayor nivel de presión al inicio del daño de la matriz entre las configuraciones evaluadas.

Para la configuración de +/-55 grados, el inicio de daño se produjo aproximadamente a **129,80 bar**

Mientras que, por ejemplo:

- +/-35 grados: 63,18 bar.
- +/-45 grados: 94,68 bar.
- +/-65 grados: 81,20 bar.
- +/-75 grados: 56,24 bar.
- +/-90 grados: 46,98 bar.

Además, este trabajo menciona resultados obtenidos previamente por Martins et al., quienes estudiaron tubos compuestos de vidrio/epoxi fabricados mediante filament winding y sometidos a presión interna hidrostática. Dichos autores también determinaron que **55 grados era el ángulo de bobinado óptimo** para la condición estudiada.

Por lo tanto, el ángulo seleccionado para el presente diseño cuenta tanto con una justificación mecánica basada en la distribución de esfuerzos de una tubería presurizada como con respaldo proveniente de estudios realizados sobre estructuras compuestas bobinadas.

1.2.3.4.3 Bobinado polar

El bobinado polar se utiliza principalmente en piezas cerradas o con extremos curvos, como recipientes a presión. En este patrón, las fibras pasan alternativamente cerca de los polos del mandril. Para la fabricación de tuberías cilíndricas rectas predominan los patrones circunferencial y helicoidal, ya que pueden distribuirse de manera continua a lo largo de toda la longitud.

El patrón de bobinado depende además del diámetro del mandril, el ancho de la banda de fibras, el paso longitudinal, la cantidad de hilos y el número de ciclos realizados. El proceso se repite hasta alcanzar el espesor establecido durante el diseño. Por lo tanto, el espesor final no depende únicamente del número de vueltas, sino también de la masa lineal de los filamentos, la proporción fibra-resina y el grado de compactación alcanzado.

1.2.3.5 Curado

Después de completar la pared, la resina debe curarse. Durante esta etapa ocurre una reacción química de entrecruzamiento que transforma la mezcla líquida en una matriz sólida, rígida e insoluble. El curado puede realizarse a temperatura ambiente o acelerarse mediante aire caliente, resistencias, radiación infrarroja u hornos, dependiendo de la resina, el catalizador y el espesor del laminado.

El control del tiempo y de la temperatura de curado es fundamental para evitar un endurecimiento incompleto, deformaciones o tensiones residuales en la tubería. Durante las primeras etapas de gelificación, la pieza debe permanecer correctamente apoyada y, en determinados casos, continuar girando lentamente para impedir que la resina se desplace por efecto de la gravedad, se acumule en la zona inferior o llegue a escurrirse.

Aunque la tubería puede manipularse o utilizarse al día siguiente de su fabricación, todavía no habrá alcanzado su resistencia mecánica máxima. El curado continúa progresivamente con el tiempo, a medida que avanza la polimerización y disminuye la cantidad de monómero residual. Cuando el proceso se realiza a temperatura ambiente, la estabilización de las propiedades puede requerir aproximadamente quince días. En cambio, el empleo de un horno permite

acelerar el curado y alcanzar en un tiempo considerablemente menor las propiedades finales del material.

1.2.3.6 Desmoldeo y terminación

Una vez alcanzado el grado de curado necesario, la tubería se retira del mandril. La extracción puede realizarse de forma manual o mediante un sistema motorizado, dependiendo del diámetro, la longitud y el peso del producto. El agente desmoldante aplicado inicialmente reduce la adherencia y evita daños en la superficie interior.

Posteriormente, los extremos de la tubería se cortan y se biselan a la longitud requerida. Estos pueden ser calibrados, biselados o mecanizados para permitir la instalación de acoplamientos, juntas, bridas u otros accesorios.

1.2.3.7 Control de calidad

El control de calidad comienza con la recepción de las materias primas. La resina y su dilución, las fibras, el desmoldante y los aditivos deben verificarse antes de su utilización para comprobar que cumplen las especificaciones establecidas. Durante la fabricación también se controlan la dosificación, la tensión de las fibras, el ángulo de bobinado, la velocidad de los movimientos, la temperatura y el tiempo de curado.

Una vez fabricada, la tubería se somete a una inspección visual y a verificaciones dimensionales de longitud, diámetro y espesor de pared. Dependiendo de su aplicación, también pueden realizarse ensayos de estanqueidad hidrostática, rigidez, deflexión, dureza Barcol, resistencia a la tracción axial y circunferencial y análisis de la composición del laminado. Estas verificaciones permiten comprobar que el producto responde a la presión, rigidez y condiciones de servicio.

1.3. Relevamiento del sistema actual en TARCO

Durante la visita técnica a la empresa TARCO, dedicada a la fabricación de tuberías y tanques de PRFV, se realizó un relevamiento del sistema de producción junto con su propietario, Roberto, quien explicó los principales parámetros operativos del proceso de *filament winding* y las dificultades asociadas al funcionamiento de la máquina actual.

Ilustración 9: Maquina devanadora empresa TARCO

En el sector de alimentación se observaron 24 carreteles de fibra de vidrio dispuestos sobre estanterías. El material utilizado corresponde a *roving* continuo fabricado por Owens Corning, con un título de 2400 TEX y un peso aproximado de 18 kg por carretel. Según lo informado durante la visita, la máquina posee capacidad para trabajar con hasta 100 carreteles, distribuidos en una configuración de 20 columnas y 5 filas, lo que permite aumentar la cantidad de fibra depositada simultáneamente y reducir los tiempos de fabricación.

El ángulo de bobinado considerado deseable para la fabricación de las tuberías es de aproximadamente 55°. Este ángulo se obtiene mediante la sincronización entre la velocidad de desplazamiento longitudinal del carro guía y la velocidad de rotación del mandril. Por lo tanto, cualquier variación o pérdida de sincronismo entre ambos movimientos puede modificar la orientación de las fibras y afectar las propiedades mecánicas de la tubería.

También se relevó que cada cobertura completa del mandril genera un incremento aproximado de 0,9 mm en el espesor de pared. De esta manera, el espesor final puede controlarse mediante el número de coberturas o ciclos de bobinado realizados, siempre que se mantengan constantes la cantidad de mechas, la tensión de las fibras, la impregnación con resina y el patrón de deposición.

El mandril utilizado presenta una construcción hueca, característica que reduce su masa y facilita las operaciones de desmontaje y extracción de la tubería una vez finalizado el curado. Esta solución disminuye los esfuerzos requeridos durante la manipulación y favorece el desmoldeo, especialmente en tuberías de gran longitud o espesor.

A partir del relevamiento se identificó que el funcionamiento adecuado del sistema depende principalmente del control de la tensión de las mechas, el ordenamiento de los carreteles, el estado de las placas de guiado, la sincronización entre el carro y el mandril, la viscosidad de la resina, la dosificación del catalizador y el control del curado. Estas variables constituyen la base para analizar las principales problemáticas del sistema actual, las cuales detallamos a continuación:

1.3.1 Problemáticas

1.3.1.1 Variación de la tensión de las mechas

Los carreteles de fibra de vidrio permanecen fijos sobre la estructura portacarreteles, mientras que el carro guía se desplaza horizontalmente a lo largo del mandril. Como consecuencia de este movimiento, la distancia recorrida por las mechas y el ángulo con el que ingresan al sistema de guiado varían de manera continua. Esta situación puede producir cambios en la tensión de las fibras, provocando que los hilos se aflojen, pierdan cohesión o se deshilachen antes de alcanzar el peine guía. La falta de una tensión uniforme también puede afectar la regularidad con la que las fibras se depositan sobre el mandril y, por lo tanto, la calidad final del laminado.

1.3.1.2 Paradas por re-enhebrado

La fatiga de los filamentos, la fricción excesiva contra los elementos de conducción o la salida de las mechas de su recorrido pueden provocar la rotura de las fibras durante el bobinado. Cuando esto ocurre, es necesario detener completamente la producción para identificar la mecha afectada, retirar el material acumulado y re enhebrar manualmente el sistema. Estas interrupciones generan tiempos improductivos y desperdicio de materia prima, dado que parte de la fibra impregnada con resina puede endurecerse y formar una masa inutilizable mientras la máquina permanece detenida.

1.3.1.3 Desviaciones en el ángulo de bobinado

El ángulo de bobinado depende de la sincronización entre la velocidad de rotación del mandril cilíndrico y la velocidad de avance lineal del carro guía. Una pérdida de sincronismo entre ambos movimientos modifica la trayectoria de las fibras sobre la superficie del mandril y altera el patrón geométrico previsto. Como resultado, pueden producirse superposiciones innecesarias, separaciones entre bandas o sectores sin cubrir, afectando la uniformidad del espesor y disminuyendo la resistencia estructural de la tubería. Por este motivo, resulta fundamental

mantener una relación precisa y constante entre los dos accionamientos durante todo el recorrido del carro.

1.3.1.4. Desgaste y mantenimiento por abrasión

La fibra de vidrio presenta una naturaleza altamente abrasiva, especialmente cuando se desplaza de manera continua y bajo tensión sobre las superficies de la máquina. El contacto repetitivo de las mechas provoca el desgaste progresivo de los peines, rodillos tensores, placas de guiado y componentes del cabezal distribuidor. Con el tiempo, estos elementos pueden desarrollar ranuras, bordes irregulares o superficies rugosas que aumentan la fricción y deterioran los filamentos. Esta situación altera la precisión del guiado, genera variaciones en la tensión de las fibras y aumenta la probabilidad de roturas, por lo que resulta necesario realizar inspecciones periódicas y detener la producción para limpiar, reparar o reemplazar los componentes afectados.

1.3.1.5. Deficiencia o exceso de impregnación de resina

La falta de una regulación precisa durante el paso de las fibras por el recipiente de resina y el cabezal distribuidor puede producir una impregnación insuficiente o excesiva. Cuando se incorpora una cantidad de resina superior a la necesaria, aumenta el peso de la tubería, el consumo de materia prima y el costo económico de cada capa, sin obtener necesariamente una mejora proporcional de sus propiedades mecánicas. Por el contrario, una impregnación insuficiente puede dejar fibras secas, reducir la adherencia entre la matriz y el refuerzo y favorecer la aparición de poros, burbujas de aire o delaminaciones. Estos defectos comprometen la homogeneidad del laminado y pueden generar zonas débiles, filtraciones o pérdidas de estanqueidad durante el funcionamiento de la tubería.

1.3.1.6. Contaminación de componentes y riesgos de seguridad

El sistema actual presenta una exposición directa de los operarios a los mecanismos móviles de la máquina y a la manipulación abierta de resinas, catalizadores y otros productos químicos. La ausencia o insuficiencia de protecciones puede generar riesgos de atrapamiento con el mandril, el carro guía, las transmisiones y demás piezas en movimiento. Asimismo, las salpicaduras y el escurrimiento de resina pueden entrar en contacto con los trabajadores y depositarse sobre guías, rodillos, transmisiones y otros componentes internos. Una vez endurecida, esta contaminación dificulta el movimiento de las piezas, incrementa las tareas de limpieza y puede

ocasionar fallas o imprecisiones en el funcionamiento. Por lo tanto, deben contemplarse protecciones mecánicas, sistemas de contención de la resina, ventilación adecuada y procedimientos seguros de operación y mantenimiento.

1.4. Objetivos del proyecto

1.4.1. Objetivo general

Diseñar una máquina integrada para la fabricación de tuberías de plástico reforzado con fibra de vidrio mediante el proceso de *filament winding*, que coordine el sistema portacarretes, el guiado y tensionado de las mechas, la impregnación con resina, el desplazamiento del carro distribuidor y la rotación del mandril, con el propósito de obtener una deposición uniforme de las fibras, controlar el ángulo de bobinado y mejorar la continuidad, seguridad y eficiencia del proceso productivo.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Relevar y analizar el proceso de fabricación actualmente utilizado en TARCO, identificando sus parámetros de funcionamiento, limitaciones operativas y principales causas de paradas, desperdicios y variaciones en la calidad de las tuberías.

2. Diseñar un sistema de almacenamiento, alimentación y guiado de los carreteles de fibra de vidrio que permita conducir las mechas de manera ordenada desde el portabobinas hasta el mandril, evitando cruces, enredos y acumulaciones de fibra deshilachada.

3. Desarrollar un sistema de tensionado que mantenga una tensión uniforme en las mechas durante todo el recorrido, compensando las variaciones de distancia y ángulo producidas por el desplazamiento del carro guía.

4. Diseñar y sincronizar los accionamientos del carro distribuidor y del mandril, de manera que sea posible controlar el patrón de deposición y alcanzar un ángulo de bobinado aproximado de 55°, manteniendo su uniformidad durante la fabricación.

5. Diseñar un sistema de impregnación controlada de las fibras, incorporando elementos de regulación y eliminación del exceso de resina para obtener una humectación homogénea,

reducir el consumo de material y evitar la presencia de fibras secas o acumulaciones de resina.

6. Dimensionar la máquina para trabajar con tuberías de diferentes diámetros y longitudes, contemplando la regulación de los recorridos, la adaptación de los parámetros de bobinado y el acoplamiento de mandriles intercambiables.

7. Desarrollar un sistema que facilite el montaje, desmontaje y recambio del mandril, reduciendo los tiempos asociados al desmoldeo y permitiendo el acople y desacople seguro de mandriles de distintos diámetros.

8. Seleccionar y dimensionar los componentes mecánicos y de accionamiento de la máquina, incluyendo motores, transmisiones, guías lineales, sistema piñón-cremallera, rodamientos, soportes, tensores y elementos estructurales.

9. Reducir el desgaste de los componentes en contacto con las fibras, mediante la selección de materiales y geometrías adecuadas para peines, placas de orificios, rodillos y elementos de guiado sometidos a abrasión.

10. Facilitar las tareas de limpieza, inspección y mantenimiento, mediante una disposición accesible y desmontable de los componentes, especialmente en las zonas de impregnación, guiado y conducción de las mechas.

11. Mejorar la seguridad operativa del equipo, incorporando protecciones en los mecanismos móviles, sistemas de parada de emergencia y medidas de contención que reduzcan el riesgo de atrapamientos, salpicaduras y contaminación con resina.
12. Verificar el funcionamiento de la propuesta mediante cálculos de ingeniería, modelado tridimensional y análisis de los principales subsistemas, comprobando que el diseño cumpla con los requerimientos mecánicos, geométricos y operativos establecidos.

1.5. Alcance del trabajo

El presente proyecto comprende el diseño integral de una máquina destinada exclusivamente a la fabricación de tuberías cilíndricas rectas de plástico reforzado con fibra de vidrio mediante el proceso de bobinado filamentario. El diseño quedará limitado a los principales subsistemas

necesarios para alimentar, guiar, tensionar, impregnar y depositar las mechas de fibra de vidrio sobre un mandril giratorio, así como los mecanismos requeridos para coordinar el movimiento longitudinal del carro distribuidor con la rotación del mandril. No se incluirá la fabricación física ni la puesta en marcha del equipo.

La máquina será diseñada para fabricar tuberías con diámetros comprendidos entre 0,1m y 1m y una longitud máxima de 6 m. Para cubrir el rango de diámetros previsto, se contemplará el empleo de mandriles intercambiables y un sistema de sujeción que permita efectuar su acople y desacople de manera segura.

El alcance se restringe exclusivamente a la fabricación de tuberías rectas de sección circular. Quedan fuera del proyecto la producción de tanques, recipientes a presión cerrados, codos, derivaciones, reducciones, bridas, accesorios, piezas con extremos esféricos y componentes obtenidos mediante bobinado polar. También quedan excluidas las operaciones posteriores de instalación en obra y montaje de las tuberías dentro de una red hidráulica

Capítulo 2. Generación y selección de alternativas de diseño

2.1. Acciones de mejora propuestas

La primera acción propuesta consiste en hacer que el **sistema portacarretes se desplace solidariamente con el carro de guiado**. Al incorporar los carreteles al carro móvil, la distancia entre las bobinas, los tensores, el peine guía, la cubeta de resina y el punto de aplicación se mantiene aproximadamente constante durante todo el recorrido. De esta manera, se busca estabilizar la tensión de las fibras, reducir el deshilachado y disminuir la posibilidad de enredos y roturas.

Para controlar el ángulo de bobinado se propone **sincronizar electrónicamente** el giro del mandril con el avance longitudinal del carro. El mandril podrá ser accionado mediante un motorreductor, mientras que el carro se desplazará por medio de un sistema de piñón y cremallera o una solución equivalente. Un encoder instalado en el mandril permitirá medir su posición o cantidad de revoluciones, y un controlador ajustará el desplazamiento del carro en función del diámetro de la tubería y del ángulo programado.

También se propone **evaluar la mejor forma de aislar y disminuir los riesgos** de tropiezos y atrapamientos y mantener los componentes móviles alejados de la zona donde se manipula la resina para **reducir la posibilidad de contaminación** de las guías y transmisiones por goteos o salpicaduras y se facilita la limpieza del área de trabajo.

Para mejorar la impregnación de las fibras se plantea incorporar una cubeta de resina con un **rascador o elemento dosificador regulable**. La finalidad de este dispositivo es retirar el exceso de resina antes de que las mechas sean depositadas sobre el mandril, manteniendo una relación fibra-resina más uniforme. Esta acción permite reducir el consumo innecesario de material y evitar tanto las acumulaciones de resina como la presencia de fibras secas o insuficientemente impregnadas.

Finalmente, se establece como criterio general que los componentes sometidos a desgaste o contaminación, como peines, rodillos, guías, placas perforadas y elementos de escurrido, sean accesibles y desmontables. Esto permitirá sustituirlos o limpiarlos sin desmontar completamente el equipo, reduciendo los tiempos improductivos asociados al mantenimiento.

2.2. Propuesta 1: carro integrado tipo “C”

La primera alternativa consiste en un carro móvil integrado con forma de “C”, diseñado para envolver parcialmente el diámetro de la tubería. En esta configuración, el portacarretes, los elementos de guiado, la cubeta de resina y el cabezal distribuidor se encuentran montados sobre una misma estructura que se desplaza longitudinalmente junto al mandril giratorio.

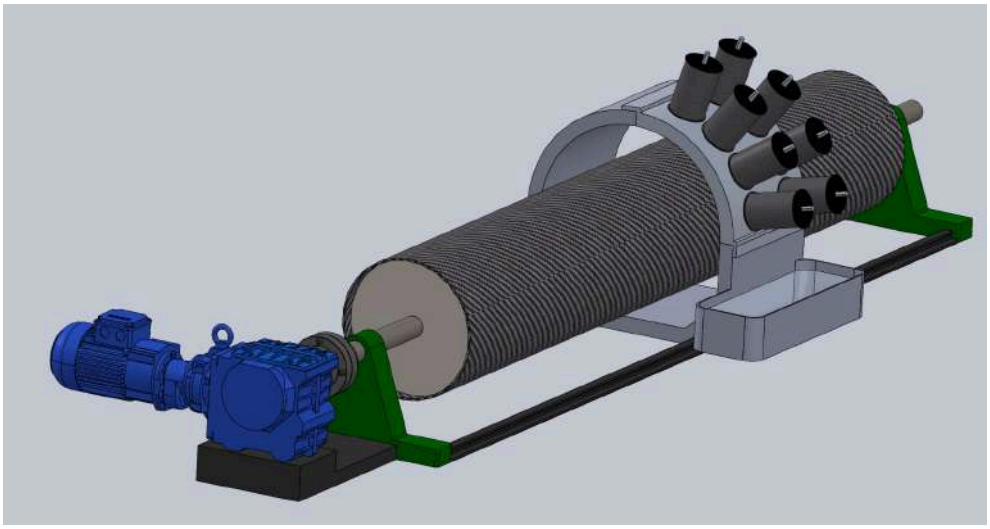


Ilustración 10: Diseño en SolidWorks - carro integrado tipo C.

