



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento

Área de Conocimiento

PROYECTO/TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO ESTRUCTURAL Y FABRICACIÓN DEL PAQUETE
AERODINÁMICO DE UN MONOPLAZA DE FÓRMULA STUDENT**

Máster en Ingeniería Industrial

Autor: MARIO IÑAKI HUARTE MUÑOZ

Tutor: JOSÉ MANUEL GARCÍA MANRIQUE OCAÑA

MÁLAGA, Abril de 2025

Agradecimientos:

Agradezco a Arnold y Lasso, compañeros y amigos en los buenos momentos, en los malos momentos e incluso cuando eran las 11 de la noche y la bolsa de vacío no sellaba. Siempre dispuestos a lo que sea sin importar la hora o el día.

A todos los alumnos y veteranos de MART, todas esas personas que caminaron para que nosotros pudiéramos correr. Todas esas personas que pese a no tener nada, sin dinero, sin taller, sin herramientas, sin coche... demostraban la misma pasión, el mismo esfuerzo y la misma ilusión.

A mis padres que, cuando yo desmontaba los juguetes nuevos para “ver cómo iban” decidieron ver algo de valor en todo eso en vez de enfadarse y siempre me dieron la libertad de perseguir mis intereses y proyectos (aunque mi cuarto acabara pareciendo un taller)

Resumen

El objetivo es sencillo: Llevar del CAD a la realidad el primer **paquete aerodinámico** completo y **funcional** en la historia de la escudería MART (Malaga Racing Team) y contribuir positivamente al **rendimiento del monoplaza** en la competición internacional de la “fórmula student”.

Durante la fase de pretemporada, se llevará a cabo un proceso de **autoformación** en materia de fabricación con **materiales compuestos**, en base a ello se realizarán los **experimentos** que se considere necesario y se estudiarán los materiales y equipos necesarios para la fabricación.

De forma paralela, se tomará parte en el proceso de **diseño de las piezas**, aportando un punto de vista mecánico/ estructural/ de fabricabilidad al departamento de simulaciones aerodinámicas CFD.

Terminado el diseño, se fabricarán los componentes. Lo que implica tener preparada para ese momento una **estrategia de fabricación** para cada uno de los 21 elementos que forman el paquete aerodinámico del monoplaza.

Durante la **ejecución**, se realizarán y documentarán los ajustes oportunos.

The objective is simple, bring the first complete and functional aero package in MART's (Malaga Racing Team) history from CAD to reality, and positively contribute to the car's performance in the international formula student competition.

During the pre-season phase, a self-training process will be carried out on the topic of composite materials manufacturing. Based on this, the necessary experiments will be conducted, and the required materials and equipment for manufacturing determined.

At the same time, I will participate in the design process of the components, providing a mechanical/structural/manufacturability perspective to the CFD aerodynamic simulation department.

Once the design is complete, the components will be manufactured. This means having a manufacturing plan ready for each of the 21 elements that make up the aerodynamic package of the car.

During the project's execution, any necessary adjustments will be made and documented.

Palabras clave

Aerodinámica, materiales compuestos, fibra de carbono, fabricación, automovilismo, formula student, alerones, competición, aeroespacial.

Aerodynamics, composite materials, carbon fiber, manufacturing, motorsport, formula student, wings, competition, aerospace.



1. Tabla de contenido

1.	Alcance y objetivos	8
2.	Metodología.....	9
3.	Introducción.....	11
3.1.	Aerodinámica y automovilismo I.....	11
3.2.	Aerodinámica y automovilismo II.....	14
3.3.	Introducción a la aerodinámica en FS	15
3.4.	Introducción a CFRP	17
3.5.	Introducción a la fabricación en CFRP.....	18
3.5.1.	Preimpregnados	18
3.5.2.	Infusión de resina	20
3.5.3.	Laminado húmedo	22
4.	Punto de partida temporada 23/24.....	23
4.1.	Anteriores temporadas del equipo	23
4.1.1.	Temporada 21/22.....	23
4.1.2.	Temporada 22/23.....	24
4.2.	Medios de los que dispone el departamento.....	25
4.2.1.	Taller en la escuela de telecomunicaciones.....	25
4.2.2.	Taller de Promálaga.....	26
5.	Pretemporada fase 1.....	28
5.1.	Aumento de las capacidades del dpto.....	29
5.1.1.	Máquina de corte por hilo caliente	29
5.1.2.	Instalación de vacío	32
5.1.3.	Horno para composites	33
5.1.4.	Acceso al taller de prototipado 3D	37
5.2.	Investigación.....	41
5.2.1.	Diseño estructural en composites	41
5.3.	Elección del método de laminado.....	45
6.	Pretemporada fase 2: Experimentos	46
6.1.	Primera tanda de experimentos 8-nov-2023	46
6.1.1.	Fabricación de modelos de XPS con hilo caliente	46
6.1.2.	Fabricación de moldes de material refractario	48



6.2.	Resultados tanda 1	49
6.2.1.	Cortadora hilo caliente.....	49
6.2.2.	Moldes refractarios	51
6.3.	Tanda de pruebas 2	53
6.3.1.	Moldes refractarios II	53
6.4.	Resultados de la tanda 2	54
6.5.	Tanda de experimentos 3.....	56
6.5.1.	Prueba de desmoldeo	56
6.5.2.	Fabricación de un perfil entero.....	58
6.6.	Resultados de la tanda 3	62
6.6.1.	Prueba de desmoldeo	62
6.6.2.	Fabricación de perfil entero.....	62
6.7.	Tanda de experimentos 4.....	65
6.7.1.	Prueba de perfil hueco	65
6.7.2.	Perfil macizo.....	66
6.7.3.	Endplate	67
6.8.	Resultados tanda 4	68
6.8.1.	Molde front wing.....	68
6.8.2.	Prueba de desmoldeo	71
6.8.3.	Perfil grande.	73
6.8.4.	Perfil pequeño macizo	74
7.	Perfiles grandes (FW main y RW main)	76
7.1.	Diseño mecánico.....	76
7.2.	Solución elegida: perfiles huecos con estructura interna.....	82
7.3.	Alerón delantero	83
7.4.	Alerón trasero	85
7.5.	Plan de fabricación	85
7.5.1.	Superficies aerodinámicas (skins)	86
7.6.	Fabricación real	101
7.7.	Vida útil de los componentes.....	118
7.7.1.	Alerón delantero.	118
7.7.2.	Alerón trasero	127



8.	Perfiles pequeños.....	128
8.1.	Diseño mecánico.....	128
8.2.	Plan de fabricación	128
8.3.	Fabricación real	139
8.4.	Vida útil de los componentes.....	143
9.	Paneles sandwich/ Endplates.....	144
9.1.	Diseño mecánico.....	144
9.2.	Plan de fabricación	144
9.3.	Fabricación real	148
9.4.	Vida útil de los componentes.....	150
10.	Undertray	151
10.1.	Diseño mecánico.....	151
10.2.	Plan de fabricación	153
10.3.	Fabricación real	155
10.4.	Vida útil de los componentes.....	169
11.	Cogidas	171
11.1.	Diseño mecánico.....	171
11.2.	Fabricación planificada.....	176
11.3.	Fabricación real	177
11.4.	Vida útil de los componentes.....	184
12.	Presupuesto y mass budget.....	185
12.1.	Herramienta de cálculo estimado	185
12.2.	Página principal: Elementos y resultados.....	186
12.3.	Coste real del proyecto	191
7.	Paso por competición	193
13.	Conclusiones.....	200



Tabla de figuras

Figura 1: Vehículos de competición de 1890(izda) y 1894(dcha) (Fast Mag, 2020).....	11
Figura 2: Lotus 49(izda) y Lotus 49B(dcha) (wikipedia, 2025).....	12
Figura 3: Alerón delantero moderno, McLaren MCL32, año 2017 (reddit, 2021)	13
Figura 4: Zona de Bargeboards, RedBull RB16, año 2021 (Reddit, 2021).....	13
Figura 5: Fuerzas que actúan sobre un coche (Tech, 2019)	14
Figura 6: Herramientas como Aero-mapas se utilizan para representar el efecto de la aerodinámica y sus parámetros en el tiempo por vuelta (Racecar Engineering by Wouter Remmerie, 2019)	15
Figura 7: Monoplaza de fórmula student, universidad de Oulu (Formula Student Oulu, 2025).....	16
Figura 8: Secciones de un CFRP (Hitachi Electron Microscope, 2021)	17
Figura 9: Colocación de fibra de carbono preimpregnada (Comseal Composite, 2025) ...	19
Figura 10: Proceso de infusión de resina (Penn, 2015)	20
Figura 11: Laminado húmedo (Total Boat, 2025).....	22
Figura 12: Monoplaza MA22RT, Circuit ParcMotor Castellolí (MART_FS, 2025)	23
Figura 13: Monoplaza MA23RT, Circuito de Montmeló (MART_FS, 2025).....	24
Figura 14: Taller en la E.T.S.I. de telecomunicaciones "taller de teleco"	25
Figura 15: Taller de Promálaga	26
Figura 16: Dibujo conceptual de la cortadora de hilo caliente	29
Figura 17: Calculadora de fuentes para hilo caliente	30
Figura 18: Regulador (Izda.) y fuente de potencia (Dcha.)	30
Figura 19: Cortadora de hilo caliente y su sistema de ajuste de tensión	31
Figura 20: Instalación de vacío.....	32
Figura 21: Tabla de propiedades de la resina con diferentes programas de curado (Sicomín, 2015).....	33
Figura 22: Interior del horno con dos piezas del alerón delantero dentro	35
Figura 23: Display de los sensores de T ^a	36
Figura 24: Horno completado en el taller.....	36
Figura 25: Cortadora de hilo caliente Alarsis CRT160	37
Figura 26: Fresadora Alarsis FR180.....	38
Figura 27: Cortadora láser Iberoláser IL-1390	40
Figura 28: Chasis de un cuadrocóptero fabricado en CFRP.....	41
Figura 29: Panel sándwich con núcleo de honeycomb de aluminio.....	42
Figura 30: Ala de avión fabricada en composite con estructura interna	43
Figura 31: Tapas de transmisión y manetas de moto fabricadas en carbono forjado.....	43
Figura 32: Ala de avión cuyo elemento estructural principal son tubos de CFRP.....	44
Figura 33: Plantillas de MDF3mm cortadas por corte láser	47
Figura 34: Primeros modelos fabricados por hilo caliente	49
Figura 35: Moldes de cemento fabricados con film sobre el modelo.....	51
Figura 36: Molde de cemento fabricado directamente sobre la espuma	51
Figura 37: Moldes fabricados con yeso mecafino	52
Figura 38: Concepto de moldeo sobre espuma con film adhesivo	53



Figura 39: Modelo de espuma con film adhesivo colocado	54
Figura 40: Moldes fabricados mediante modelo de espuma y forro adhesivo	54
Figura 41: Arrugas apreciadas en el forro después de sacar el modelo del molde.....	55
Figura 42: Primer planteamiento del experimento de desmoldeo de fibra sobre cemento.	57
Figura 43: Diseño de la estructura interna.....	58
Figura 44: Diseño de las guías.....	59
Figura 45: Unión en el borde delantero de los perfiles.....	60
Figura 46: Concepto de borde delantero con espuma.....	61
Figura 47: Concepto de borde delantero con refuerzo interno	61
Figura 48: Guía con las referencias hasta el borde (incorrecto, izda) y con cierto margen (correcto, dcha).....	62
Figura 49: Corte y montaje de la estructura interna	63
Figura 50: Modelos de espuma XPS	64
Figura 51: Fabricación de los moldes de cemento	64
Figura 52: Corte de patrones de fibra	65
Figura 53: Patrones de corte de carbono para el flap y endplate de prueba	66
Figura 54: Modelo de endplate de prueba	67
Figura 55: Pruebas de fresado de espuma	68
Figura 56: Modelo para molde de alerón completo con la masilla aplicada.....	69
Figura 57: Modelo de espuma preparado para el vertido de cemento.....	70
Figura 58: Fraguado del cemento	70
Figura 59: Superficie del molde de cemento	71
Figura 60: Prueba de desmoldeo	71
Figura 61: Superficie de la probeta fabricada.....	72
Figura 62: Bolsa de vacío y horno "in situ".....	73
Figura 63: Laminados terminados y pieza final	73
Figura 64: Perfil pequeño con núcleo de espuma.....	74
Figura 65: Sección de un perfil con core de espuma.....	77
Figura 66: Perfil con tubos estructurales de CFRP.....	78
Figura 67: Perfil con estructura interna de costillas y vigas.....	79
Figura 68: Posible concepto para perfil semihueco con estructura trapezoidal y cores de espuma.....	81
Figura 69: Monatje de perfil con estructura trapezoidal	81
Figura 70: Diseño aerodinámico FW vista ISO.....	83
Figura 71: Diseño aerodinámico FW vista planta	83
Figura 72: Diseño aerodinámico FW vista sección central	83
Figura 73: Estructura interna del FW	84
Figura 74: concepto de diseño heredado del perfil experimental.....	84
Figura 75: Estructura interna del alerón trasero	85
Figura 76: Alerones "rectos" (izquierda) vs alerones "curvos" (derecha).....	86
Figura 77: Modelo preliminar de FW Main	86
Figura 78: Perfil alar con las piezas de carbono.....	87
Figura 79: Perfil alar con ambos moldes que lo formarían	87



