



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

PROCESO DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DE
UNOS ESQUÍ EN MATERIALES
COMPUESTOS

Autor: Carmen Zulueta Guisasola

Director : Xavier Soldani
Co-director: Xavier Giner

Curso 2022-2023

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Proceso de diseño y fabricación de unos esquís en materiales

compuestos

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2022/2023 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es

plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada

de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Carmen Florentina Zulueta Guisasola Fecha: 17/ 07/ 2023



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Xavier Soldani

Fecha:



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

PROCESO DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DE
UNOS ESQUÍES EN MATERIALES
COMPUESTOS

Autor: Carmen Zulueta Guisasola

Director : Xavier Soldani

Co-director: Xavier Giner

Curso 2022-2023

Madrid

PROCESO DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNOS ESQUIS EN MATERIALES COMPUESTOS

Autor: Zulueta Guisasola, Carmen.

Directores: Soldani, Xavier y Giner, Xavier.

Entidad Colaboradora: Husta Skis, Valle de Arán.

RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto consiste en el diseño y fabricación de unos esquís que se diferencian de unos esquís comerciales en dos principales aspectos: la adaptación de los mismos a un esquiador en concreto y la sustitución de placas de titanal (presentes en todos los esquís comerciales) por un adecuado laminado de materiales compuestos.

Palabras clave: Diseño, geometría, laminado, fabricación, rigidez.

Introducción:

Hoy en día, exceptuando el caso de los esquiadores de profesión, lo más habitual es que el esquiador se tenga que adaptar a un esquí adquirido en una tienda y fabricado en masa en una cadena de producción. Siendo el esquí un deporte de ocio y disfrute, se plantea que lo más lógico sería que esto fuese al revés: que el esquí esté diseñado para cumplir las necesidades del usuario.

De esta manera surge la start-up Husta Skis, situada en el Valle de Arán y entidad colaboradora de este Trabajo de Fin de Grado. Esta pequeña empresa no solo pretende aprovechar la oportunidad de mercado vendiendo esquís customizados a esquiadores que estén dispuestos a duplicar el precio de sus esquís, sino que también apuesta por una producción sostenible y apoya el producto local. Por ello, este trabajo estará rigurosamente alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que se describirán a lo largo del proyecto.

Descripción el proyecto:

El proyecto se puede dividir en tres grandes fases, que a su vez conforman los tres distintos capítulos de la memoria: análisis, diseño, fabricación y resultados. Como es de esperar, estas fases están ordenadas tanto en su documentación como en el orden cronológico del desarrollo del proyecto. Se diseña según lo analizado y se fabrica a partir del diseño realizado.

En primer lugar, para que el esquí esté debidamente adaptado a su usuario, se debe hacer un análisis del mismo, que comprende dos subfases: análisis biométrico del esquiador (peso, talla, fuerza...) y análisis técnico (nivel y estilo de esquí que practica).

Una vez analizado lo que se busca, se procede a diseñar. Se diseña tanto la geometría del esquí como el laminado de las fibras, se elige el tipo de madera para el núcleo y otros materiales para pequeñas piezas descritas posteriormente. Además, se diseña el acabado final estético del esquí. Se documenta todo en planos para su posterior fabricación.

Concluido el diseño, se comienza la fase de fabricación en el taller. Se prepara cada pieza para, posteriormente, obtener una correcta unión entre ellas. Se utiliza maquinaria como una fresadora de control numérico o una prensa artesanal.

Por último, se examina el esquí acabado, comparando su rigidez y deformaciones con las de un esquí comercial de similares prestaciones. De esta manera, se hace una valoración del producto final obtenido.

Objetivo del proyecto:

El objetivo principal del proyecto es el de la obtención de un producto final que cumpla con los requerimientos personales establecidos y que presenten una mejora respecto de los esquís comerciales utilizados por el usuario hasta el momento.

Se fabricará el primer esquí de pista que se hace en Husta Skis. Por ello, este TFG busca también aportar a la empresa un diseño y su debida documentación para los posteriores encargos que tengan de esquís de pista.

La persecución de ese objetivo cuenta con un proceso que involucra, a su vez, otros objetivos de formación técnica y personal: la familiarización con las máquinas del taller, obtención de soltura con AutoCad con la realización de los planos.

Por último, al ser una pequeña empresa local, tiene un firme compromiso con el cuidado del medioambiente y con la disminución al máximo posible del desperdicio de los materiales, así como la adquisición de estos de proveedores locales para disminuir las emisiones del transporte necesario.

Resultados obtenidos:

Los resultados obtenidos se han dividido en dos aspectos: resultados estéticos y resultados de comportamiento.

Los primeros se examinan simplemente bajo inspección visual, intentando identificar aquellas zonas donde ha podido haber alguna imprecisión en el montaje o algún descuido en el laminado, proponiendo las soluciones pertinentes para futuros productos. En este caso, se utilizó demasiada resina epoxi y en el momento del laminado hubo un descuido que resultó en una arruga en el esquí acabado.

En el caso del ensayo de rigidez y deformaciones, se hizo una comparación entre el esquí fabricado y un esquí comercial con prestaciones similares a las buscadas. Se aplicaron las mismas cargas en ambos esquíes y se obtuvieron las siguiente tablas de deformaciones:

	Deformaciones esquí fabricado (mm)		
	A	B	C
10 kg	17	24	17
20 kg	34	48	35
27,5 kg	48	66	48

	Deformaciones esquí comercial Head eSpeed 2021 (mm)		
	A	B	C
10 kg	20	26	18
20 kg	43	54	38
27,5 kg	62	75	52

Comparando a simple vista las dos tablas anteriores, se observa que el esquí fabricado deforma menos que el comercial, aplicando la misma carga en ambos casos. Por ello, se ha conseguido un esquí más rígido y a su vez menos pesado que el comercial.

SKI DESIGN AND FABRICATION PROCESS IN COMPOSITE MATERIALS

Author: Zulueta Guisasola, Carmen.

Directors: Soldani, Xavier y Giner, Xavier.

Collaborating Entity Husta Skis, Valle de Arán.

ABSTRACT

The project consists of the design and manufacture of skis that differ from commercial skis in two main aspects: the adaptation of the skis to a specific skier and the replacement of titanal plates (present in all commercial skis) by a suitable laminate of composite materials.

Keywords: Design, geometry, laminate, manufacturing, stiffness.

Introduction:

Nowadays, apart from professional skiers, it is most common that the skier has to adapt to a ski purchased in a shop and mass-produced on a production line. Since skiing is a sport of leisure and enjoyment, it makes sense that this should be the other way around: that the ski should be designed to meet the needs of the user.

This is how the start-up Husta Skis, located in the Val d'Aran and collaborating entity of this Final Degree Project, came into being. This small company not only aims to take advantage of the market opportunity by selling customized skis to skiers who are willing to double the price of their skis but is also committed to sustainable production and supports local products. As such, this work will be rigorously aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs) that will be described throughout the project.

Project description:

The project can be divided into three broad phases, which in turn form the three different chapters of the report: analysis, design, manufacturing and results. As is to be expected, these phases are ordered both in their documentation and in the chronological order of the development of the project. The ski is designed according to what has been analyzed and manufactured from the design.

Firstly, for the ski to be properly adapted to its user, an analysis of the user must be carried out, comprising two sub-phases: biometric analysis of the skier (weight, size, strength...) and technical analysis (level and style of skiing).

Once we have analyzed what we are looking for, we proceed to design. The geometry of the ski is designed as well as the fiber laminate, the type of wood for the core is chosen and other materials for small parts described later. In addition, the final aesthetic finish of the ski is designed. Everything is documented in plans for subsequent production.

Once the design has been completed, the manufacturing phase begins in the workshop. Each part is prepared in order to obtain a correct joint between them. Machinery such as a numerical control milling machine, or a handmade press is used.

Finally, the finished ski is examined, comparing its rigidity and deformations with those of a commercial ski of similar performance. In this way, an assessment is made of the final product obtained.

Aim of the project:

The main objective of the project is to obtain a final product that meets the personal requirements established and that presents an improvement over the commercial skis used by the user up to now.

The first piste ski to be made at Husta Skis will be manufactured. For this reason, this TFG also aims to provide the company with a design and its due documentation for subsequent orders they may have for piste skis.

The pursuit of this objective involves a process that involves, in turn, other technical and personal training objectives: familiarization with the machines in the workshop, gaining fluency with AutoCAD and drawing up the plans.

Finally, being a small local company, it has a firm commitment to care for the environment and to reduce the waste of materials as much as possible, as well as to purchase them from local suppliers in order to reduce the necessary transport emissions.

Results obtained:

The results obtained have been divided into two aspects: aesthetic results and performance results.

The former are simply examined under visual inspection, trying to identify those areas where there may have been some imprecision in the assembly or some carelessness in the laminate, proposing the relevant solutions for future products. In this case, too much epoxy resin was used and at the time of lamination there was an oversight that resulted in a wrinkle in the finished ski.

In the case of the stiffness and deformation test, a comparison was made between the manufactured ski and a commercial ski with similar performance to that sought. The same loads were applied to both skis and the following deformation tables were obtained:

	Manufactured ski deformations (mm)		
	A	B	C
10 kg	17	24	17
20 kg	34	48	35
27,5 kg	48	66	48

	Head eSpeed 2021 deformations (mm)		
	A	B	C
10 kg	20	26	18
20 kg	43	54	38
27,5 kg	62	75	52

Comparing at a glance the two tables above, it can be seen that the manufactured ski deforms less than the commercial ski, applying the same load in both cases. Therefore, we have achieved a stiffer ski and at the same time lighter than the commercial one.

Índice

ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE PLANOS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	4
1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. ESTADO DE LA CUESTIÓN.....	7
3. MOTIVACIÓN	8
4. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	8
5. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	9
6. METODOLOGÍA DE TRABAJO Y CRONOGRAMA	9
7. RECURSOS A EMPLEAR	11
8. CAPÍTULO I :ANÁLISIS.....	11
8.1 ESTUDIO BIOMÉTRICO:.....	12
8.2 EVALUACIÓN TÉCNICA :.....	13
9. CAPÍTULO II : DISEÑO.....	15
9.1 TERMINOLOGÍA	15
9.2 DEFINICIÓN DE COTAS	19
9.3 DISEÑO ESTRUCTURAL: ESPESOR MÁXIMO DEL NÚCLEO DE MADERA	22
9.4 LAMINADO DE FIBRAS.....	31
9.4.1 Laminado del esquí destruido: Atomic Redster SX	32
9.4.2 Laminado del primer prototipo	32
9.4.3 Laminado definitivo del esquí	33
9.5 ESPÁTULA	35
9.6 ACABADO ESTÉTICO	37

9.7	PLANO DE CONJUNTO DEL ESQUÍ.....	39
10.	CAPÍTULO III : FABRICACIÓN.....	41
10.1	MAQUINARIA UTILIZADA	41
10.1.1	<i>Fresadora control numérico Sacchi Machinery FS MH 1325.....</i>	<i>41</i>
10.1.2	<i>Sierra vertical Hammer N4400.....</i>	<i>43</i>
10.1.3	<i>Prensa artesanal.....</i>	<i>43</i>
10.1.4	<i>Plantilla para colocación de los cantos.....</i>	<i>44</i>
10.2	PREPARACIÓN DE LAS PIEZAS	45
10.2.1	<i>Suela</i>	<i>45</i>
10.2.2	<i>Cantos.....</i>	<i>45</i>
10.2.3	<i>Núcleo de madera.....</i>	<i>49</i>
10.2.4	<i>Sidewalls.....</i>	<i>49</i>
10.2.5	<i>Fibras</i>	<i>50</i>
10.2.6	<i>Topsheet.....</i>	<i>52</i>
10.2.7	<i>Espátula.....</i>	<i>53</i>
10.2.8	<i>Cola</i>	<i>55</i>
10.3	UNIÓN DE LAS PIEZAS PREPARADAS.	55
10.3.1	<i>Montaje del canto en la suela</i>	<i>56</i>
10.3.2	<i>Conformación del cuerpo principal.....</i>	<i>57</i>
10.3.3	<i>Ajuste del topsheet</i>	<i>58</i>
10.3.4	<i>Laminación</i>	<i>59</i>
10.3.5	<i>Prensado.....</i>	<i>61</i>
10.3.6	<i>Corte y lijado para acabado final.....</i>	<i>63</i>
11.	CAPÍTULO IV : RESULTADOS	64
11.1	ESTÉTICA DEL ESQUÍ	64
11.2	COMPORTAMIENTO DEL ESQUÍ	65
11.2.1	<i>Prueba de los esquís en nieve</i>	<i>65</i>
11.2.2	<i>Ensayo del esquí a flexión</i>	<i>65</i>

12. CONCLUSIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	70

Índice de tablas

TABLA 1: METODOLOGÍA Y FECHAS OBJETIVO.....	10
TABLA 2: PARÁMETROS A ANALIZAR EN EL ESTUDIO BIOMÉTRICO.	12
TABLA 3: REPERCUSIÓN DEL ANÁLISIS TÉCNICO.	14
TABLA 4: TERMINOLOGÍA DEL ESQUÍ.	17
TABLA 5: MEDIDAS DEL ENSAYO A FLEXIÓN.	66
TABLA 6: DEFORMACIONES DEL ENSAYO A FLEXIÓN.	67
TABLA 7: MEDIDAS DEL ENSAYO A FLEXIÓN HEAD ESPEED.	67
TABLA 8: DEFORMACIONES DEL ENSAYO A FLEXIÓN HEAD ESPEED.	68

Índice de planos

PLANO 1: PLANO DE PLANTA Y DE PERFIL DEL ESQUÍ SIN ACOTAR.....	16
PLANO 2: PLANO DE PLANTA Y PERFIL DEL ESQUÍ ACOTADO.....	21
PLANO 3: NÚCLEO DE MADERA PARA MECANIZAR.	30
PLANO 4: ESPÁTULA.	36
PLANO 5: CANTOS DEL ESQUÍ.....	46

Índice de figuras

FIGURA 1: APROXIMACIÓN ESTRUCTURAL DEL ESQUÍ A UNA VIGA BIAPOYADA.	22
FIGURA 2: DIAGRAMA DE AXILES.	23
FIGURA 3: APROXIMACIÓN ESTRUCTURAL CON REACCIONES ESPERADAS..	24
FIGURA 4: DIAGRAMA DE CORTANTES.	25
FIGURA 5: DIAGRAMA DE FLECTORES.....	25
FIGURA 6: DIAGRAMA DE SECCIÓN DEL NÚCLEO.....	26
FIGURA 7: ESFUERZOS EN LA SECCIÓN DEL NÚCLEO.....	27
FIGURA 8: FIBRA DE CARBONO BIAxIAL.	33
FIGURA 9: FIBRA DE CARBONO UNIDIRECCIONAL.	34