2.3. Propuesta 2: unidad móvil integrada convencional

La segunda alternativa consiste en una unidad móvil integrada que se desplaza lateralmente sobre guías paralelas al mandril. El carro incorpora el portacarretes, los sistemas de tensionado y guiado, la cubeta de impregnación y el distribuidor de fibras, pero, a diferencia de la propuesta anterior, no envuelve la tubería.

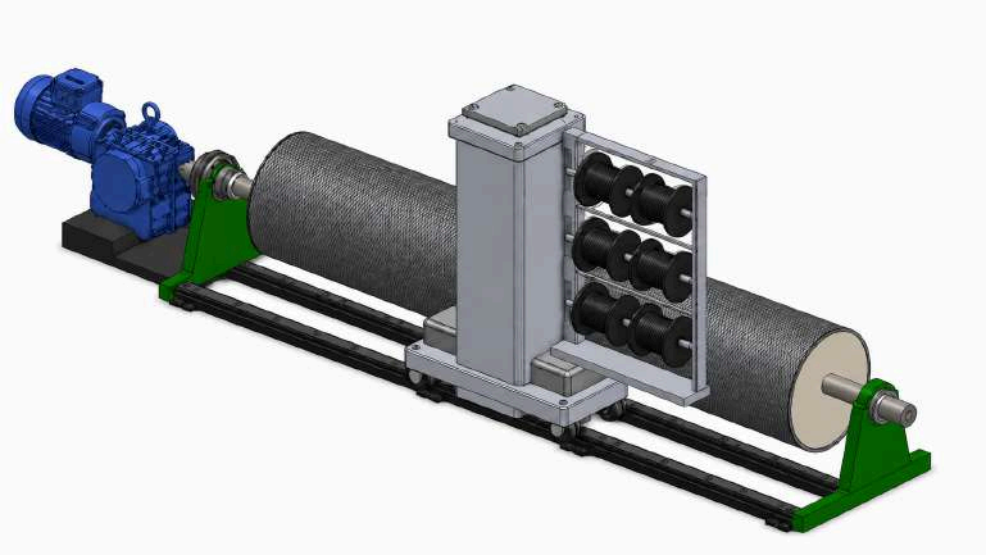


Ilustración 11: Diseño en SolidWorks - unidad móvil integrada convencional.

2.4. Propuesta 3: carro integrado tipo pórtico

La tercera propuesta consiste en una estructura tipo pórtico que se extiende por encima del mandril. Sobre la parte superior del pórtico se colocan las guías lineales y el sistema de accionamiento del carro, mientras que el portacarretes, la cubeta de impregnación y el cabezal distribuidor quedan suspendidos sobre la zona de fabricación.

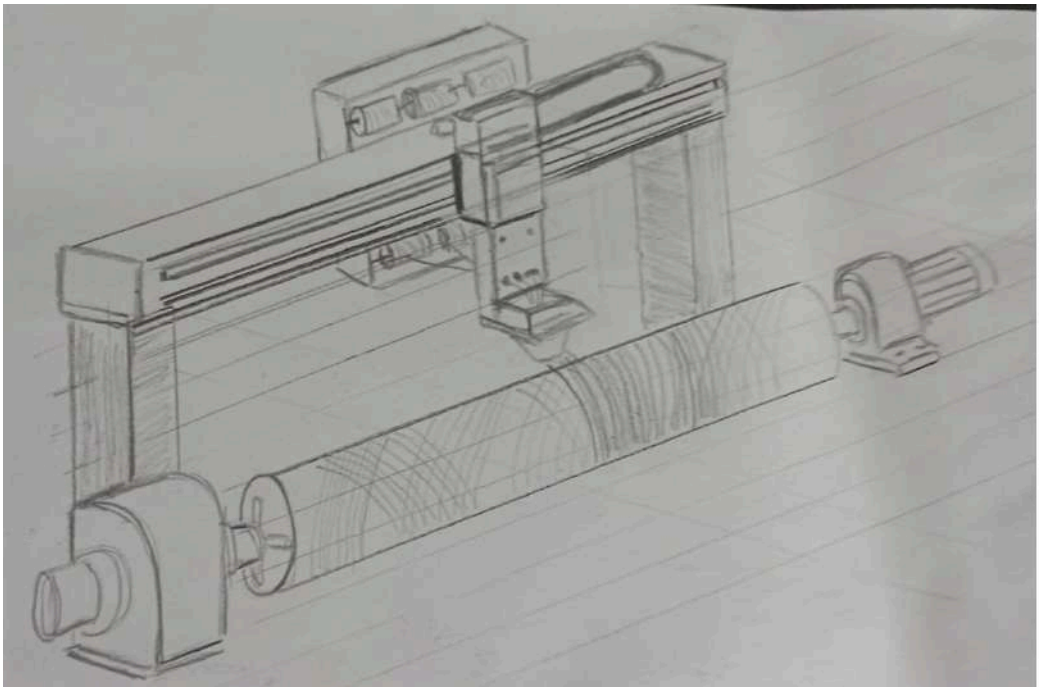


Ilustración 12: Diseño a mano alzada - carro integrado tipo pórtico.

2.5. Elección de la propuesta

Para comparar las tres alternativas conceptuales se empleó una **matriz de Pugh**, herramienta de selección que permite analizar distintas propuestas respecto de una solución tomada como referencia o *benchmark*. En este caso, se adoptó como referencia la máquina utilizada actualmente en TARCO, ya que constituye el sistema real sobre el cual se identificaron las problemáticas que dieron origen al proyecto. De esta manera, cada alternativa fue evaluada según si representaba una mejora, un desempeño equivalente o una desventaja respecto del equipo existente.

La comparación se realizó utilizando tres símbolos. El signo **"+"** indica que la propuesta presenta un comportamiento mejor que el sistema de referencia para el criterio analizado; el símbolo **"0"** señala que su desempeño es aproximadamente equivalente; y el signo **"–"** indica que la alternativa resulta menos favorable que la máquina actual. Este procedimiento permite efectuar una primera selección cualitativa sin asignar inicialmente diferentes niveles de importancia a los criterios.

Los criterios utilizados surgieron de las problemáticas relevadas durante la visita técnica a TARCO y de los objetivos establecidos para la nueva máquina. Se consideraron el control de la tensión de las mechas, la reducción de acumulaciones de fibra deshilachada, el control del ángulo de

bobinado, la disminución de paradas por reenhebrado, la adaptabilidad a diferentes diámetros, la reducción del consumo de resina, la disminución del desgaste de los componentes, la facilidad de mantenimiento, el costo de implementación, la seguridad operativa, la higiene del proceso y el grado de innovación de cada alternativa.

Una vez comparadas las propuestas, se contabilizó la cantidad de valoraciones positivas, negativas y neutras obtenidas por cada una. Para determinar el resultado neto se restó el número de valoraciones negativas al número de valoraciones positivas:

$$P = N^{(+)} - N^{(-)}$$

donde P representa el puntaje final, $N^{(+)}$ la cantidad de evaluaciones positivas y $N^{(-)}$ la cantidad de evaluaciones negativas. Las valoraciones neutras no modifican directamente el puntaje, aunque permiten identificar aquellos criterios en los que la propuesta no representa una mejora respecto del sistema actual.

N°	Criterio	Opcion 1	Opcion 2	Opcion 3	Referencia	Descripcion
1	Control tension del filamento	+	+	+	0	Las tres alternativas contemplan que el portacarretes acompañe el desplazamiento del sistema de guiado, manteniendo prácticamente constante la longitud libre del filamento y favoreciendo una tensión uniforme
2	Reducción de acumulacion de fibra deshilachada	+	+	+	0	Consecuencia directa del criterio 1
3	Control del angulo de bobinado	0	0	0	0	En las tres alternativas el ángulo de bobinado se controla mediante la sincronización entre la velocidad de giro del mandril y la velocidad de avance del sistema de guiado.
4	Disminucion de paradas por re-enhebrado	+	+	+	0	Consecuencia directa del criterio 1 y 2
5	Adaptabilidad del sistema	-	0	0	0	La Propuesta 1 presenta limitaciones debido a su configuración envolvente tipo "C", que restringe el rango de diámetros admisibles. Las Propuestas 2 y 3 poseen estructuras abiertas que permiten trabajar con una mayor variedad de dimensiones de mandril.
6	Reduccion del consumo de resina	+	+	+	0	Las tres alternativas incorporan una cuba de impregnación con sistema de control de resina mediante rascador permitiendo retirar excedentes.

7	Reduccion del desgaste de guias y componentes	0	0	+	0	La Propuesta 3 ubica las guías y mecanismos principales alejados de la zona de impregnación, reduciendo la exposición a resina y suciedad, mientras que en las Propuestas 1 y 2 estos componentes permanecen más expuestos.
8	Facilidad de mantenimiento	0	0	+	0	Consecuencia directa del criterio 7
9	Costo de implementacion	-	0	-	0	Las tres alternativas requieren motores, sistemas de guiado, mandril y elementos de sincronización similares. Sin embargo, la Propuesta 1 y 3 incorporan una estructura más compleja
10	Seguridad Operativa	0	0	+	0	Al encontrarse las guías y sistemas de movimiento por encima de la zona de impregnación, la Propuesta 3 disminuye la posibilidad de contaminación por derrames o salpicaduras de resina y facilita la limpieza del área de trabajo.
11	Higiene en el proceso	0	0	+	0	La Propuesta 3 mantiene los mecanismos de desplazamiento elevados y alejados de la zona de tránsito del operario, reduciendo el riesgo de atrapamientos o contactos accidentales con partes móviles.
12	Innovacion de la propuesta	+	0	+	0	Las Propuesta 2 es muy parecida a la que se encuentra en el mercado y a la utilizada en la empresa

Tabla 2: Matriz de Pugh

	Opcion 1	Opcion 2	Opcion 3	Referencia
Positivos	5	4	9	Referencias
Negativos	2	0	1	Referencias
Ceros	5	8	2	Referencias
PUNTAJE	3	4	8	

Tabla 3: Resultados

La Propuesta 1 obtuvo una valoración favorable en el control de la tensión y la reducción de acumulaciones, pero fue penalizada por su limitada adaptabilidad y por las restricciones que genera su geometría envolvente.

La Propuesta 2 presentó un funcionamiento equilibrado y no obtuvo valoraciones negativas significativas, aunque gran parte de sus características resultaron equivalentes al sistema de referencia y no aportaron mejoras destacadas en seguridad, higiene e innovación.

La Propuesta 3 obtuvo el mayor resultado neto, con nueve valoraciones positivas, una negativa y dos neutras. Sus principales ventajas se relacionan con la adaptabilidad a diferentes diámetros, la seguridad operativa, la separación entre los mecanismos y la zona de resina, la facilidad de mantenimiento y el carácter innovador de su configuración.

Como verificación complementaria se aplicó una **matriz de decisión ponderada**, asignando diferentes pesos a los criterios según su importancia y valorando el cumplimiento de cada alternativa con una escala de 1, 3 y 5 puntos. Los resultados obtenidos fueron 372 puntos para la Propuesta 1, 422 puntos para la Propuesta 2 y 474 puntos para la Propuesta 3.

N°	Criterio	Peso	Opcion 1	Opcion 2	Opcion 3	Descripcion
1	Control tension del filamento	12	5	5	5	Las tres alternativas contemplan que el portacarretes acompañe el desplazamiento del sistema de guiado, manteniendo prácticamente constante la longitud libre del filamento y favoreciendo una tensión uniforme
2	Reducción de acumulacion de fibra deshilachada	9	5	5	5	Consecuencia directa del criterio 1
3	Control del angulo de bobinado	10	4	4	4	En las tres alternativas el ángulo de bobinado se controla mediante la sincronización entre la velocidad de giro del mandril y la velocidad de avance del sistema de guiado.
4	Disminucion de paradas por re-enhebrado	9	5	5	5	Consecuencia directa del criterio 1 y 2
5	Adaptabilidad del sistema	12	1	5	5	La Propuesta 1 presenta limitaciones debido a su configuración envolvente tipo "C", que restringe el rango de diámetros admisibles. Las Propuestas 2 y 3 poseen estructuras abiertas que permiten trabajar con una mayor variedad de dimensiones de mandril.
6	Reduccion del consumo de resina	8	5	5	5	Las tres alternativas incorporan una cuba de impregnación con sistema de control de resina mediante rascador permitiendo retirar excedentes.

7	Reduccion del desgaste de guias y componentes	8	3	3	4	La Propuesta 3 ubica las guías y mecanismos principales alejados de la zona de impregnación, reduciendo la exposición a resina y suciedad, mientras que en las Propuestas 1 y 2 estos componentes permanecen más expuestos.
8	Facilidad de mantenimiento	6	3	3	4	Consecuencia directa del criterio 7
9	Costo de implementacion	6	3	4	3	Las tres alternativas requieren motores, sistemas de guiado, mandril y elementos de sincronización similares. Sin embargo, la Propuesta 1 y 3 incorporan una estructura más compleja
10	Seguridad Operativa	10	3	3	5	Al encontrarse las guías y sistemas de movimiento por encima de la zona de impregnación, la Propuesta 3 disminuye la posibilidad de contaminación por derrames o salpicaduras de resina y facilita la limpieza del área de trabajo.
11	Higiene en el proceso	8	3	3	5	La Propuesta 3 mantiene los mecanismos de desplazamiento elevados y alejados de la zona de tránsito del operario, reduciendo el riesgo de atrapamientos o contactos accidentales con partes móviles.
12	Innovacion de la propuesta	4	4	3	5	Las Propuesta 2 es muy parecida a la que se encuentra en el mercado y a la utilizada en la empresa
	PUNTAJE	100%	372	422	474	

Tabla 4: Matriz de decisión ponderada

Este segundo análisis confirmó que la configuración tipo pórtico constituye la alternativa que mejor satisface los requerimientos del proyecto. En consecuencia, se seleccionó esta propuesta para el desarrollo del proyecto.

Capítulo 3. Desarrollo y diseño de la solución seleccionada

3.1. Parámetros geométricos y productivos

3.1.1. Definición de pasada y cobertura

Definimos como pasada al recorrido realizado por el carro móvil a lo largo del mandril en un solo sentido. Durante este desplazamiento, el mandril gira simultáneamente y las mechas son depositadas siguiendo el ángulo de bobinado pre-establecido. Por lo tanto, un movimiento completo de ida y vuelta está compuesto por dos pasadas.

Una cobertura o capa corresponde al conjunto de pasadas necesarias para cubrir una vez la totalidad de la superficie cilíndrica del tubo. Debido a que cada pasada deposita solamente una franja de fibras, deben realizarse varias pasadas sucesivas hasta completar toda la circunferencia.

3.1.2. Circunferencia de la tubería

La circunferencia representa la longitud del perímetro exterior del tubo sobre el cual deben distribuirse las bandas de fibra. Es determinada a partir del diámetro de fabricación mediante la siguiente expresión:

$$C = \pi * D$$

donde C es la circunferencia del tubo y D su diámetro exterior. Debido a que el diámetro crece con la incorporación de nuevas capas, la circunferencia también presenta un crecimiento progresivo durante el bobinado.

3.1.3. Cantidad de pasadas por cobertura

La cantidad de pasadas necesarias para completar una cobertura se determina relacionando la circunferencia del tubo con el ancho efectivo de la banda depositada:

$$N = C / b_e$$

donde N es la cantidad de pasadas por cobertura y b_e es el ancho efectivo de deposición.

Para seis mechas de aproximadamente 3,6 mm de ancho se obtiene un ancho total nominal:

$$b = 3,6mm \times 6\ mechas = 22mm$$

Considerando un solapamiento del 15 % y un ángulo de bobinado de 55°, en el diseño preliminar se adopta un ancho efectivo de aproximadamente 15,43 mm:

$$b_e = b \times (1 - 0,15) \times sen(55°)$$

$$= 22 \times (1 - 0,15) \times sen(55°) = 15,43\ mm$$

3.1.4. Título TEX del roving

El TEX es una unidad utilizada para expresar la masa lineal de una fibra, hilo o mecha. Indica la cantidad de gramos correspondientes a una longitud de 1000 metros:

$$1\ TEX = 1\ g/1000\ m$$

Para el diseño se seleccionó un roving Owens Corning 158B de 2400 TEX, lo que significa que cada mecha posee una masa de 2400 g por cada 1000 m de longitud, equivalente a:

$$2400\ TEX = 2,4\ g/m$$

3.1.5. Espesor depositado por cobertura

El espesor por cobertura representa el aumento de espesor de la pared del tubo luego de completar una capa sobre toda su superficie.

Cada mecha seleccionada posee un título de 2400 TEX, equivalente a 2,4 g por metro. Al utilizar seis mechas simultáneamente, la masa lineal total es:

$$M_L = Carreteles \times 2,4\ g/m$$

$$= 6 \times 2,4\ g/m = 14,4\ g/m$$

A partir del relevamiento realizado en TARCO se obtuvo un valor experimental de aproximadamente 0,9 mm por cobertura.

Por otra parte, el cálculo teórico realizado a partir de la masa superficial de fibra y la densidad del compuesto arrojó un valor aproximado de 0,52 mm.

$$\rho_{Compuesto} = 1,55\ g/cm^3$$

$$E_{Teórico} = M_L/\rho = 14,4\ g/m\ /1,55 g/cm^3$$

$$= 0,52\ mm/cobertura$$

Debido a la diferencia entre ambos resultados, para los cálculos preliminares se adoptó un espesor promedio de 0,71 mm/cobertura .