Figura 80: Solapes de la fibra en los bordes delantero y trasero	87
Figura 81: Ambas mitades de la pieza separadas y con el sobrante de fibra añadido	88
Figura 82: Moldes con la línea de partición del molde	89
Figura 83: Sección final del molde.....	89
Figura 84: Sección de los modelos de espuma.....	90
Figura 85: Unión tipo cola de milano para fabricar el bloque de espuma.....	92
Figura 86: Molde retocado con masilla de pared durante la fase de experimentación.....	94
Figura 87: Diferentes tipos de trayectorias y efectos en el acabado.....	94
Figura 88: Pesaje de la fibra seca	95
Figura 89: Mezclado de la resina bicomponente	96
Figura 90: Laminado sobre un vidrio	96
Figura 91: Concepto de laminado con refuerzos locales.....	97
Figura 92: Bolsa de vacío completa con toma de vacío	98
Figura 93: Modelo de FW al salir de la fresadora CNC.....	102
Figura 94: Modelo de FW con capa de resina aplicada.....	103
Figura 95: Curado en horno de las capas de resina	103
Figura 96: Acabado superficial espejo del modelo de espuma	104
Figura 97: Uno de los moldes de cemento del FW.....	105
Figura 98: Laminado del FW	106
Figura 99: Bolsa de vacío y curado del FW	108
Figura 100: Laminado del RW	108
Figura 101: Laminados del FW sacados del horno	109
Figura 102: Laminados del RW sacados del horno.....	109
Figura 103: Estructura interna de FW, defectuosa en revisión de entrada.....	110
Figura 104: Laminado de vigas de CFRP para estructura interna.....	111
Figura 105: Vigas de CFRP con núcleo de MDF de 3mm.....	112
Figura 106: Montaje del FW Main I.....	113
Figura 107: Montaje del FW Main II	114
Figura 108: FW Main montado I.....	115
Figura 109: FW Main montado detalle del leading edge	115
Figura 110: FW Main montado II	116
Figura 111: RW montado	117
Figura 112: Monoplaza MA24RT en su primera vuelta con alerones	118
Figura 113: Desgaste en la zona inferior del endplate.....	120
Figura 114: Tensores colocados en el alerón delantero.....	121
Figura 115: Primer día de testing	122
Figura 116: Reparación y bordes ya reparados del FW.....	123
Figura 117: FW con el borde delantero arreglado durante el segundo testing.....	124
Figura 118: Altura del alerón delantero en condiciones dinámicas	124
Figura 119: Tensores definitivos ya en Austria.....	125
Figura 120: Recreación de la prueba de rigidez realizada.....	126
Figura 121: Tensores en el alerón trasero.....	127
Figura 122: Corte de núcleo (Easy Composites Ltd., 2022)	128



Figura 123: Probetas realizadas para determinar los parámetros de la máquina de hilo..	129
Figura 124: Una de las probetas fabricadas.....	129
Figura 125: Trayectoria empleada.....	130
Figura 126: Colocación de las costillas de aluminio (Easy Composites Ltd., 2022)	131
Figura 127: Capa de resina sobre el MYLAR (Easy Composites Ltd., 2022)	132
Figura 128: Compactación mediante rodillo y siguiente capa aplicación de resina (Easy Composites Ltd., 2022)	133
Figura 129: Sigüientes capas del laminado (Easy Composites Ltd., 2022)	134
Figura 130: Envoltura del core con la fibra (Easy Composites Ltd., 2022).....	135
Figura 131: Preparación de la bolsa de vacío (Easy Composites Ltd., 2022).....	136
Figura 132: Colocación de la toma de vacío (Easy Composites Ltd., 2022)	136
Figura 133: Extracción de arrugas (Easy Composites Ltd., 2022).....	137
Figura 134: Aplicación gradual del vacío (Easy Composites Ltd., 2022).....	138
Figura 135: Pieza final curada (Easy Composites Ltd., 2022)	138
Figura 136: Endplate con core de espuma.....	140
Figura 137: Alerón delantero montado por primera vez	141
Figura 138: Montaje de los flaps y endplate.....	142
Figura 139: Adhesivado de insertos embebidos a piel de CFRP (Easy Composites Ltd., 2022).....	144
Figura 140: Preparación del núcleo de Honeycomb de aramida (Easy Composites Ltd., 2022).....	145
Figura 141: Ajuste del honeycomb a los insertos (Easy Composites Ltd., 2022).....	145
Figura 142: Resina espesada con Fumed Silica (Easy Composites Ltd., 2022).....	146
Figura 143: Aplicación de la resina sobre la piel de carbono (Easy Composites Ltd., 2022)	146
Figura 144: Colocación del honeycomb.....	147
Figura 145: Montaje de los endplates en el RW.....	149
Figura 146: Diseño del chasis del M24RT	151
Figura 147: Concepto del suelo modular.....	152
Figura 148: Concepto de cogidas del difusor	152
Figura 149: Concepto inicial para la partición del fondo modular.....	153
Figura 150: Fabricación de la zona central del fondo y pieza final.....	155
Figura 151: Zonas pobres de resina y contaminación por la plastilina	155
Figura 152: Fondo recién desmoldado	156
Figura 153: Recorte de los sobrantes del fondo	157
Figura 154: Pizarra en el horno colocada en vertical	158
Figura 155: Núcleos de los laterales preparados con insertos metálicos y de impresión 3d	159
Figura 156: Primer laminado de los laterales del fondo.....	160
Figura 157: Impresión de los insertos y fondo con los mismos colocados	161
Figura 158: Fondo plano, detalles 3D I.....	161
Figura 159: Fondo plano, detalles 3D II.....	162
Figura 160: Molde del difusor salido de la fresadora.....	163



Figura 161: Laminado del difusor sobre molde de cemento	164
Figura 162: Difusor desmoldado, superficie inferior	165
Figura 163: Superficie superior del difusor.....	166
Figura 164: Laminado del Gurney flap en el difusor	167
Figura 165: Fondo completo ensamblado por primera vez	168
Figura 166: Difusor colocado con sus cogidas.....	168
Figura 167: Múltiples tensores en el monoplaza	169
Figura 168: Fondo del coche combado (izda) y arreglado (dcha).....	170
Figura 169: Puntos de anclaje de las cogidas del FW	171
Figura 170: Espacio disponible bajo el chasis para las cogidas	172
Figura 171: Diseño preliminar de las cogidas	172
Figura 172: Costillas laterales de un flap del FW	173
Figura 173: Montaje de los flaps	173
Figura 174: Inplate e inseto lateral de colocación de flaps	173
Figura 175: Ensamblaje completo del RW Main con sus cogidas	174
Figura 176: Montaje de las cogidas del FW en el Main.....	177
Figura 177: In-plate original y versión final de CFRP	178
Figura 178: Cogidas originales RW y primer montaje en el coche.....	178
Figura 179: Laminado de las cogidas definitivas del RW	180
Figura 180: Cogidas definitivas del RW desmoldadas.....	181
Figura 181: Una de las cogidas del RW ya cortada y canteada.....	182
Figura 182: Primer montaje del RW con sus cogidas definitivas.....	183
Figura 183: Página 1 de la hoja de cálculo, Elementos y resultados.....	186
Figura 184: Página dos de la hoja de cálculo, lista de materiales	187
Figura 185: Resto de páginas, funciones de método	188
Figura 186: Introducción de parámetros.....	189
Figura 187: Función de método.....	190
Figura 188: Representación de costes según su destino	191
Figura 189: Representación de costes según material	191
Figura 190: Representación temporal de costes	192
Figura 191: Miembros de MART que participan en la defensa del diseño	193
Figura 192: Monoplaza en la cola de espera para inspección técnica en el Red Bull Ring	194
Figura 193: Integrantes de MART trabajando en el monoplaza	195
Figura 194: Monoplaza durante la prueba de Autocross.....	196
Figura 195: Monoplaza preparado para entrar a la endurance	197
Figura 196: Monoplaza durante la Endurance.....	198
Figura 197: Monoplazas compitiendo en la endurance	198
Figura 198: Ceremonia de cierre de fórmula student Austria	199



1. Alcance y objetivos

Tal y como se ha expresado en el resumen, el objetivo es llevar del CAD a la realidad el primer paquete aerodinámico completo y funcional en la historia de la escudería MART (Malaga Racing Team) y contribuir positivamente al rendimiento del monoplaza en la competición internacional de la “fórmula student”.

Para poder considerar esta premisa como cumplida, se deben cumplir una serie de condiciones indispensables:

- El paquete aerodinámico debe completarse con los fondos disponibles, los cuales se proyectan alrededor de unos 2500 euros, pero ni la fecha de llegada ni la cantidad exacta son seguras.
- El paquete aerodinámico debe ser funcional antes de terminar mayo para las sesiones de pruebas y debe estar completamente terminado en junio, antes del día de la presentación del monoplaza.
- Los elementos del paquete aerodinámico deben tener la rigidez y resistencia suficientes para soportar su uso, tanto en pista como durante su manipulación y transporte.
- Los elementos del paquete aerodinámico deben cumplir la normativa y tener la rigidez y resistencia suficientes para superar las inspecciones técnicas de las competiciones.
- El paquete aerodinámico debe cumplir unos estándares de calidad adecuados, con buena precisión en dimensiones y geometrías y un buen acabado en superficies.
- El paquete aerodinámico completo no debe incrementar la masa total del vehículo en más de 20 kg.

Al leer estas condiciones, destacan por su tono pragmático. No se menciona la palabra “optimizar” que tanto gusta en ingeniería, tampoco se menciona la investigación ni el aprendizaje. En varias ocasiones el equipo ha fracasado en su intento de llevar a cabo un paquete aerodinámico así que el verdadero objetivo podría resumirse como “no fracasar”.

Esto no significa que no se vaya a intentar reducir el peso, o mejorar la calidad, o a prestar atención a los detalles, pero es un equilibrio difícil y cada euro o minuto invertido cuenta ya que:

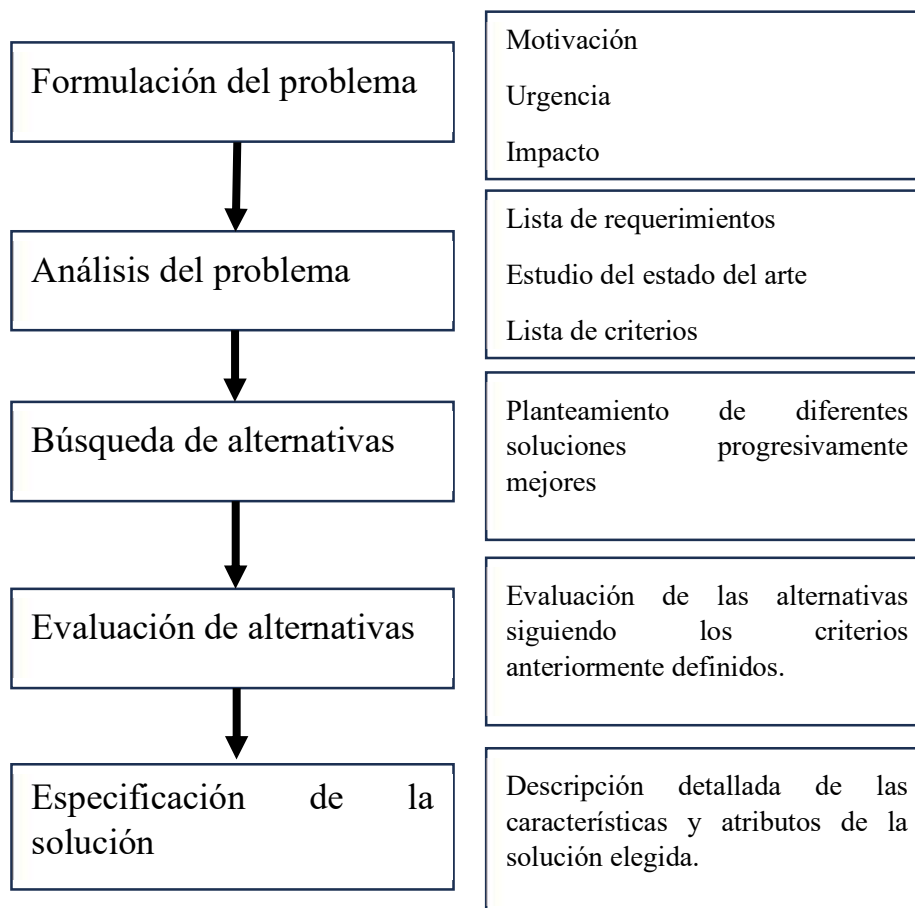
“Si consigues reducir el peso del alerón a la mitad, pero lo terminas el día siguiente a la carrera, no sirve de nada” o como se suele decir en el mundo del motorsport “llegar a la línea de salida es mucho más difícil que llegar a la de meta”

Tener presentes estos objetivos y este enfoque es crucial ya que es el hilo conductor de todas las decisiones tomadas a lo largo del proyecto.