FIGURA 10: TWILL DE CARBONO.....	34
FIGURA 11: TWILL FIBRA DE VIDRIO.....	35
FIGURA 12: DISEÑO DEL ACABADO DEL ESQUÍ.....	38
FIGURA 13: MÁQUINA DE CONTROL NUMÉRICO.....	42
FIGURA 14: DISPOSITIVO DE CONTROL DE LA MÁQUINA.....	42
FIGURA 15: SIERRA VERTICAL.....	43
FIGURA 16: PRENSA ARTESANAL.....	43
FIGURA 17: PLANTILLA PARA LA COLOCACIÓN DE LOS CANTOS.....	44
FIGURA 18: MATERIAL DE LA SUELA.....	45
FIGURA 19: ROLLO DE CANTOS DE ACERO.....	45
FIGURA 20: ESPÁTULA SIN CANTO CORRIDO.....	47
FIGURA 21: ESPÁTULA CON CANTO CORRIDO.....	47
FIGURA 22: GATO CURVADOR DE CANTOS.....	48
FIGURA 23: CANTO CURVADO.....	48
FIGURA 24: NÚCLEO Y SIDEWALLS PREVIOS A LA COLACIÓN.....	49
FIGURA 25: MATERIAL SIN TRATAR PARA LOS SIDEWALLS.....	49
FIGURA 26: CONJUNTO NUCLEO-SIDEWALL LISTO PARA SER MECANIZADO.....	50
FIGURA 27: ROLLOS DE FIBRAS.....	50
FIGURA 28: CORTE DE LAS FIBRAS.....	51
FIGURA 29: BIAXIAL CON FORMA DEL ESQUÍ.....	52
FIGURA 30: ROLLO DE NYLON PARA TOPSHEET.....	52
FIGURA 31: ROLLO ABS PARA ESPÁTULA.....	53
FIGURA 32: ESPÁTULA DEFECTUOSA DESECHADA.....	54
FIGURA 33: REDUCCIÓN DEL ESPESOR DE LA ESPÁTULA EXITOSO.....	54
FIGURA 34: ESPÁTULA CORRECTA.....	55
FIGURA 35: COLA DE ABS.....	55
FIGURA 36: COLOCACIÓN DE CANTOS EN LA SUELA.....	56
FIGURA 37: COLOCACIÓN DE CANTOS EN LA SUELA.....	57
FIGURA 38: UNIÓN ESPÁTULA AL NÚCLEO.....	58
FIGURA 39: UNIÓN COLA AL NÚCLEO.....	58

<i>FIGURA 40: AJUSTE DEL TOPSHEET.</i>	58
<i>FIGURA 41: PREPARACIÓN DE LA RESINA EPOXI.</i>	59
<i>FIGURA 42: PRIMERA CAPA DE FIBRA SOBRE LA SUELA</i>	60
<i>FIGURA 43: LAMINACIÓN DE FIBRAS INTERMEDIAS.</i>	60
<i>FIGURA 44: ÚLTIMA CAPA DEL LAMINADO. TOPSHEET.</i>	61
<i>FIGURA 45: PRENSADO DEL ESQUÍ.</i>	61
<i>FIGURA 46: BARÓMETRO DE LA PRENSA.</i>	62
<i>FIGURA 47: ESQUÍ RECIÉN SALIDO DE LA PRENSA.</i>	62
<i>FIGURA 48: SUELAS DEL ESQUÍ RECIÉN SALIDO DE LA PRENSA.</i>	63
<i>FIGURA 49: REBABA RESULTANTE DEL CORTE CON SIERRA.</i>	63
<i>FIGURA 50: ACABADO FINAL DEL ESQUÍ.</i>	63
<i>FIGURA 51: EXCESO DE RESINA EPOXY.</i>	64
<i>FIGURA 52: ARRUGA DE LA FIBRA EN ACABADO FINAL.</i>	64
<i>FIGURA 53: CURVAS DEFORMADAS EN EL ENSAYO A FLEXIÓN.</i>	66

1. INTRODUCCIÓN

En colaboración con una *start-up* llamada “*Husta Skis*”, situada en el Valle de Arán, este proyecto persigue la obtención del producto final de unos esquís de pista fabricados con materiales compuestos. En el trabajo se documentan todos los pasos seguidos tanto en el diseño como en la ejecución de dichos esquís.

Se trata de la realización de un diseño propio y de la completa obtención de unos esquís de pista totalmente personalizados para un individuo y en función del tipo de deporte. Cabe destacar que este proyecto no busca la fabricación de un esquí polivalente, económico o impersonal. Contrariamente, se busca un producto final que se distinga de un esquí comercial hecho en una cadena de producción.

Más adelante se describen las especificaciones concretas que se buscan en el esquí final, así como las decisiones tomadas y métodos empleados para obtener estos requerimientos.

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Hoy en día, en España, hay aproximadamente 2.000.000 (2018) de practicantes de esquí. De esta cifra, un 10% aproximadamente compra un par de esquís anual, y a su vez, el 99,9% de ellos, adquieren esquís comerciales estandarizados hechos en cadenas de producción. Es difícil cuantificar cual es la proporción de esquiadores cuyo poder adquisitivo puede acceder a nuestro producto pero, en cualquier caso, este público existe y en España hay un hueco de mercado en este sector.

Cabe señalar que sí existe a nivel nacional una empresa que realiza personalización de diseño de esquís. Sin embargo, se centra al 90% en el aspecto estético y acabados. La idea es, precisamente, innovar centrándonos en la customización estructural y

rendimiento del esquí, por supuesto también en el diseño, pero sin ser este el objetivo principal.

3. MOTIVACIÓN

Este trabajo de fin de grado busca la aplicación de los conocimientos técnicos obtenidos durante el Grado hacia la persecución del producto final de unos esquís, mencionado anteriormente. A su vez, al estar inscrito en una *start-up* y con el objetivo de ampliar su actividad, se decide realizar el **diseño del primer esquí de pista que se fabrica** en el taller (su actividad principal gira entorno al esquí *freeride*).

La idea de la obtención de un producto final único y personalizado que se va a poder disfrutar posteriormente.

La alta presencia en el taller, que va implícita en el proyecto y la familiarización con los elementos y maquinaria del lugar de trabajo son alicientes para la elección de este proyecto.

4. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Como el propio título del trabajo indica, el objetivo final del proyecto es el de la obtención de unos esquís totalmente acabados que cumplan con los requisitos personalizados que mencionábamos anteriormente.

Sin embargo, durante todo el proceso hasta llegar al producto final, se buscan otros objetivos intermedios como el empleo de la maquinaria (principalmente Máquina de Control Numérico), o la elección de los distintos materiales compuestos y a su vez, la orientación de las fibras en las distintas partes del esquí, según la dirección de los esfuerzos que tendrán que soportar estas.

Se busca un esquí que prescindiendo de las famosas placas de titanio que conforman los esquís comerciales, cumplan con unos requisitos de rigidez y dureza. Se logrará esto con un adecuado laminado de fibras que además ayudará a reducir el peso del esquí.

5. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

De entre los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, este proyecto se alinea especialmente con dos de ellos:

-Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles

Este proyecto se llevará a cabo en un taller totalmente artesanal, sin emisiones en la producción e, intentando, en la medida de lo posible, hacer consumo de producto local sin grandes distancias de transporte requeridas

-Objetivo 15: (...), gestionar los bosques de forma sostenible, (...)

Posteriormente, en el trabajo final, se especificarán con más detalles los materiales empleados y de esta manera, se explicará la elección de las maderas más sostenibles y ecológicas, siendo estas la madera de fresno y de bambú.

La alineación con estos ODS conlleva intrínsecamente la alineación a su vez con el **Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.**

6. METODOLOGÍA DE TRABAJO Y CRONOGRAMA

Las distintas fases a seguir hacia la obtención del producto final se recogen en la siguiente tabla:

Fase	Descripción	Fecha Objetivo
Análisis del esquiador	Comprende tanto un análisis físico como un análisis técnico. -Análisis físico: estudio de las características físicas del esquiador; peso, altura, fuerza, talla de pie.	Enero

	-Análisis técnico: rapidez, agresividad en el esquí, tipo de giro... Se valorará también el lugar de esquí habitual para tener en cuenta el tipo de nieve en el que se utilizará el esquí más frecuentemente.	
Cotas del esquí	Se definirán a partir del análisis realizado en la fase previa. Se realizarán los planos en CAD.	Febrero
Composición del esquí	Se valorará qué materiales utilizar en cada parte del esquí, así como la orientación de las fibras según los esfuerzos que se tengan que soportar en cada sección.	
Fabricación	Una vez tomadas estas decisiones, se procederá a fabricar lo que se ha diseñado. En primer lugar, el fresado del núcleo del esquí utilizando una máquina de control numérico. Seguimos con los laminados de las fibras que recubren el núcleo, además del montaje de los <i>sidewall</i> y los cantos del esquí. Por último, se acabará el esquí con el diseño estético que se desee (color, dibujos etc.)	Abril
Redacción	Una vez terminado lo práctico, se redactará y se ordenará todo lo documentado durante el proceso.	Mayo
Defensa	Defensa del Trabajo de Fin de Grado.	Julio

Tabla 1: Metodología y fechas objetivo

7. RECURSOS A EMPLEAR

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, este proyecto está enmarcado en el contexto de una *start-up* llamada *Husta Skis*, por lo tanto, haré uso de sus recursos, tanto de maquinaria como de material.

Para mecanizar el núcleo del esquí (madera), se empleará una **máquina de control numérico** que consiste en una fresadora de 3 ejes Sacchi modelo FS MH 1325.

Además, para el correcto laminado de las fibras, el taller cuenta con una **prensa artesanal** cuyo funcionamiento consiste en una tubería llena de aire a una presión de 3 bares que se acopla perfectamente a la superficie de lo que se esté prensando, el esquí en este caso.

En cuanto a material, se usará principalmente los siguientes materiales (no es una lista exhaustiva), seguidos de sus respectivos proveedores:

- Resina Epoxy, *Sicomín Epoxy Systems*
- Fibra de Carbono y Fibra de Vidrio, Aportación del astillero *King Marine* (se utilizarán distintos gramajes y configuraciones de las fibras)
- Polietileno (suela del esquí), *Isosport Innovative Plastic Solutions*
- Cantos, *Waelzholz GmbH*

8. CAPÍTULO I :ANÁLISIS

El análisis del esquiador es una fase crucial en el proyecto. Como se ha mencionado en diversos apartados previos, el objetivo son unos esquís que se adapten plenamente a un esquiador en concreto, por lo tanto, hay que saber de antemano qué es lo que el esquiador demanda de unos esquís y con qué características deben contar estos para ajustarse lo mejor posible al cliente. Para ello será necesario estudiar tanto a la persona como a su estilo y nivel de esquí. Por tanto, esta fase comprende dos subfases:

8.1 Estudio biométrico:

Fase centrada en el estudio físico de la persona. La siguiente tabla recoge brevemente los parámetros relevantes del cliente y las propiedades del esquí que dependen de cada una.

Característica	Medida	Relevancia
Altura	175 cm	Longitud del esquí
Peso	68 kg	Rigidez del esquí
Fuerza en las piernas (0-5)	3	Rigidez del esquí
Morfología del pie		Localización del Camber

Tabla 2: Parámetros a analizar en el estudio biométrico.

A continuación se describe más extensamente cada una de las características biométricas relevantes:

-Altura:

Un esquí de pista, para proporcionar estabilidad a altas velocidades, debe tener una longitud de, al menos, la altura del esquiador. A partir de ahí, el esquí puede ser comendidamente más largo según preferencias del usuario. Cuanto más largo sea el esquí, más estabilidad proporcionará y más seguro se sentirá el esquiador a altas velocidades, sin embargo, más difícil será el manejo del esquí y más nivel técnico requerirán por parte del esquiador.

-Peso:

Las propiedades de rigidez y flexibilidad de un esquí son directamente proporcionales al peso del usuario, ya que esto determina en gran parte la fuerza que este ejercerá sobre el esquí. Un hombre adulto no utiliza el mismo esquí que un niño pequeño, y estos esquís no se diferencian únicamente en su longitud.

-Fuerza en las piernas:

Característica que influye en los mismos parámetros que el peso. Ambas están relacionadas con la fuerza que se va a ejercer sobre el esquí y de esta manera con la rigidez y flexibilidad que han de tener. Medir la fuerza de las piernas es muy difícil, y por tanto se asignará un valor coherente en una escala del 0 al 5, dependiendo de la complexión de la persona, su forma física y de si es hombre o mujer.

-Morfología del pie:

A priori, esta característica no aparenta gran relevancia, especialmente si pensamos en que la rígida carcasa de las botas de esquí van a anular cualquier tipo de anatomía del pie. Estando esto lejos de la realidad, la morfología del pie sí influye en cierta parte de la geometría de un esquí. Los pies son el vínculo directo entre la fuerza que ejercemos con el cuerpo y el esquí. Sin embargo, prestando atención a la anatomía de la planta del pie, es fácil ver que no se ejerce la fuerza a través de toda la superficie de la planta.

Las dos partes del pie que podrían establecer el contacto son el talón y las cabezas de los metatarsianos. La posición de un buen esquiador es una posición adelantada y flexionada, por ello tenemos que la zona de la cabeza de los metatarsianos será la parte encargada de transmitir esa fuerza.

Atendiendo a lo que posteriormente nombraremos *camber* del esquí, la parte más alta de este tendrá que ser coincidente con esta parte del pie, ya que es el punto del esquí que más fuerza debe absorber.

8.2 Evaluación técnica :

Por otro lado, en esta sección, lo que se analizará serán las habilidades y estilos del esquiador en el deporte. Se muestra a continuación una tabla análoga a la anterior.

Característica	Medida	Relevancia
Nivel (0-10)	8	Rigidez y longitud del esquí.
Tipo de giro	Amplio y largo	Radio del esquí.

Velocidad		Dureza y rigidez.
Tipo de pista	Pista pisada balizada	Superficie del esquí.

Tabla 3: Repercusión del análisis técnico.

Al igual que con el análisis biométrico, se procede a describir más precisamente estas características y su influencia en el diseño del esquí.

-Nivel :

El nivel de esquí está directamente proporcionado con la fuerza que el esquiador ejerce sobre sus esquís. Un esquiador con alto nivel busca en mayor medida un esquí duro que aguante cierta agresividad. Si bien es cierto que el esquí duro será mucho más difícil de manejar que el blando. Además, como ya se ha mencionado, grandes longitudes de esquí son más estables pero requieren también mayor nivel y control.

-Tipo de giro:

El radio del esquí es una de las cotas más importantes del mismo, ya que determina el radio mínimo de los giros que se podrán realizar. Este radio es el radio de la curva que une las dos partes más anchas del esquí, la de delante y la de detrás. Estas anchuras son cotas restringidas e ilegibles, ya que vienen determinadas por la longitud del esquí, la anchura del patín y el radio de giro, y no hay cabida a más grados de libertad para estas medidas.

-Velocidad:

Como previamente se ha mencionado, las altas velocidades requieren esquís estables y por tanto rigidez y longitud que proporcionen una estabilidad acorde con las velocidades a las que el esquí se va a someter en su uso.

-Tipo de pista:

Siendo muy generalista, los tipos de nieve se pueden clasificar en dos: pista y fuera pista. Los esquís serán distintos en los dos casos. Un esquí de fuera pista o esquí *freeride* necesita ser mucho más ancho que uno de pista, ya que necesita grandes superficies para no hundirse en la nieve polvo etc. Además es un esquí más blando ya que no es necesario ejercer tanta fuerza en este tipo de nieve.

En este caso, se busca un esquí de pista, la geometría viene muy determinada por este rasgo, ya que las cotas se ajustarán a las que se consideren dentro del rango de un esquí de pista y que se especificarán posteriormente en el capítulo de diseño.

Este análisis nos proporcionará datos no aplicados en la compra de un esquí comercial, además, jugaremos con la posición de las fijaciones, que, al ser el elemento más pesado del esquí, determinará en gran parte el centro de gravedad del conjunto esquí-esquiador.