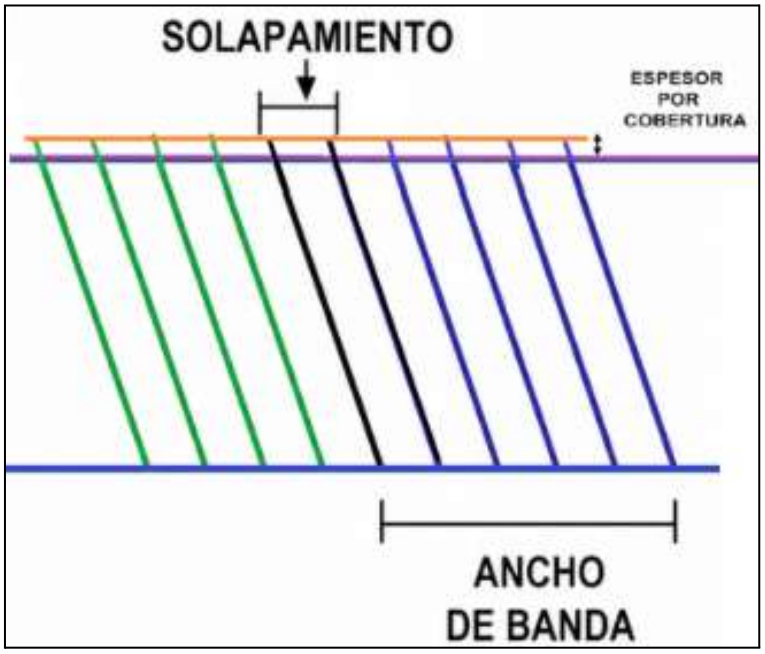


Ilustración 13: Representación del ancho de banda, el solapamiento entre pasadas consecutivas y el espesor generado por cobertura.

3.1.6. Cantidad de coberturas necesarias

La cantidad de coberturas depende del espesor final requerido para la tubería. Se calcula dividiendo el espesor de diseño por el espesor depositado en cada cobertura:

$$N_c = E_F / E_C$$

donde Nc es la cantidad de coberturas, E_f es el espesor final requerido y E_c es el espesor adoptado por cobertura.

3.1.7. Cantidad total de pasadas

La cantidad total de pasadas necesarias para fabricar el tubo se obtiene multiplicando la cantidad de pasadas requeridas para completar una cobertura por la cantidad total de coberturas:

$$N_{Total} = N_C / N$$

Este parámetro permite estimar la duración del bobinado, la longitud total de fibra utilizada y el consumo de materia prima.

3.1.8. Longitud de fibra utilizada por pasada y total

La longitud de fibra utilizada depende de la longitud del tubo, del ángulo de bobinado, de la cantidad total de pasadas y del número de mechas depositadas simultáneamente.

Considerando que el ángulo de 55° se mide respecto del eje longitudinal del tubo, la longitud aproximada recorrida por una mecha durante una pasada puede expresarse como:

$$L_{Pasada} = L / cos\theta$$

donde L es la longitud útil de la tubería y θ el ángulo de bobinado.

La longitud total de fibra se determina mediante:

$$L_F = L_{Pasada} \times N_{Total} \times n_F$$

donde n_f es la cantidad de mechas utilizadas simultáneamente, igual a seis en la configuración seleccionada.

3.1.9. Tiempo de fabricación en casos extremos

Para evaluar el desempeño de la máquina en sus condiciones límite, se calcularon los tiempos de fabricación para espesores finales comprendidos entre 4 y 15 mm, rango adoptado como representativo de las tuberías consideradas en el proyecto.
La fórmula utilizada para calcular el tiempo de fabricación fue:

$$Tiempo = \frac{Pasadas\ totales \times Largo}{Velocidad\ Carro}$$

Se estableció un espesor mínimo de 4 mm, ya que valores inferiores podrían producir una pared con rigidez y resistencia insuficientes para una manipulación y utilización segura, mientras que 15 mm se tomó como condición máxima de fabricación.

Los cálculos se realizaron considerando los parámetros desarrollados previamente en el apartado 3.1 y velocidades longitudinales del carro comprendidas entre 20 y 35 m/min, presentándose en las tablas los resultados correspondientes a velocidades representativas de 25 y 30 m/min. Asimismo, se analizaron los dos diámetros extremos previstos para la máquina, correspondientes al diámetro mínimo y máximo de fabricación, con el objetivo de verificar tanto la condición de menor cantidad de pasadas como aquella que exige la mayor cantidad de coberturas, consumo de material y tiempo de operación.

Este análisis observable en ilustración 14 e ilustración 15 nos permitió comprobar que el sistema de desplazamiento y el proceso de bobinado puedan trabajar adecuadamente en todo el rango dimensional establecido.

Ancho de banda [mm]	22	Ancho efectivo [mm]	15.3153	circunferencia [mm]	31.416
Para el caso de un tubo de 10mm diametro, 6m largo	10	Cantidad de pasadas necesarias para una cobertura completa	2.051282051	25	30
Espesor necesario [mm]	Espesor por cobertura [mm]	Cantidad de coberturas	Pasadas necesarias	Tiempo de fabricacion 25m/min en minutos	Tiempo de fabricacion 30m/min en minutos
4	0.71	5.63	11.56	2.774	2
8	0.71	11.27	23.11	5.547	5
10	0.71	14.08	28.89	6.934	6

Ilustración 14: Memoria de cálculo de tiempos de fabricación para el diámetro mínimo.

Ancho de banda [mm]	22	Ancho efectivo [mm]	15.3153	circunferencia [mm]	3141.6
Para el caso de un tubo de 1000mm diametro, 6m largo	1000	Cantidad de pasadas necesarias para una cobertura completa	205.1282051	25	30
Espesor necesario [mm]	Espesor por cobertura [mm]	Cantidad de coberturas	Pasadas necesarias	Tiempo de fabricacion 25m/min en horas	Tiempo de fabricacion 30m/min en horas
4	0.71	5.63	1155.65	4.623	4
8	0.71	11.27	2311.30	9.245	8
10	0.71	14.08	2889.13	11.557	10
15	0.71	21.13	4333.69	1040.087	867

Ilustración 15: Memoria de cálculo de tiempos de fabricación para el diámetro máximo.

3.2. Diseño del carro móvil integrado

3.2.1. Configuración del carro, selección de perfiles y materiales

Para la estructura del carro móvil fueron seleccionados perfiles tubulares de acero de bajo carbono SAE 1020 debido a su disponibilidad comercial, facilidad de mecanizado, buena soldabilidad y resistencia adecuada para la fabricación de bastidores de maquinaria.

A diferencia del pórtico, que es fijo permanentemente y requiere una elevada rigidez, el carro se desplaza continuamente durante el proceso, por lo que resulta necesario reducir su masa sin comprometer su resistencia estructural.

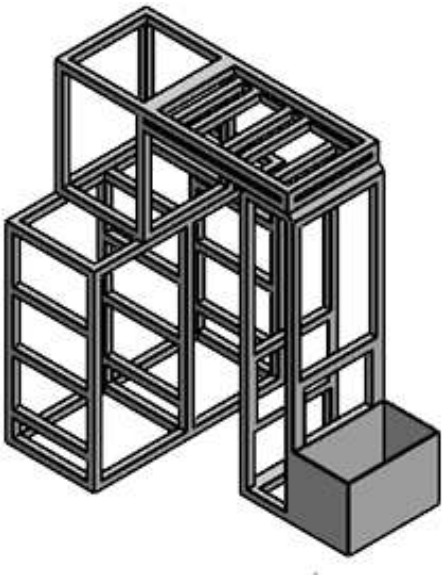


Ilustración 16: Vista isométrica del carro guia

Podemos observar en ilustración 16 el carro guía integrado y la utilización de perfiles tubulares, los cuales nos otorgan una buena relación entre rigidez y peso debido a que el material se distribuye alejado del eje neutro de la sección. De esta manera, conseguimos una estructura capaz de soportar los carreteles, el sistema de tensionado, la cubeta de resina y el cabezal distribuidor, evitando incorporar una cantidad excesiva de peso.

La reducción de la masa trasladada disminuye la inercia del conjunto y, en consecuencia, las fuerzas necesarias para acelerar y desacelerar el carro. Esto adquiere importancia en los extremos del recorrido, donde el sistema debe frenar, invertir el sentido de movimiento y volver a acelerar.

Las dimensiones del carro pueden observarse en el Anexo 1.

3.2.2. Determinación de la masa total

Debido a que el conjunto debe desplazarse longitudinalmente durante el proceso de bobinado, no solo debe considerarse la masa propia del bastidor, sino también la de todos los elementos que se trasladan solidariamente con él.

De acuerdo con las dimensiones establecidas para la estructura, se estimó una masa aproximada del bastidor de 45 kg.

A esta estructura principal se incorporan los refuerzos necesarios para soportar los ejes de los carreteles. Se consideraron 12 refuerzos de acero ASTM A36, cuya masa conjunta es de aproximadamente 10,8 kg.

Los seis ejes portacarretes se fabricarán de acero SAE 1045, con un diámetro nominal de 25 mm. A partir de la densidad del acero y del volumen correspondiente a los seis ejes se obtuvo una masa total aproximada de 9 kg

A estos componentes se adiciona la tornillería necesaria para el montaje, cuya masa se estimó en 2 kg.

Para permitir el giro de los carreteles se incorporan 12 rodamientos a bolas modelo 6205, dos por cada posición de carretel. La masa conjunta considerada para estos elementos es de 1,550 kg.

Uno de los aportes más importantes a la masa total corresponde a los propios carreteles de fibra. Considerando una masa aproximada de 18 kg por carretel completo y una configuración de seis unidades se calculan 108 kg.

Este valor representa prácticamente la mitad de la masa total desplazada, por lo que resulta especialmente importante en el dimensionamiento dinámico del carro.

Para la cubeta de acero inoxidable AISI 304 se estimó una masa de 8 kg

Debe contemplarse la resina contenida en ella durante la fabricación. Debido a que la cubeta no necesita encontrarse completamente llena durante la operación, se consideró una carga de trabajo aproximada de 25 kg.

La cantidad de resina disponible fue definida de forma tal que permita realizar el proceso de fabricación sin necesidad de llenar continuamente la cubeta, estimándose aproximadamente entre cinco y seis reposiciones durante la producción de una tubería.

Finalmente, se incorpora al conjunto móvil el servomotor destinado al accionamiento, para el cual se considera una masa de 10 kg.

La masa del distribuidor de fibras se considera despreciable frente a la masa total del conjunto, debido a que se proyecta su fabricación mediante placas de material plástico o acrílico.

Por lo tanto, la masa total trasladada por el carro se obtiene mediante la suma de los diferentes componentes considerados, resultando en:

$$m_{TOTAL} = 220\ kg$$

De esta manera, para los cálculos posteriores de selección de guías, transmisión y accionamiento se considera una masa móvil aproximada de 220 kg en condición de carga, correspondiente al carro equipado con los seis carreteles, la estructura portante, los elementos de soporte, la cubeta con resina y el sistema de accionamiento.

Cabe destacar que esta masa corresponde a la configuración actualmente seleccionada y representa la condición operativa empleada para el dimensionamiento del sistema de desplazamiento.

3.3. Sistema portacarreteles

3.3.1. Cantidad de carreteles adoptada

La cantidad de carreteles se definió considerando principalmente el ancho de la banda de fibra depositada, la productividad del proceso y las limitaciones mecánicas del carro móvil.

Al aumentar el número de carreteles, se incrementa la cantidad de mechas que pueden procesarse en paralelo, permitiendo depositar una mayor cantidad de fibra en cada recorrido del carro. Como consecuencia, se reduce el número de pasadas necesarias para alcanzar el espesor requerido de la tubería y disminuye el tiempo total de fabricación.

Sin embargo, una mayor cantidad de carreteles también produce un incremento de la masa que debe soportar y desplazar el sistema. Cada carretel completo posee una masa aproximada de 18 kg, por lo que consideramos como óptima la incorporación de seis unidades.

3.3.2. Diseño de los ejes de soporte

Podríamos elegir inicialmente el diámetro de los ejes de 25 mm porque es compatible geométricamente con el diámetro interior del alojamiento central de los carreteles. Para validar esta selección debe comprobarse que el eje resiste el peso del carretel sin superar la tensión admisible del material ni presentar una deformación excesiva.

El material elegido es SAE 1045 por ser la solución comercial más implementada.

Se considera que cada carretel completo posee una masa aproximada de 18 kg, por lo tanto, el peso correspondiente es 176 N.

Para contemplar pequeñas vibraciones, irregularidades durante el movimiento del carro y los esfuerzos generados durante la manipulación, se adopta preliminarmente un coeficiente dinámico de 1,51:

$$Fd = 1,5 \times 176,6\ N = 264,9\ N$$

Esta fuerza actúa sobre cada eje de manera individual, ya que cada eje soporta un único carretel.

El eje puede modelarse como una viga en voladizo, empotrada en la estructura del portacarreteles y cargada aproximadamente en el centro del carretel. La distancia L se mide desde la cara de fijación del eje hasta el centro de gravedad del carretel, distancia de aproximadamente 500 mm.

Para un eje macizo de sección circular, la tensión máxima de flexión se calcula mediante:

$$\sigma b = \frac{32 \times Fd \times L}{\pi \times d^3}$$

donde:

- Fd: carga de diseño sobre el eje;

- L: distancia entre el soporte y el centro del carretel.
- d: diámetro del eje.
- σb: tensión máxima de flexión.

Despejando el diámetro mínimo:

$$dmin = \sqrt[3]{\frac{32 \times Fd \times L}{\pi \times \sigma b}}$$

$$dmin = \sqrt[3]{\frac{32 \times 264{,}9\ N \times 500}{\pi \times 310\ MPa}} = 16,33mm$$

Entonces como el diámetro mínimo es menor que la elección de 25 mm ha quedado verificado el diámetro.

3.3.3. Sistema de fijación

Para limitar el desplazamiento axial de los carreteles se han seleccionado collares partidos de dos piezas comercializados en paquetes de cuatro unidades. El modelo elegido está fabricado de aleación de aluminio y posee como dimensiones comerciales de referencia, un diámetro interior de 25 mm, un diámetro exterior de aproximadamente 45 mm y un ancho de 12 mm. La fijación es realizada mediante dos tornillos que comprimen ambas mitades del collar alrededor del eje.

La principal ventaja de esta elección es que el collar puede montarse directamente alrededor del eje, sin necesidad de introducirlo desde uno de sus extremos. De esta manera, se evita utilizar bujes de ajuste o elementos montados por interferencia que deban colocarse mediante presión o golpeado. Asimismo, el collar puede desmontarse y reposicionarse aflojando sus tornillos, simplificando el cambio de los carreteles y las tareas de mantenimiento.

Cada carretel quedará limitado axialmente mediante dos collares, uno ubicado a cada lado. Uno de ellos podrá permanecer como referencia fija, mientras que el segundo se retirará para efectuar el reemplazo de la bobina.

La construcción en aleación de aluminio también permite reducir la masa incorporada al carro móvil y proporciona resistencia frente a la corrosión.

Ilustración 17: Collar de fijación

3.4. Sistema de tensionado y guiado de las fibras

3.4.1. Determinación de la tensión de trabajo

La tensión aplicada sobre cada mecha de fibra de vidrio constituye un parámetro relevante debido a que influye directamente sobre la estabilidad en el recorrido de la fibra, su disposición sobre el molde y la compactación de las capas.

El roving no es un elemento macizo, sino un conjunto compuesto por numerosos filamentos individuales de vidrio. Debido a esto, su sección transversal resulta difícil de medir directamente.

Para realizar el cálculo se determina una **sección equivalente**, es decir, el área que tendría una sección maciza de vidrio con la misma masa por unidad de longitud que el roving utilizado:

$$A_{eq} = \rho \times \lambda$$

donde:

- λ: densidad lineal del roving, en kg/m;
- ρ: densidad volumétrica de la fibra de vidrio, en kg/m³;

- A_{eq}: sección equivalente del roving, en m².

Para la fibra E-Glass se considera una densidad típica de:

$$\rho = 2540\ kg/m^3$$

Reemplazando los valores:

$$A_{eq} = \frac{0{,}0024 kg/m}{2540 kg/m3} = 9,448 \times 10^{-7} m^2 = 0,945 mm^2$$

De acuerdo con los datos considerados para la fibra E-Glass, la resistencia a la tracción es:

$$\sigma r = 2450\ MPa = 2450 N/mm^2$$

La carga teórica de rotura se calcula mediante:

$$Fr = \sigma r \times A_{eq}$$

Reemplazando:

$$Fr = 2450 N/mm^2 \times 0,945 mm^2$$

$$Fr = 2315\ N$$

Este valor representa la carga de rotura teórica del conjunto de filamentos de una mecha, suponiendo que todos ellos soportan la carga de manera uniforme y que no existen daños, rozamientos, defectos o concentraciones de esfuerzo.

La fuerza de tensado necesaria durante el bobinado no tiene como objetivo aprovechar la resistencia mecánica de la fibra. Su función es únicamente mantener la mecha estirada y permitir la deposición estable.

Como valor inicial de diseño se adopta una fuerza equivalente al 0,5% de la carga teórica de rotura:

$$Ftrab = 0,005 \times Fr$$
$$= 0,005 \times 2315N = 12\ N\ por\ mecha$$

La fuerza podrá ajustarse posteriormente en función de la velocidad de bobinado, el ángulo de deposición, el estado de los carreteles y la compactación requerida entre capas.

3.4.2. Sistema de regulación individual

El sistema de tensionado está basado en un mecanismo de frenado por fricción regulable, instalado de manera individual en cada carretel. Su funcionamiento es similar al de un regulador mecánico de presión: una perilla roscada comprime un resorte ubicado entre dos arandelas o superficies de fricción, aumentando la fuerza axial aplicada sobre el carretel.

Al ajustar la perilla, se modifica la compresión del resorte y, en consecuencia, la resistencia al giro del carretel. Una mayor compresión genera una fuerza de fricción superior, dificultando el desenrollado y aumentando la tensión de la mecha. Por el contrario, al aflojar la perilla disminuye el rozamiento y el carretel puede girar con mayor facilidad.

Este sistema permite regular individualmente la tensión de cada mecha y compensar posibles diferencias entre los carreteles. Además, evita el giro libre por inercia durante las aceleraciones, desaceleraciones o detenciones del carro, reduciendo la formación de bucles, aflojamientos y desenrollados excesivos de fibra.

La regulación final deberá realizarse durante la puesta a punto mediante un tensiómetro, ajustando cada perilla hasta alcanzar aproximadamente la misma tensión de salida en todas las mechas. De esta manera, se busca formar una banda uniforme y mantener una deposición estable sobre el mandril.

3.4.3 Selección de materiales de las guías

Las placas de guiado se fabricarán en acrílico, este material nos permite obtener una superficie liviana, de fácil mecanizado. Sin embargo, para evitar que la fibra de vidrio entre en contacto directo con los bordes de las perforaciones y produzca el desgaste progresivo de la placa, incorporaremos bujes independientes de PTFE en cada orificio.

El PTFE es elegido debido a su bajo coeficiente de fricción, buena resistencia química y adecuado comportamiento frente al deslizamiento continuo de las fibras. Los bujes presentarán

bordes redondeados para disminuir el rozamiento, evitar el deshilachado de las mechas y reducir las concentraciones de contacto.

Al tratarse de componentes desmontables e independientes, podrán reemplazarse periódicamente cuando se detecte un aumento del diámetro interno o deterioro superficial. De esta manera, el desgaste quedará concentrado en piezas económicas y sustituibles, evitando el reemplazo completo de la placa.