2. Metodología

Durante la resolución de problemáticas complejas, es fácil dejarse llevar por sesgos personales, opiniones subjetivas o conclusiones prematuras lo que puede llevar a decisiones subóptimas. Con el objetivo de evitar este tipo de errores y llegar a la mejor solución, se ha de trabajar de forma rigurosa siguiendo un método.

El **método o enfoque ingenieril** se trata de una adaptación práctica del **método científico**. Mientras el método científico trata de expandir el conocimiento tratando de obtener la respuesta a preguntas o dando explicación a fenómenos, el método ingenieril tiene por objetivo la solución a problemas o la respuesta a necesidades.



Esquema 1: Flujo de trabajo del método ingenieril



Una vez establecida la teoría **¿Cómo se aplica el método a este proyecto concreto?**

1. **Formulación del problema:** Se divide el proyecto en una serie de problemas en los que se puede trabajar de forma relativamente independiente, en este caso, cada pieza que se va a fabricar se puede considerar como un “problema” que consiste en establecer un diseño mecánico y un método de fabricación que sean compatibles entre sí y con todas las condiciones externas.
2. **Análisis del problema:** Se analiza la pieza en cuestión y se establecen los requerimientos: Geometría de la pieza, nivel de calidad superficial y cargas que debe soportar. Una vez estudiada la pieza, se realiza un estudio del estado del arte ¿Existen piezas similares en fabricación en la industria? ¿Qué consideraciones de diseño emplean los profesionales del sector? ¿Qué métodos de fabricación emplean? ¿Qué materiales? Más allá de que se vaya a emular o no, es crucial conocer la forma en la que se acomete el problema en el sector y los motivos que basan esta forma de trabajo. Una vez obtenido dicho conocimiento, ya se puede pensar en seguirlo o no. La última parte del análisis consiste en establecer una lista de criterios, los criterios pueden cambiar según el caso, pero algunos se deben tener en cuenta siempre: Peso de la pieza, coste estimado de la pieza, tiempo total de diseño y fabricación, número de horas de trabajo de diseño y de fabricación, nivel de incertidumbre o riesgo asociado.
3. **Búsqueda y evaluación de alternativas:** Los pasos de búsqueda y evaluación de alternativas se llevan a cabo de forma cíclica. Primero se buscan una serie de alternativas basadas en el estado del arte, se realiza una evaluación de estas en el contexto de la pieza concreta que se va a diseñar y fabricar. La evaluación se suele llevar a cabo mediante listas de ventajas/desventajas ya que, debido a la complejidad de este tipo de situaciones, no se suele disponer de criterios cuantitativos. Hecha la evaluación se revisan las alternativas. Se pueden buscar nuevas alternativas, se pueden modificar las alternativas anteriores o incluso combinar diferentes aspectos de varias. Este proceso iterativo se repite hasta que se termina el tiempo destinado a planificación o hasta llegar a una solución que no se consigue mejorar.
4. **Especificación de la solución:** Una vez decidida la estrategia de diseño y fabricación, se debe documentar. En este caso se lleva a cabo mediante un documento llamado “**Fabri definitiva**” que se encuentra en la nube del equipo. A diferencia de otros documentos de uso diario, éste solo debe incluir las alternativas elegidas, sirviendo como una guía en fases posteriores.

3. Introducción

3.1. Aerodinámica y automovilismo I

Aerodinámica: Parte de la física que estudia el movimiento de los gases y especialmente el de los cuerpos sólidos que se mueven en ellos. (Real Academia Española)

Automovilismo: Deporte que consiste en conducir un automóvil en competiciones de velocidad. (Real Academia Española)

La aerodinámica y el automovilismo están relacionados casi desde la creación del deporte. Las primeras competiciones de automóviles tuvieron lugar alrededor del año 1894 y los vehículos no tenían una forma que se pueda llamar aerodinámica, los coches se asemejaban más a carruajes que a un coche moderno.

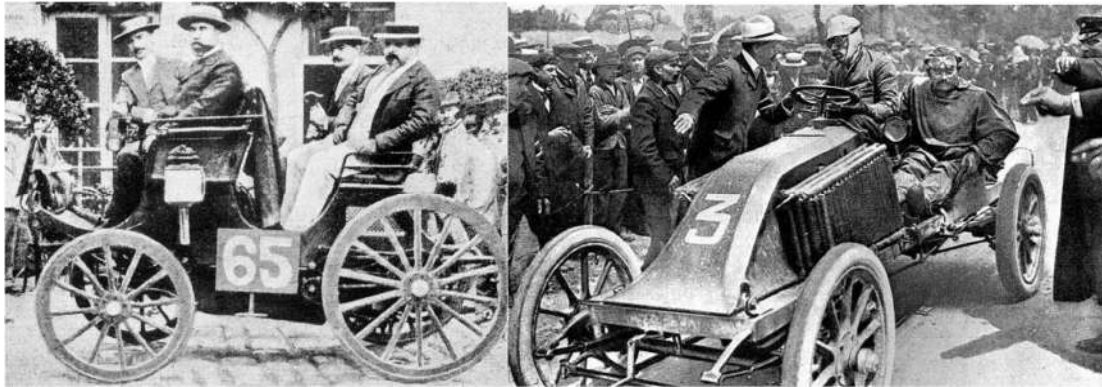


Figura 1: Vehículos de competición de 1890(izda) y 1894(dcha) (Fast Mag, 2020)

No obstante, tan solo 6 años más tarde, tras la inclusión del automovilismo en los juegos olímpicos de París del año 1900, los coches no se parecían en absoluto a sus predecesores. Los cubre motores de muchos coches empezaron a tomar variadas y elaboradas formas: redondeados, con forma de cuña, en punta, en bisel, etc. Los primeros amantes del automovilismo de la historia se habían dado cuenta de algo. De la misma forma que un barco se mueve por el agua, un coche se mueve por el aire, y al igual que en un navío, la forma del casco es crucial para reducir la resistencia y poder alcanzar altas velocidades.

Este descubrimiento fué la base de la aerodinámica en el automovilismo durante los siguientes 60 años, en los que el objetivo del diseño era reducir al máximo la resistencia al avance para lograr aumentar la velocidad punta de los vehículos.



Figura 2: Lotus 49(izda) y Lotus 49B(dcha) (wikipedia, 2025)

Año 1968, gran premio de Mónaco, el equipo de fórmula 1 Lotus presentó en el principado con una nueva versión de su monoplaza 49, el Lotus 49B. Diseñado por el legendario diseñador Colin Chapman, fue el primer monoplaza de fórmula uno en incluir lo que ha terminado siendo el elemento más característico de estos coches: alas.

Unos meses antes, el célebre piloto del equipo, Jim Clark había probado un prototipo de coche de Indycar con alas y terminó tremendamente impresionado con el rendimiento en curva: “he conducido este coche más rápido de lo que cualquier hombre mortal habría pensado posible”. Después de esta prueba, Clark presionó a su equipo para añadirlas al coche de fórmula uno lo antes posible.

Trágicamente, Jim nunca pudo probar el monoplaza ya que falleció unos meses después, en un accidente en el circuito de Hockenheim.

Desde ese momento, los coches de fórmula uno y todas las otras categorías de automovilismo donde se permite su uso, han incorporado el uso de alerones y otros elementos aerodinámicos ya que tal y como Clark había dicho, permiten conducir un coche a velocidades que son físicamente imposibles sin ellos.

(wikipedia, 2025)



Figura 3: Alerón delantero moderno, McLaren MCL32, año 2017 (reddit, 2021)

Desde ese momento, los coches de fórmula uno y todas las otras categorías de automovilismo donde se permite su uso, han incorporado el uso de alerones y otros elementos aerodinámicos ya que tal y como Clark había dicho, permiten conducir un coche a velocidades que son físicamente imposibles sin ellos.



Figura 4: Zona de Bargeboards, RedBull RB16, año 2021 (Reddit, 2021)

3.2. Aerodinámica y automovilismo II

Llevar alas (o alerones, como se conocen en el mundo del automovilismo) en un coche de carreras ¿No frenan su avance? ¿No añaden peso? La respuesta es sí. Sin embargo, llevar alerones puede incrementar considerablemente la velocidad a la que un coche es capaz de trazar las curvas de un circuito.

Cuando un coche se encuentra sobre el asfalto, sea un fórmula 1 o un 2CV, existen una serie de fuerzas actuando sobre el mismo; en el eje vertical están el peso del coche y la fuerza normal ejercida por el suelo. En el plano horizontal, existe la fuerza de fricción entre los neumáticos y el asfalto, ésta fuerza es la que permite al coche acelerar, frenar o girar.

Aumentar la fuerza de fricción entre los neumáticos y el asfalto es clave para un coche de carreras ya que le permite acelerar y frenar en menos distancia y tomar las mismas curvas a mayor velocidad. Todo ello resultando en vueltas más rápidas y, con un poco de suerte y buena conducción, ganar la carrera.

La fuerza de fricción tiene un límite que depende de la interacción neumático/asfalto y de la fuerza que presiona cada rueda contra el suelo. Los alerones utilizan perfiles alares similares a los de un avión, pero invertidos, generando una fuerza vertical hacia abajo denominada “downforce”, esa fuerza se suma al peso del vehículo, aumentando la fuerza en los neumáticos y por lo tanto el límite de agarre.

Normalmente los vehículos con más masa tienen un límite de grip (agarre) mayor, pero también tienen una inercia mayor, por lo que las aceleraciones máximas que pueden generar no aumentan (de hecho, empeoran ya que los neumáticos tienen un comportamiento no lineal y además el aumento de masa penaliza también en muchas otras áreas). No obstante, gracias a la aerodinámica se puede aumentar el límite de grip sin aumentar la masa, permitiendo aumentar el rendimiento del vehículo hasta niveles imposibles para vehículos sin elementos aerodinámicos.

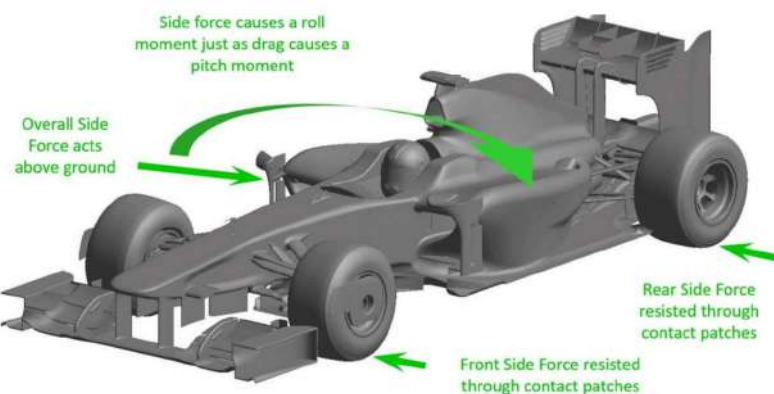


Figura 5: Fuerzas que actúan sobre un coche (Tech, 2019)

3.3. Introducción a la aerodinámica en FS

El diseño aerodinámico en las competiciones de fórmula student puede resultar un poco desconcertante para personas ajenas a la competición que estén acostumbradas a otras categorías de motorsport. Los coches de fórmula student tienen alerones de un tamaño desproporcionadamente grande en comparación con otras categorías, esto se debe a una sencilla razón, los circuitos de fórmula student tienen muchas curvas cerradas y muy pocas rectas largas.

Además de generar downforce, los elementos aerodinámicos generan otra fuerza denominada drag que se produce en la dirección opuesta al avance y tiende a frenar el avance del vehículo.

En términos generales, un alerón más agresivo genera más downforce pero también más drag, lo que significa que el vehículo podrá tomar las curvas a mayor velocidad pero su velocidad máxima en recta se reducirá debido al drag.

Por lo tanto, se trata de un problema de optimización en la que se equilibra el rendimiento en recta con el rendimiento en curva para lograr el mejor tiempo en un circuito concreto.