Además de estas características plenamente objetivas, al ser un esquí adaptado a un esquiador, es preciso escuchar también los deseos, preferencias y lo que este busca en su nuevo esquí:

En este caso, se busca un esquí que exija al esquiador bajar el centro de gravedad y que permita un giro agresivo con alta adherencia en nieve dura. Es cierto que esto penalizará en nieves blandas y a principio de temporada cuando las piernas están débiles, pero el objetivo en estos esquís es bajar rápido y fuerte en pista balizada y se priorizarán las propiedades que permitan esto último. Es preciso recalcar otra vez que no se busca un esquí polivalente ni impersonal y que, por lo tanto, a lo largo del proyecto se van a priorizar características y objetivos muy específicos, sacrificando así otros que el cliente considere menos relevantes en el esquí que busca.

Posteriormente, en el capítulo de diseño se precisarán la geometría y cotas escogidas para el esquí en cuestión.

9. CAPÍTULO II : DISEÑO

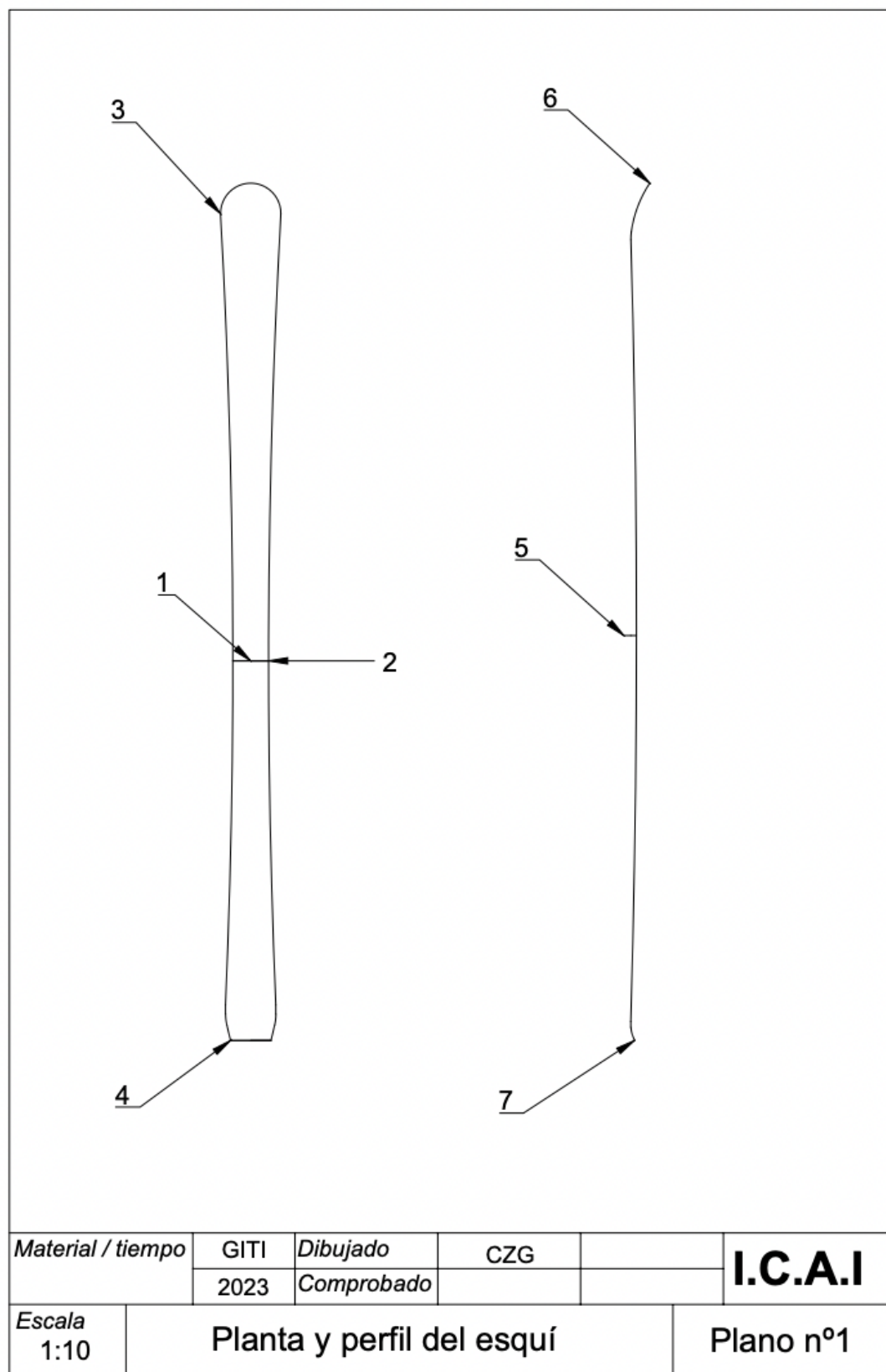
En este capítulo se documentarán los distintos criterios aplicados en la elección de las cotas del esquí, así como el laminado de las fibras y otros detalles del diseño del esquí para su posterior fabricación. Cabe destacar que todas las cotas siguientes estarán expresadas en milímetros. Se considera relevante comenzar con una breve descripción de la terminología técnica que se empleará a lo largo del capítulo.

9.1 Terminología

El plano a continuación (sin acotar) muestra la terminología de las distintas partes y cotas relevantes en el diseño del esquí.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA - I.C.A.I.

INGENIERÍA INDUSTRIAL Trabajo de Fin de Grado Carmen Zulueta Guisasola



Plano 1: Plano de planta y de perfil del esquí sin acotar.

En la siguiente tabla se muestra la nomenclatura de cada etiqueta del plano anterior.

Etiqueta	Nombre
1	Patín
2	Radio
3	Espátula delantera
4	Espátula trasera o cola
5	<i>Camber</i>
6	<i>Rocker</i> de la espátula delantera
7	<i>Rocker</i> de la cola

Tabla 4: Terminología del esquí.

Cabe resaltar que, en el plano anterior, al ser un plano sin acotar, tanto el *camber* como el *rocker* de la espátula trasera están exagerados con el objetivo de visualizar correctamente a lo que se refieren los términos. En los posteriores planos ya acotados, los cuales se utilizarán para la fabricación de los esquís, estos se encontrarán a escala y por ello la percepción visual será mínima, ya que son medidas muy sutiles comparadas con otras grandes cotas como la longitud del esquí.

1. Patín

Se trata de la zona más estrecha del esquí. En un esquí de pista, esta medida oscila entre los 65 y los 80 mm. A partir de esta medida, pasan a considerarse esquís *All-mountain*, esquís polivalentes para más tipos de nieve y pistas.

La razón de esto se basa en la fuerza normal que ejerce el suelo en reacción a la fuerza ejercida por el esquiador. Esta fuerza de reacción, como su nombre indica, será la respuesta de la fuerza ejercida por el pie del esquiador, por lo tanto, será igual y opuesta a esta y además, actuará en el mismo punto. En el caso de los esquís de pista, el lugar donde necesitamos más fuerza es en los cantos del esquí, es decir, en los laterales, ya que en nieves duras, es importante que los cantos del esquí se agarren con fuerza en la nieve. Por ello, cuanto más se acerque la anchura del patín a la anchura del pie, más localizada estará esta fuerza en los cantos del esquí.

Se comprueba esto al esquiar en pista con un esquí *freeride* de patín más ancho, ya que para que los cantos reciban la misma fuerza que en el esquí de pista, la fuerza ejercida tendrá que ser mucho mayor.

También se podría justificar esto en términos de presión, ya que en el diseño de esquís se juega con el área o superficie de los mismos.

Con $P = \frac{F}{A}$, se concluye fácilmente que en un esquí de mayor superficie, para que se alcance la misma presión, la fuerza debe ser mayor, ya que presión y área son inversamente proporcionales.

2. Radio

Se trata del radio físico de la curva que une las dos partes más anchas del esquí, la de delante (espátula) y la de detrás (cola). Determinará el radio de giro mínimo que el esquiador podrá realizar. Por ejemplo, en esquís de slalom, este radio es muy pequeño, ya que pasar palos situados a no mucha diferencia de altura, obliga a hacer giros muy cerrados. Por lo contrario, para esquís de slalom gigante, disciplina en la cual las puertas a pasar están mucho más separadas en altura y los giros son significativamente más amplios, el radio de giro será mucho mayor.

Los esquís a diseñar son esquís recreativos, no de competición, por ello se situarán en un punto medio de los descritos anteriormente, siendo estos dos extremos opuestos en cuanto a radios de giro.

5. Camber

El camber es la distancia que hay desde el suelo hasta el patín cuando no hay peso ejercido en el esquí. Lo ideal es que el camber esté situado donde más fuerza se vaya a ejercer, para que cuando el esquiador se calce los esquís, estos se aplanen. El camber tiene varias funciones, una de ellas es que debido al peso del esquiador el esquí no se hunda en la nieve, sino que alcance el nivel de esta, formando una superficie totalmente plana y paralela a la nieve.

6. Rocker

Como se puede observar en el plano de perfil, el rocker es la elevación de la parte delantera del esquí, la espátula.

La posición natural de un esquí en momentos distintos al giro es oblicua al plano de la nieve, ya que se debe clavar canto. A su vez, cuando se realiza el giro, lo que se está haciendo es cambiar la fuerza de una pierna a otra. Al esquiar, la presión debe ser ejercida en el esquí exterior. Por lo tanto, la ejecución del giro está basada en el traslado de la fuerza y de esta manera el esquí exterior pasa a ser el interior y viceversa.

Al realizar este cambio, naturalmente se cambia el lado de cantos que se están clavando en la nieve. Es por tanto lógico que para realizar este cambio el esquí pasará por una posición de 0° de inclinación con respecto al plano de la nieve. Por la geometría del esquí, en este momento del giro, la longitud efectiva del mismo es menos debido al *rocker*. Gracias a esto, el esquí pivotará más fácilmente en el momento del giro y serán más manejables. Cabe recalcar que cuando el esquí está clavando canto, es decir, oblicuo a la nieve, la longitud efectiva del mismo es la longitud del esquí en sí, por lo tanto, el *rocker* en su medida no compromete la estabilidad del esquí.

En un esquí de pista, el *rocker* está situado entre un 5% y un 15% de la longitud de la espátula. Por lo contrario, en un esquí fuera pista el *rocker* es mayor, ya que este también facilita la flotación del esquí en nieve polvo, pero no se trata de lo que se busca en este proyecto.

9.2 Definición de cotas

Con el estudio del esquiador concluido, se obtienen unas cotas que se consideran óptimas en base a lo descrito en el apartado anterior.

La elección de las cotas de un esquí se basa principalmente en la elección de la longitud del esquí, del radio de giro, y de la anchura del patín. Como se observa en el siguiente plano, el resto de las cotas son medidas generadas por la naturaleza de las cotas anteriores elegidas deliberadamente, razón por la cual son cotas de números no redondos, sino generados por las restricciones de los grados de libertad.

Cotas establecidas por elección

Cota	Medida
Patín	75 mm
Longitud	175 cm
Radio	16 m
<i>Camber</i>	5 mm
<i>Rocker</i>	40 mm

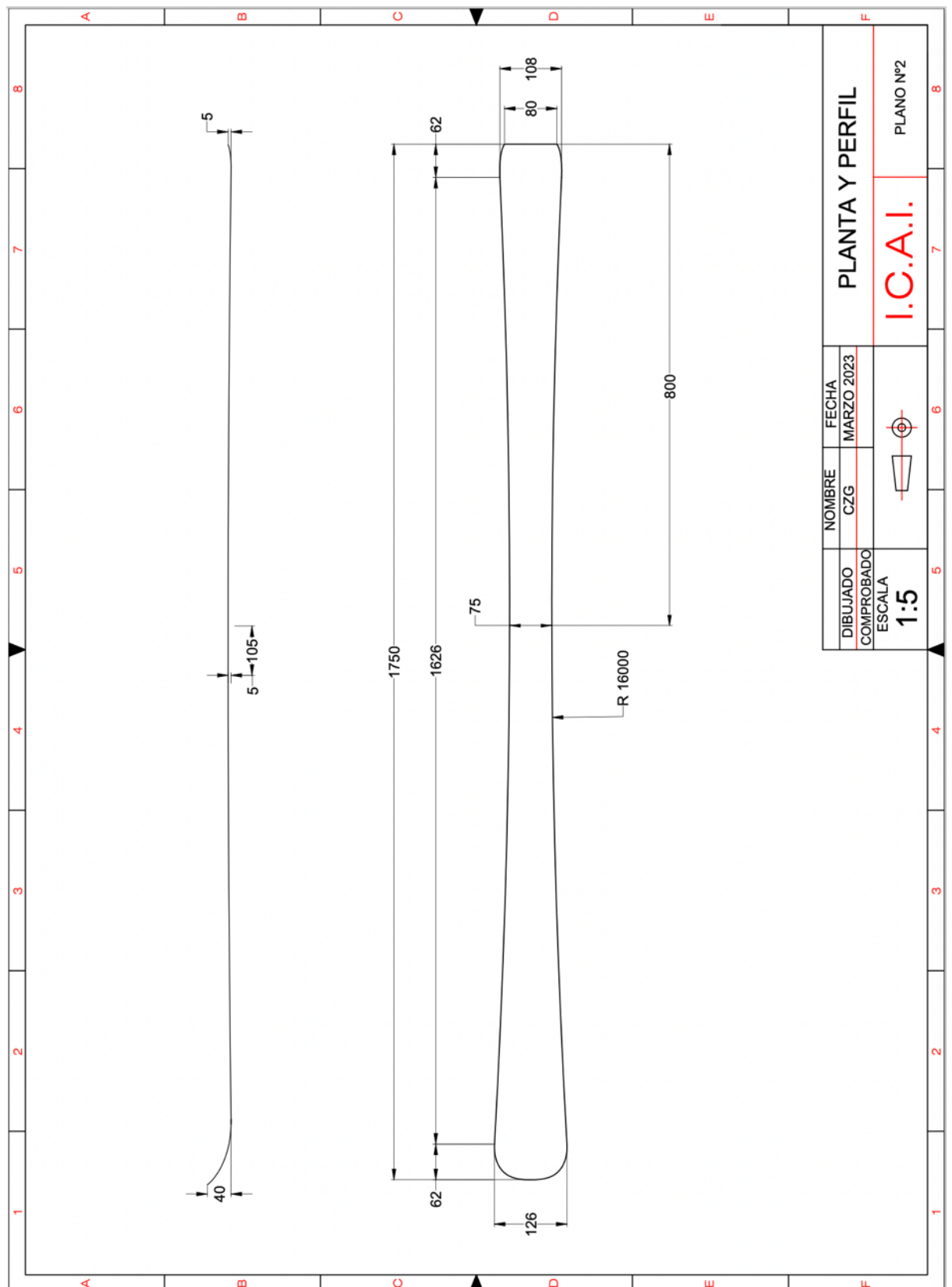
Tabla 4: Cotas elegidas para la geometría del esquí.

Cotas restringidas

Cota	Medida
Espátula	126 mm
Cola	108 mm

Tabla 5: Cotas impuestas por restricciones de las cotas elegidas.

Se muestra a continuación un plano A3 de *Autocad* de planta y perfil acotado con las medidas anteriores.



Plano 2: Plano de planta y perfil del esquí acotado.

Es preciso recalcar que la ausencia de espesor en el plano de perfil se debe a que el espesor depende del laminado de fibras que se escojan, así como del grosor del núcleo de madera, proceso posterior a la definición de la geometría del esquí.

Posteriormente, al concluir la fase mencionada, se incluirán los planos más precisos incluyendo las dimensiones de espesor como consecuencia de la cantidad y el gramaje de fibras que se escojan para el laminado.