3.5. Sistema de impregnación

3.5.1. Diseño de la cubeta

La cubeta de impregnación fue diseñada con dimensiones aproximadas de 300 × 400 × 300 mm y será fabricada en acero inoxidable AISI 304, debido a su resistencia frente al contacto con la resina, su facilidad de limpieza y su durabilidad en ambientes industriales.

La cubeta será desmontable, permitiendo retirarla del carro para realizar las tareas de vaciado y mantenimiento sin intervenir sobre el resto del sistema. En su interior se dispondrá el rodillo de inmersión encargado de obligar a las mechas a atravesar el baño de resina antes de dirigirse hacia el distribuidor.

Durante el funcionamiento no se utilizará la capacidad total de la cubeta. Se mantendrá un espacio libre entre el nivel de la resina y el borde superior, con el objetivo de reducir el riesgo de derrames y salpicaduras durante las aceleraciones, desaceleraciones e inversiones del movimiento del carro.

Para el cálculo de la masa trasladada se consideró una carga aproximada de 25 kg de resina.

La cubeta no fue dimensionada para almacenar todo el material necesario para fabricar una tubería completa, ya que esto incrementa excesivamente la masa y la inercia del carro. En consecuencia, se prevé recargarla aproximadamente cinco o seis veces durante la fabricación de una tubería.

Esta configuración permite alcanzar un equilibrio entre la autonomía del proceso y la reducción de la masa móvil, disminuyendo las fuerzas requeridas durante la aceleración y el frenado del carro, así como las solicitaciones transmitidas a las guías, el accionamiento y la estructura del pórtico.

3.5.2. Rodillos de inmersión

Los rodillos de inmersión se dispondrán en el interior de la cubeta de manera que obliguen a las mechas a ingresar en la resina y atravesar el baño antes de dirigirse hacia el cabezal distribuidor.

Para el cuerpo de los rodillos se selecciona aluminio 6061-T6, debido a su baja densidad, adecuada resistencia mecánica, buena mecanizabilidad y resistencia a la corrosión. Su reducido peso contribuye además a disminuir la masa total del carro móvil.

La superficie exterior del rodillo será mecanizada y posteriormente sometida a un anodizado, con el objetivo de aumentar su resistencia al desgaste, facilitar la limpieza y evitar que irregularidades superficiales dañen las fibras. Los bordes presentan radios suaves y una terminación lisa para impedir el corte o deshilachado de las mechas.

Los ejes y elementos de fijación se fabrican en acero inoxidable AISI 304, material que presenta una elevada resistencia química y permiten evitar la aparición de óxido o contaminantes dentro de la resina.

3.6. Sistema de desplazamiento longitudinal del carro

3.6.1. Selección de las guías lineales

Para el desplazamiento longitudinal del carro se seleccionó un sistema compuesto por dos guías lineales HIWIN HGR 65 dispuestas en paralelo como se observa en ilustración 17, cada una equipada con dos patines de brida HGW65CA, totalizando cuatro patines. El recorrido útil previsto es de aproximadamente 7,5 m, mientras que el movimiento será producido mediante un sistema de piñón-cremallera.

La elección de dos guías paralelas permite distribuir el peso del carro entre ambos lados de la estructura y resistir no solamente las cargas verticales, sino también las fuerzas laterales y los momentos generados por la posición suspendida de los carreteles, la cubeta de resina y el resto de los componentes. La utilización de cuatro patines, separados longitudinal y transversalmente, aumenta la estabilidad del conjunto y reduce la tendencia del carro a inclinarse, girar o perder su alineación durante las etapas de aceleración, frenado e inversión.

Se adopta un coeficiente de diseño (k=3) para contemplar las incertidumbres asociadas al funcionamiento real del sistema.

La serie HG de HIWIN corresponde a guías de bolas diseñadas para aplicaciones de carga elevada. Su configuración utiliza cuatro hileras de bolas con puntos de contacto a 45°, lo que permite admitir cargas en las direcciones radial, radial inversa y lateral. Asimismo, la geometría de contacto proporciona una elevada rigidez y cierta capacidad de autoalineación frente a pequeños errores de montaje, favoreciendo un movimiento lineal uniforme.

El modelo HGW65CA es un patín de tipo brida y carga pesada. De acuerdo con el catálogo del fabricante, cada patín presenta una capacidad de carga dinámica básica de aproximadamente 213,2 kN y una capacidad de carga estática básica de 287,48 kN. También posee capacidades nominales frente a momentos de aproximadamente 6,65 kN·m, 5,87 kN·m y 5,87 kN·m, según el eje considerado.

La masa total trasladada por el carro se estimó preliminarmente en aproximadamente 220 kg, que es equivalente a un peso cercano a 2,15 kN. Incluso considerando un factor de carga de 3, la carga vertical de diseño sería del orden de 6,5 kN. En una distribución ideal entre cuatro patines, cada uno soportaría aproximadamente 1,6 kN, valor demasiado inferior en comparativa a las capacidades nominales del componente. Esta diferencia proporciona un margen suficiente para considerar la distribución no uniforme del peso, las cargas dinámicas, las vibraciones, la excentricidad del centro de gravedad y futuras ampliaciones del sistema portacarreteles.

La elevada capacidad seleccionada no responde únicamente al peso estático del carro. Dado que gran parte de la masa se encuentra suspendida por debajo de las guías, se generan momentos sobre los patines cuando el carro acelera o desacelera. La disposición de dos rieles y cuatro patines permite absorber estos momentos de forma más segura, manteniendo la plataforma estable y reduciendo las variaciones en la posición del distribuidor respecto del mandril.

Otra ventaja de las guías lineales de bolas es su reducido rozamiento en comparación con un sistema de deslizamiento convencional. Esto disminuye la fuerza necesaria para trasladar el carro, favorece el dimensionamiento del accionamiento piñón-cremallera y permite obtener un movimiento más suave. La precisión del guiado también contribuye a conservar la trayectoria longitudinal del distribuidor, que es condición necesaria para mantener constante el ángulo de bobinado y lograr una deposición uniforme.

Ilustración 18: Patines y guias seleccionados marca HIWIN

El patín HGW fue seleccionado en su configuración de brida debido a que presenta una superficie de montaje ancha, adecuada para vincular el carro mediante uniones abulonadas. Esta geometría facilita la distribución de las cargas sobre la estructura móvil y permite realizar el montaje o desmontaje sin intervenir sobre las guías completas. El fabricante señala que los patines de brida resultan adecuados para aplicaciones sometidas a momentos elevados por su mayor superficie de apoyo.

3.6.2 Dimensionamiento de la fuerza de accionamiento

Para seleccionar el sistema piñón-cremallera se determinaron las fuerzas máximas que deberá transmitir durante el desplazamiento del carro.

3.6.2.1 Velocidad máxima del carro:

La velocidad máxima del carro es:

$$Vmax = 40m/min \times 60s/min = 0,667m/s$$

Adoptaremos una aceleración de un segundo para alcanzar la velocidad máxima.

3.6.2.2 Aceleracion del carro:

La aceleración se obtiene mediante:

$$a = \Delta V/\Delta t a = \frac{0{,}667 m/s}{1\,s} = 0,667\ m/s^2$$

donde:

- a: aceleración [m/s²]
- ΔV: variación de velocidad [m/s]
- Δt: tiempo de aceleración [s]

3.6.2.3 Fuerza para acelerar el carro movil:

La fuerza necesaria para acelerar la masa móvil se calcula mediante la segunda ley de Newton.

$$F = m_{exp} \times a = 450\ kg \times 0,667\ m/s^2 = 300\ N$$

3.6.2.4 Peso del conjunto móvil:

El peso del carro se calcula mediante:

$$W = m_{exp} \times g = 450\ kg \times 9,81\ m/s^2 = 4414,5\ N$$

Del catálogo de HIWIN se indica que la resistencia al movimiento puede estimarse mediante:

$$Fr = \mu \times W = 0,004 \times 4414,5\ N = 17,66\ N$$

donde:

- m_{exp}: Masa del carro considerando una capacidad máxima de 18 carreteles - (expansión).
- Fr: fuerza de rozamiento [N]
- μ: coeficiente de fricción de la guía (0,004) - (dato fabricante)
- W: peso del sistema móvil [N]

3.6.2.5 Fuerza ejercida por las fibras:

La tensión total de las fibras resulta:

$$F_F = n_{exp} \times T = 18 \times 12N = 216N$$

donde se puede prever una expansión a 18 carreteles.

- Ff: fuerza total de las fibras [N]
- n_{exp}: número de mechas considerando una capacidad máxima de 18 carreteles - (expansión).
- T: tensión de cada mecha [N]

3.6.2.6 Fuerza longitudinal nominal:

La fuerza total necesaria para mover el carro resulta de sumar todas las solicitaciones.

$$F_N = F_a + F_R + F_F$$

$$F_N = 300\,N + 17,66\,N + 216\,N = 533,66\,N$$

3.6.2.7 Fuerza de diseño:

Se adopta un coeficiente de diseño igual a 3 para contemplar las incertidumbres asociadas al funcionamiento real del sistema, tales como variaciones de la carga, aceleraciones y desaceleraciones, posibles incrementos transitorios de la tensión de las fibras, desalineaciones y efectos dinámicos no contemplados en el modelo simplificado

$$F_{dis} = k \times F_N = 3 \times 533,66\,N = 1600,97\,N$$

donde:

- F_{dis}: fuerza de diseño [N]
- K: coeficiente de diseño adoptado
- F_N: fuerza longitudinal calculada [N]

3.6.3 Cálculos para la selección del piñón y cremallera

3.6.3.1 Diámetro primitivo:

Para el diseño del piñón de dientes rectos (ángulo de presión de 20°), adoptamos 25 dientes y un módulo inicial de 3 mm. La cantidad de dientes, evita el socavado y asegura un diámetro compatible con el carro, el módulo, responde a la fuerza tangencial y al espacio disponible. Ambas elecciones facilitan la fabricación con cremalleras normalizadas y no surgen de una única ecuación. Finalmente, todo el conjunto se validará mediante la ecuación de Lewis para verificar la resistencia a la flexión del diente.

El diámetro primitivo se calcula mediante:

$$d_{prim} = m \times z = 3 \times 25 = 75\,mm$$

donde:

- d_{prim}: diámetro primitivo [mm]
- m: módulo del engranaje [mm]
- z: cantidad de dientes

3.6.3.2 Diámetro exterior

$$D_{ext} = m \times (z + 2) = 3 \times (25 + 2) = 81\,mm$$

donde:

- d_{ext}: diámetro exterior [mm]
- m: módulo
- z: número de dientes

3.6.3.3 Avance por revolución

Cada vuelta del piñón desplaza el carro una longitud igual a la circunferencia primitiva.

$$L = \pi \times d_{prim} = \pi \times 75\,mm = 235,62\,mm$$

donde:

- L: avance lineal por revolución [mm]
- d_{prim}: diámetro primitivo [mm]

3.6.3.4 Velocidad de rotación del piñón

La velocidad angular del piñón se obtiene mediante

$$n = \frac{V}{\pi \times d_{prim}} \times 60 = \frac{0{,}667 m/s}{\pi \times 0{,}075\,m} \times 60 = 169,8\,rpm$$

donde:

- n: velocidad del piñón [rpm]
- V: velocidad lineal [m/s]
- dp: diámetro primitivo [m]
- 60: conversión de rps a rpm

3.6.3.5 Par transmitido

El par requerido en el eje del piñón se determina considerando que la fuerza tangencial de diseño actúa sobre el radio primitivo del engranaje. Por lo tanto:

$$T = F_{dis} \times r_{prim} = 1600,97\ N \times 0,0375\ m = 60\ Nm$$

Este valor representa el par mínimo que debe proporcionar el accionamiento en el eje del piñón bajo la condición de carga de diseño.

3.6.3.6 Potencia mecánica

La potencia requerida es:

$$P = F_{dis} \times V = 1600,97\ N \times 0,667 m/s = 1067\ W = 1,07\ kW$$

3.6.3.7 Verificación del factor de seguridad del piñón

Luego del dimensionamiento, se verifica la resistencia del diente del piñón frente a una falla estática por flexión. Se adopta un ancho de dentado de 30 mm, compatible con el módulo previamente seleccionado y con las dimensiones constructivas previstas para el piñón. Este ancho permite distribuir la fuerza tangencial sobre una superficie de contacto suficiente y mantener una geometría compacta del elemento. El valor adoptado se incorpora al cálculo de flexión del diente y queda posteriormente verificado mediante el factor de seguridad obtenido.

La tensión de flexión se calcula mediante la ecuación simplificada de Lewis:

$$\sigma F = \frac{F_{dis}}{(b \times \pi \times m \times y)} = \frac{1600,97\ N}{(30mm \times \pi \times 3mm \times 0,11752)} = 48,2\ MPa$$

donde:

- **σF**: tensión de flexión en la base del diente [MPa].
- **Fd**: fuerza tangencial de diseño [N].
- **b**: ancho del dentado [mm].
- **m**: módulo del engranaje [mm].
- **y**: factor geométrico de Lewis.

El factor de seguridad frente a la fluencia del material se determina mediante:

$$FS = \frac{\sigma y}{\sigma F}$$

donde:

- **FS**: factor de seguridad estático del diente.
- **σy**: límite de fluencia del acero SAE 1045 [MPa].
- **σF**: tensión de flexión calculada [MPa].

Para acero SAE 1045 se adopta un límite de fluencia de 310 MPa correspondiente al valor considerado para la condición de material seleccionado. Este valor se utilizará como referencia para comparar la tensión de flexión calculada en el pie del diente con la capacidad resistente del material.

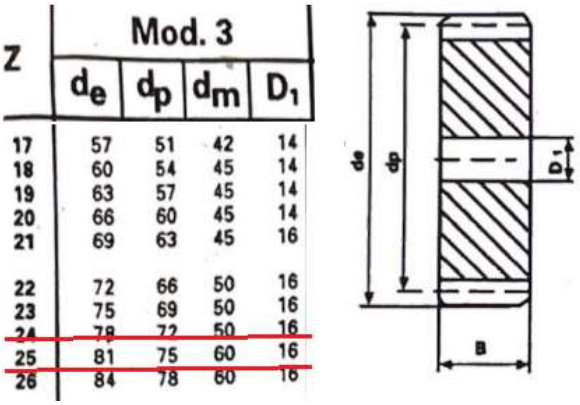
Reemplazando:

$$FS = \frac{310\ MPa}{48{,}2\ MPa} = 6,4$$

FS: indica que, bajo la condición de carga estática analizada, el diente del piñón posee una resistencia aproximadamente 6,4 veces superior a la tensión generada por la fuerza de diseño.

3.6.3.8 Seleccion del piñón

Una vez realizado el dimensionamiento geométrico y resistente del sistema de transmisión, se procedió a buscar un conjunto comercial que cumpliera con los parámetros obtenidos. Se seleccionaron componentes fabricados por **Poleas Industriales S.R.L.,** empresa argentina dedicada a la fabricación de elementos de transmisión mecánica, que dispone tanto de engranajes rectos estándar como de cremalleras de dentado recto.



Z	Mod. 3			
	d_e	d_p	d_m	D_1
17	57	51	42	14
18	60	54	45	14
19	63	57	45	14
20	66	60	45	14
21	69	63	45	16
22	72	66	50	16
23	75	69	50	16
24	78	72	50	16
25	81	75	60	16
26	84	78	60	16

Ilustración 19: Selección de piñón de Poleas Industriales. [22]

Mod.	L			
	250	500	1000	2000
	A x B	A x B	A x B	A x B
1	15 x 15	15 x 15	15 x 15	15 x 15
1,5	17 x 17	17 x 17	17 x 17	17 x 17
2	20 x 20	20 x 20	20 x 20	20 x 20
2,5	25 x 25	25 x 25	25 x 25	25 x 25
3	30 x 30	30 x 30	30 x 30	30 x 30

Ilustración 20: Selección de cremallera de Poleas Industriales [21]

3.6.4. Cálculos para la selección del motor

3.6.4.1 Velocidad de salida del reductor

La velocidad de salida se calcula dividiendo la velocidad nominal del motor por la relación de transmisión del reductor. Incorporar esta etapa entre el servomotor y el piñón permite adaptar la alta velocidad de giro a las exigencias del sistema piñón-cremallera. Además, este mecanismo incrementa el par disponible en el eje de salida. Se adopta inicialmente una relación de transmisión teórica de aproximadamente 15:1. Para la selección comercial se verifica el catálogo SIMOGEAR, seleccionándose el reductor helicoidal Z.39 con relación normalizada i = 14,79 y adaptador KS5.2, compatible con el servomotor SIMOTICS S-1FL605LI.

$$n_{salida} = n_{motor} / i = 3000\, rpm/15 = 200\, rpm$$

donde:

- **n_{salida}**= velocidad de salida del reductor [rpm].
- **n_{motor}** = velocidad nominal del servomotor [rpm].
- **i** = relación de transmisión del reductor.

La velocidad de 200 rpm del piñón equivale a la nominal de 3000 rpm del servomotor. Sin embargo, para alcanzar la velocidad máxima del carro de 40 m/min, el piñón solo requiere operar

a 170 rpm. El servodrive comandará al motor a la velocidad exacta correspondiente a esa exigencia, evitando que trabaje a su régimen nominal. Así, la nueva velocidad del servomotor se calculará de forma proporcional.

3.6.4.2 Velocidad lineal del carro correspondiente a la velocidad nominal del motor:

La velocidad del carro correspondiente de la máquina se calcula mediante:

$$V_{carro} = \pi \times D \times n_{salida} = \pi \times 0,075 \times 200 = 47,1\, m/min$$

donde:

- **V_{carro}** = velocidad lineal del carro respecto a velocidad nominal del servomotor [m/min].
- **D** = diámetro del cilindro motriz [m].
- **n_{salida}** = velocidad de salida del reductor [rpm].

3.6.4.3 Velocidad requerida del servo motor para la velocidad lineal máxima.

Para limitar la velocidad de trabajo a 40 m/min, la velocidad de salida del reductor debe ser aproximadamente:

$$n_{salida} = 170\, rpm$$

Por lo tanto, para alcanzar la velocidad lineal máxima de diseño de 40 m/min, el servomotor deberá operar aproximadamente:

$$n_{motor} = n_{salida}/i = 170\ rpm \times 15 = 2550\, rpm$$

Este valor se encuentra por debajo de la velocidad nominal del servomotor de 3000 rpm, por lo que la velocidad del carro puede ser regulada mediante el servodrive, limitando la velocidad máxima de desplazamiento al valor establecido en el diseño

3.6.4.4 Par nominal del servomotor

El par nominal del motor se calcula a partir de la potencia y de la velocidad angular:

$$T_m = P \times \omega$$

donde la velocidad angular es:

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{n}{60}$$

Reemplazando:

$$T_m = \frac{2000\,W}{2\pi \cdot \frac{3000\,rpm}{60}} = 6,37\,Nm$$

donde:

- **T_m** = par nominal del motor [N.m].
- **P** = potencia del motor [W].
- **ω** = velocidad angular [rad/s].
- **n** = velocidad del motor [rpm].