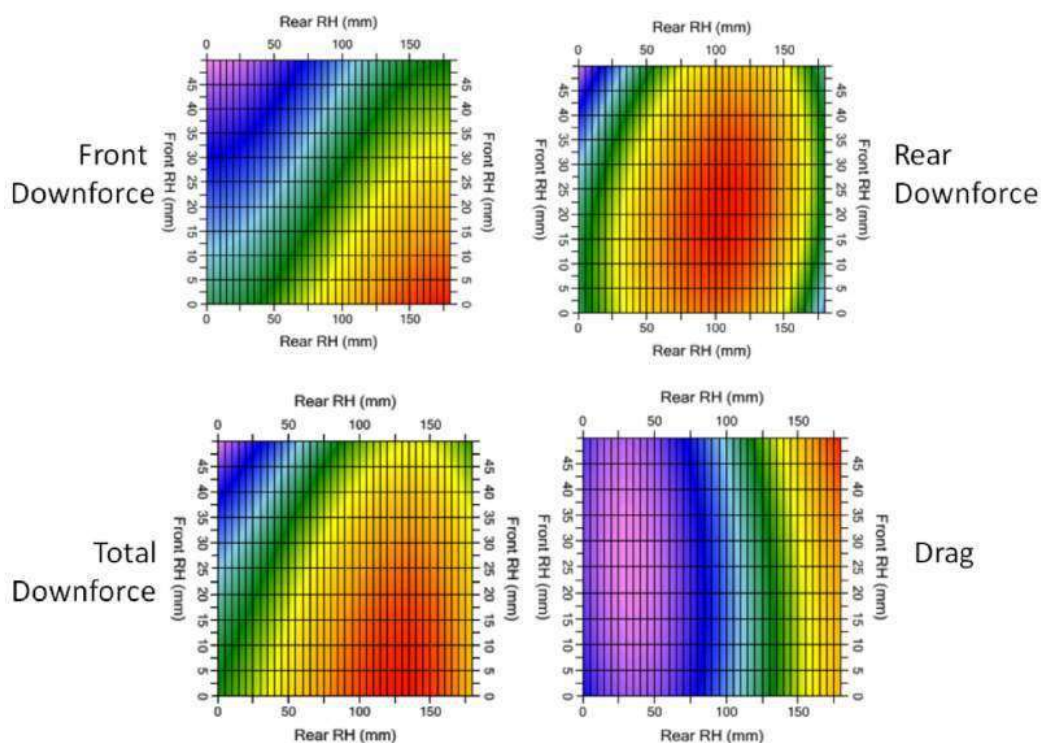


Figura 6: Herramientas como Aero-mapas se utilizan para representar el efecto de la aerodinámica y sus parámetros en el tiempo por vuelta (Racecar Engineering by Wouter Remmerie, 2019)

Como se ha mencionado, en la formula student, los circuitos prácticamente carecen de rectas, por lo tanto, los paquetes aerodinámicos son extremadamente agresivos tratando de maximizar el downforce, aunque también aumente mucho el drag.



Figura 7: Monoplaza de fórmula student, universidad de Oulu (Formula Student Oulu, 2025)

3.4. Introducción a CFRP

El material referido coloquialmente como “fibra de carbono” se trata en realidad de un polímero reforzado por fibras de carbono (Carbon Fiber Reinforced Polymer: CFRP) en el que la fibra de carbono se trata del refuerzo presente en una matriz de resina normalmente epoxy, pero existen otras opciones como cianato-éster, poliéster o viniléster.

Los CFRP son los materiales que se utilizan cuando es necesario fabricar componentes estructurales muy ligeros.

Lo primero y más importante que se debe tener en cuenta cuando se trabaja con estos materiales es que son inherentemente complejos. Su composición es compleja, su fabricación es compleja y su comportamiento también lo es.

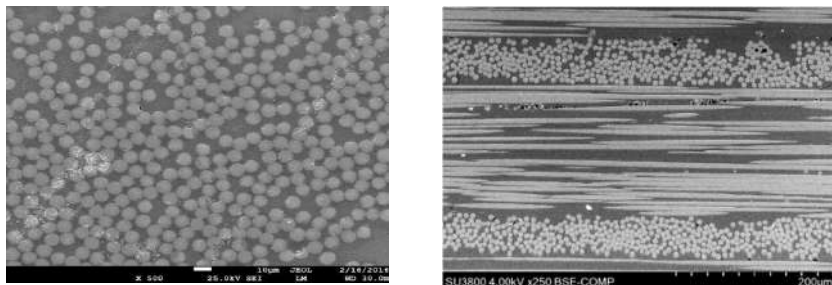


Figura 8: Secciones de un CFRP (Hitachi Electron Microscope, 2021)

Esta complejidad se debe a que las excelentes propiedades vienen de las fibras de carbono en sí mismas, que tienen un módulo elástico elevadísimo y una resistencia a la tracción enorme, pero ninguna a flexión o compresión.

Si se desea una pieza rígida, se deben sujetar dichas fibras de alguna manera, ahí es donde entra la resina.

La resina hace de matriz rellenando los huecos entre las fibras, sin embargo, las propiedades de la resina son inferiores a las de las fibras por lo que, si en algún momento la carga es soportada por la resina, la pieza podría romperse inesperadamente. La conclusión es que los CFRP tienen el potencial para hacer piezas con unas muy buenas propiedades, pero llegar a dichas propiedades requiere un diseño y fabricación cuidadosos.



3.5. Introducción a la fabricación en CFRP

La fabricación de fibra de carbono a nivel pieza se divide en dos procesos; el impregnado de las fibras en resina y el curado de la resina.

Fibra de carbono: Se comercializa en forma de telas tejidas con diferentes patrones usando las propias fibras como hilos.

Resina epoxy: Se comercializa como dos componentes, que una vez mezclados empiezan a reaccionar químicamente (polimerización) y se endurecen. El factor determinante en la velocidad de reacción es la **temperatura**.

La polimerización es un proceso relativamente sencillo desde el punto de vista de la persona que esta fabricando las piezas, por lo tanto, el proceso clave es el impregnado de las fibras en resina.

Los tres métodos más utilizados son:

3.5.1. Preimpregnados

Debido a la dificultad que supone conseguir una buena proporción de fibra y resina, la clave de los preimpregnados es quitar ese problema y que la resina y la fibra las junte directamente el fabricante. Una vez impregnada, el fabricante congela la tela para que la resina no se endurezca y el preimpregnado se mantiene congelado como un semielaborado hasta llegar a las manos de quien vaya a fabricar la pieza.

En años anteriores, en el equipo se ha trabajado con preimpregnados al existir un patrocinio con la empresa Gurit. Por razones internas, Gurit ha optado por dejar de patrocinar a los equipos de fórmula student.

Ventajas:

Trabajar con preimpregnados es extremadamente cómodo y rápido ya que se pueden adherir al molde o al laminado como si fueran pegatinas lo que permite su colocación sobre geometrías complejas. Esto también supone una gran reducción de las horas de trabajo necesarias para cada pieza.

La pieza resultante tiene las mejores propiedades mecánicas posibles y el mínimo peso. Esto se debe a que la relación fibra resina es perfecta y uniforme en todo el material al haberse realizado industrialmente por el fabricante.

Desventajas:

Coste: Los preimpregnados son más caros que el precio equivalente en fibra y resina.

Logística: Para evitar que la resina cure, los preimpregnados se deben enviar y mantener a bajas temperaturas (-18 a -25 °C). Aun cumpliendo este requisito, suelen tener una vida útil inferior al año. Una vez sacados del congelador, la resina empieza a curarse y por lo tanto el tiempo de trabajo es limitado.

Curado: Para que los preimpregnados duren el máximo tiempo posible en el congelador, se usan en ellos resinas con temperaturas de curado altas. Por lo tanto, la gran mayoría de preimpregnados requiere un curado en horno, lo que supone no solo la necesidad de tener un horno, sino que condiciona todo el proceso de fabricación ya que todos y cada uno de los elementos y materiales debe ser resistente a la temperatura.

Conclusión: Los preimpregnados se suelen utilizar cuando se requieren las mejores prestaciones posibles, aunque es un método más caro que los otros.



Figura 9: Colocación de fibra de carbono preimpregnada (Comseal Composite, 2025)

3.5.2. Infusión de resina

El método de infusión de resina consiste en colocar los paños de tela seca sobre un molde en la posición que van a tener en la pieza (se suele usar un adhesivo en spray para sujetarlos).

Una vez colocados los paños, se compactan al vacío mediante una bolsa.

Se conecta la bolsa de vacío por un lado a la bomba de vacío y en el otro extremo a un recipiente lleno de resina abierto a la atmósfera. La diferencia de presión hace que la resina fluya a través de los huecos entre las fibras tratando de llegar a la mínima presión (la bomba de vacío).



Figura 10: Proceso de infusión de resina (Penn, 2015)

Ventajas:

Las propiedades mecánicas de la pieza final están muy cerca de las óptimas ya que se logra una relación fibra/ resina cercana a la óptima. La resina empapa los huecos entre las fibras, pero no se forman excesos ya que el conjunto se encuentra bajo presión en todo momento debido a la bolsa de vacío.

El coste es inferior a los preimpregnados.

Desventajas:

Complejidad: Para que la resina se reparta por toda la pieza, se debe estudiar muy bien la forma en la que ésta va a fluir, lo que viene determinado en gran medida por la viscosidad. En muchos casos, el resultado es que la resina llega al orificio de salida sin empapar toda la pieza por lo que se debe hacer uso de elementos como espirales o mallas que aceleran el flujo en ciertas direcciones. Se trata de un proceso complejo que requiere experiencia y planificación. Si se empieza una infusión y el flujo se comporta de forma diferente a lo



previsto, suele resultar en el descarte de toda la pieza, perdiéndose la fibra, la resina, los consumibles y todo el tiempo invertido en preparación.

Coste: El proceso requiere muchos consumibles lo que supone un coste superior al laminado húmedo.

Tiempo de trabajo: El tiempo invertido en la preparación de una infusión es muy superior al requerido en preimpregnados o laminado húmedo.

Conclusión: Es una opción utilizada en operaciones a pequeña escala para obtener resultados similares a los de los preimpregnados con un coste menor. Sin embargo, se requiere maestría y tiempo para fabricar piezas por infusión de resina.

3.5.3. Laminado húmedo

Consiste en aplicar manualmente la resina sobre la tela mediante el uso de rodillos o brochas. Para lograr una buena distribución, se alternan las aplicaciones de resina y las de telas de fibra, además se utilizan rodillos duros para aplastar la fibra y que la resina se distribuya uniformemente.

Ventajas:

Coste: Es el método más barato ya que su casi todo su coste es el de la fibra/resina.

Accesibilidad: No requiere casi equipos especializados como hornos o instalaciones de vacío.

Desventajas:

Prestaciones: La distribución de resina se hace a mano por lo que no será perfecta, debido a esto, hay que trabajar con un exceso de resina para que ninguna zona quede seca, la pieza final será más pesada de lo necesario y tendrá unas propiedades peores.

No sirve para cualquier geometría: Durante el tiempo de laminado, la pieza no está al vacío. La resina es viscosa, pero en determinadas geometrías, esta viscosidad no es suficiente para que los paños se mantengan en su sitio.

Conclusión: Es un método más manual que los otros y por lo tanto los resultados obtenidos son menos consistentes. Sin embargo, puede ser la mejor opción para fabricación en volúmenes bajos si se dispone de personal experimentado.



Figura 11: Laminado húmedo (Total Boat, 2025)

4. Punto de partida temporada 23/24

4.1. Anteriores temporadas del equipo

4.1.1. Temporada 21/22

La fabricación del departamento de aerodinámica en la temporada siguió las líneas de temporadas anteriores, el monoplaza compitió con un paquete que consistía solo en las partes obligadas por normativa (morro y laterales). Cabe destacar que esta temporada fue marcada por un relevo generacional en el que bastantes integrantes del departamento eran nuevos.

Al igual que en anteriores ocasiones, se planteó la posibilidad de incluir elementos extras como alerones. Se planteó fabricar un fondo plano, pero faltó visión a futuro ya que no se planteó como anclar al coche ni el beneficio que dicho fondo podría tener en el rendimiento.

En términos de fabricación, el proceso se basaba en fabricar un modelo de espuma, del que luego se obtenía un molde de fibra de vidrio, para obtener la pieza final también en fibra de vidrio. Este método es común en la industria debido a su bajo coste en volúmenes de producción reducidos.

Sin embargo, la carga de trabajo para esculpir el modelo de espuma a mano resultó muy elevada y el trabajo que se destinó a la realización del molde también fue muy alta (además de implicar una gran variedad y cantidad de químicos nocivos)

Las piezas cumplieron su función perfectamente y presentaban unos acabados buenos. Su único problema fué el peso ya que al ser de fibra de vidrio era bastante elevado.



Figura 12: Monoplaza MA22RT, Circuit ParcMotor Castellolí (MART_FS, 2025)

4.1.2. Temporada 22/23

La temporada 22/23 quedó marcada por ambiciosa y pese a que tuvo varios fracasos, también fue un gran salto con respecto a temporadas anteriores. Desde el principio se decidió que ese año se iba a fabricar un paquete aerodinámico completo, además se decidió utilizar fibra de carbono por primera vez en la trayectoria del equipo.