Se observa en el plano un esquí con gran canto efectivo. El canto efectivo es la longitud de canto que hará contacto con la nieve al realizar los virajes. En un esquí de pista de alto nivel se busca un canto efectivo largo, ya que son pocos momentos en los que se derrapa, de este modo se prioriza el buen agarre en posición oblicua, que será la natural del esquí. El canto efectivo se regula con la espátula, no con la altura que esta alcanza sino con la proyección horizontal que esta tenga. A mayor proyección horizontal, menor será el canto efectivo, ya que habrá mayor superficie del esquí elevada respecto del nivel de la nieve.

9.3 Diseño estructural: espesor máximo del núcleo de madera

La parte estructural que nos va a proporcionar la inercia principal del esquí será el núcleo del mismo. Las fibras aportarán otras propiedades más precisas para cada parte del esquí como la resistencia a flexión en el camber o a torsión en la cola.

Para estudiar cual debe ser el espesor del esquí, aproximaremos la estructura del esquí a la de una viga biapoyada de longitud $L=1626$ mm con una carga puntual en el *camber*, que es el punto en el que se aplica la fuerza del peso al esquí.

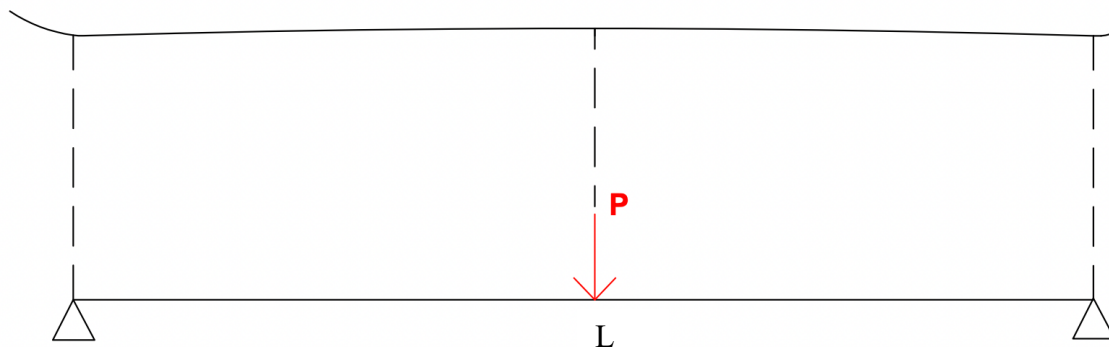


Figura 1: Aproximación estructural del esquí a una viga biapoyada.

Analicemos los esfuerzos que sufrirá la viga (esquí). Se analizan estos esfuerzos en plano, ya que es muy complicado aproximar la pendiente media a la que se utilizarán los esquís. Se tendrá esto en consideración al aplicar un factor de seguridad n en el dimensionamiento de la viga.

-Axiles

Habrán esfuerzos axiales debido al empuje horizontal que producirá la punta de la bota en la fijación. Son sin embargo esfuerzos despreciables frente a los demás (cortante, flector y torsor) que sufrirá el esquí.

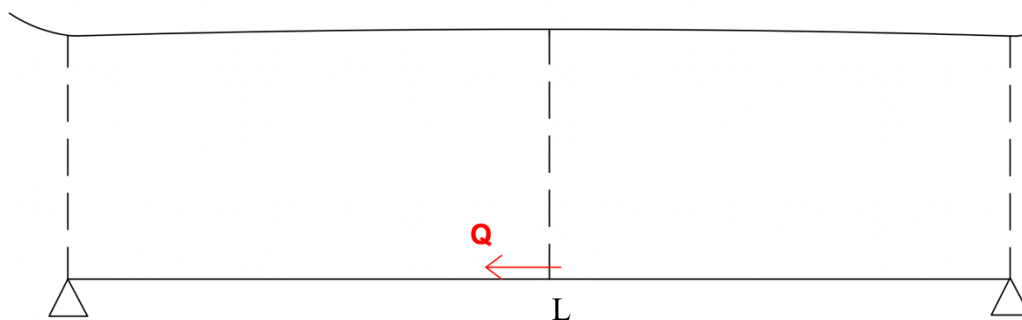


Figura 2: Diagrama de axiles.

No se aprecia ningún diagrama de axiles, ya que como se ha mencionado, con el objetivo de simplificar el estudio de dimensionamiento, y debido a la imperceptibilidad de estos esfuerzos frente a los principales, se despreciarán a efectos prácticos.

Al no haber calculado a estas alturas la posición exacta de las fijaciones del esquí, se ha colocado la carga Q ligeramente adelantada al camber, ya que como se ha especificado anteriormente, el camber debe coincidir con la cabeza de los metatarsianos, por tanto la punta del pie y la fijación estarán sutilmente adelantadas al camber.

Al asumir nulos los esfuerzos axiales, procedemos a calcular las reacciones en los extremos del esquí o en los apoyos de la viga,

A pesar de que a simple vista parezca que la carga P se encuentra en $L/2$, esto no es así. La carga P es el peso y la fuerza que ejerce el esquiador, la cual se ejerce en el camber, y este no se encuentra en la mitad. Atendiendo a las cotas el plano, procedemos a ubicar la carga P de la siguiente manera:

El segundo apoyo se encuentra a 62 mm. del extremo trasero del esquí o viga. A su vez, el patín, que se encuentra a 800mm del extremo trasero, está 105 mm retrasado respecto del camber, y por tanto el camber se encontrará a una distancia $d=800-62+105=843\text{mm}$ del apoyo derecho de la viga simplificada. Debido a que $L=1626\text{ mm}$, y $L/2= 813\text{mm}$ aproximaremos a $d=L/2$, ya que la diferencia es mínima comparada a la cota L en su totalidad, y esto simplificará considerablemente los cálculos.

Obtenemos la siguiente estructura simplificada:

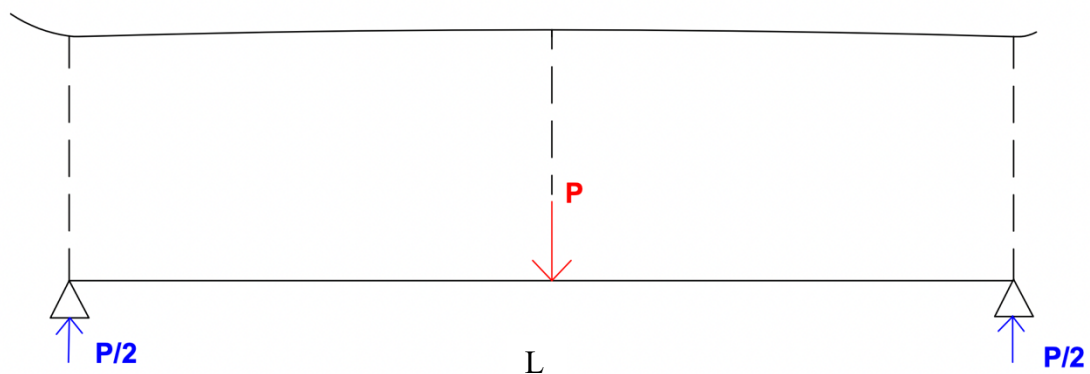


Figura 3: Aproximación estructural con reacciones esperadas.

-Cortantes

El diagrama de cortantes siguiente

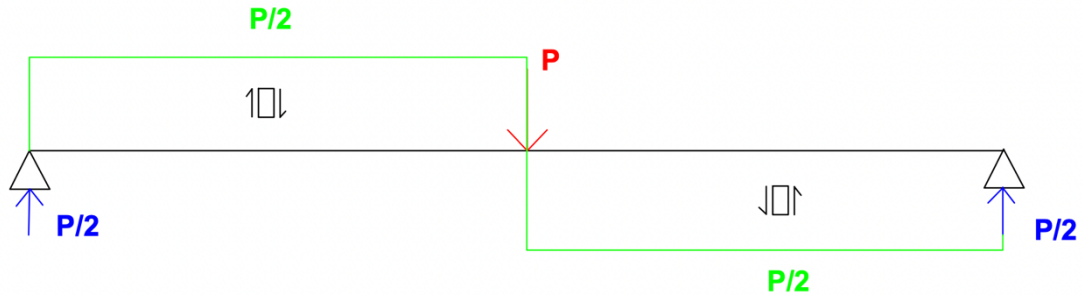


Figura 4: Diagrama de cortantes.

Se observa que el cortante máximo $Q_{\text{máx}}$ que sufrirá la viga es $P/2$.

-Flectores

En el caso de los flectores, debemos hallar el momento flector máximo que sufrirá el esquí, para poder dimensionar correctamente las dimensiones que deberá tener el esquí para cumplir con la inercia necesaria para ser resistente a la carga aplicada.

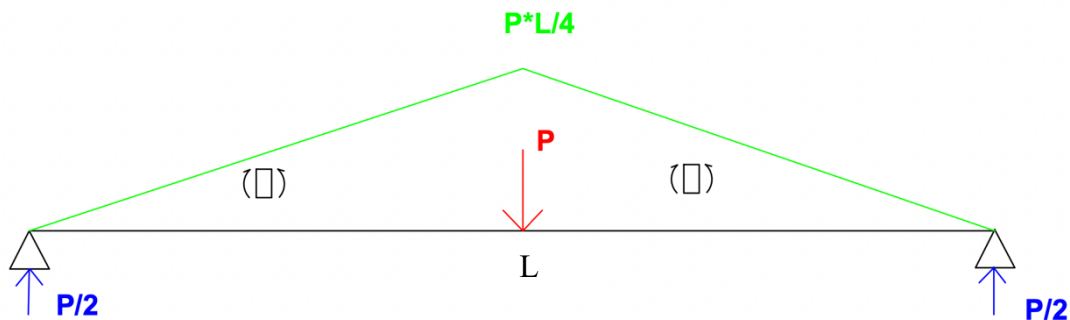


Figura 5: Diagrama de flectores.

El diagrama revela que el momento flector máximo $M_{\text{máx}}$ que sufrirá el esquí será de $PL/4$, localizado en el camber, donde se ubica la carga, al igual que ocurre en el caso del cortante el cortante $Q_{\text{máx}}$.

-Torsor

El esquí sufre momento torsor, especialmente en la cola y en la espátula, en el momento del giro, ya que son las zonas que rotan de manera más pronunciada sobre el eje del esquí debido a que son las más lejanas al pie al realizar el giro. En este caso, el torsor nos determinará el laminado de las fibras, ya que es un esfuerzo más complejo de estudiar y se pueden reforzar las zonas más afectadas con el laminado adecuado, así como con la orientación de fibras más eficaz.

Dimensionamiento del espesor necesario del núcleo de madera

La sección transversal del núcleo de madera en el *camber* es un rectángulo como el siguiente:

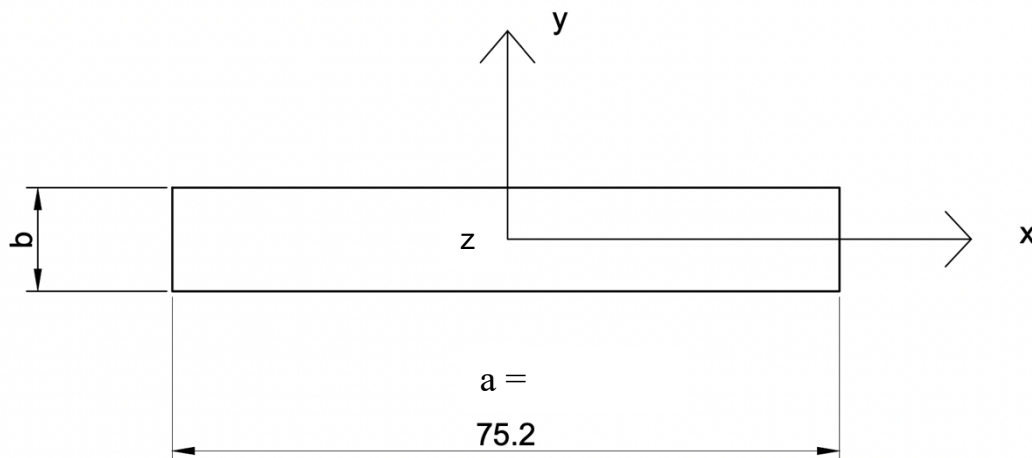


Figura 6: Diagrama de sección del núcleo.

Siendo de 75,2 mm el ancho del esquí a la altura del camber, medido sobre el plano. Recalcamos que es una medida muy parecida a la del patín ya que el radio del esquí es de 17 m y el camber y el patín se encuentran muy cerca, por lo tanto la diferencia de anchura es mínima (0,2 mm).

Se trata de dimensionar el espesor 'b' a partir del momento flector máximo, ya que la anchura a ya se ha decidido en el momento de diseño de la geometría del esquí.

Para ello utilizaremos la fórmula de Navier:

$$\sigma_{adm} \geq \frac{M_{m\acute{a}x}}{I_z} \times b_{m\acute{a}x}, \text{ con:}$$

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{PL}{4} = \frac{667,08 \times 1,626}{4} = 271,168 \text{ Nm}$$

$$I_z = \frac{1}{12} \times ab \times (a^2 + b^2) = 0,006267b \times (0,00566 + b^2)$$

$$P = m \times g = 68 \times 9,81 = 667,08 \text{ N}$$

$$L = 1,626 \text{ m}$$

$b_{m\acute{a}x}$ es la distancia máxima vertical desde la fibra neutra, esto es, la fibra que sufrirá tensión nula debido al cambio de compresión a tracción. Para ello habrá que estudiar qué zonas de la sección sufrirán esfuerzos de tracción (+) y qué zonas sufrirán los de compresión. Se muestra el diagrama de tensiones en la siguiente figura:

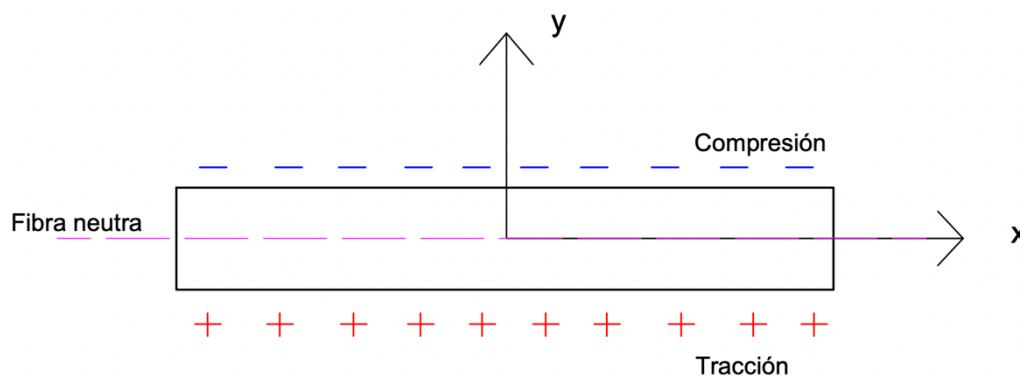


Figura 7: Esfuerzos en la sección del núcleo.

En el diagrama se aprecia que $b_{m\acute{a}x}$ será igual a $\frac{b}{2}$, ya que las fibras que más sufren son la superior y la inferior, siendo en este caso el peor caso la fibra inferior ya que es la que está sometida al esfuerzo de tracción máximo.

$$b_{m\acute{a}x} = \frac{b}{2}$$

Por último, para poder despejar b en la ecuación, necesitaremos la tensión admisible σ_{adm} de la madera de fresno con la que se va a fabricar el núcleo, así como el factor de seguridad n que se quiera aplicar.