3.6.4.5 Par disponible a la salida del reductor

El par de salida se obtiene multiplicando el par del motor por la relación de transmisión y por el rendimiento del reductor:

$$T_{salida} = T_m \times i \times \eta = 6,37\,Nm \times 15 \times 0,95 = 90,8\,Nm$$

donde:

- **T_{salida}** = par disponible a la salida del reductor [N.m].
- **i** = relación de transmisión.
- **η** = eficiencia del reductor (0,95).

Este valor es superior al par de diseño de 60 N·m, por lo que la selección del servomotor y del reductor resulta adecuada.

3.6.4.6 Seleccion de servomotor y reductor

Se seleccionó el servodrive Siemens SINAMICS V90 en conjunto con el servomotor SIMOTICS S-1FL6, observable en ilustración 21 , debido a que ambos equipos forman un sistema servo compatible y permiten controlar con precisión la velocidad y posición del accionamiento. El servomotor incorpora un encoder que permite realimentar la posición y velocidad al servodrive, posibilitando una regulación precisa del movimiento del carro.

En conjunto con este sistema de accionamiento, se selecciona el reductor SIMOGEAR Z.39 observable en ilustración 22, con una relación de transmisión normalizada i = 14,79:1, el cual

permite adaptar la velocidad del servomotor a los requerimientos del sistema y, al mismo tiempo, incrementar el par disponible en el eje de salida para el accionamiento del piñón.

Esta configuración resulta adecuada para el accionamiento del sistema piñón-cremallera, ya que permite obtener la velocidad máxima requerida de 40 m/min sin superar la velocidad nominal del servomotor, mientras que el conjunto reductor permite incrementar el par disponible en el eje del piñón. Asimismo, la utilización de una relación comercial normalizada de 14,79:1 permite reemplazar la relación teórica inicialmente adoptada de 15:1 por una solución comercial concreta respaldada por catálogo.

System overview

Clicking to SiePortal

6SL3255-0AA00-5AA0

SINAMICS V90 basic servo drive system

Selection and ordering data

SIMOTICS S-1FL6 servomotors ➡ Configuration with adapter for mounting on SIMOGEAR Gearboxes and SIMOGEAR Gearboxes
Further info in section SIMOTICS S-1FL6 servomotors

Max. speed n_{max} rpm	Rated power [1] P_N at ΔT=100 K kW (hp)	Static torque M_0 at ΔT=100 K Nm	Rated torque [1] M_N at ΔT=100 K Nm	Max. torque [1] M_{max} Nm	Rated current I_N at ΔT=100 K A	Max. current I_{max} A	Article No.	Torque constant Nm/A	Moment of inertia of rotor $J_{without\ brake}$ 10^{-4} kgm²	$J_{with\ brake}$ 10^{-4} kgm²	Recommended load to motor inertia ratio, max.	Weight [2] $m_{without\ brake}$ kg	$m_{with\ brake}$ kg
SIMOTICS S-1FL6 High Inertia servomotors – Smooth operational performance													
Shaft height 45 – Rated speed n_N 3000 rpm													
4000	0.4 (0.54)	1.9	1.27	3.8	1.2	3.6	**1FL6042-1AF61-2 ■ ■ 1**	1.1	2.7	3.2	10×	3.4	4.8
4000	0.75 (1.02)	3.5	2.39	7.2	2.1	6.3	**1FL6044-1AF61-2 ■ ■ 1**	1.2	5.2	5.7		5.2	6.6
Shaft height 65 – Rated speed n_N 2000 rpm													
3000	0.75 (1.02)	4	3.58	10.7	2.5	7.5	**1FL6061-1AC61-2 ■ ■ 1**	1.5	8	9.1	5×	5.7	8.8
3000	1 (1.36)	6	4.78	14.3	3	9	**1FL6062-1AC61-2 ■ ■ 1**	1.7	11.7	13.5		7	10.1
3000	1.5 (2.04)	8	7.16	21.5	4.6	13.8	**1FL6064-1AC61-2 ■ ■ 1**	1.6	15.3	16.4		8.4	11.5
3000	1.75 (2.38)	11	8.36	25.1	5.3	15.9	**1FL6066-1AC61-2 ■ ■ 1**	1.7	22.6	23.7		11.1	14.2
3000	2 (2.72)	15	9.55	28.7	5.9	17.7	**1FL6067-1AC61-2 ■ ■ 1**	1.7	29.9	31		13.7	16.8
Shaft height 90 – Rated speed n_N 2000 rpm													
3000	2.5 (3.40)	15	11.9	35.7	7.8	23.4	**1FL6090-1AC61-2 ■ ■ 1**	1.6	47.4	56.3	5×	15.4	21.5

SIMOTICS S-1FL6 servomotors for SINAMICS V90

Overview

Optimized servomotor solution for motion control applications

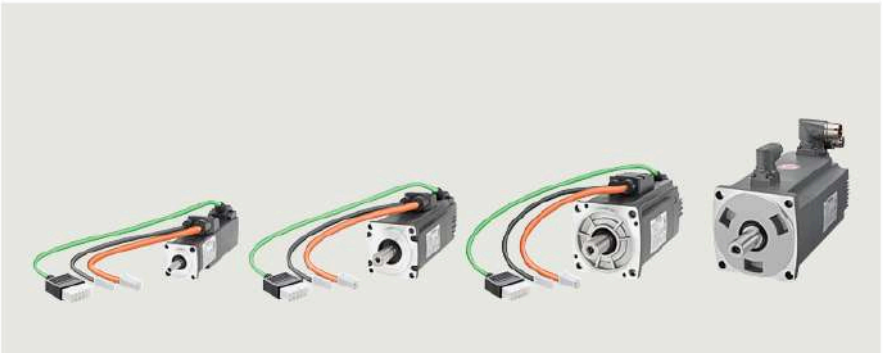


Ilustración 21: Servomotor SINAMICS V90 [24]

SIMOGEAR gearboxes
Helical gearboxes

Transmission ratios and torques

Selection and ordering data

Gearbox i -	n_2 rpm	T_{2N} Nm	F_{R2} N	ϕ [1] '	J_G 10^{-4} kgm²	R_{ex} -	Adapter K4	63	71	80	90	100	112	132	160	180	200	225	250			Article No. (Article No. supplement, see below)
							K2			80	90	100	112	132	160	180	200	225	250	280	315	
							KS		3.1		5.1	6.1	8.1	10.1								
									3.2		5.2	6.2		10.2								
									4.1													
									4.2													
							K8									813		816		818		
							K5		56		140	180		210	250	280		320	360			
							K3		56		140	180		210	250	280						
							A/AZ			80	90	100	112	132	160	180	200	225	250			
Z.39																						
55.95	26	200	4370	7.7	0.06	7553/135		✓	✓													2KJ3103 - ■■A0■-0■A2
49.75	29	200	4370	7.7	0.07	3731/75		✓	✓	✓	✓											2KJ3103 - ■■A0■-0■X1
43.68	33	200	4070	7.8	0.08	1092/25		✓	✓	✓	✓											2KJ3103 - ■■A0■-0■W1
39.71	37	200	3790	7.8	0.10	2184/55		✓	✓	✓	✓											2KJ3103 - ■■A0■-0■V1
33.97	43	200	3340	7.9	0.12	2548/75		✓	✓	✓	✓											2KJ3103 - ■■A0■-0■U1
30.88	47	200	3080	7.9	0.14	5096/165		✓	✓	✓	✓											2KJ3103 - ■■A0■-0■T1
27.30	53	200	2760	8.0	0.17	273/10		✓	✓	✓	✓	✓[2]	✓[2][3]									2KJ3103 - ■■A0■-0■S1
24.82	58	200	2520	8.0	0.22	273/11		✓	✓	✓	✓	✓[2]	✓[2][3]									2KJ3103 - ■■A0■-0■R1
21.74	67	200	2190	8.1	0.25	3913/180		✓	✓	✓	✓	✓[2]	✓[2][3]									2KJ3103 - ■■A0■-0■Q1
20.07	72	200	2000	8.1	0.31	301/15		✓	✓	✓	✓	✓[2]	✓[2][3]									2KJ3103 - ■■A0■-0■P1
17.77	82	200	1720	8.3	0.36	533/30		✓	✓	✓	✓	✓[2]	✓[2][3]									2KJ3103 - ■■A0■-0■N1
14.79	98	193	1500	8.4	0.47	1183/80		✓	✓	✓	✓	✓[2]	✓[2][3]									2KJ3103 - ■■A0■-0■M1
13.92	104	189	1470	8.4	0.55	1183/85		✓	✓	✓	✓	✓[2]	✓[2][3]									2KJ3103 - ■■A0■-0■L1
12.47	116	180	1470	8.6	0.60	3367/270		✓	✓	✓	✓	✓[2]	✓[2][3]									2KJ3103 - ■■A0■-0■K1

SIMOGEAR gearboxes
Helical geared motors

Orientation

SIMOGEAR helical gearboxes Z and D

Ilustración 22: Reductor SIMOGEAR Z39 [23]

3.7. Diseño de la estructura tipo pórtico

3.7.1. Configuración estructural

Para la viga superior del pórtico se evaluaron perfiles de sección **C** y perfiles **doble T**. Aunque ambos pueden resistir las cargas verticales del carro, el perfil C presenta una geometría no

simétrica, por lo que su centro de corte no coincide necesariamente con el punto de aplicación de la carga. Debido al movimiento, la aceleración y el frenado del carro, esta excentricidad podría generar momentos torsores sobre la viga, provocando giros o desalineaciones capaces de afectar el correcto desplazamiento de los patines sobre las guías lineales.

En cambio, el perfil doble T posee una sección doblemente simétrica, con una distribución más equilibrada del material respecto de sus ejes principales. Esta característica reduce considerablemente la tendencia a la torsión cuando las cargas se aplican de manera centrada y proporciona una elevada rigidez a flexión en el plano vertical. De esta manera, se busca conservar la alineación de las guías y disminuir el riesgo de que el movimiento dinámico del carro produzca desplazamientos laterales, trabas o una distribución irregular de las cargas sobre los patines.

La selección del perfil doble T también responde a un criterio de ampliación futura. La sección se dimensionó con un margen superior al requerido por la configuración inicial, de modo que la máquina pueda incorporar una mayor cantidad de carreteles sin necesidad de reemplazar la estructura principal. El aumento del número de carreteles permitiría formar una banda de fibras más ancha, depositar una mayor cantidad de material en cada pasada y reducir el tiempo total de fabricación de las tuberías.

El desplazamiento del carro sobre la viga superior genera no sólo cargas verticales, sino también solicitaciones dinámicas, vibraciones y fuerzas horizontales asociadas con las etapas de aceleración, frenado e inversión del movimiento. Además, cualquier pequeña desalineación entre las guías o excentricidad en la posición del centro de gravedad del carro puede producir momentos torsores sobre la viga y afectar la correcta distribución de las cargas entre los patines.

Por este motivo se descartaron perfiles de alas estrechas, como el IPE 400, cuyo ancho de ala es de aproximadamente 180 mm. En su lugar se seleccionó un perfil **IPB 400**, con una altura aproximada de 400 mm y un ancho de alas de 300 mm. La mayor separación transversal entre los extremos de las alas proporciona una rigidez superior frente a las solicitaciones laterales y reduce la tendencia al giro de la sección cuando el carro acelera o frena con una carga suspendida.

Esta geometría mejora la estabilidad del conjunto y disminuye el riesgo de que la torsión o la flexión lateral de la viga provoquen una pérdida de alineación entre las guías lineales. De esta manera, se reducen las posibilidades de sobrecarga desigual en los patines, aumento del

rozamiento, trabas durante el desplazamiento o salida del carro respecto de su trayectoria prevista.

A su vez, la mayor rigidez del perfil reduce la susceptibilidad de la viga al pandeo lateral/torsional y permite mantener deformaciones reducidas durante el funcionamiento dinámico de la máquina.

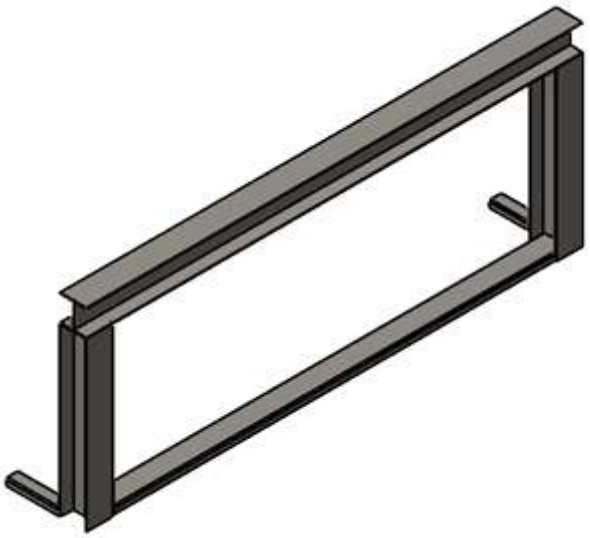
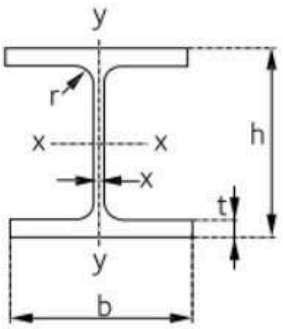


Ilustración 23: Vista isométrica del pórtico

I.P.B. (grey mediano HEB)

Usos y aplicaciones
Se utilizan como vigas, columnas y canales para diversas aplicaciones estructurales.



I.P.B.	Dimensiones				Sección	Masa nominal por unidad de longitud	Valores estáticos			
	h	b	s	t	S	m_N	I_x	I_y	W_x	W_y
	mm	mm	mm	mm	cm²	kg/m	cm⁴	cm⁴	cm³	cm³
340	340	300	12,0	21,5	171,0	134,0	36.650	9.690	2.160	646
360	360	300	12,5	22,5	181,0	142,0	43.190	10.140	2.400	676
400	400	300	13,5	24,0	198,0	155,0	57.680	10.820	2.880	721
450	450	300	14,0	26,0	218,0	171,0	79.890	11.720	3.550	781
500	500	300	14,5	28,0	239,0	187,0	107.200	12.620	4.290	842

Ilustración 24: Imagen extraída de tablas y equivalencias grupo Arcelor Mittal.

3.7.2 Verificación de la estructura

Para verificar la resistencia y rigidez del pórtico se realizó un análisis estático mediante el método de elementos finitos en SolidWorks Simulation.

La condición evaluada corresponde a la ubicación más desfavorable del carro, situado aproximadamente en el centro de la viga superior, donde se produce el mayor momento flector y, por lo tanto, la mayor deformación vertical.

Como observamos en la ilustración 25, sobre la zona de apoyo del carro se aplicó una carga vertical total de 8000 N. Este valor representa aproximadamente tres veces la carga estimada para las condiciones normales de funcionamiento, por lo que se adoptó un factor de amplificación de 3 para considerar posibles sobrecargas, efectos dinámicos asociados con el movimiento del carro y una futura ampliación de la cantidad de carreteles.