La temporada estuvo plagada de problemas. Muchos de ellos fueron debidos a falta de planificación e inexperiencia, pero otros tantos fueron debidos a causas ajenas como patrocinadores que faltaron a sus acuerdos.

Breve resumen de los hechos:

Las piezas obligatorias (morro y laterales) se llevaron a cabo en fibra de carbono con una gran reducción de peso respecto al año anterior y logrando una buena calidad. Debido a la falta de varios patrocinadores, la fabricación del modelo de espuma para el morro se tuvo que realizar a mano, suponiendo una enorme cantidad de horas de trabajo físico (lijando).

En parte debido a lo anterior, el resto de las piezas se realizaron en muy poco tiempo, sin haberse planificado bien y con todos los errores a los que esto conlleva.

El resultado fueron unos alerones que, si bien se llevaron a cabo, estructuralmente eran un desastre, muchas piezas estaban deformadas y los anclajes entre elementos nunca se llegaron a realizar. Por no mencionar que el peso del alerón trasero era superior al peso del paquete completo de muchos equipos.

La conclusión que yo extraigo personalmente de la temporada de mis predecesores es que el problema presente nunca ha de ser subestimado. Fabricar con composites es difícil y trabajoso, estructuralmente los alerones deben ser enormemente rígidos para pasar las inspecciones y todos los anclajes y detalles se deben planificar al detalle ya que cualquier error puede llevar fácilmente a la descalificación del equipo.



Figura 13: Monoplaza MA23RT, Circuito de Montmeló (MART_FS, 2025)

4.2. Medios de los que dispone el departamento

Dada la situación es crucial estudiar los medios disponibles ya que al ser estos muy limitados, todo el trabajo realizado va a consistir en buscar soluciones que pudiendo ser o no las mejores, **sean la mejor solución en el contexto y con los medios del equipo.**

También es importante valorar la posibilidad de expandir estratégicamente dichos medios.

4.2.1. Taller en la escuela de telecomunicaciones.

El principal lugar de trabajo del departamento de aerodinámica se trata de una caseta de obra localizada adyacente a la escuela de telecomunicaciones en la que se dispone de agua potable, electricidad, así como de varias mesas.

La falta más notable del taller es la escasez de herramientas. A principio de temporada no había ni una llave inglesa (a menudo los miembros llevaban herramientas propias para hacer determinadas tareas). Debido a esto, desde el principio de la temporada se trata de tener presente el futuro del equipo e ir comprando herramientas para que pasen a formar parte del taller.

Otra cosa para tener en cuenta es la limitación en el espacio. Una buena organización espacial y temporal será necesaria debido a esto.

El taller dispone de una bomba de vacío, pero ésta nunca se había utilizado y no se dispone del resto de la instalación de vacío (racores, válvulas, líneas etc.)



Figura 14: Taller en la E.T.S.I. de telecomunicaciones "taller de teleco"

4.2.2. Taller de Promálaga

El taller de Promálaga es la principal sede y zona de trabajo del equipo, consta de herramientas y equipos variados. Este taller se utilizará de forma puntual ya que las piezas y procesos de aerodinámica requieren mucho espacio y suponen un cierto riesgo debido a la utilización de productos químicos. También se ha de tener en cuenta que las herramientas de Promálaga están disponibles para su uso, pero conviene planificar ya que un viaje de ida y vuelta puede tardar unos 40 minutos.



Figura 15: Taller de Promálaga



Parte 1: La pretemporada

Se consideran como pertenecientes a la pretemporada aquellas actividades de preparación que se llevan a cabo sin conocer el diseño final del paquete aerodinámico. Entre noviembre de 2023 y febrero de 2024, el trabajo se centra en:

- Obtener conocimiento.
- Plantear y probar técnicas de fabricación mediante experimentos.
- Ampliar las capacidades y medios disponibles.

Durante todo este periodo se mantiene una estrecha comunicación con el equipo de diseño aerodinámico. A menudo la búsqueda de mejorar la aerodinámica lleva a utilizar geometrías complejas y difíciles de fabricar, el objetivo del desarrollo de fabricación es hacer posible dichas geometrías, sin embargo, el presupuesto, el tiempo y las capacidades de fabricación son limitados por lo que es necesario encontrar un punto medio.

La clave del éxito es la transparencia entre ambas partes para converger en un diseño que tenga una buena combinación de fabricabilidad y rendimiento aerodinámico.



5. Pretemporada fase 1

El objetivo de la presente fase es obtener la información y los medios necesarios para el resto de la temporada.

Obtención de medios: Es interesante invertir tiempo en mejorar las capacidades del dpto. Búsqueda de patrocinadores, desarrollo de herramientas/ equipos, optimización/ automatización de procesos, etc. Todo este tipo de tareas deben realizarse antes de empezar a fabricar ya que, si no, lo que suele ocurrir es que se postpongan o no se llevan a cabo. Por otro lado, si se llevan a cabo antes, los frutos del desarrollo se pueden aprovechar durante todo el proyecto.

Obtención de información: investigación/ experimentación: Es inevitable que durante la producción surjan imprevistos. Pese a ello, cuanto más se investigue y mejor se estudie/ planifique antes de empezar a producir, mayores son las probabilidades de éxito. Durante esta pretemporada, aparte de investigar, se van a realizar experimentos, como forma de aprendizaje y para estudiar la viabilidad de diferentes ideas.

5.1. Aumento de las capacidades del dpto.

Durante la planificación, se manifiesta la necesidad o la ventaja que supondría disponer de ciertos equipos especializados, por lo que se procede al diseño y fabricación de éstos.

5.1.1. Máquina de corte por hilo caliente

Tal y como se va a explorar más adelante, un material muy utilizado es la espuma de poliestireno extruido.

Una herramienta de gran utilidad a la hora de trabajar con esta espuma es una máquina de corte por hilo caliente, que permite realizar cortes de alta calidad mediante el uso de plantillas.

Las máquinas de corte por hilo CNC son preferibles a las manuales, pero durante la etapa de planificación no se sabía si se iba a tener acceso a una, además las máquinas manuales permiten realizar cortes en ángulos variables.

Existen soluciones comerciales pero debido al presupuesto y a las dimensiones necesarias de corte, se decide diseñar y fabricar una máquina propia.

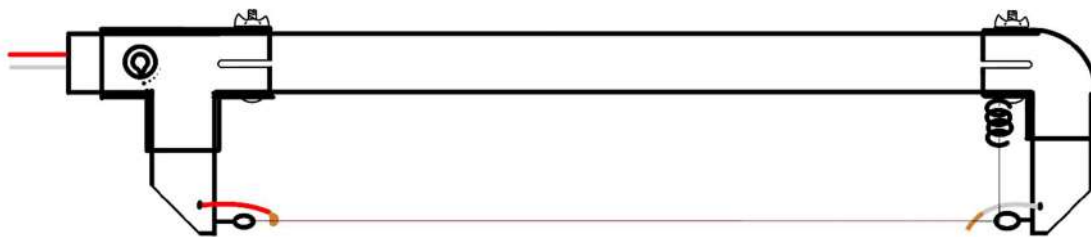


Figura 16: Dibujo conceptual de la cortadora de hilo caliente

La máquina se construye a partir de una estructura de tubos de PVC.

El primer problema es establecer las necesidades eléctricas del hilo. Se trata de un fenómeno complejo ya que la conductividad del hilo de nicromo cambia mucho con la temperatura y la temperatura depende del material cortado, velocidad de corte, tamaño del corte y otros factores.

La estrategia más adecuada se basa en utilizar datos experimentales para elegir una fuente de tensión con suficiente potencia para el caso más exigente y luego añadir un regulador al sistema para poder ajustarlo a las diferentes situaciones.

Se utiliza como fuente la siguiente página web, que tiene recomendaciones sobre el tipo de fuente de potencia óptimo para esta aplicación y que cuenta con una herramienta para calcular la tensión y corriente necesaria para la situación específica.

Calculate:		
<input checked="" type="radio"/> Volts	<input type="radio"/> Temp	
Resistance Wire		
Nichrome 80 ▾		
Gauge	Length (inches)	
24	50	
Target Temp (F)	842	
Copper Lead Wire		
Gauge	Length (feet)	
Resistance Wire		
Ω/Ft :	Ohms	Volts:
1.61	6.7	23.9
Dia (in):	Dia (mm)	
0.0201	0.511	
Copper Wire		
Ω/Ft :	Ohms	Volts:
NaN	0	0
Amps	Watts	
3.568	85	
Total Volts Req'd		23.9

Figura 17: Calculadora de fuentes para hilo caliente

Se opta por una fuente de tensión destinada a luces LED de 24V. Se coloca también un regulador de intensidad DC-DC.



Figura 18: Regulador (Izda.) y fuente de potencia (Dcha.)

Cambios en el diseño:

- Se añaden fichas al hilo para que los cables hagan un buen contacto eléctrico
- Se añade un sistema de tornillos para poder tensar rápidamente el hilo. Se había tenido en cuenta este problema añadiendo un muelle, sin embargo, la expansión térmica es muy grande así que disponer de un sistema ajustable que también tenga muelle acaba siendo lo mejor.



Figura 19: Cortadora de hilo caliente y su sistema de ajuste de tensión

5.1.2. *Instalación de vacío*

Aplicar vacío durante la curación de las piezas es una práctica común para mejorar los resultados, el vacío sirve para extraer los excesos de resina usando capas de peelply, para mejorar las propiedades haciendo que las capas del laminado se junten más y para que la fibra se acople mejor al molde.

El equipo disponía de una bomba de vacío que nunca se había usado. Por lo tanto, se busca el manual de esta y luego se buscan en el catálogo de CATS Automation (patrocinador del equipo) los racores necesarios para realizar la instalación.

Características:

Conviene poder conectar y desconectar la instalación a varias piezas a la vez para poder medir las presiones o aumentar la presión de vacío en caso de fuga, por lo tanto, la instalación tiene la posibilidad de conectar hasta 3 bolsas de vacío a la vez.

Se añade un manómetro de vacío para medir la presión.

Se coloca todo sobre una tabla y se ancla permanentemente en una esquina del taller como forma de ahorro de espacio, la instalación es accesible pero no molesta.



Figura 20: Instalación de vacío

5.1.3. Horno para composites

El curado de las piezas depende de la resina y el endurecedor que se use, normalmente viene especificado en la TDS de la resina.

En este caso el sistema Epoxy utilizado es del fabricante Sicomin, específicamente la resina SR1800 con el endurecedor SD2805.

Se ha elegido ese endurecedor ya que tiene la capacidad de curar a una temperatura de 23°C y en el momento de elegir la resina, el equipo no tenía horno.

La forma en la que el fabricante informa sobre los tiempos de curado es garantizando las propiedades mecánicas de la resina tras unos programas de curado específicos, el lado negativo es que no es posible conocer las propiedades si se utiliza un programa de curado diferente.

En este caso el fabricante garantiza propiedades tras 10 días a 23°C. Este tiempo era demasiado largo por lo que se planteó la posibilidad de fabricar un horno con el que utilizar uno de los otros programas de curado.

TECHNICAL DATASHEET

SR 1700
Page 6 / 7
Version 03/09/2015

Mechanical properties on pure cast resin

		SR 1700 / SD 2805			
		10 days @ 23 °C	24 h 23 °C + 24h 40°C	24 h 23 °C + 16 h 60° C	24 h 23 °C + 8 h 80 °C
Tensile					
Modulus of elasticity	N/mm ²	4100	3700	3600	3500
Maximum resistance	N/mm ²	75	86	88	90
Resistance at break	N/mm ²	75	86	87	91
Elongation at maximum resistance	%	3.0	3.5	3.8	4.3
Elongation at break	%	3.0	3.8	4.6	5.4
Flexion					
Modulus of elasticity	N/mm ²	4000	3700	3600	3500
Maximum resistance	N/mm ²	128	133	138	140
Elongation at maximum resistance	%	3.1	4.9	5.4	5.5
Elongation at break	%	3.4	6.0	7.3	7.5
Charpy Impact strength					
Resilience	kJ/m ²	12	14	14	14
Glass transition					
Tg1	°C	56	70	82	87
Tg1 max.	°C				90

Figura 21: Tabla de propiedades de la resina con diferentes programas de curado (Sicomin, 2015)

Tras estudiar la reducción de tiempo con respecto a la dificultad de fabricación del horno se decide utilizar el programa de curado de 60°.

Dado que se sabía que el horno siempre debía estar bajo supervisión, el curado de 16h se puede hacer en un día sin la necesidad de que nadie pase noche en el taller.

Por otro lado, el curado de 80° reduce más el tiempo, pero esa temperatura empieza a acercarse a los límites de los materiales que se pretenden utilizar.