El esquí se fabrica en madera de fresno, una madera tenaz con una σ_{adm} del orden de 110 Mpa. Metiendo estos números en la ecuación:

$$\sigma_{adm} \geq \frac{M_{m\acute{a}x}}{I_z} \times b_{m\acute{a}x}$$
$$\frac{110 \times 10^6}{n} \geq \frac{271,168}{0,006267b \times (0,00566 + b^2)} \times \frac{b}{2}$$

Haciendo cuentas rápidas con esta ecuación, se concluye que, o se aplica un factor de seguridad n más grande de lo necesario, o el momento flector que se va a ejercer sobre el esquí no será suficiente para romper la madera en ningún caso.

Por ello, habiendo demostrado que el esquí no va a romperse, el estudio del espesor del núcleo se centra en la consistencia y peso que debe tener el esquí, así como la reactividad que se busca.

La reactividad del esquí es la capacidad que este tiene para volver a su forma original después de sufrir una deformación. Se busca que al salir de un giro, el esquí se recupere rápidamente para estar preparado para entrar en el siguiente. Aunque se haya comprobado que el esquí no va a romper, cuanto más fino sea el núcleo, más deformará al ejercerse presión sobre él. Por lo tanto, se debe proponer un espesor que permita que estas deformaciones, además de ser mínimas, sean reversibles rápidamente.

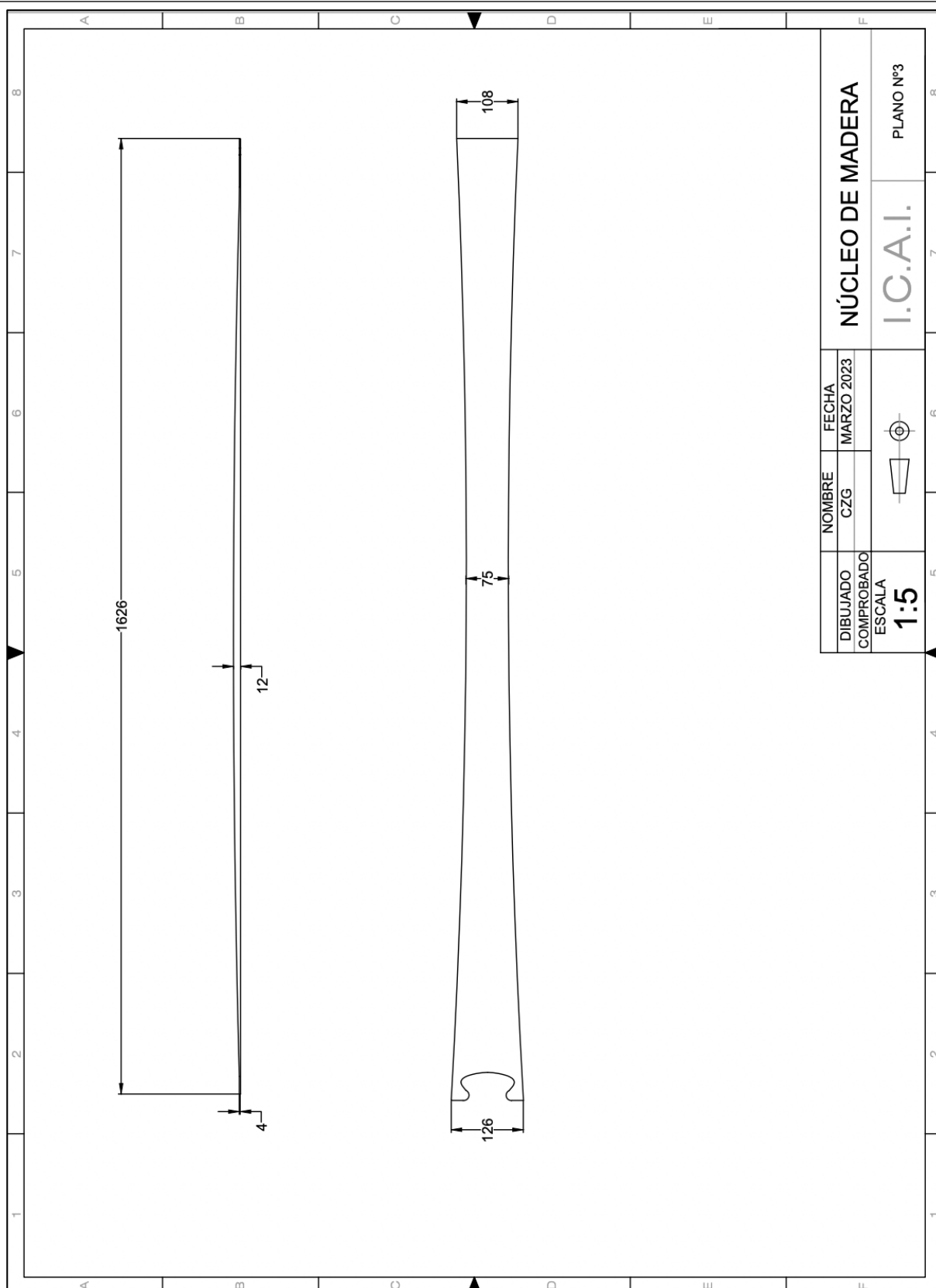
Teniendo en cuenta que no se puede calcular esto analíticamente, ya que depende de numerosos factores como el tipo de giro, la velocidad, el tipo de nieve etc., se dimensionará el espesor comparando distintos esquís comerciales y aproximando el esquí a esquís cuyo comportamiento sea parecido al que se quiere obtener.

Habiendo tomado esta medida en distintos esquís, el espesor máximo en los esquís relevantes oscila entre los 10 mm y 15 mm. Se situará el núcleo ligeramente por debajo de la mitad de ese intervalo, ya que las posteriores fibras aportarán espesor. El núcleo tendrá un **espesor máximo** en el *camber* de **12 mm**.

Se habla en todo momento de espesor máximo, ya que el espesor no es uniforme a lo largo de todo el esquí. La cola y la espátula tienen que tener más capacidad de torsión. Además, como la fuerza se ejerce en el centro, lejos de los extremos, si el esquí tuviese la misma sección, serían difícilmente manejables.

Este espesor de 12 mm se irá reduciendo linealmente hasta llegar a un espesor de 4 mm al comienzo de la espátula. El espesor en la espátula será constante y será de un material dúctil llamado ABS que se explicará en apartados posteriores.

El núcleo de madera consta de dos componentes: el propio núcleo y los *sidewalls*. Los *sidewalls* serán de bambú, un tipo de madera más dúctil que el fresno, adecuada para los laterales del esquí ya que al ser las zonas de agarre a la nieve, se tendrán que acoplar más dócilmente a la superficie del terreno al clavarse los cantos. Vienen de proveedor con sección cuadrada de lado 10mm. La medida horizontal o anchura no se modifica, ya que se considera apropiada la proporción en el patín de 20 mm de bambú frente a 55 mm de fresno. La medida vertical o espesor se mecaniza para dotarla de unas dimensiones idénticas a las del núcleo de fresno.



Plano 3: Núcleo de madera para mecanizar.

El núcleo tiene esa forma en su extremo, ya que es ahí donde se enganchará la espátula. Esta es de un material llamado ABS, cuyo nombre técnico es acrilonitrilo butadieno estireno, un plástico muy resistente a los impactos. No se desea tener una transición de una línea recta entre la madera y la espátula, ya que sería un cambio muy brusco de propiedades. En su lugar, se acoplan estos componentes con una curva para que haya una pequeña zona de cambio gradual del comportamiento.

9.4 Laminado de fibras

Una vez dimensionado el núcleo, se debe elegir la composición del laminado del esquí para conseguir el comportamiento deseado. Para ello, se realizará un primer prototipo, y en función del resultado se valorará qué añadir o eliminar.

La inmensa mayoría de los esquí de pista están hechos con placas de titanal, que aporta rigidez y reactividad al esquí. El titanal es una aleación de aluminio con otros metales, principalmente cinc.

Uno de los objetivos de este proyecto es el de conseguir un esquí igual de rígido sustituyendo estas placas por fibras de materiales compuestos como la fibra de carbono o la fibra de vidrio. Se diseñará el laminado atendiendo a tres rasgos generales: peso, rigidez a flexión y a torsión y reactividad.

En cuanto al peso, se quiere conseguir un peso notablemente reducido respecto de un esquí comercial. Los esquí comerciales con prestaciones similares a las que se buscan oscilan alrededor de los 2500 gramos. El objetivo es reducir este peso en un 15% aproximadamente.

Para tener un punto de partida en cuanto a la composición del esquí, se ha destruido un esquí de alta gama y se ha ido decapando para ver las fibras que lo componen. El material compuesto principal es la fibra de vidrio. La fibra de carbono escasea, algo que se quiere cambiar en el esquí que se está diseñando. La fibra de carbono es un material muy reactivo y como se ha explicado antes, un esquí debe serlo, por lo tanto, ya que no se dispone de titanal, se aumentará la proporción de fibra de carbono.

Es difícil sin embargo realizar una comparación entre materiales tan distintos como el titanal y la fibra de carbono, así como encontrar el equilibrio perfecto entre un esquí duro pero no demasiado. Estos aspectos se escapan de cualquier cálculo matemático o físico, son resultados que se obtienen experimentalmente.

Por ello, se realizará un primer prototipo con un laminado que se asemeje lo más posible al esquí destruido, añadiendo a este laminado una pequeña cantidad de fibra de carbono para compensar la falta de titanal.

9.4.1 Laminado del esquí destruido: Atomic Redster SX

El esquí que se ha destruido es un Atomic Redster SX. Esquí de pista de alta gama y con prestaciones similares a las que se buscan. Se trata de un esquí con núcleo de madera, una capa de titanal y fibra de vidrio. El laminado, en orden ascendente, es el siguiente:

- Suela + cantos
- Fibra de vidrio 1050 gr/m²
- Núcleo de madera
- Placa titanal
- Fibra de vidrio 1050 gr/m²
- Recubrimiento estético

El primer prototipo se laminará con el mismo gramaje, pero sustituyendo 300gr/m² de fibra de vidrio por fibra de carbono, compensando así la pérdida del titanal.

9.4.2 Laminado del primer prototipo

Para el primer prototipo se propone un laminado en sándwich simétrico y uniforme en todo el esquí. De esta manera, se apreciará más directamente qué falta o que sobra en cada zona o en el esquí en general, ya que el laminado es igual a lo largo del esquí entero.

El laminado propuesto, de suela a superficie, es el siguiente:

- Suela + cantos
- Fibra de vidrio triaxial 750 gr/m²
- Fibra de carbono biaxial 300gr/m²
- Núcleo fresno + *Sidewalls* bambú
- Fibra de carbono biaxial 300gr/m²
- Fibra de vidrio triaxial 750 gr/m²

- Recubrimiento: *Topsheet* Nylon

Como se puede observar, es un laminado muy parecido al esquí comercial destruido, adhiriendo fibra de carbono al núcleo para aportar la rigidez que proporcionaba el titanal.

9.4.3 Laminado definitivo del esquí

El primer prototipo ha resultado en un esquí más rígido de lo que se esperaba para ese laminado. Sin embargo, no alcanza la dureza que se busca en el resultado final. Además, se busca un esquí un tanto más reactivo.

Para solucionar estos aspectos, en primer lugar, se cambiará la gran mayoría del vidrio por carbono y se jugará con la orientación de las fibras, lo cual influirá directamente en la reactividad.

Por tanto, se considera que el laminado no tiene por qué ser igual a lo largo de todo el esquí. Por ejemplo, la espátula y la cola son dos elementos que tienen que poder torsionar, por lo tanto, se considera que debe haber menos cantidad de **fibra de carbono biaxial**. En torsión, las deformaciones ocurren en dirección oblicua. La fibra de carbono biaxial consiste en una superposición de dos telas. Una de ellas oblicua a 45° positivos y la otra a 45° negativos. Ambas direcciones son necesarias, ya que depende de hacia dónde se realice el giro, se tensionarán unas fibras o las otras. Si hubiera mucha cantidad de esta fibra tan resistente a torsión e la espátula y la cola, el esquí sería muy difícilmente manejable, ya que no conduciría bien el giro.

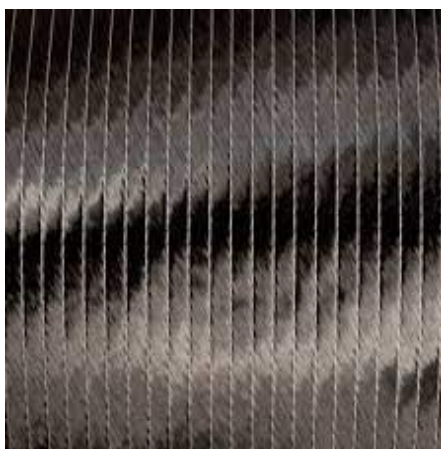


Figura 8: Fibra de carbono biaxial.

Para resistir los esfuerzos flectores, se empleará **el carbono unidireccional**, el más resistente a flexión, ya que todas las fibras que lo componen están orientadas en la misma dirección y, por tanto, todo su gramaje se centra en resistir en la misma dirección.

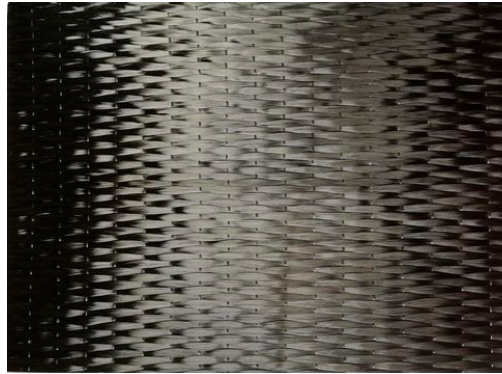


Figura 9: Fibra de carbono unidireccional.

El **twill de carbono** proporcionará consistencia y dureza al esquí. No se pone necesariamente por tener que resistir esfuerzos, sino por homogeneizar estos y dar un comportamiento uniforme al esquí, ya que son fibras hiladas a 90° que se disponen longitudinalmente y transversalmente en el esquí y que abarcan toda la superficie de este.



Figura 10: Twill de carbono.

Por último, para aportar peso y consistencia al esquí, se incluirá fibra de vidrio, que es menos ligera que la de carbono. Aunque se haya mencionado el objetivo de un esquí ligero, este no puede serlo demasiado, ya que un esquí demasiado ligero es inestable a altas velocidades. Además, la fibra de carbono aportará cierta elasticidad al esquí. Se pondrán también en forma de *twill*, ya que en este caso tampoco se busca resistencia en una dirección en concreto, sino que solidez en general.



Figura 11: Twill fibra de vidrio.