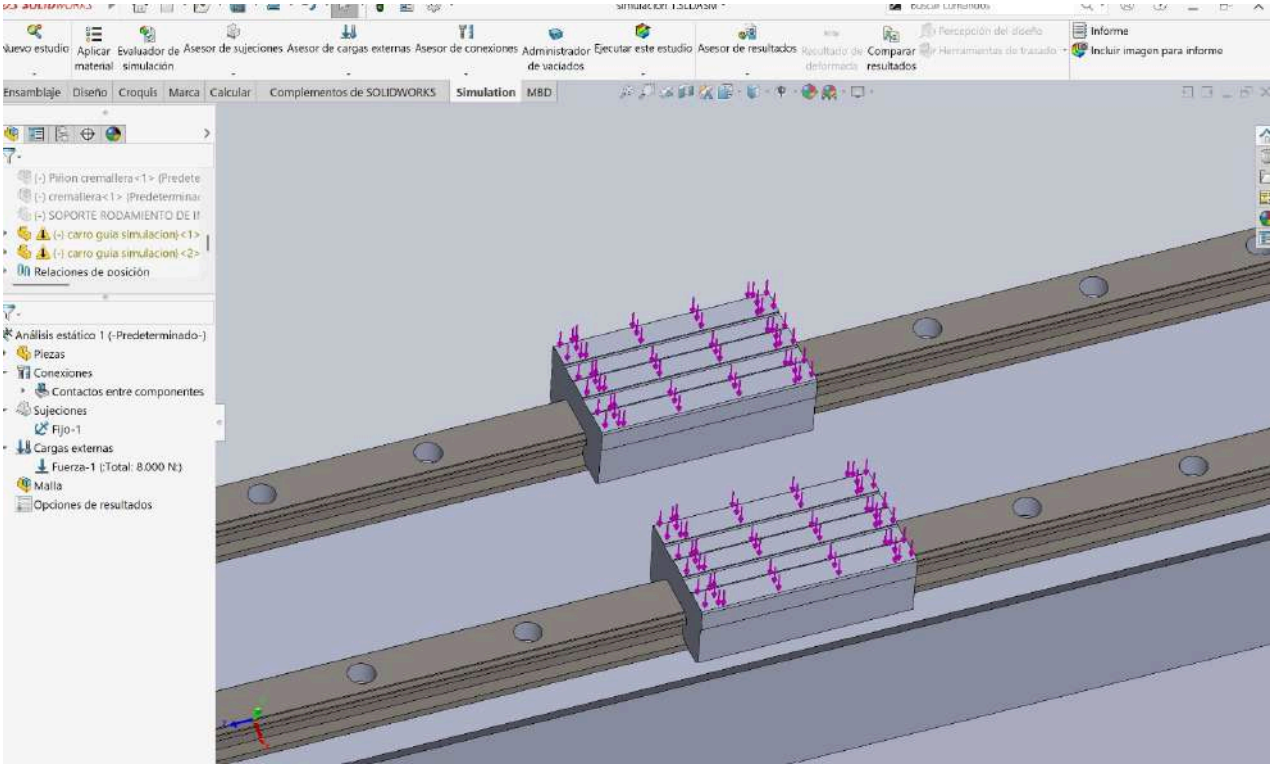


Ilustración 25: Simulación de carga aplicada sobre patines

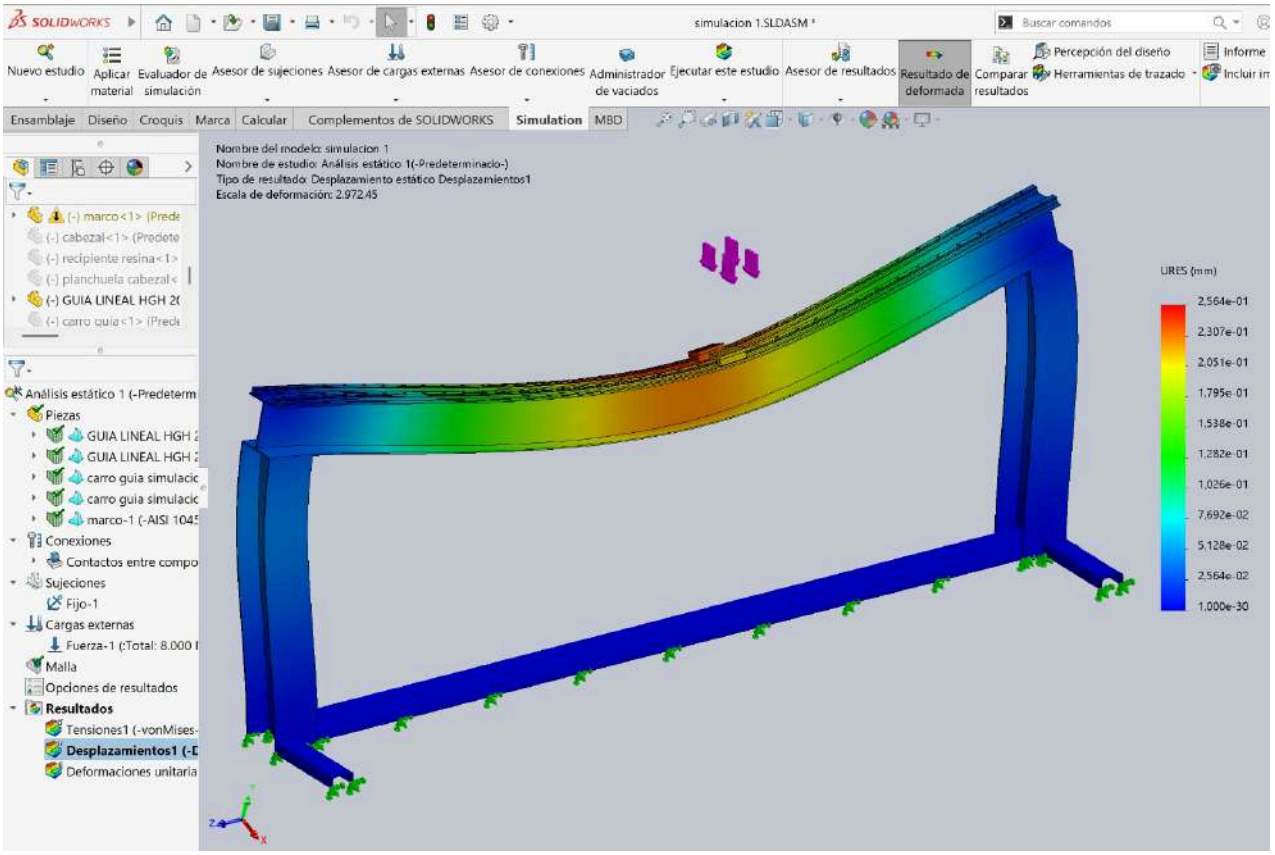


Ilustración 26: Simulación de carga sobre el pórtico - desplazamiento

En la ilustración 26 se presenta el desplazamiento resultante de la estructura. La escala de colores indica la magnitud de la deformación: las zonas azules corresponden a desplazamientos prácticamente nulos, principalmente en los apoyos inferiores, mientras que los colores verde, amarillo y naranja muestran el aumento progresivo de la deformación hacia el centro de la viga superior. El desplazamiento máximo obtenido fue de aproximadamente:

$$\delta max = 0,256\, mm$$

Este valor se localiza en la región central de la viga, coincidiendo con la zona de aplicación de la carga. La forma deformada representada por SolidWorks se encuentra ampliada aproximadamente **2972 veces**, únicamente para facilitar su visualización; por lo tanto, la curvatura observada en la imagen no corresponde a la deformación real del pórtico.

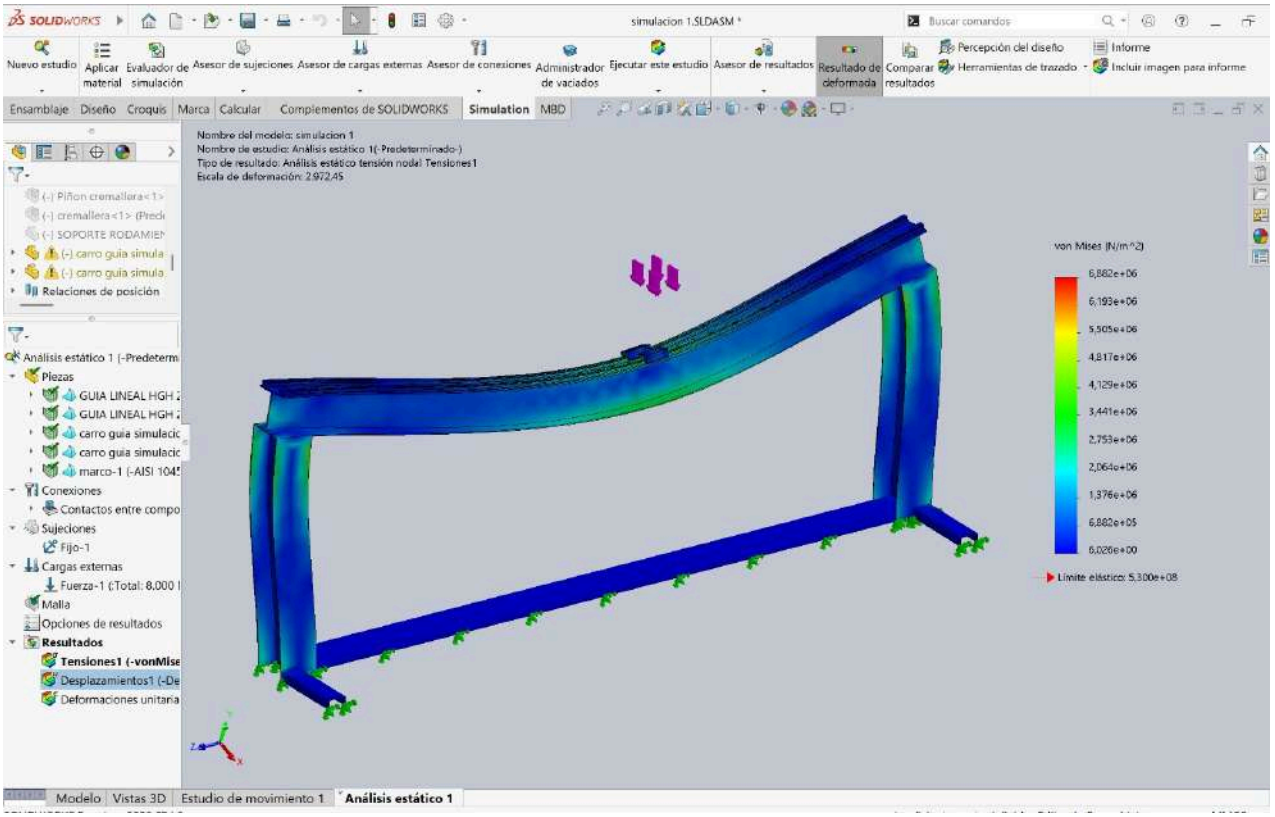


Ilustración 27: Simulación de carga sobre el pórtico - Tensiones Máximas Von Mises

El análisis de tensiones arrojó una tensión equivalente máxima de von Mises de aproximadamente:

$$\sigma_{VMmax} = 6,88\ MPa$$

Considerando para el perfil un acero estructural F-24, con un límite de fluencia aproximado de 240 MPa, el factor de seguridad frente a la fluencia resulta:

$$n = 240\ MPa/6,88\ MPa = 34,9$$

Los resultados obtenidos indican que, aun bajo una carga amplificada tres veces respecto de la condición normal estimada, las tensiones permanecen considerablemente por debajo del límite de fluencia y la deformación vertical de la viga es reducida. En consecuencia, el perfil IPB 400 presenta resistencia y rigidez suficientes para la condición crítica analizada, además de conservar un margen estructural para futuras ampliaciones del sistema portacarretes.

Conclusiones

Este proyecto nos fue muy enriquecedor a nivel profesional debido a que nos permitió desarrollar una solución conjunta para la fabricación de tuberías de PRFV partiendo del relevamiento de una problemática industrial real, avanzando desde la identificación de las principales problemáticas del proceso actual hasta el dimensionamiento de los componentes de una nueva maquinaria.

Uno de los aspectos más importantes del trabajo fue la aplicación de los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de Ingeniería Mecánica. El dimensionamiento estructural requirió conceptos de estática, resistencia de materiales y análisis de tensiones y deformaciones; el diseño de los ejes y la transmisión nos permitió aplicar criterios de elementos de máquinas, flexión, engranajes, relaciones de transmisión, par, potencia y factores de seguridad; mientras que el movimiento del carro involucra conceptos de dinámica, rozamiento, aceleración y selección de accionamientos.

La selección de materiales nos exigió considerar de manera simultánea propiedades mecánicas, masa, resistencia a la corrosión, desgaste, mecanizado y condiciones de servicio. Asimismo, el modelado tridimensional y la simulación por elementos finitos nos permitieron complementar los cálculos analíticos y verificar el comportamiento de la estructura frente a las condiciones de carga establecidas.

Otro aprendizaje relevante fue comprender que el diseño de una máquina debe abordarse como un sistema completo. La modificación de una variable, como la cantidad de carreteles o la velocidad del carro, repercute sobre la masa móvil, la productividad, las guías, la estructura, el accionamiento y la potencia requerida. Esto obligó a evaluar constantemente soluciones de compromiso y a compatibilizar los resultados teóricos con componentes comerciales, dimensiones normalizadas y criterios de fabricación, montaje y mantenimiento.

En este sentido, el carácter innovador de la propuesta se encuentra principalmente en la integración de sus subsistemas y en la disposición tipo pórtico. Frente a una devanadora convencional, la solución desarrollada busca ofrecer un mayor control del recorrido y la tensión de las fibras, una mejor separación entre la zona de proceso y los mecanismos de precisión, mayor accesibilidad para mantenimiento y una estructura más adaptable a distintos requerimientos de fabricación.

Por tratarse de la última instancia académica de la carrera, este Proyecto Final resultó especialmente valioso como ejercicio integrador. Nos permitió comprobar cómo conceptos que durante la formación se estudian de manera separada deben combinarse para resolver un problema real de ingeniería. El trabajo permitió pasar del cálculo aislado de componentes a la toma de decisiones sobre un sistema mecánico completo, incorporando además criterios de seguridad, fabricación, selección comercial, mantenimiento y viabilidad constructiva.

Finalmente, el proyecto permitió transformar una necesidad concreta de la industria en una propuesta de ingeniería fundamentada mediante cálculos, selección de componentes, diseño tridimensional y verificación estructural. Si bien la construcción y validación experimental del prototipo quedan fuera del alcance del trabajo, el desarrollo realizado establece una base técnica para avanzar hacia una devanadora más controlable, adaptable y segura, y constituye una síntesis práctica de los conocimientos y criterios de diseño adquiridos durante la formación como ingenieros mecánicos.

Referencias bibliográficas

[1] ISO 23856:2021 - Plastics piping systems for pressure and non-pressure water supply, drainage or sewerage — Glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) systems based on unsaturated polyester (UP) resin

[2] ISO 10639:2017 - Plastics piping systems for pressure and non-pressure water supply — Glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) systems based on unsaturated polyester (UP) resin

[3] AWWA COMMENT PERIOD ON AWWA C950, Fiberglass Pressure Pipe - American Water Works Association

[4] FLOWTITE Pipe Systems. Documento técnico sobre sistemas de tuberías de PRFV.

[5] GRP Irrigation Pipes & Agricultural Water Supply | Amiblu. Documento técnico de aplicaciones agrícolas y sistemas de riego.

[6] ISO 10467:2018 - Plastics piping systems for pressure and non-pressure drainage and sewerage — Glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) systems based on unsaturated polyester (UP) resin

[7] GRP/GRE Industrial Piping & Cooling Water Pipes | Amiblu.

[8] GRP Penstocks for Hydropower | High-Pressure Pipes | Amiblu.

[9] Fiber Glass Systems | Fiberglass Pipeline Solutions | NOV

[10] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API Specification 15HR: High-Pressure Fiberglass Line Pipe. Cuarta edición. Washington, D. C.: API, 2016.

[11] Bondstrand® LPA Series Documento técnico para líneas de petróleo, gas, agua de inyección y salmueras.

[12] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Subcommittee 15: Fiberglass and Plastic Tubular Standards**. Información sobre normas aplicables a la industria de exploración y producción de petróleo y gas.

[13] Our Industry & Products – Glass Fibre

[14] Amiblu Supports Sewer Upgrade Beneath Melbourne's Yarra River. Caso de aplicación de tuberías de PRFV mediante rehabilitación y microtunelado.

[15] Bristol, Gipsy Patch Lane, structual rehabiliation with Amiblu Hobas pipes

[16] Filament Winding (Flowtite Technology) - Amiblu

[17] The Pultrusión Process

[18] Tuberías de PRFV para circuito de refrigeración | Tadipol

[19] New GRP penstock for hydropower plant Ovadas, Portugal

[20] (PDF) PROGRESSIVE FAILURE ANALYSIS OF FILAMENT WOUND COMPOSITE TUBES UNDER INTERNAL PRESSURE

[21] Poleas Industriales Cremallera

[22] Poleas Industriales Pinon

[23] REDUCTOR SIMOGEAR Z39

[24] SINAMICS V90 Basic Servo Drive System

ANEXO 1

Plano de conjunto - Máquina devanadora integral

Plano de fabricación - Mandril

Plano de fabricación - Eje

Plano de fabricación - Soporte eje

Plano de fabricación - Piñon cremallera

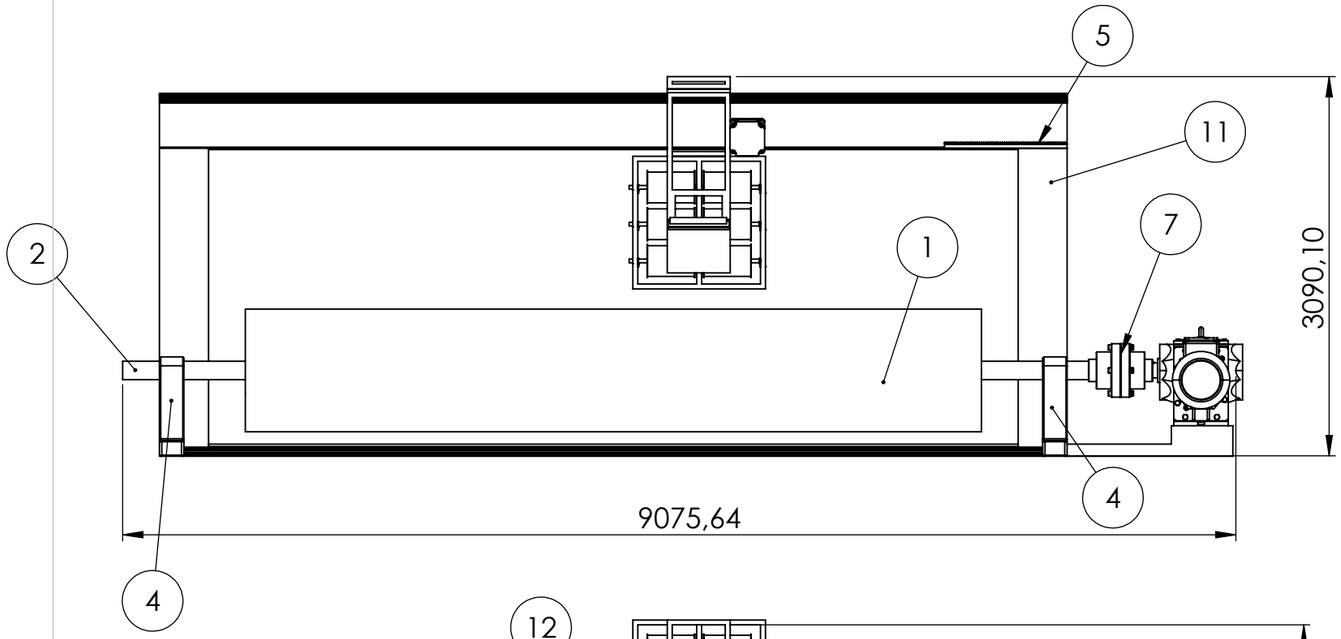
Plano de fabricación - Cubeta para resina