Contexto del diseño del horno

El contexto del diseño y fabricación es que se hizo durante la última semana antes de la congelación del diseño y el comienzo de la fabricación. Debido a esto, el horno tenía que ser funcional en una semana.

Por otro lado, sin entrar en la situación financiera del equipo, el horno fue construido en el peor momento posible, cuando los fondos de la temporada anterior están prácticamente agotados y los de la temporada actual aún no han llegado (el equipo no recibe dinero hasta muy avanzada la temporada por lo que siempre tiene que guardar del año anterior para poder llevar a cabo su actividad).

Debido a este contexto, el horno se debía construir en una semana con materiales que ya estuvieran disponibles en el equipo, factores que motivaron la mayoría de las decisiones.

Consideraciones iniciales

Se deciden las dimensiones del horno en 800x1600x1600 ya que este volumen permite la entrada del fondo del coche (pieza más grande que se va a fabricar).

El material de aislamiento elegido es espuma EPS ya que el equipo disponía de unos bloques que se pueden cortar en planchas con la máquina de hilo caliente.

Se realiza un cálculo de pérdidas en el horno si la T^a en el interior es de 60°C y la resistencia térmica de convección es cero (peor caso posible).

Se obtiene que con un espesor de aislamiento de 5cm, la potencia perdida a través de las paredes es de 303W.

Diseño final del horno

Caja del horno: Estará fabricada en madera (ya que es de lo que dispone el equipo), la madera se forrará exteriormente por el aislamiento.

El aislamiento utilizado es espuma EPS ya que el equipo disponía de unos bloques de espuma de grandes dimensiones que se iban a tirar ya que no tenían otra utilidad y ocupaban mucho espacio. Estos bloques se cortan en planchas utilizando la cortadora de hilo caliente manual.

Debido al tamaño de las piezas y a la dificultad en el manejo de los moldes, toda la cara frontal será la puerta, que tendrá dos hojas para utilizar mejor el espacio en el taller.

Por último, se cubrirá la cara interna del horno con papel de aluminio para minimizar las pérdidas radiantes y reducir la temperatura de la madera.

Se espera que la mayoría de las pérdidas térmicas se deban a la salida de aire por ranuras alrededor de la puerta así que la potencia térmica podría ser mucho mayor a los 303W calculados.

Los elementos calefactados provendrán de un horno doméstico averiado que había en el taller. Dicho electrodoméstico consta de dos resistencias de 1000W a 230V.

Se decide que, en vez de fijar las resistencias al horno, es mejor que sean libres y se puedan colocar en diferentes posiciones, debido a que las piezas que se van a curar en el horno tienen formas diversas y en muchos casos no dejan margen en alguna dirección.

Por lo tanto, cada resistencia se fija a un trozo de madera y se cablea con longitud de sobra utilizando cables resistentes a la temperatura.



Figura 22: Interior del horno con dos piezas del alerón delantero dentro

Por último, el control de temperatura se realiza mediante un termostato incubador de huevos, que tiene un coste muy bajo, permite ajustar la temperatura fácilmente y dispone de dos sensores que permiten conocer la temperatura en varios puntos del horno a la vez.



Figura 23: Display de los sensores de T^a

Resultados

Pese a que claramente el horno tiene un amplio margen de mejora, se considera que el resultado fue positivo ya que en ese momento cada euro contaba mucho para el equipo y el coste del horno fue inferior a 40 euros. Por otro lado, las restricciones de tiempo se cumplieron y el horno era perfectamente funcional en el momento de empezar la fabricación.

En el momento de redactar este momento, el horno ha tenido más de 200h de servicio y se ha utilizado en el curado de todas las piezas, permitiendo agilizar el proceso en gran medida.



Figura 24: Horno completado en el taller

5.1.4. Acceso al taller de prototipado 3D

El dpto. de aerodinámica de MART llega a un acuerdo con el departamento de expresión gráfica para plantear la posibilidad de usar las máquinas disponibles en el dpto. de prototipado 3D.

Trabajar con las máquinas del taller de prototipado permite llevar a cabo tareas que antes eran imposibles (fresado de geometrías 3D) y también permite obtener resultados mucho más precisos, rápidos y repetibles en tareas que ya se hacían (corte 2D o corte con hilo caliente) El dpto. dispone de una serie de máquinas sin embargo las que son de gran interés son:

Máquina de corte por hilo caliente CNC Alarsis CRT 160

Esta máquina permite mover el hilo caliente en trayectorias 2D de forma precisa y repetible, además permite ajustar la velocidad y temperatura del hilo. Tiene un tercer eje que rota el bloque de espuma como un torno.



Figura 25: Cortadora de hilo caliente Alarsis CRT160

- Área de Trabajo: 120 cm x 60 cm
- Altura max: 60 cm
- Resolución: 0,01mm.
- Programa: Gpro2rt

Puntos fuertes: Permite trabajar de forma sencilla y muy rápida.

Puntos débiles: Solo puede trabajar con espuma de poliestireno, solo puede realizar geometrías 2D.

Fresadora CNC Alarsis FR180

Esta fresadora de 3 ejes con husillo vertical se caracteriza por tener un gran volumen de trabajo, pero estar limitada a materiales blandos como espuma. Puede trabajar en madera si se reduce la velocidad y las piezas son pequeñas.



Figura 26: Fresadora Alarsis FR180

Características Básicas:

- Número de ejes: 3 ejes
- Orientación del husillo: vertical
- Área de fresado: 1500 mm x 720 mm
- Altura max: 120 mm
- Potencia: 1050 w.



- Resolución: 0,02mm.
- Velocidad de desplazamiento: 40 metros/min.
- Sistema de aspiración de viruta.
- Palpador para puesta a cero eje Z.
- Puntero láser para verificación de puesta a cero de ejes X,Y.
- Dimensiones de la Máquina: 1900 mm x 950 mm

Puntos fuertes: Permite trabajar con geometrías 3D, el volumen de trabajo es adecuado para piezas de grandes dimensiones como moldes para alerones.

Puntos débiles: Su uso implica una gran inversión de tiempo; Primero se ha de programar el CAM y preparar el material en la máquina (es rápido para ser CAM, pero no baja 2-3h), luego el tiempo de mecanizado puede ser de unas 6-8h para una pieza del tamaño de la mesa. El volumen de trabajo es limitado en la dimensión perpendicular a la mesa (pone 12cm pero en la vida real la máquina da error si sube de 6cm).

Cortadora Grabadora Láser Iberolaser IL-1390

Máquina para cortar/grabar principalmente en madera o cartulina. Permite prototipar piezas en MDF de 3mm de forma extremadamente rápida. Sobre todo, útil para fabricar guías, utillajes y otros útiles auxiliares.



Figura 27: Cortadora láser Iberoláser IL-1390

- Formato de fichero preferente: DXF
- Software: RDCAM
- Área: 1300 mm x 900 mm
- Potencia: 100 W
- Tecnología: Láser de CO₂
- Medidas: 104cm(Al) x 183cm(La) x 144cm(An).

Puntos fuertes: Muy rápida y fácil de utilizar. Los resultados obtenidos son excelentes.

Puntos débiles: Solo sirve para piezas planas de bajo espesor. Solo puede trabajar en madera, cartulina y algún otro material, pero metales no y fibra tampoco.

5.2. Investigación

5.2.1. Diseño estructural en composites

El diseño estructural de piezas de CFRP se centra en lograr piezas rígidas a partir de finas láminas de carbono. Estas láminas tienen una elevada resistencia y rigidez a tracción, pero ninguna a flexión debido a su pequeño espesor. Las láminas se forman a partir de varias capas de telas de carbono, el número de capas, las direcciones de la fibra en cada capa y el espesor de cada capa son factores que se deben decidir para cada aplicación.

Piezas de carbono monolítico: Una primera solución podría ser añadir más capas de carbono hasta que el espesor aumente y la pieza sea rígida. Esta solución no es muy eficiente en peso ni en coste ya que las capas de carbono del interior trabajan muy poco.

Se suele usar en piezas pequeñas que deben tener muchos detalles como tornillos.



Figura 28: Chasis de un cuadrocóptero fabricado en CFRP

Paneles sándwich con espuma: El concepto de panel viene de lo mencionado anteriormente, ya que las capas intermedias no soportan los esfuerzos y su única función es aumentar el espesor, ¿Por qué no usar el material más ligero posible para esta tarea? Por este motivo, es muy común utilizar espumas como material “core” o núcleo. Para trabajar con paneles sándwich siempre se ha de tener en cuenta la “teoría” del panel solo funciona en el centro y no en los bordes. Por lo tanto, un panel sándwich podría no ser la mejor solución en piezas muy alargadas o con un ratio área/perímetro pequeño. Una solución en estos casos es reforzar los bordes del panel. Otro factor a tener en cuenta es que un panel sándwich no tiene un buen comportamiento ante esfuerzos localizados (por ejemplo, si se

le hace un agujero y se pone un tornillo). Esto implica que los puntos de anclaje se deben planificar con antelación para colocar insertos durante la fabricación del panel.

Paneles sándwich con honeycomb: Se trata del mismo principio, pero en vez de utilizar espumas para el núcleo, se utilizan “honeycombs” de aluminio o polímero. El honeycomb se trata de finas láminas plegadas para formar una estructura tubular hexagonal.

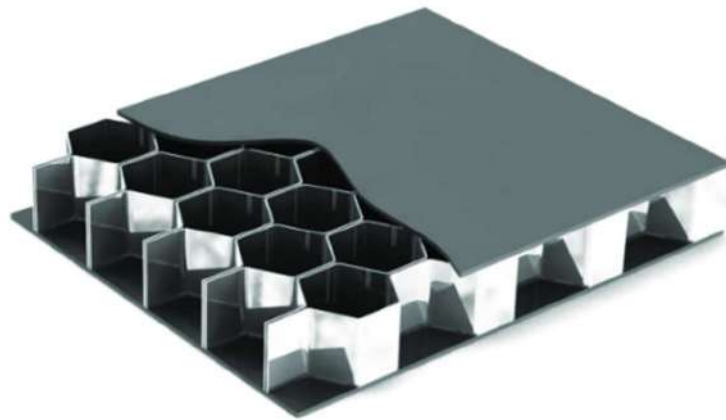


Figura 29: Panel sándwich con núcleo de honeycomb de aluminio

Adición de nervios: Otra forma de rigidizar piezas es mediante la adición de nervios, que pueden ser de fibra o incluso de fibra rellena de espuma.

Estructuras internas: Un método relevante al proyecto es la fabricación de piezas huecas con una estructura propia en su interior, la carcasa exterior de fibra puede ser estructural o no. No suele ser la forma más ligera ya que las excelentes propiedades de la carcasa de CFRP se desaprovechan y los esfuerzos son soportados por la estructura que añade peso. La carcasa no suele poder ser muy fina ya que no tendría ninguna rigidez al ser la pieza hueca. Esta técnica tiene la ventaja de que la estructura da flexibilidad a la hora de colocar anclajes y que el volumen hueco interior puede ser utilizado.



Figura 30: Ala de avión fabricada en composite con estructura interna

Carbono forjado: Consiste en mezclar de corta longitud con la resina en vez de telas. Como no se trabaja con telas, este tipo de piezas no suelen tener geometría de lámina fina, sino que se suelen usar geometrías como las que tendría una pieza de fundición, dado que la pieza comienza como un líquido que solidifica en un molde. Debido al uso de fibras cortas, las piezas de carbono forjado tienen unas propiedades inferiores, pero más flexibilidad en cuanto a geometrías que se pueden fabricar.



Figura 31: Tapas de transmisión y manetas de moto fabricadas en carbono forjado

Tubos de carbono: Se trata de un producto disponible en muchas medidas y a buenos precios. Al tener forma de tubo, éstos son rígidos por sí mismos.



Figura 32: Ala de avión cuyo elemento estructural principal son tubos de CFRP



5.3. Elección del método de laminado

La primera decisión importante que se debe tomar es el método de laminado ya que todo el desarrollo posterior en cuanto a proceso se deberá plantear con el método elegido en mente.

El método elegido es el **laminado húmedo**.

El uso de preimpregnados se descarta debido al coste/ accesibilidad, en parte porque se ha conseguido un patrocinio de la empresa MEL composites, que permite obtener una rebaja de precios en tela seca y resina (no trabajan con preimpregnados).

El método de infusión de resina se descarta debido a su complejidad y dificultad. Tal vez la mejor forma de proceder sería utilizar laminado húmedo para la mayoría de las piezas y complementar con infusión en los casos en los que la geometría lo requiera. Sin embargo, al ser el primer paquete aerodinámico del equipo, en el momento de tomar esta decisión, la experiencia de los integrantes del equipo en el trabajo con la fibra de carbono es nula, por lo que se decide evitar la complejidad propia de la infusión de la infusión. Por otro lado, el coste de la infusión también es mayor debido a la cantidad de consumibles que se utilizan.