El laminado propuesto teniendo en cuenta las propiedades de las fibras descritas es el siguiente:

Tomando como referencia 0 la cola del esquí,

- Suela + cantos
- Fibra de carbono biaxial 600 gr/m² 0-1750
- Twill de fibra de vidrio 200 gr/m² 0-1750
- Núcleo de fresno 12mm + *Sidewalls* bambú
- Fibra de carbono unidireccional 300 gr/m² 0-1750
- Fibra de carbono biaxial 600 gr/m² 30-1100
- Twill de fibra de carbono 200 gr/m² 0-1750

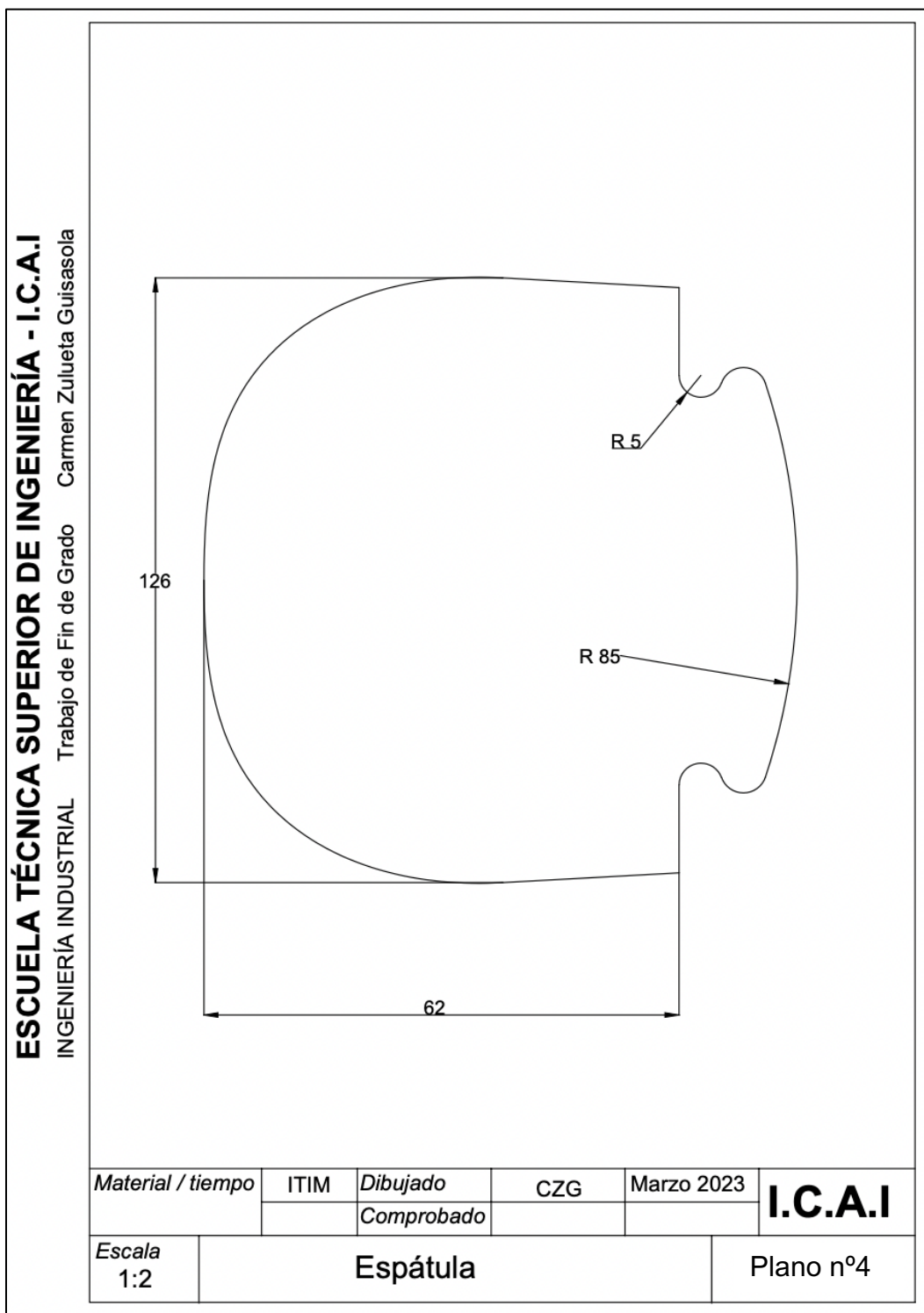
9.5 Espátula

Una última pieza que se debe mecanizar, y por tanto diseñar, es la espátula del esquí. La espátula puede ser tanto de bambú como de ABS. En este caso, en los planos se aprecia que la pendiente de la curvatura de la espátula es bastante pronunciada, ya que el canto efectivo es largo y la altura de 40mm del *rocker* se obtiene en una distancia muy corta.

Por ello, se ha decidido que sería mejor una espátula de ABS para este esquí, ya que es un material más dúctil y elástico que el bambú, el cual acumularía demasiadas tensiones si se forzara a doblar con la curvatura que se desea y podría llegar a partir.

Se muestra a continuación el plano. Las cotas de la curvatura del enganche no tienen justificación. Son cotas generadas aleatoriamente tras dibujar la geometría. Como

se ha explicado anteriormente, la transición no es en línea recta para no tener un cambio brusco de las propiedades. Las cotas que sí son relevantes son las del perímetro exterior del esquí, ya que pertenecen a las dimensiones geométricas del esquí.



Plano 4: Espátula.

9.6 Acabado estético

La capa del laminado que contiene el acabado estético del esquí se llama el *topsheel*, está hecho de nylon y se trata de una lámina transparente sobre la que se imprime el diseño que se desee.

Se ha optado por un diseño minimalista y discreto, para que el protagonista del acabado no deje de ser el dibujo característico la fibra de carbono de capas inferiores.

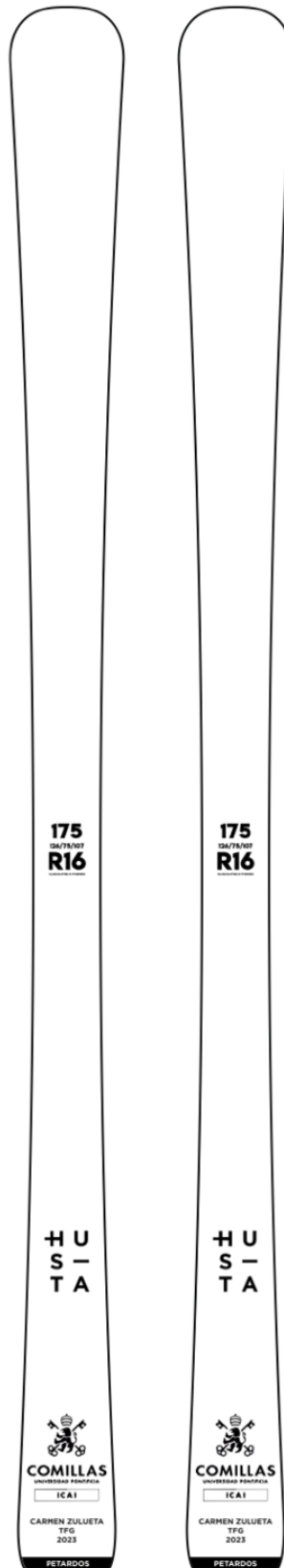
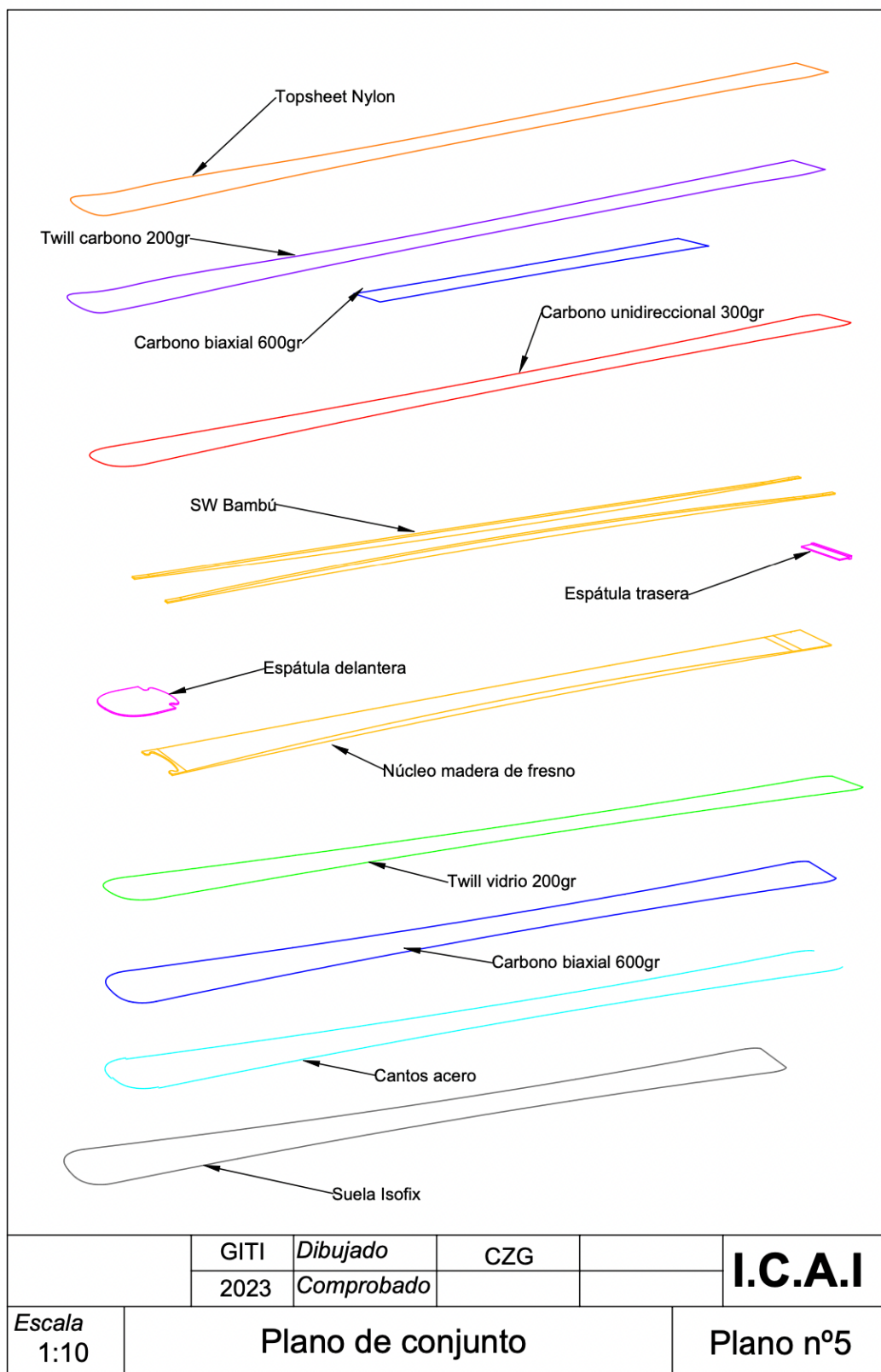


Figura 12: Diseño del acabado del esquí.

9.7 Plano de conjunto del esquí

Con todas las piezas descritas anteriormente, se realiza un plano de despiece con todos los componentes que conforman el esquí en su totalidad.



Plano 5: Plano de conjunto del esquí.

10. CAPÍTULO III : FABRICACIÓN

El proceso de fabricación del esquí una vez se ha diseñado tanto geométricamente como estructuralmente , se puede englobar en dos grandes fases, las cuales aglutinan a su vez otras subfases.

La primera fase comprende la preparación de cada pieza o capa y la segunda, la unión de estas piezas y capas entre sí, principalmente con resina epoxy, y en el caso de los cantos y la suela con otros adhesivos, como araldite o cianoacrilato.

Es importante señalar que el esquí se trabaja en todo momento en plano. Es decir, serán dos tablas planas hasta el último paso de la fabricación que consiste en el prensado. Se explicará en detalle posteriormente.

Para comenzar a describir el proceso de fabricación, explicaremos la preparación de las piezas por separado. Las piezas que se deben preparar para la posterior conformación son las siguientes:

- Suela
- Cantos
- Fibras (carbono y vidrio)
- Núcleo de madera de fresno
- Sidewalls
- Topsheet de nylon
- Espátula
- Cola
- Fijaciones

10.1 Maquinaria utilizada

10.1.1 Fresadora control numérico Sacchi Machinery FS MH 1325

Se trata de una máquina de control numérico de tres ejes con la que se realizan las operaciones tanto de reducción de espesor como de corte que requieren las distintas piezas. El programa utilizado para dicha máquina es CAM, un programa del mismo desarrollador que *AutoCad* que permite desarrollar el código de control numérico para el mecanizado de una pieza previamente diseñada con CAD.

La sujeción utilizada es el vacío, ya que es la más polivalente en el caso de mecanizar piezas grandes y distintas entre ellas.



Figura 13: Máquina de control numérico.

Figura 14: Dispositivo de control de la máquina.

10.1.2 Sierra vertical Hammer N4400

Para hacer los cortes de precisión más bien basta, se utiliza una sierra vertical Hammer N4400. Se trata de cortes gruesos como la reducción del tamaño de la madera para posteriormente mecanizarla de manera más fina en la fresadora.



Figura 15: Sierra vertical.

10.1.3 Prensa artesanal

Para darle la curvatura al esquí visto de perfil, hace falta una prensa. La utilizada en este caso es una prensa artesanal que consiste en un tubo en el que se inyecta aire a presión de 3 bar. El tubo de esta manera se infla ejerciendo presión sobre lo que haya debajo metido en la prensa. También cuenta con un control de la temperatura. Se explicará este posteriormente cuando se describa el proceso concreto del prensado de este esquí.



Figura 16: Prensa artesanal.

10.1.4 Plantilla para colocación de los cantos

A pesar de solo necesitarse para un proceso y por tanto encarecer la fabricación con un solo cometido, es de total necesidad. Se trata de la plantilla necesaria para la correcta adhesión de los cantos a la suela, cuyo proceso se explicará posteriormente en el apartado de unión de las distintas piezas.



Figura 17: Plantilla para la colocación de los cantos.

Como se muestra en la figura, se trata de un bloque de madera de unos tres centímetros de espesor que se podría considerar un útil de sujeción para dicho proceso.

10.2 Preparación de las piezas

Se explicará la preparación de todos los componentes del esquí de abajo a arriba, de suela a superficie.

10.2.1 Suela

La suela es de polietileno y se encarga a proveedor en rollos.



Figura 18: Material de la suela.

Lo primero, se corta un trozo de dos metros de polietileno, para posteriormente mecanizarlo en la fresadora. En el caso de la suela, solo se mecaniza perimetralmente para darle la geometría deseada, esto es, no hace falta reducción de espesor.