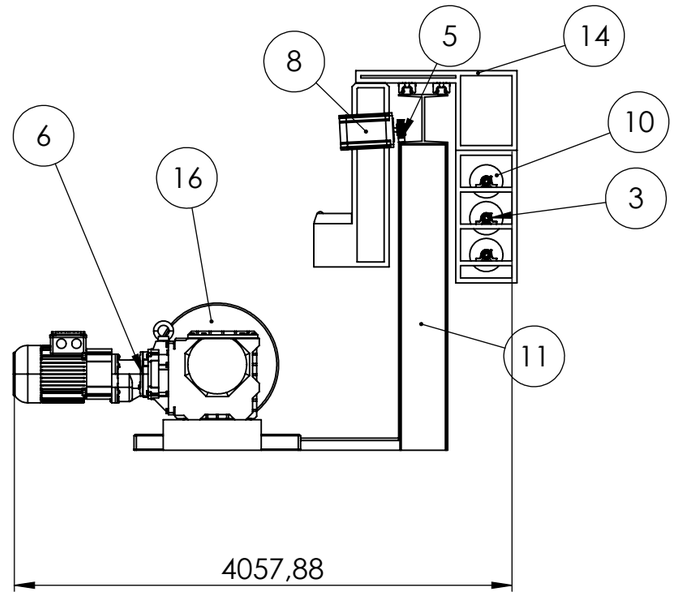
Plano de fabricación - Pórtico

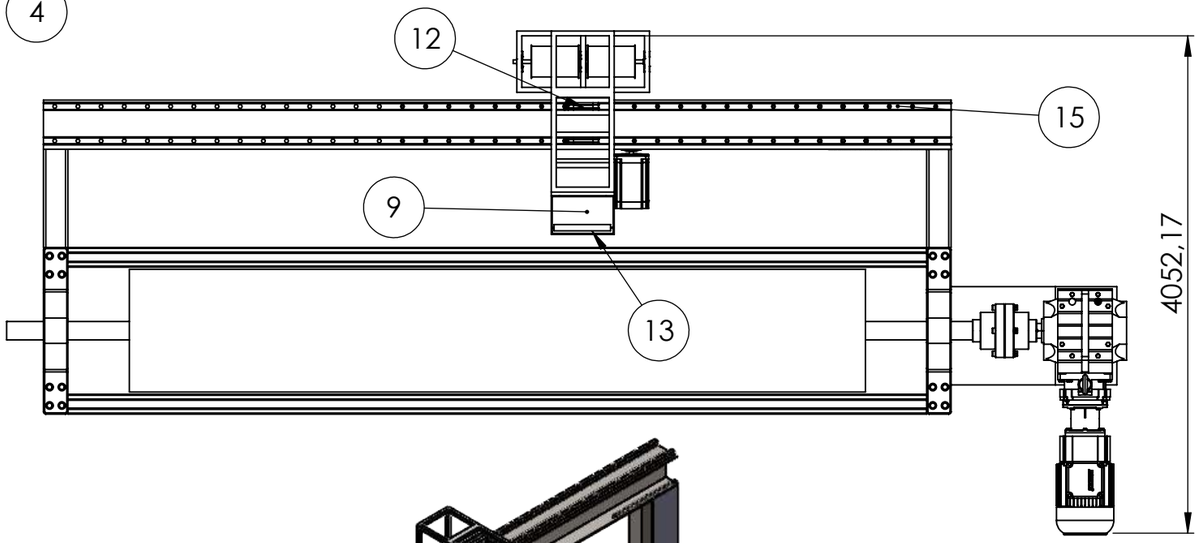
Plano de fabricación - Patín guía

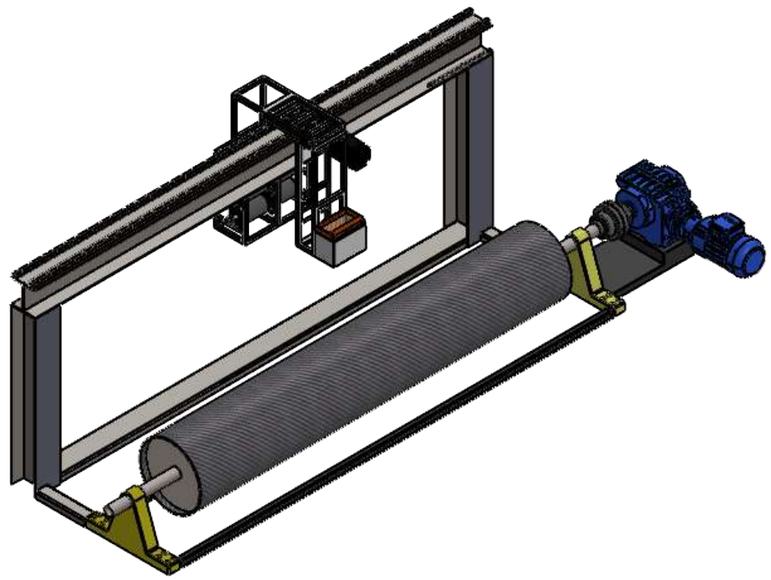
Plano de fabricación - Carro guia

Plano de fabricación - Tapa cilindro









VISTA ISOMÉTRICA

MEDIDAS EN MILIMETROS

POS.	DENOMINACIÓN	MATERIAL	CANT.
16	TAPA CILINDRO	SAE 1010	2
15	GUIA DE PERFIL CUADRADO	COMERCIAL	2
14	CARRO GUIA	ASTM 36	1
13	RODILLO TENSOR	GRILON	1
12	PATIN DE GUIA	COMERCIAL	2
11	PORTICO	ASTM 36	1
10	CARRETEL	COMERCIAL	6
9	CUBETA PARA RESINA	316L	1
8	SERVOMOTOR	COMERCIAL	1
7	ACOPLE	COMERCIAL	1
6	MOTORREDUCTOR	COMERCIAL	1
5	PIÑON CREMALLERA	SAE 1045	1
4	SOPORTE DE EJE	FUNDICION	2
3	SOPORTE DE RODAMIENTO	FUNDICION	9
2	EJE	SAE 1045	1
1	CILINDRO	SAE 1045	1

	FECHA	APELLIDO Y NOMBRE	FIRMA
DIBUJO	12/9/2026	MANGIATERRA - ARRABAL	
REVISO			
APROBO			

ESC.: 1:50

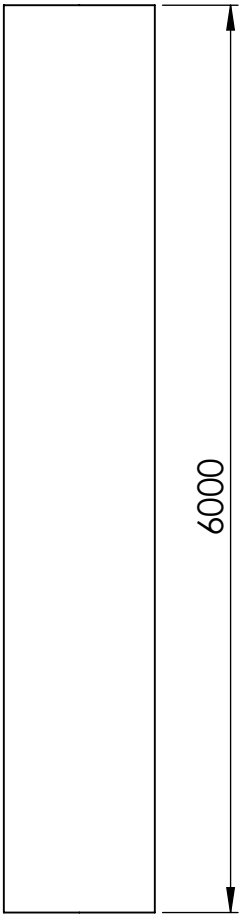
TOL.:

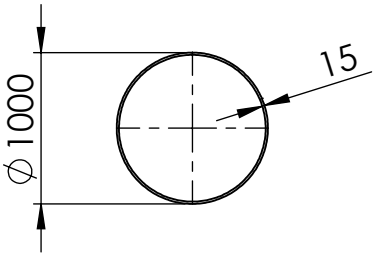
MÁQUINA DEVANADORA INTEGRAL

PLANO DE CONJUNTO

ING. Y DESARROLLO

Observacione: Rolar una vez, puntear y rolar nuevamente para garantizar cilindricidad

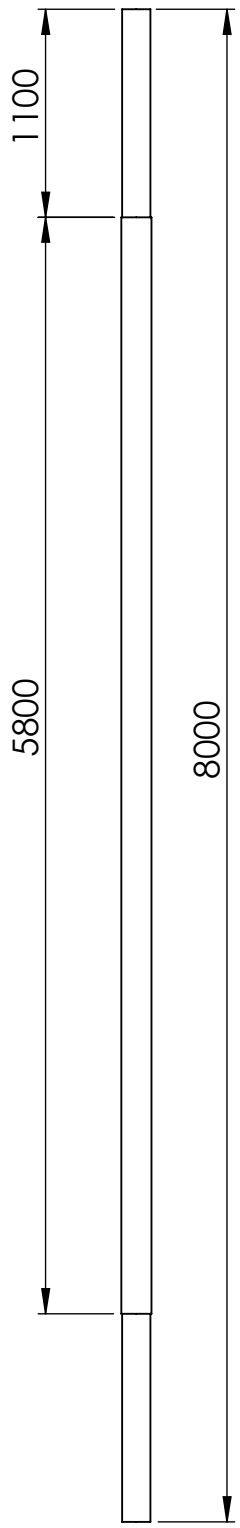


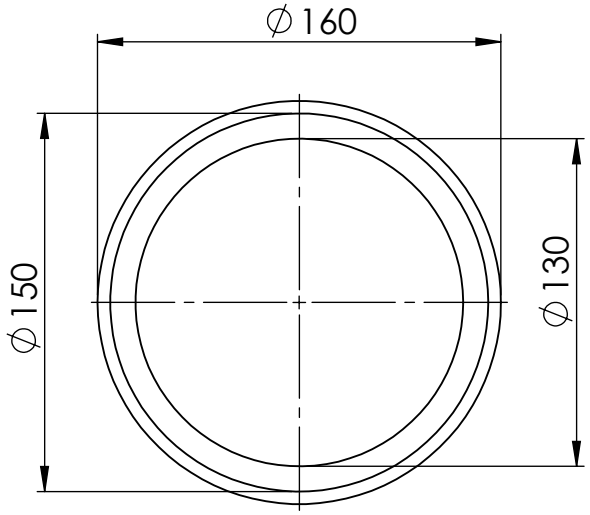


VISTA ISOMÉTRICA

MEDIDAS EN MILIMETROS

	FECHA	APELLIDO Y NOMBRE	FIRMA	
DIBUJO	12/9/2026	MANGIATERRA - ARRABAL		1
REVISO				
APROBO				
ESC.: 1:50	MÁQUINA DEVANADORA INTEGRAL			MANDRIL
				ING. Y DESARROLLO
TOL.:				

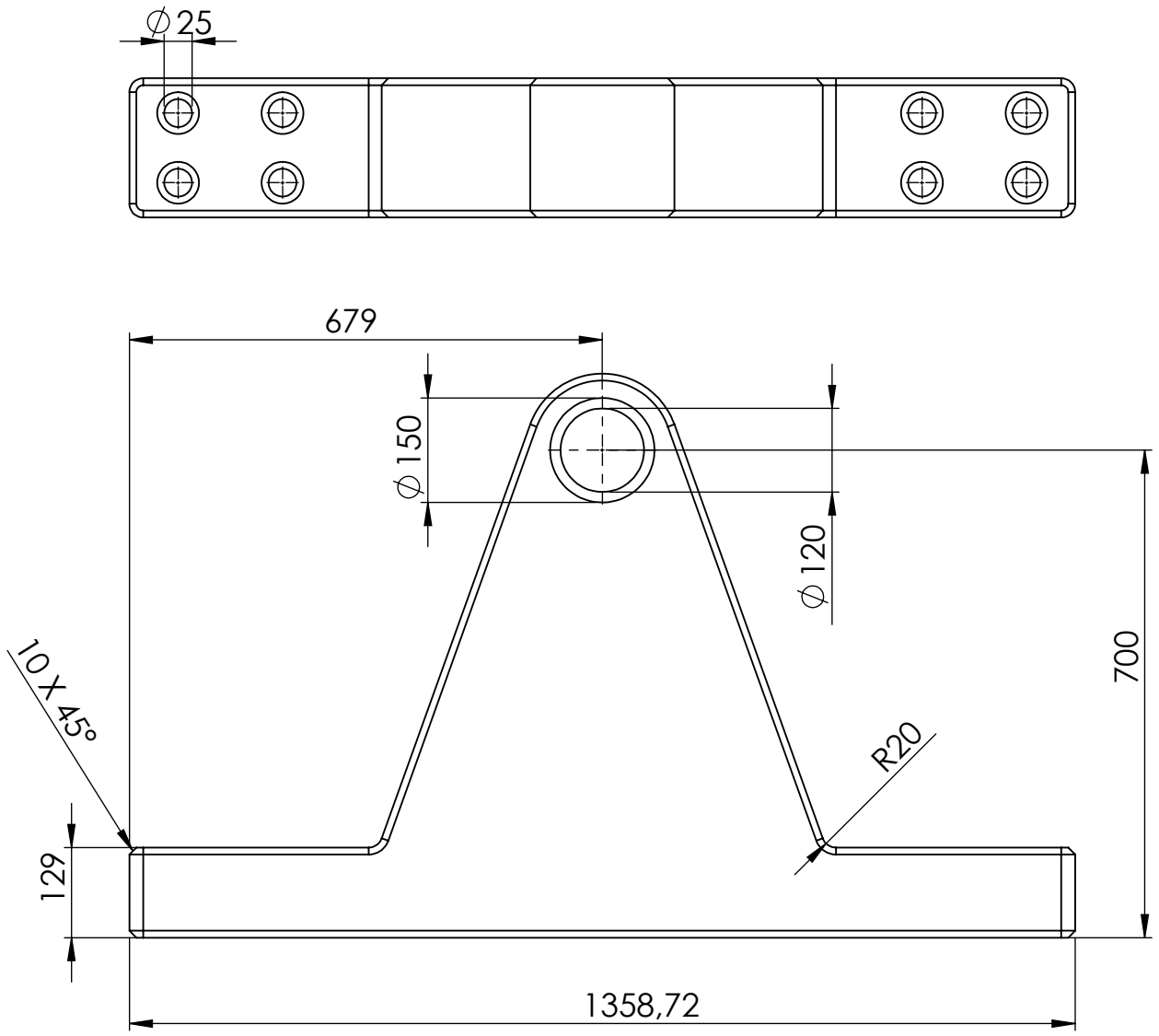


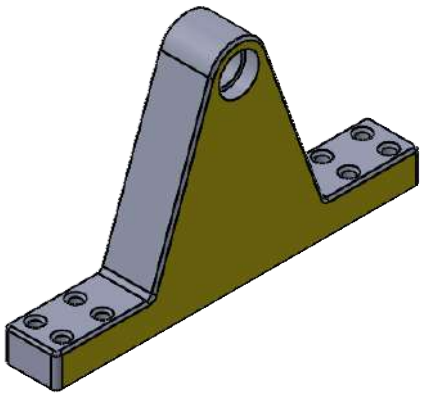


VISTA FRONTAL ESC. 1:3

MEDIDAS EN MILIMETROS

	FECHA	APELLIDO Y NOMBRE	FIRMA	
DIBUJO	12/9/2026	MANGIATERRA - ARRABAL		2
REVISO				
APROBO				
ESC.: 1:40	MÁQUINA DEVANADORA INTEGRAL			EJE
				ING. Y DESARROLLO
TOL.:				

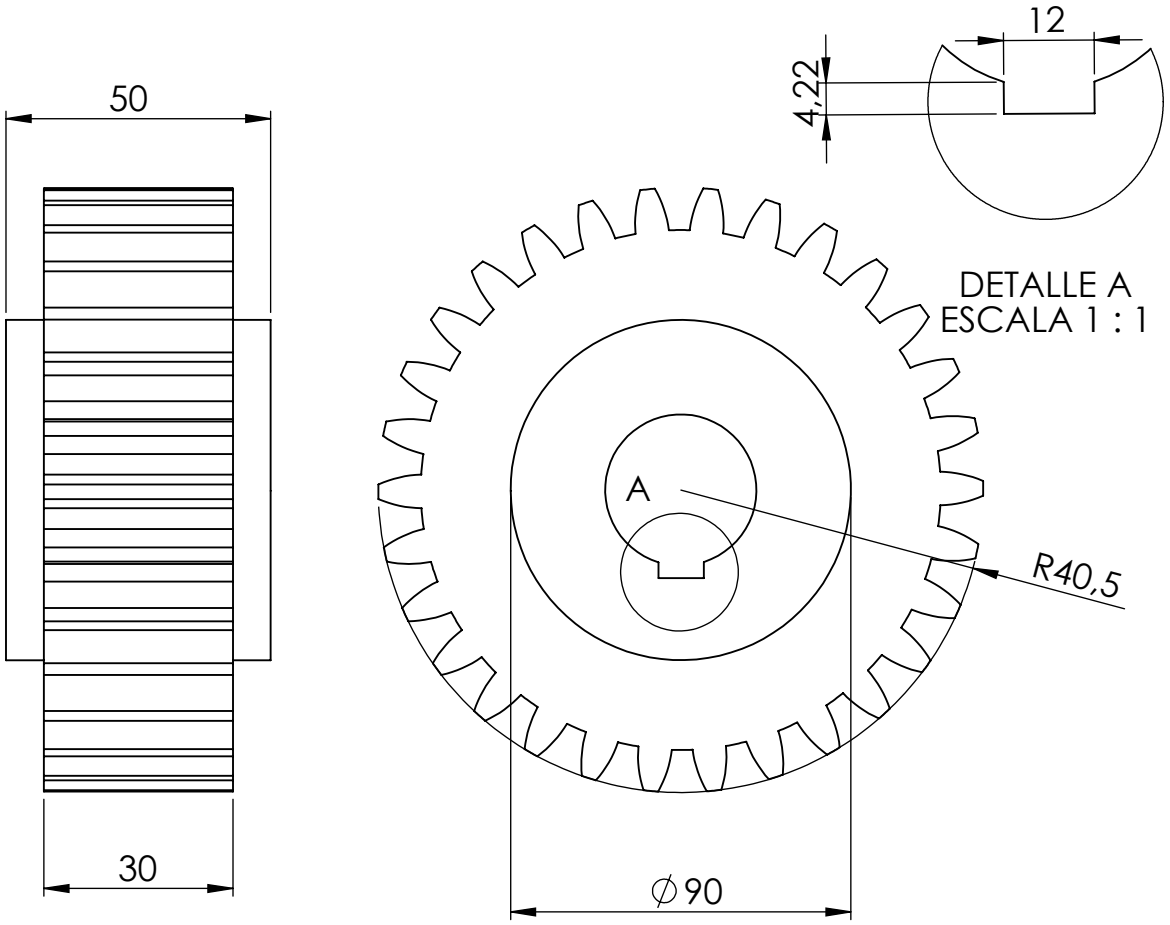


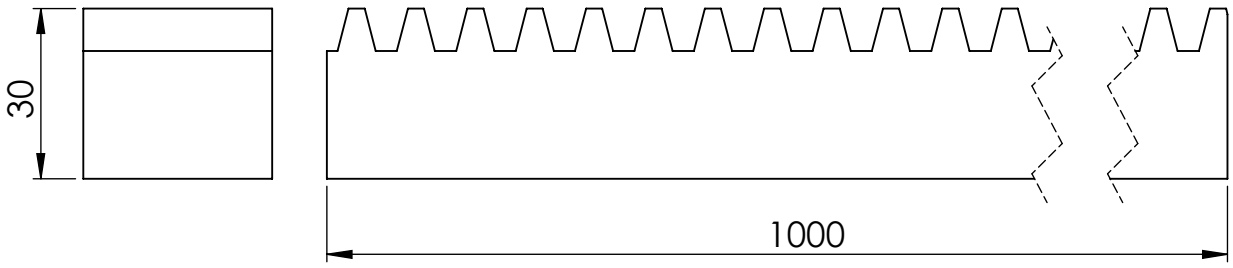


VISTA ISOMÉTRICA

MEDIDAS EN MILIMETROS

	FECHA	APELLIDO Y NOMBRE	FIRMA	
DIBUJO	12/9/2026	MANGIATERRA - ARRABAL		4
REVISO				
APROBO				
ESC.: 1:5	MÁQUINA DEVANADORA INTEGRAL			SOPORTE EJE
TOL.:				ING. Y DESARROLLO