6. Pretemporada fase 2: Experimentos

Una vez realizada la labor de investigación, se realizan tandas de experimentos. El objetivo es aumentar la probabilidad de éxito en la fabricación:

- Probando la viabilidad de ideas
- Descubriendo puntos de error
- Sirviendo como práctica para las personas que van a realizar la fabricación

6.1. Primera tanda de experimentos 8-nov-2023

El objetivo es desarrollar un método para la fabricación de modelos y moldes. El método consiste en fabricar un modelo con la cortadora de hilo en XPS y luego fabricar el molde con cemento o yeso.

Durante esta fase de la temporada se operaba bajo el supuesto de que se iba a trabajar con el prepreg de Gurit por lo que había que encontrar una forma de fabricar moldes asequible resistentes a la T^a

6.1.1. Fabricación de modelos de XPS con hilo caliente

Probar la cortadora de hilo caliente nada más terminar su fabricación.

Objetivos:

- Fabricación de modelos largos y esbeltos (perfil alar del Rear wing)
- Ajuste del voltaje del arco para obtener los mejores resultados en cortes largos y cortos
- Desarrollo y práctica de la técnica (velocidad de corte y tensión)

Bibliografía relevante al experimento:

Corte de perfiles:

<https://www.youtube.com/watch?v=ZIQZFib8PiM>

(Arnold's Design, 2017)

Fabricación del arco de hilo caliente:

<https://www.youtube.com/watch?v=vXT49RqF6Qc>

(Good Roads, 2021)

Procedimiento seguido

-Dibujo de las guías

Las guías se dibujan en AutoCAD y se cortan en madera MDF de 3mm en la cortadora láser del laboratorio.

Se prueban varios perfiles alares genéricos a los que se añaden líneas tangentes para el sobrante y bordes para luego poder verter el cemento o yeso.

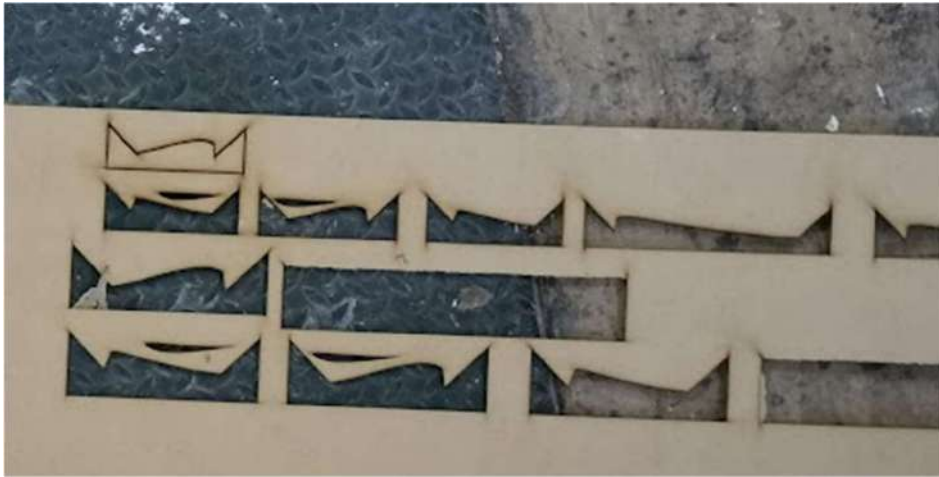


Figura 33: Plantillas de MDF3mm cortadas por corte láser



6.1.2. Fabricación de moldes de material refractario

Objetivos:

- Comprobar la viabilidad del proceso en general
- Comprobar el acabado superficial del molde (porosidad, rugosidad etc.)
- Comprobar el proceso con un molde largo y esbelto y con uno corto.
- Elegir el mejor material (yeso, cemento blanco y gris)
- Producir moldes de cara a la próxima fase de experimentación

Procedimiento

- Se mezcla el cemento o el yeso con agua en las cantidades indicadas, se debe remover abundantemente.
- El vertido se debe hacer muy despacio para evitar burbujas, mientras la mezcla está líquida.
- Es muy importante agitar el molde para que salgan todas las posibles burbujas, en algunos tutoriales recomiendan usar una pistola de masajes
- El tiempo de curación viene indicado en los envoltorios

Desmoldeo

Para poder sacar el molde de yeso/cemento del modelo de XPS, se va a probar la utilización de un film de plástico, debe ser fino para no afectar a las dimensiones y algo elástico también.

El plástico se colocará sobre el molde y se ajustará lo mejor posible a la geometría antes de hacer el vertido.

6.2. Resultados tanda 1

6.2.1. Cortadora hilo caliente

Observaciones:

- La máquina no se puede manejar por una sola persona, hacen falta dos personas sincronizadas.
- Con el hilo de 120cm, la velocidad de corte es muy baja. Manualmente es difícil seguir esta velocidad y al tirar, el hilo se arquea dando lugar a piezas inservibles.
- Con el hilo a 70cm los resultados mejoran.
- Las guías de MDF son propensas a atascar el hilo. El resultado mejora lijando las guías. Las dos personas que manejan el hilo deben llevarlo siguiendo la guía, pero sin apoyarlo con fuerza (si se aprieta el hilo contra la guía, este tiende a atascarse y moverse a saltos).
- Se dibujan líneas en las guías para que las dos personas se puedan sincronizar.



Figura 34: Primeros modelos fabricados por hilo caliente

**Problemas encontrados:**

El voltaje de la fuente de tensión es demasiado bajo para 120cm de hilo. Se reduce la longitud a 60cm y funciona mucho mejor (el hilo está más caliente y deja mejor superficie, además de ir más rápido y reducir el error humano).

Posible solución: El alerón trasero mide 91cm, el central del delantero 92cm y los pequeños del delantero 27,5cm. Lo óptimo sería reducir la longitud del hilo a 33cm, de esta forma, el hilo tendría más potencia y el arqueado del hilo también sería menor. Se cortaría el molde de espuma en 3 partes, luego se unen y luego se vierte el cemento.

Algunas planchas de XPS tienen zonas duras: Algunas planchas se forman pegando otras más finas, esta unión opone más resistencia que el resto de la plancha al hilo y el resultado es malo. Hay que evitar estas planchas o planificar la colocación del molde para evitar que la zona dura quede en zonas críticas del molde.

Solución: Las planchas de Leroy Merlin no tienen dicha unión así que para el uso con hilo caliente son mejores.

6.2.2. Moldes refractarios

Moldes de cemento gris

Los moldes se dejan fraguar 40h.

Se han fabricado 3 moldes, dos de ellos tenían film transparente para ayudar al desmolde y uno no tenía nada.

Moldes fabricados con film transparente: Desmoldan sin problema, la superficie es excelente, el plástico no se coloca perfectamente sobre la espuma: debido a ello: quedan marcas de las arrugas en el molde y algunas esquinas en punta salen redondeadas.



Figura 35: Moldes de cemento fabricados con film sobre el modelo

Molde con el cemento directo sobre el XPS: También desmolda sin problemas, la geometría sigue perfectamente a la espuma. La superficie del molde es áspera ya que la de la espuma es áspera (El molde está arqueado y tenía líneas porque el modelo era uno de los que salió mal con el hilo)

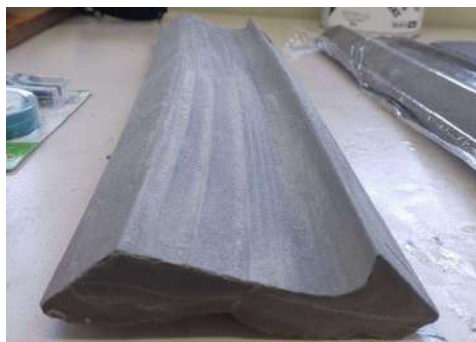


Figura 36: Molde de cemento fabricado directamente sobre la espuma

Molde de yeso

El yeso utilizado es “yeso terminación mecafino plus” de Obramat

Este experimento termina en fracaso. Tras 69h de fragua, los moldes siguen sin endurecer y algunas partes finas que si están secas no tienen ninguna resistencia (se puede desmenuzar con los dedos)

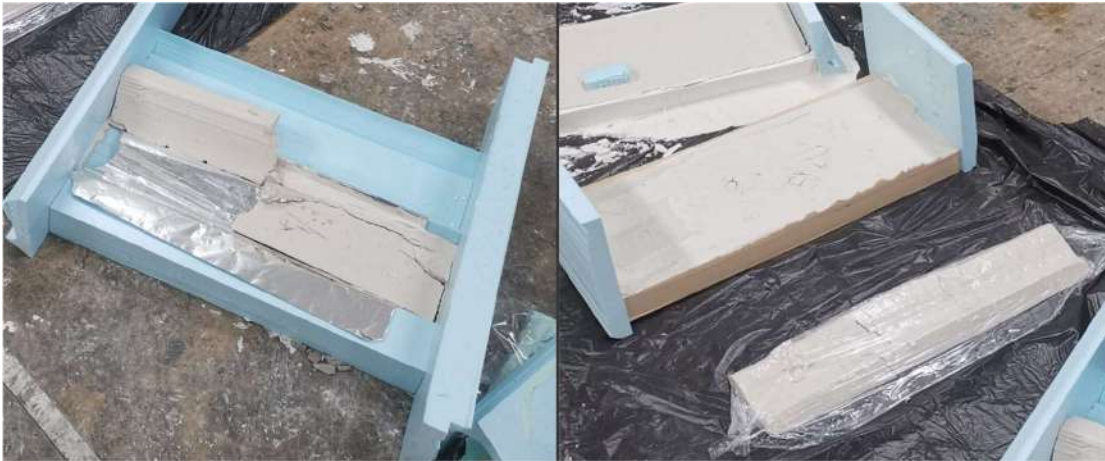


Figura 37: Moldes fabricados con yeso mecafino

6.3. Tanda de pruebas 2

6.3.1. Moldes refractarios II

Tras un resultado prometedor en la primera prueba.

Se sabe que el cemento directamente sobre XPS da un buen resultado. Sin embargo, un molde debe tener una superficie lisa así que se buscan alternativas para lograr dicho acabado.

El film transparente deja una superficie muy buena, pero forma arrugas.

Film de forrar libros

Dado que las partes más peliagudas de la superficie no son parte del perfil final, la propuesta consiste en aplicar un forro de libros como una pegatina en la parte cuya superficie nos importa.



Figura 38: Concepto de moldeo sobre espuma con film adhesivo

6.4. Resultados de la tanda 2

Se coloca el forro de libros sobre el molde y el resultado es bastante satisfactorio, se ha de hacer con cuidado, pero el forro queda sin arrugas.



Figura 39: Modelo de espuma con film adhesivo colocado

Se saca el molde de la espuma tras 30h de fragua y se obtienen unos buenos resultados, la superficie del cemento es tan lisa que a simple vista parece que tiene una pegatina puesta (no es el caso)



Figura 40: Moldes fabricados mediante modelo de espuma y forro adhesivo

El resultado es excelente, pero se puede apreciar que el forro se ha despegado un poco en los extremos. Lo más probable es que se deba a la humedad del cemento despegando el adhesivo del forro de libros.



Figura 41: Arrugas apreciadas en el forro después de sacar el modelo del molde

Se pueden apreciar pequeñas arrugas o burbujas en los extremos del forro de libros. No obstante, se considera el experimento exitoso ya que se ha conseguido fabricar un molde de forma muy económica (menos de 5 euros), con pocas horas de trabajo y con una tolerancia dimensional buena.



6.5. Tanda de experimentos 3

En esta tanda se plantea un experimento de desmoldeo y uno de fabricación de un perfil entero.

6.5.1. Prueba de desmoldeo

Habiéndose demostrado la viabilidad de fabricar los moldes en cemento, queda demostrar que verdaderamente se pueden usar para la fabricación de fibra de carbono. La mayor incógnita es si las piezas de fibra quedarán adheridas al cemento, como es un método que nadie ha probado (que se haya encontrado), esto es una incógnita.

El cemento es poroso, pero en este caso la superficie es muy lisa. Hasta que no se pruebe, no se puede saber si las piezas desmoldarán o no y cuál es la combinación de tapa poros y desmoldante necesaria.

Preparación del molde

Tapaporos (o sellador): Sustancia cuya función es evitar el paso de fluidos a través de un material poroso.

Desmoldante: Sustancia que permanece entre el molde y el modelo para evitar que se peguen.

Ambos elementos funcionan como un sistema, que debe ser adecuado para el caso de moldeo específico.

Pruebas que se planea realizar:

- Tapaporos sin nada
- 5 capas de desmoldante sin tapaporos
- Tapaporos y 3 capas de desmoldante (mitad de lo normal)
- Tapaporos y 5 capas de desmoldante (lo normal)
- Tapaporos y 9 capas de desmoldante (150%)
- Otra opción es la cera desmoldante Miracle gloss mould release wax

Laminado

Se había planteado usar fibra de vidrio y vinylester por precio. Para que la prueba sea significativa, se van a usar materiales lo más parecidos a los de verdad.