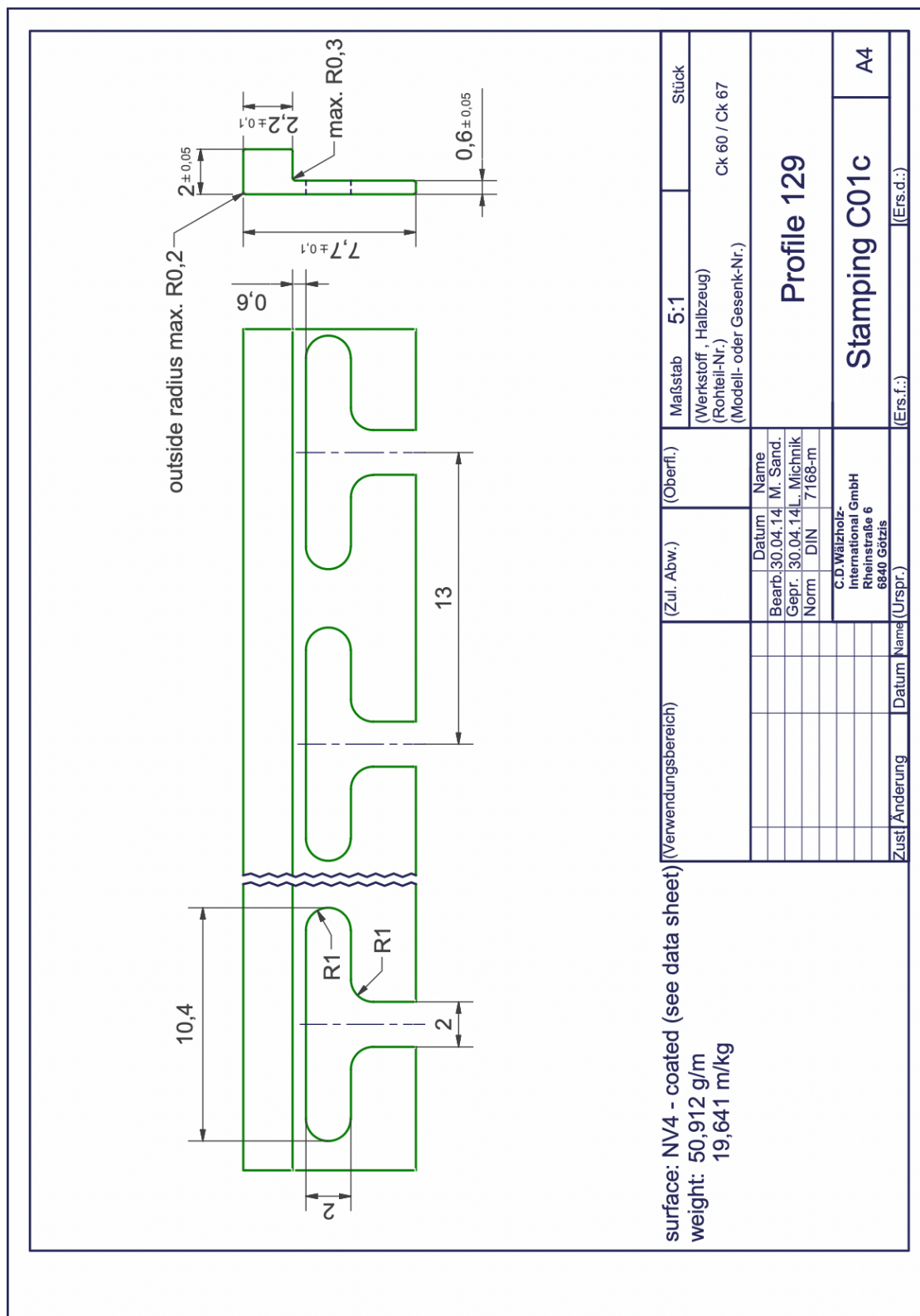
10.2.2 Cantos

Los cantos, igual que la suela, también se encargan a proveedor y vienen en rollos.



Figura 19: Rollo de cantos de acero.

Las dimensiones del canto empleado se muestran a continuación en el plano proporcionado por el proveedor.



Plano 6: Cantos del esquí.

Se cortan dos trozos de cuatro metros de canto, ya que el canto da la vuelta a todo el esquí, exceptuando la cola, y por tanto cada esquí llevará un poco más de canto que dos veces su longitud. Este esquí contará con canto corrido, lo cual quiere decir que no habrá interrupción del canto en la espátula.

Muchos esquís comerciales tienen una discontinuidad del canto en la espátula, que se compensa con una chapa mecanizada con la que se ahorra tener que darle la forma de la espátula al canto. Esto es beneficioso para su fabricación, ya que la espátula, al tener una forma curva, es lugar de conflictos para la fabricación canto. Este, al ser de acero, acumula muchas tensiones si se saca de su posición recta de equilibrio. Sin embargo, si se supera la laboriosa fabricación del canto corrido, se valorará mucho posteriormente en el comportamiento del esquí.

Si el canto presenta discontinuidad, el punto coincidente entre canto y chapa será conflictivo para la recepción de impactos o golpes, ya que supone un cambio de material y por tanto de propiedades.



Figura 20: Espátula sin canto corrido.



Figura 21: Espátula con canto corrido.

Para romper estas tensiones mencionadas, se utiliza una máquina artesanal que consiste en una especie de gato plegador que se muestra en la siguiente figura:



Figura 22: Gato curvador de cantos.

Se mete el canto entre los rodillos, y se gira el mango de madera, que curvará el canto deshaciendo estas tensiones. La forma que recibe el canto no será exactamente la que luego tenga este en el esquí. Sin embargo, es un buen punto de partida para posteriormente ajustar la forma manualmente.



Figura 23: Canto curvado.

10.2.3 Núcleo de madera

La madera llega del proveedor en grandes bloques. Para reducir este tamaño, únicamente para la comodidad en la fabricación, se utiliza la sierra Hammer N4400. Cuando tengamos un tamaño adecuado para trabajar, del resto se encargará la fresadora. Esta utilizará distintas herramientas para los procesos de reducción de espesor y para el corte del perímetro.

Una vez se reduce el espesor de la madera en bruto al espesor máximo que tendrá la sección del esquí, se pegan los *sidewalls*, del mismo espesor, con resina epoxy y a partir de este momento se mecanizarán en conjunto.



Figura 24: Núcleo y sidewalls previos a la colocación.

Se mete el conjunto en la máquina de control numérico que dotará al núcleo de la forma necesaria con la debida curvatura y cambios de espesor en las distintas zonas, como se ha precisado en el capítulo de diseño.

10.2.4 Sidewalls

Los *sidewalls*, como su nombre en inglés indica, son las paredes del esquí que van adheridas al núcleo de madera. Llegan al taller como finos y largos prismas de madera de bambú, en este caso.

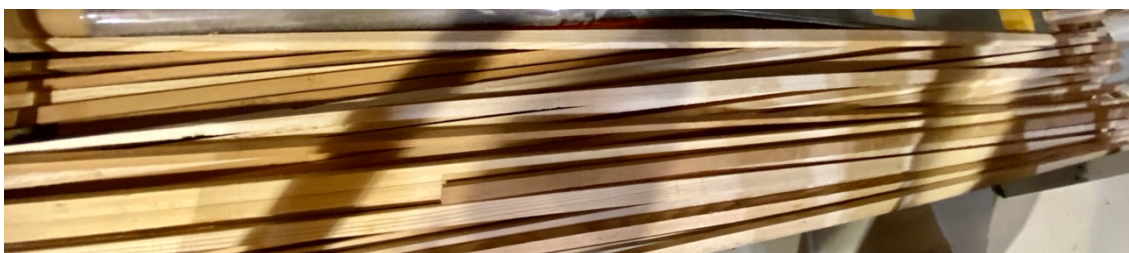


Figura 25: Material sin tratar para los sidewalls.

Antes de realizar esta unión, se mecanizará el *sidewall* en la fresadora con el espesor máximo que este tendrá y se adherirá al núcleo de fresno para que el conjunto sea trabajado como una sola pieza a partir de ese instante.



Figura 26: Conjunto núcleo-sidewall listo para ser mecanizado.

10.2.5 Fibras

En el caso de las fibras, el quid de la cuestión reside en los cálculos previos para decidir el laminado adecuado. En cuanto a lo que la preparación se refiere, únicamente se cortan las telas en un tamaño aproximado de dos metros de longitud por unos veinte centímetros de ancho para cada esquí.



Figura 27: Rollos de fibras.

Si se quiere actuar con precisión para que las fibras no se deshilachen durante el corte, se puede rodear el perímetro de corte con un poco de cinta de papel que hará que el corte sea más limpio.



Figura 28: Corte de las fibras.

Existe una única capa que deberá ser cortada con la geometría del esquí, la que va adherida directamente a la suela. Esto se debe a que los cantos añaden un espesor de 2 mm al perímetro de la suela, causando una pequeña diferencia de nivel. Si se hiciera caso omiso a este dato, el esquí tendría una ligera forma cóncava al terminarse. Por lo tanto, se trata de cortar esta primera fibra de carbono biaxial de 600gr con la geometría del esquí pero no con la misma dimensión, sino restándole al perímetro el ancho que ocupa el canto en el esquí. De esta manera el biaxial quedará al nivel del canto, salvando las diferencias de nivel que había anteriormente.

Cabe destacar que el laminado escogido en un principio situaba la fibra de vidrio RC 200gr pegada a la suela. Sin embargo, este gramaje de fibra no era suficiente para salvar la diferencia de espesores debida a los cantos y al detectar este problema se decidió hacer el cambio de orden de las fibras.



Figura 29: Biaxial con forma del esquí.

10.2.6 Topsheet

El topsheet es la capa de nylon de gramaje 200gr que mostrará el acabado del esquí, es decir el diseño gráfico que se quiera plasmar en el esquí terminado. El primer paso es imprimir sobre papel el diseño en tamaño real en una impresora especial de impresiones en gran tamaño.

Posteriormente, se realiza la sublimación sobre el nylon, técnica de impresión utilizada para imprimir en distintos materiales utilizando uno de soporte, en este caso el papel. Se trata de un proceso en el que la tinta pasa del estado sólido al gaseoso sin pasar por el líquido. De esta manera, las partículas de tinta penetran directamente en el material sobre el que se desea imprimir.



Figura 30: Rollo de nylon para topsheet.

De esta manera ya se tienen todas las capas del laminado. El *topsheet* lleva un plástico protector que previene al acabado final de restos de resina o se rasguños no deseados durante el prensado o las operaciones posteriores que incluyen herramientas de corte afiladas y amenazantes para el correcto acabado superficial.

10.2.7 Espátula

El material ABS con el que está hecha la espátula se recibe en rollos del proveedor.



Figura 31: Rollo ABS para espátula.

Al ser un material bastante rígido, es difícil aplanarlo para las operaciones en la fresadora. Además al ser dúctil, da bastantes problemas de enganchones en la máquina cnc y es poco habitual obtener un resultado exitoso a la primera. La operación que más problemas generaba era la reducción del espesor, ya que la herramienta utilizada no es afilada ni el filo incide perpendicularmente en la pieza. El fresado sin embargo no resultaba tan tedioso, no obstante, no sirve para nada que el fresado salga bien en una pieza ya rota por la reducción de espesor anterior.



Figura 32: Espátula defectuosa desechada.

Como se puede observar en la imagen de arriba, los enganchones se producían en los bordes, que es donde se producía la incisión de la herramienta. Ocurría cuando el borde no estaba perfectamente adherido a la mesa de trabajo de la máquina.

Después de varios intentos, se obtuvieron dos espátulas que se dieron por válidas.



Figura 33: Reducción del espesor de la espátula exitoso.

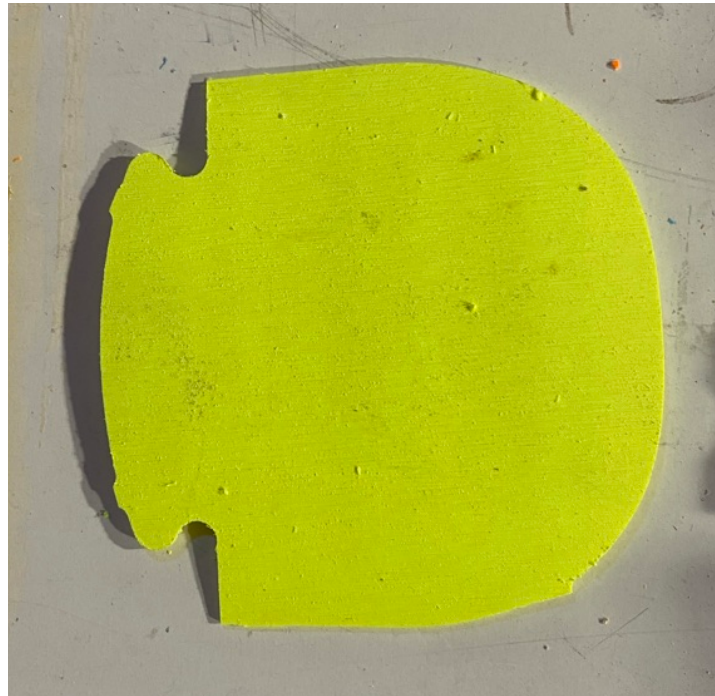


Figura 34: Espátula correcta.

10.2.8 Cola

La cola también está hecha de ABS, como la espátula. En este caso, la cola es una pieza que viene ya fabricada de proveedor, ya que tiene una geometría difícil de mecanizar. Además, ocurre igual que con los cantos, al ser piezas comunes para todos los esquís, sale rentable a la empresa pedirlos al por mayor.



Figura 35: Cola de ABS.

10.3 Unión de las piezas preparadas.

En este apartado, se explicará como se conforma el esquí total a partir de las piezas que han sido preparadas para el montaje.

10.3.1 Montaje del canto en la suela

La conformación canto-suela es uno de los procesos más laboriosos de todos, y a su vez el más importante. El canto tiene que estar perfectamente adherido a la suela por todo el perímetro del esquí. Es lo que va a proporcionar el agarre al esquiador en los momentos de conducción más agresiva y en la nieve dura.

Un utillaje esencial en esta fase es la plantilla mencionada. La suela antes de ser proporcionada con epoxy en el proceso de laminado, es un material muy blando y flexible, con poca consistencia, véase en la *figura 17*, que viene en rollos y no tiene aspecto de tender a desenrollarse. Es por eso que, si no contáramos con la plantilla, este sería un proceso que, a parte de ser mucho más difícil, no daría buen resultado.

Lo primero es colocar la suela fresada en la plantilla, de manera que ahora se estará colocando el canto alrededor de la rígida plantilla, pero encima de la suela. Lo siguiente será colocar encima el canto previamente doblado, y agarrar este con pinzas para tener una mínima sujeción.

Cabe destacar que, en este proceso, lo difícil es la espátula. Las zonas rectas, es decir, los laterales del esquí, no hay que ajustarlos, ya que los cantos ya tienen la forma adecuada para esa parte, únicamente hay que pegarlos. Por ello, se fijan primero las rectas y, una vez tenemos el canto estable en el esquí procedemos a ajustar la espátula manualmente con alicates.

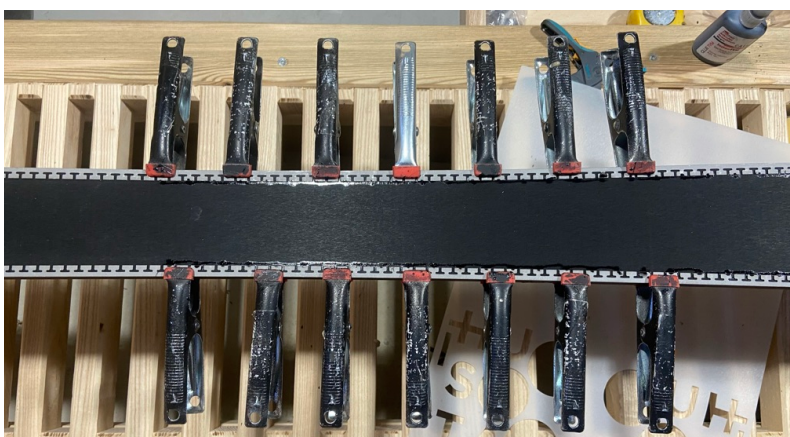


Figura 36: Colocación de cantos en la suela.

Es relevante saber que en esta parte no se busca una adhesión muy resistente, sino que, una fijación provisional para dar la forma adecuada al canto y que no se mueva en la

posterior laminación ni prensado. El adhesivo utilizado es un cianoacrilato o ‘supercemento’, cuya característica principal es su rápido secado.

Tras fijar las zonas rectas, se procede a moldear la espátula, resultando una vista general como la siguiente.



Figura 37: Colocación de cantos en la suela.