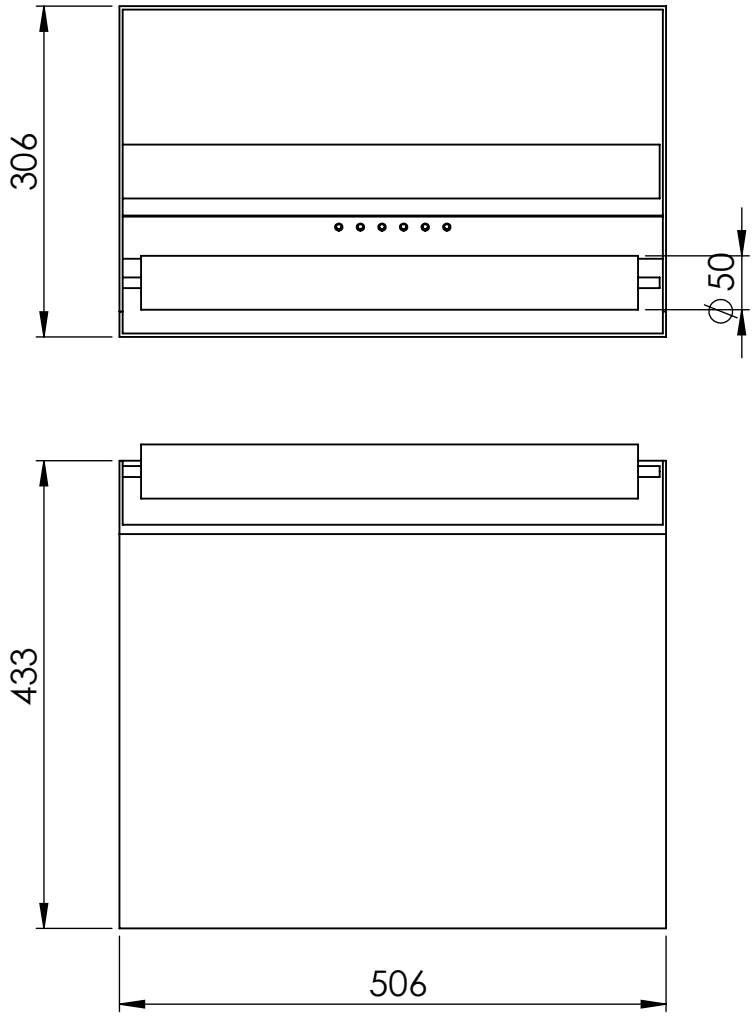


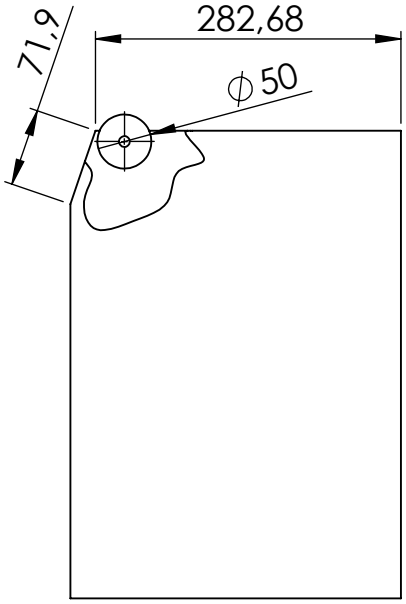


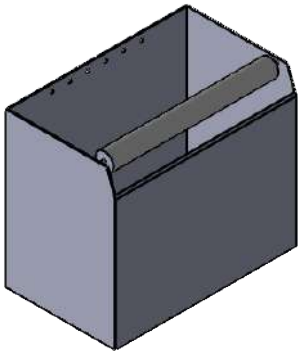
Diámetro primitivo (d)	75
Número de dientes (z)	25
Diámetro exterior (da)	81
Diámetro interior (df)	60
Áncho (b)	30
Módulo	3

MEDIDAS EN MILIMETROS

	FECHA	APELLIDO Y NOMBRE	FIRMA	
DIBUJO	12/9/2026	MANGIATERRA - ARRABAL		5
REVISO				
APROBO				
ESC.: 1:2	MÁQUINA DEVANADORA INTEGRAL			PIÑON CREMALLERA
TOL.:				ING. Y DESARROLLO



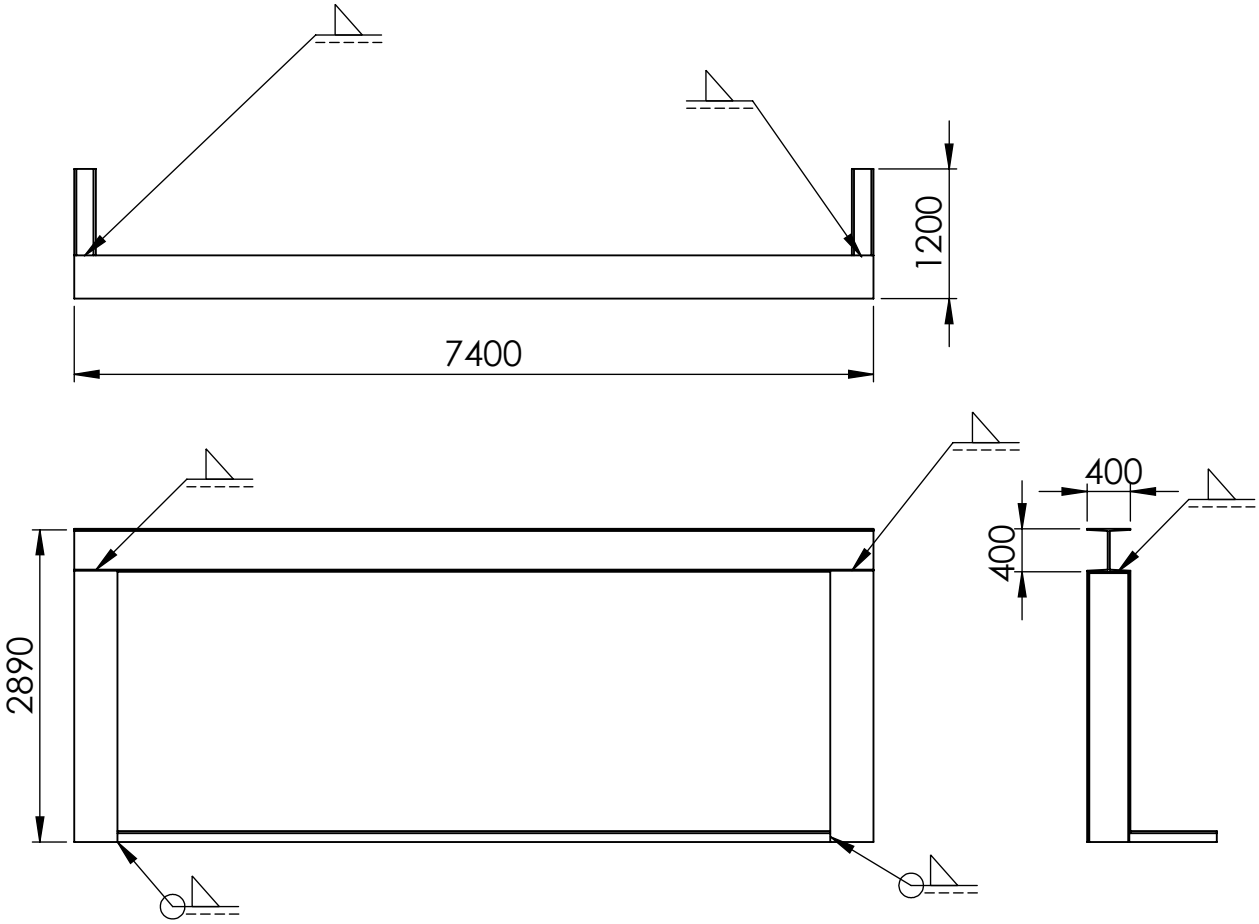


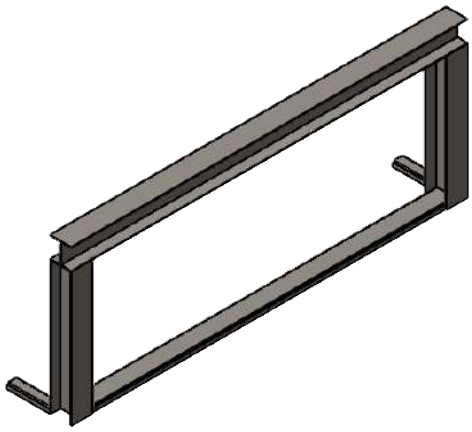


VISTA ISOMETRICA

MEDIDAS EN MILIMETROS

	FECHA	APELLIDO Y NOMBRE	FIRMA	
DIBUJO	12/9/2026	MANGIATERRA - ARRABAL		9
REVISO				
APROBO				
ESC.: 1:7	MÁQUINA DEVANADORA INTEGRAL			CUBETA PARA RESINA
				ING. Y DESARROLLO
TOL.:				

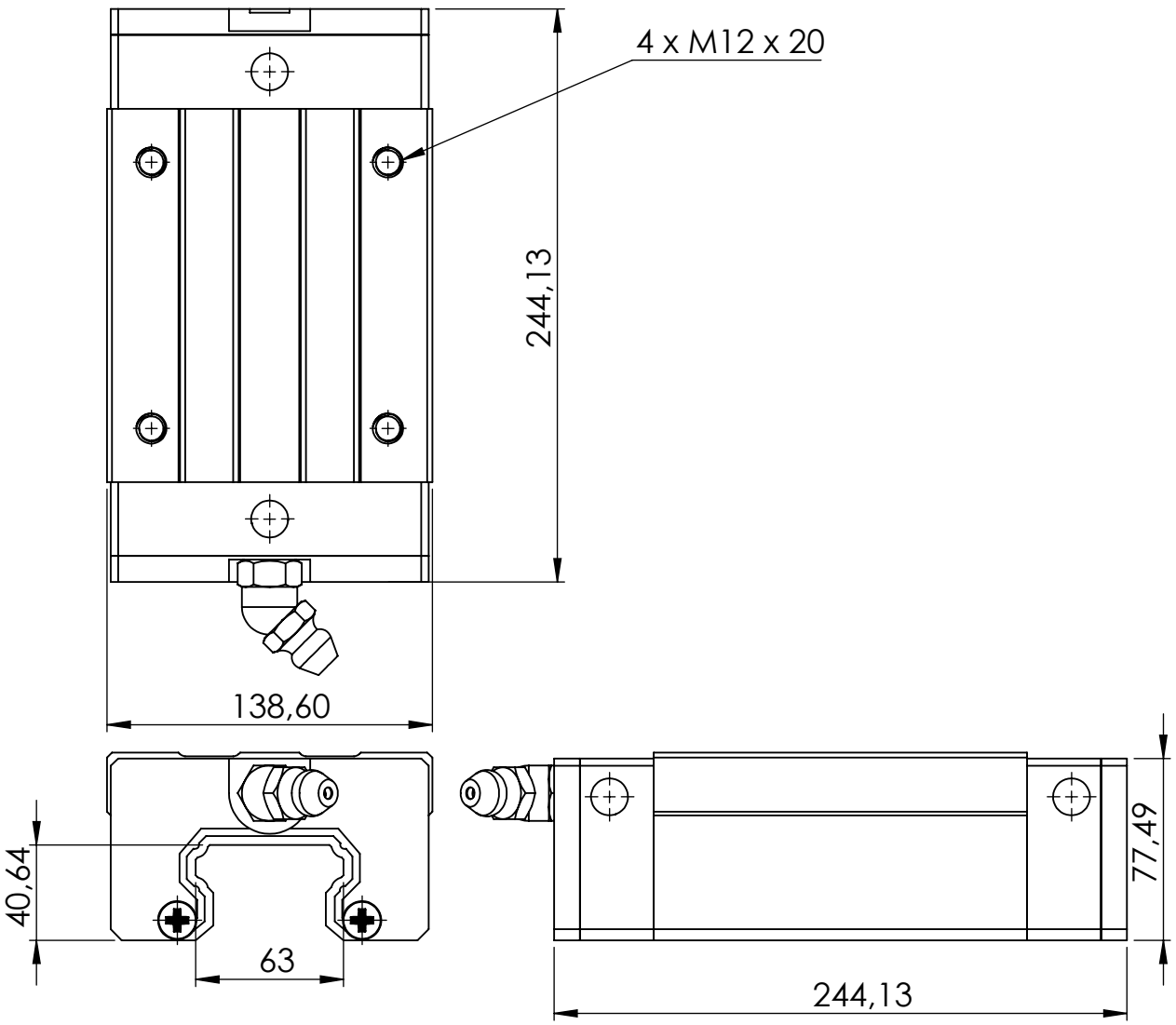


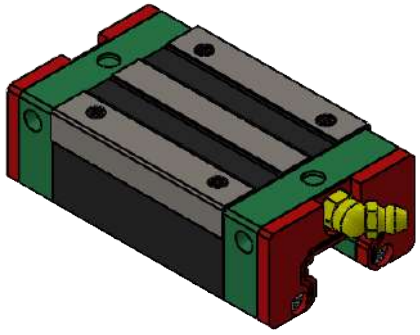


VISTA ISOMÉTRICA

MEDIDAS EN MILIMETROS

	FECHA	APELLIDO Y NOMBRE	FIRMA	
DIBUJO	12/9/2026	MANGIATERRA - ARRABAL		11
REVISO				
APROBO				
ESC.: 1:70	MÁQUINA DEVANADORA INTEGRAL			PÓRTICO
				ING. Y DESARROLLO
TOL.:				



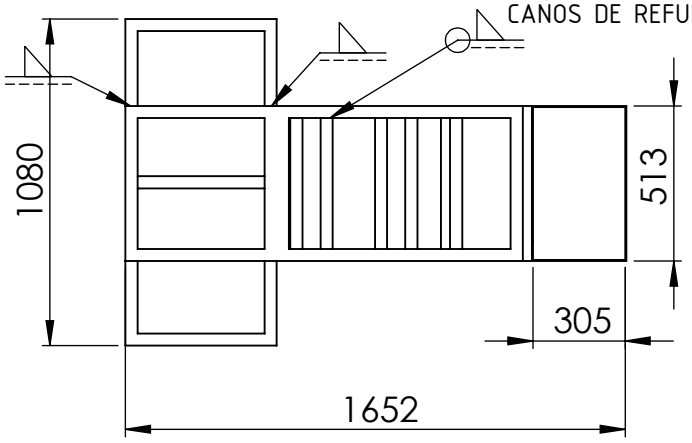


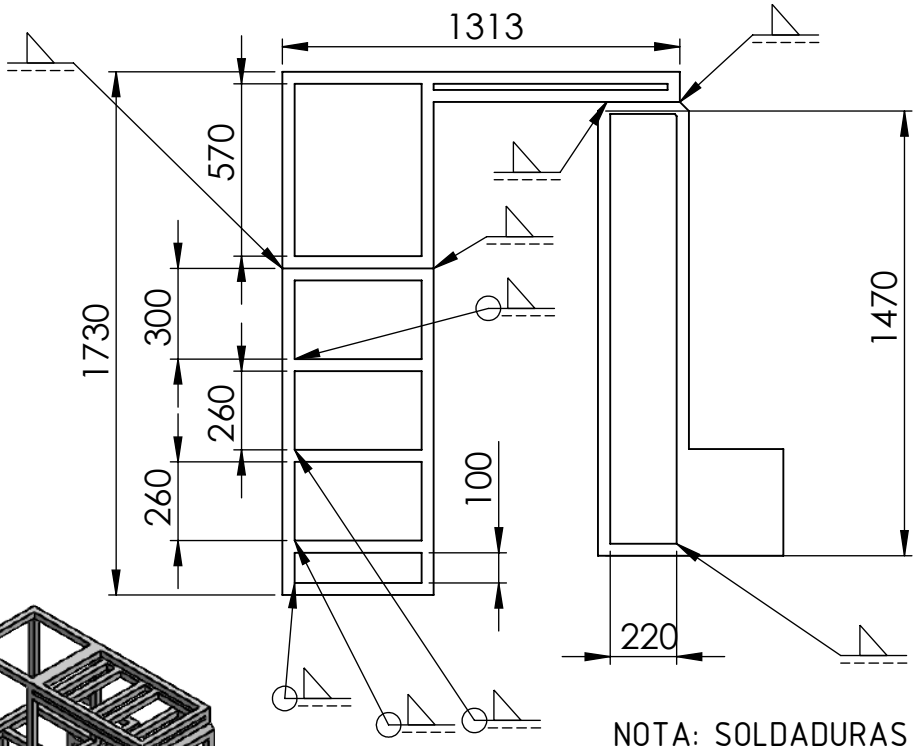
VISTA ISOMETRICA

MEDIDAS EN MILIMETROS

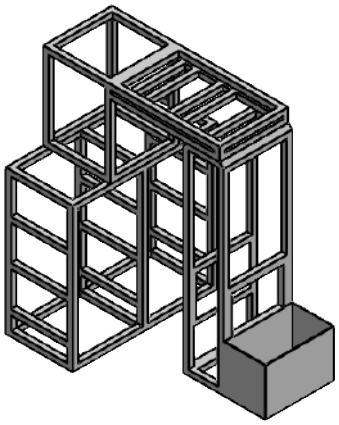
	FECHA	APELLIDO Y NOMBRE	FIRMA	
DIBUJO	12/9/2026	MANGIATERRA - ARRABAL		12
REVISO				
APROBO				
ESC.: 1:3	MÁQUINA DEVANADORA INTEGRAL			PATIN GUIA
TOL.:				ING. Y DESARROLLO

NOTA: MISMAS SOLDADURAS PARA LOS CAÑOS DE REFUERZOSUPERIORES





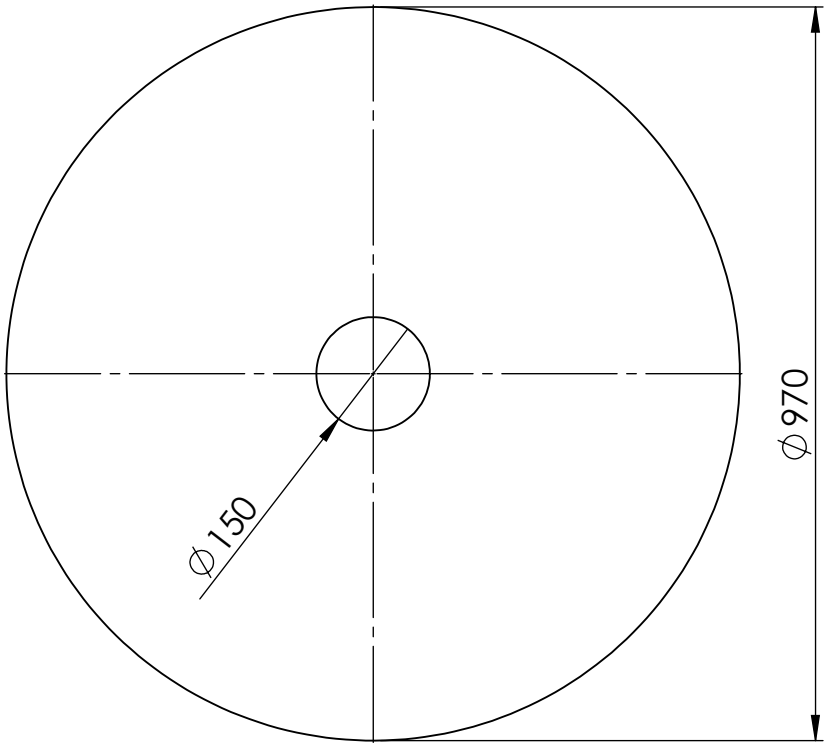
NOTA: SOLDADURAS ANÁLOGAS PARA LADOS OPUESTOS



VISTA ISOMÉTRICA

MEDIDAS EN MILIMETROS

	FECHA	APELLIDO Y NOMBRE	FIRMA	
DIBUJO	12/9/2026	MANGIATERRA - ARRABAL		14
REVISO				
APROBO				
ESC.: 1:25	MÁQUINA DEVANADORA INTEGRAL			CARRO GUÍA
TOL.:				ING. Y DESARROLLO



ESPESOR DE CHAPA: 3/8"

MEDIDAS EN MILIMETROS

	FECHA	APELLIDO Y NOMBRE	FIRMA	
DIBUJO	12/9/2026	MANGIATERRA - ARRABAL		16
REVISO				
APROBO				
ESC.: 1:10	MÁQUINA DEVANADORA INTEGRAL			TAPA CILINDRO
				ING. Y DESARROLLO
TOL.:				