Una vez concluida la colocación de los cantos, se tapa la suela por detrás con cinta de papel, para que durante el laminado no queden restos de resina.

10.3.2 Conformación del cuerpo principal

El cuerpo principal del esquí está formado por el núcleo de madera, *sidewalls* (ya unidos en pasos previos) , la espátula y la cola. Igual que con los cantos, este paso intermedio no busca una unión ultra resistente sino una disposición adecuada de las piezas. Se unirán igualmente con adhesivo de secado rápido.





Figura 38: Unión espátula al núcleo.

Figura 39: Unión cola al núcleo.

Se puede observar que la cola sobresale por los laterales del núcleo. Esto es debido a que es una pieza estándar para muchas dimensiones de esquíis etc. Se decide eliminar ese defecto en el último momento, ya que son cortes rectos y sencillos y de esta manera hay un pequeño margen para cualquier desplazamiento no deseado.

10.3.3 Ajuste del *topsheet*

El *topsheet* se monta en el esquí como la última capa del laminado. Sin embargo, el proceso de laminado es muy delicado y tóxico, por lo que se debe hacer con la mayor rapidez posible. A su vez, el *topsheet*, al ser un elemento decorativo, debe estar bien centrado y colocado con precisión. Por ello, este ajuste se debe hacer previamente para que en el momento crucial de la laminación no suponga esto una demora.



Figura 40: Ajuste del topsheet.

El ajuste consiste en disponer tres machos fuera del esquí: dos a los laterales de la cola y uno centrado en el eje de la espátula. A su vez, el *topsheet* está impreso con tres

solapas con sus correspondientes agujeros. Consiste en encajar las tres solapas con los tres machos y este es el momento de realizar cualquier ajuste necesario para que el *topsheel* quede como se desee.

10.3.4 Laminación

Una vez concluidos los procesos anteriores. Ya está todo preparado para proseguir con lo más delicado: la laminación.

Se laminará con una resina epoxi cuya proporción es: 46gr de catalizador por cada 100gr de epoxi, con un tiempo de 25 minutos de endurecimiento. Por lo tanto, habrá que concluir este proceso con cierta agilidad.



Figura 41: Preparación de la resina epoxi.

Se irán untando todas las capas de resina y montándose una encima de la otra en el orden especificado, con el núcleo de madera en medio, también untado con resina. La primera capa se monta con más delicadez por la geometría que debe tener, como se ha explicado.

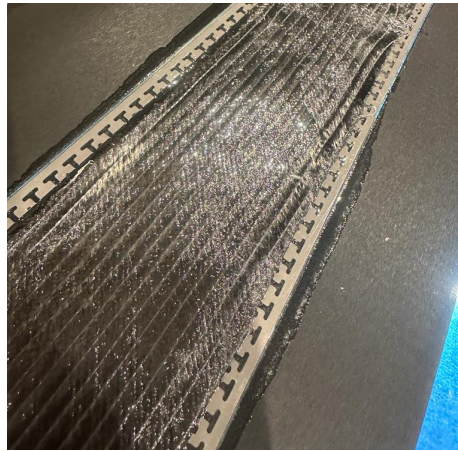


Figura 42: Primera capa de fibra sobre la suela

El resto de las capas se pondrán sobre esas, pero de forma rectangular, ya que así se reduce mucho el tiempo de laminado y se evitan errores causados por el desplazamiento de las fibras, ya que las capas rectangulares cubren el esquí entero y no es necesaria la misma precisión al colocarlas.



Figura 43: Laminación de fibras intermedias.

Por último, se coloca el *topsheet*. En la siguiente foto se aprecian las solapas para el ajuste del *topsheet* que se describía anteriormente.



Figura 44: Última capa del laminado. Topsheet.

10.3.5 Prensado

Se ha trabajado en todo momento con el esquí en plano. Es el momento de darle la curvatura del camber, la espátula y la cola. Se consigue mediante un prensado con control de temperatura.

El esquí se cubre con unas mantas y unas placas de aluminio que serán responsables del control de temperatura. Debajo del esquí, está la matriz. La matriz de esta prensa consiste en un molde fabricado expresamente para este esquí, dotado de las cotas y curvaturas diseñadas. Lo señalado en la imagen es la curvatura correspondiente a la espátula.



Figura 45: Prensado del esquí.

Se deja el esquí en la prensa durante unas doce horas, con un aumento de temperatura de dos grados por minuto. El enfriamiento se produce a velocidad natural, sin ser forzado. El aire del tubo que ejerce presión sobre el esquí se tiene una presión de dos bares y medio, que permanece constante durante todo el prensado.



Figura 46: Barómetro de la prensa.

Teniendo en cuenta cómo se ha laminado el esquí, es evidente que al salir de la prensa, lo hace como un bloque macizo sin forma de esquí, de la siguiente manera:



Figura 47: Esquí recién salido de la prensa.



Figura 48: Suelas del esquí recién salido de la prensa.

10.3.6 Corte y lijado para acabado final

Para convertir lo de la imagen anterior en un par de esquíes, se utilizarán herramientas como una sierra radial y una lijadora.

Lo primero será separar el bloque por la mitad y de esta manera aislar los esquíes el uno del otro. A continuación, con la sierra, se recortará el material sobrante y se le dará al esquí la forma que le corresponde.

Esto no es suficiente, ya que la sierra deja un acabado muy farragoso.



Figura 49: Rebaba resultante del corte con sierra.

En la figura se observa la gran cantidad de rebaba y el acabado poco suave que se obtiene después de la sierra. Para solucionarlo, se lija el esquí en una lijadora de banda continua Hammer HS 950, consiguiendo el esperado acabado final.



Figura 50: Acabado final del esquí.

11. CAPÍTULO IV : RESULTADOS

Una vez acabados los esquís, se han probado para comprobar el trabajo realizado. Se obtuvieron conclusiones en dos aspectos distintos: comportamiento del esquí y acabado estético. A lo largo de este capítulo se destacarán tanto los puntos fuertes del resultado como los aspectos mejorables.

11.1 Estética del esquí

En el ámbito estético, se ha obtenido un buen acabado final, contemplando sin embargo los siguientes pequeños defectos, solucionables para posteriores proyectos:

- Exceso de resina epoxi: debido a que el momento del laminado es muy tóxico y se debe hacer rápidamente, se utilizó la resina epoxi de manera incontrolada, abusando de la misma y dejando rastro en el acabado final, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 51: Exceso de resina epoxy.

- Arruga de las fibras: Por el mismo motivo, por la rapidez con la que se debe laminar, quedó una arruga en una de las capas de fibra, al ser prensado a tanta presión, estos pequeños defectos son muy visibles en el acabado final.



Figura 52: Arruga de la fibra en acabado final.

- Error de precisión en la colocación de las fijaciones: un error de medición a la hora de colocar las fijaciones dejó en los esquís dos agujeros extra que dan un aspecto ligeramente antiestético por encima de la fijación.

11.2 Comportamiento del esquí

Se ha examinado el comportamiento del esquí de dos maneras: su propia puesta en marcha en nieve y un ensayo a flexión para medir deformaciones.

11.2.1 Prueba de los esquís en nieve

Es evidente que con esta prueba solo se pueden obtener conclusiones cualitativas basadas en la experiencia, por lo tanto es difícil plasmar formalmente lo ensayado de esta manera.

En definitiva, se sintieron unos esquís muy rígidos y duros, exigentes y con mucha fuerza requerida para conducirlos adecuadamente. Se notó además, gracias a la fibra de carbono, una gran reactividad, el esquí volvía de manera muy rápida a la posición original tras ser deformados a flexión en un giro.

Como observación para futuros diseños, habría sido preferible un esquí un poco más pesado para no comprometer la consistencia del mismo y la sensación de seguridad al esquiarlos. De todas maneras, esto era esperable, ya que la fibra de carbono es muy poco pesada comparada con la aleación de titanio que los esquís suelen contener.

11.2.2 Ensayo del esquí a flexión

Para comprobar la rigidez obtenida en el esquí, se hizo un ensayo a flexión cuyo objetivo era medir las deformaciones del esquí fabricado y comparar estas con las deformaciones de un esquí comercial.

Para llevar a cabo este ensayo, el primer paso fue construir un útil de sujeción para apoyar el esquí. Se fabricó con chapa de acero, soldando las distintas partes mediante soldadura TIG. El útil consistía en dos apoyos, cada uno formado por dos chapas soldadas en T y con un macho roscado soldado verticalmente.

Un nervio con una guía en un extremo (para que fuese regulable) y un agujero en el extremo opuesto se acopla a los apoyos para asegurar la distancia entre apoyos y que estos no se muevan.



La idea era situar los apoyos en los extremos del canto efectivo del esquí, para simular el esquí en la nieve. En el caso de este esquí, el canto efectivo es de 1626 mm. Como puntos relevantes se tienen: el punto más alto del *camber*, donde se aplica la carga, y los dos puntos medios entre el *camber* y cada apoyo.

Se midieron las deformaciones en estos puntos, aplicando pesos de 10kg, 20kg y 27,5kg , obteniendo las siguientes curvas deformadas:

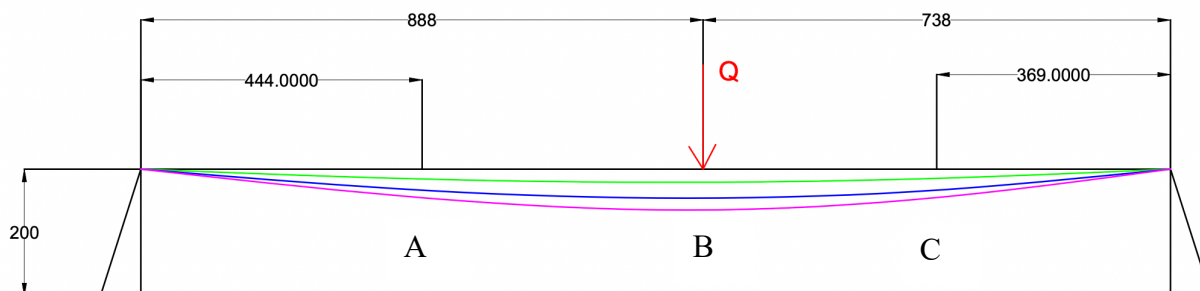


Figura 53: Curvas deformadas en el ensayo a flexión.

Cabe destacar que siendo muy difícil medir las deformaciones directamente (de arriba abajo) , se midieron las distancias verticales desde la superficie de apoyo hasta la parte inferior del esquí y se restaron esas medidas a las del reposo.

Medida vertical suelo-esquí (mm)			
	A	B	C
Reposo	201	202	202
10 kg	184	178	185
20 kg	167	154	167
27,5 kg	153	136	154

Tabla 5: Medidas del ensayo a flexión.

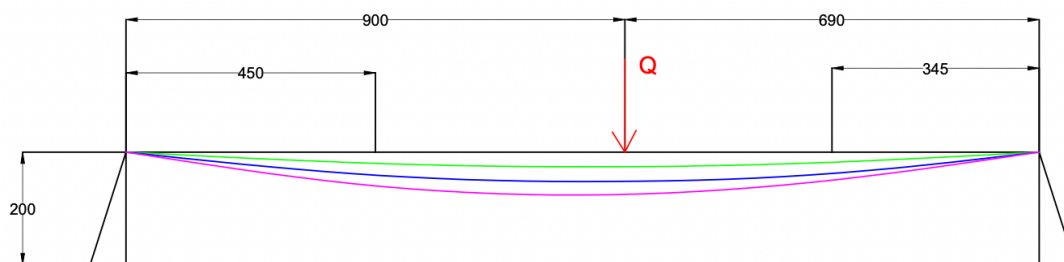
A partir de la tabla anterior se obtienen la deformaciones recogidas a continuación:

	Deformaciones (mm)		
	A	B	C
10 kg	17	24	17
20 kg	34	48	35
27,5 kg	48	66	48

Tabla 6: Deformaciones del ensayo a flexión.

Para obtener conclusiones de este estudio, se deben comparar estas medidas con las correspondientes a un esquí comercial cuyas propiedades ya se conocen. Se realiza el mismo ensayo en un esquí Head eSpeed de talla 1700mm.

En este caso, el canto efectivo es de 1590mm y se toman las medidas en los puntos mostrados en la figura siguiente.



Se desarrolla el mismo procedimiento anterior y se obtienen las siguientes tablas análogas a las del esquí fabricado, en este caso del esquí comercial.

Medida vertical suelo-esquí (mm)			
	A	B	C
Reposo	201	202	201
10 kg	181	176	183
20 kg	158	148	163
27,5 kg	139	127	149

Tabla 7: Medidas del ensayo a flexión Head eSpeed.

	Deformaciones (mm)		
	A	B	C
10 kg	20	26	18
20 kg	43	54	38
27,5 kg	62	75	52

Tabla 8: Deformaciones del ensayo a flexión Head eSpeed.

Las medidas documentadas en estas tablas permiten concluir que se ha logrado el objetivo de fabricar un esquí rígido y ligero. Las deformaciones del esquí fabricado son notablemente menores que las del esquí comercial, por lo tanto, el nuevo esquí será un esquí más exigente que requerirá de más fuerza y agresividad en el giro.

12. CONCLUSIONES

La realización de este proyecto ha permitido llegar a ciertas conclusiones en distintos ámbitos como la fabricación y la ingeniería de materiales.

Al tratarse de una producción artesanal con pocos procesos mecanizados (únicamente el fresado del núcleo y la suela), se ha tenido que prestar especial atención a pequeños detalles como la correcta unión entre piezas, que a su vez involucran utillajes de sujeción muy específicos que no existen en el mercado. Gracias a ello, se ha vivido una experiencia real en un taller y el esfuerzo y precisión que conllevan los procesos de fabricación y la mano de obra, así como la importancia de guardar protocolos de seguridad relativos a la maquinaria y a otras herramientas que deben utilizarse con precaución.

Además, el proyecto ha sido un ejemplo real que demuestra que peso y rigidez no tienen por qué ser dependientes, gracias en este caso a los materiales compuestos, en especial a la fibra de carbono y su baja densidad, que resultan en un material extremadamente resistente y ligero. En este caso, la geometría del esquí no es difícil de moldear, ya que se trata de una superficie mayormente plana y uniforme, sin embargo, al laminar lo esquí, se ha observado que la fibra de carbono es muy útil también para

geometrías complejas, ya que en estado húmedo, es un material maleable y moldeable capaz de proporcionar formas complicadas.

Bibliografía

Radio Huesca. (15 de marzo de 2018). *España ya cuenta con 2.000.000 de esquiadores.*

Ser. <https://www.cadenaser.com>

Monoesqui. (15 de julio de 2022). *Reflexiones sobre el patín de los esquís: “Cuando más ancho no es siempre mejor”*. Lugares de nieve. <https://www.lugaresdenieve.com>

Ziack, Darek. (14 de noviembre de 2011). *¿Rocker, camber o...?*. Nevasport. <https://www.nevasport.com>

Jiménez,M. ,Fraiz,D. y Soldani,X. Procesos de conformación por arranque de material. *DIM-GITI-441: Tecnologías de fabricación*. (pp 47-68). Universidad Pontificia Comillas ICAI.

Jiménez,M. y Soldani,X. Conformado por soldadura . *DIM-GITI-441: Tecnologías de fabricación*. (pp 60-72). Universidad Pontificia Comillas ICAI.

De la Zerda, Iara. (30 de agosto de 2021). *Todo lo que necesitas saber sobre la sublimación*. Grupo Billingham. Recuperado el 17 de octubre de 2022. <https://www.grupobillingham.com>