Se van a usar retales de fibra de carbono y se va a comprar una pequeña cantidad de epoxy.

Se va a laminar con vacío ya que esa es la forma que se va a hacer en la fabricación final.

Cada probeta tendrá unas dimensiones de unos 50x200mm, tendrá dos capas de fibra y se colocará en una parte con curva del molde.

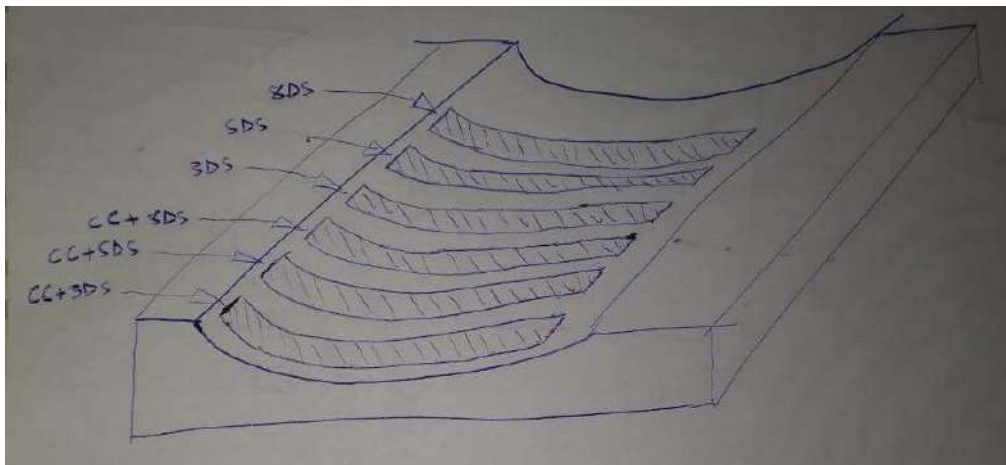


Figura 42: Primer planteamiento del experimento de desmoldeo de fibra sobre cemento

6.5.2. *Fabricación de un perfil entero*

Se propone fabricar el perfil mayor del alerón delantero en su totalidad (a una escala menor) utilizando materiales de calidad inferior a los que se utilizarán en el producto final pero cuya fabricación es similar. Se va a usar fibra de vidrio en vez de fibra de carbono, etc, etc.

- Comprobar si las uniones con adhesivo en el borde delantero y trasero funcionan.
- Comprobar si la superficie de carbono queda rígida en las zonas en las que no apoya en la estructura.
- Probar el proceso de pegado del carbono a la estructura
- Probar el proceso entero y descubrir imprevistos.

Estructura interna:

En lo que se refiere a esta prueba, la estructura se va a fabricar en madera aglomerada MDF de espesor 3mm. En el alerón final la estructura se fabricará de aluminio, sin embargo, el corte láser tiene un coste elevado.

La estructura se cortará mediante láser en el laboratorio de expresión gráfica y se ensamblará con cola blanca (en caso de ser aluminio, se podría unir mediante soldadura fuerte (brazing))

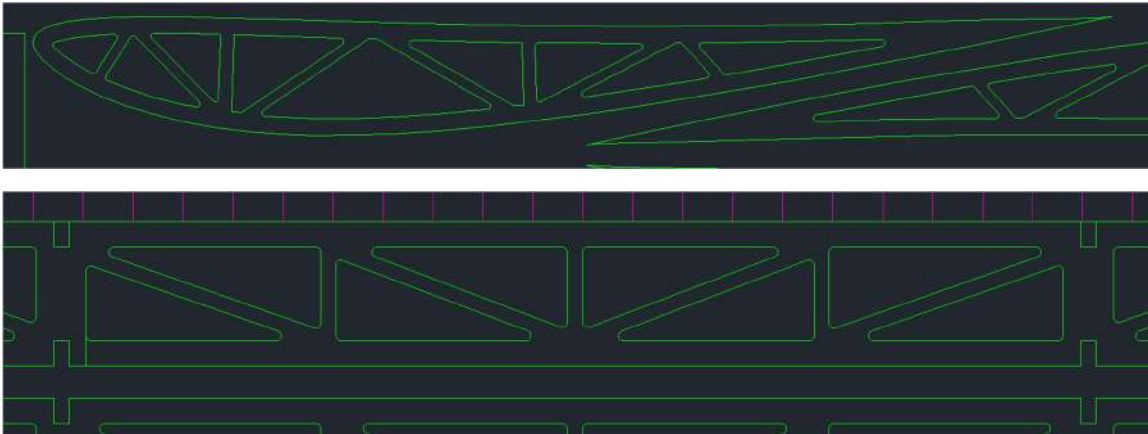


Figura 43: Diseño de la estructura interna

Superficie del perfil

Guías: Para las guías se intentan corregir los problemas encontrados en el experimento anterior.



Figura 44: Diseño de las guías

Primero se introduce el dibujo del perfil en autoCAD con el comando “import” y poniendo la escala que viene indicada en el menú que sale.

Se eligen los puntos de unión de ambas mitades cortando el perfil con una recta por el borde trasero y la parte del delantero que quede tangente a la recta.

Se copia el dibujo dos veces y en uno se borra la parte superior y en otro la parte inferior.

Por razones del laminado, se extiende la superficie mediante una recta tangente en ambos puntos de unión (SIN PERDER EN NINGÚN MOMENTO LA REFERENCIA DE DONDE SE UNEN LAS MITADES)

Con esto se tiene preparada la superficie donde se va a laminar, ahora se añaden unas rectas a 45° para que la espuma forme una cavidad donde se pueda verter el cemento.

- Se añaden agujeros de 1mm de radio para poder fijar la guía a la espuma con alfileres.
- Se evitan las esquinas agudas donde el hilo se suele atascar
- Se añaden líneas grabadas verticales para que las personas que manejan el hilo puedan ir sincronizadas.
- Nombre grabado para saber a qué perfil corresponden las guías
- Referencias que indiquen los puntos de unión (después de laminar habrá que cortar las piezas de fibra en este punto)
- Para que las referencias grabadas queden en el lado correcto, hay que dibujar en autoCAD cada guía Y SU VERSIÓN SIMÉTRICA.

Ensamblaje

Primero se ensambla la estructura interna

Cuando se saquen los laminados del molde, se ha de marcar una línea recta por los puntos de unión (están indicados en las guías). Luego se corta por dicha línea.

Se pega una de las mitades a la estructura interna (se recomienda que sea la mitad de abajo ya que esta zona sufre presiones negativas y puede tender a separarse)

Soldadura delantera: La unión del borde delantero es una zona crítica pero no ofrece mucha superficie para el adhesivo, además la tolerancia para que ambas piezas encajen es pequeña, se proponen dos ideas para asegurar que queda bien.

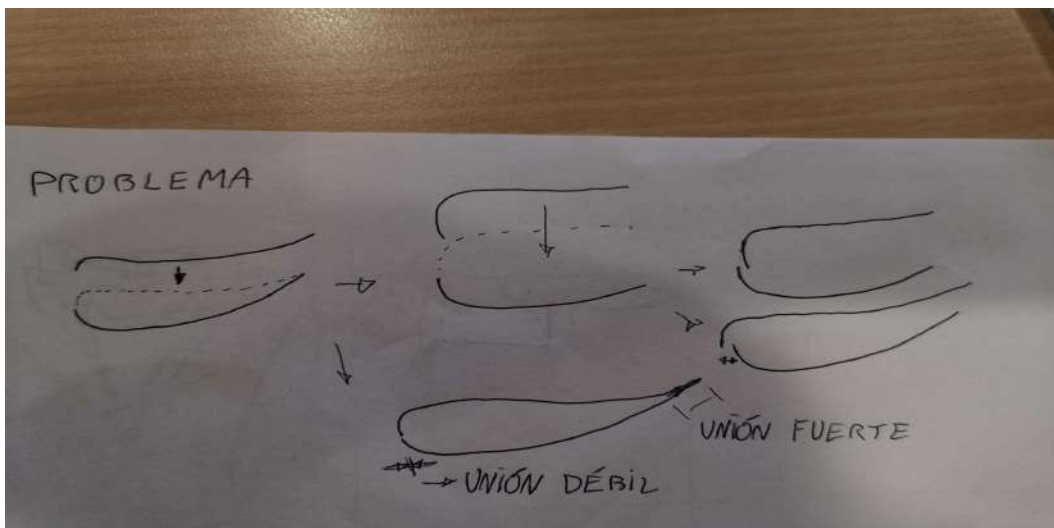


Figura 45: Unión en el borde delantero de los perfiles

Borde delantero de espuma: se corta una pieza de espuma que se pueda pegar interiormente a una de las mitades del perfil, de esa forma al pegar la segunda mitad, la espuma fuerza el alineado y aumenta la superficie de adhesivo disponible

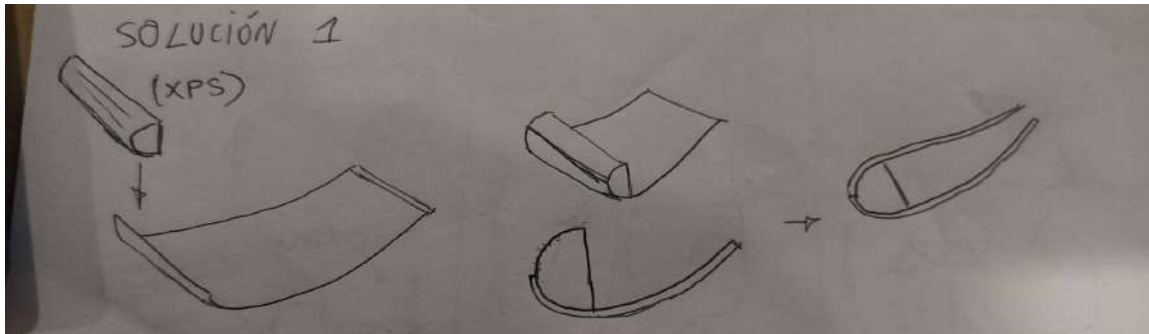


Figura 46: Concepto de borde delantero con espuma

-Laminado de unión: Es el mismo concepto, pero incluiría fabricar una tercera pieza de laminado (fibra de carbono o vidrio) lo cual supone un trabajo extra ya que incluye todos los pasos de moldeo etc. Por otro lado, aportaría una gran resistencia al eje delantero sin aumentar apenas el peso del alerón

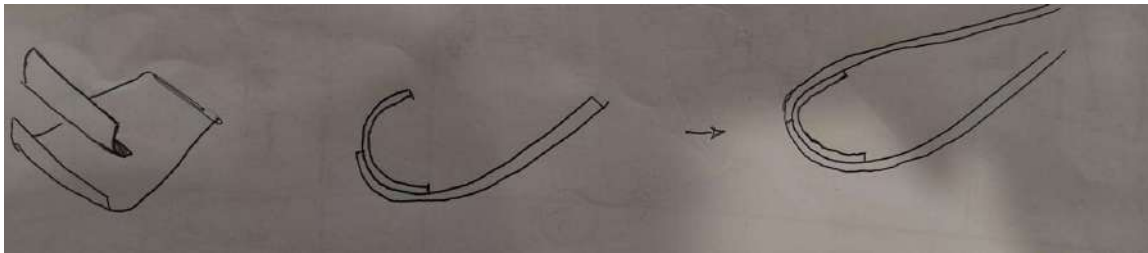


Figura 47: Concepto de borde delantero con refuerzo interno

6.6. Resultados de la tanda 3

6.6.1. Prueba de desmoldeo

Por falta de materiales (fibra y resina), no se lleva a cabo. El planteamiento inicial era hacer la prueba con epoxi de uso general del Leroy Merlín y fibra de vidrio que había en el taller. Después de hablar con el director técnico, y el patrocinador de fibra/ resina, se decide hacer una pequeña compra de fibra y resina iguales a las que se va a usar en la fabricación.

No es un mal planteamiento, pero el resultado es que debido a la burocracia del patrocinio y a la situación financiera del equipo, un experimento que se iba a realizar en 2-3 días se acaba realizando semanas después.

6.6.2. Fabricación de perfil entero

Fabricación de las guías:

Bien hecho:

Se puso la plancha de madera sobre una superficie plana con pesos para que se quedara plana unos días antes del corte. Esto ha hecho que la plancha no tenga curvatura y la distancia de enfoque del láser sea mejor. Por otro lado, se ha usado la velocidad recomendada y una potencia 20% superior. El corte ha sido muy bueno.

Agujeros para alfiler: Los agujeros funcionan bien para fijar las guías

Mal hecho:

- Líneas de referencia: La potencia de grabado era demasiado alta, las líneas grabadas casi atraviesan la madera. Por otro lado, las líneas de referencia llegan al borde por donde desliza el hilo, el hecho de tener esas líneas hace que se atasque el hilo.

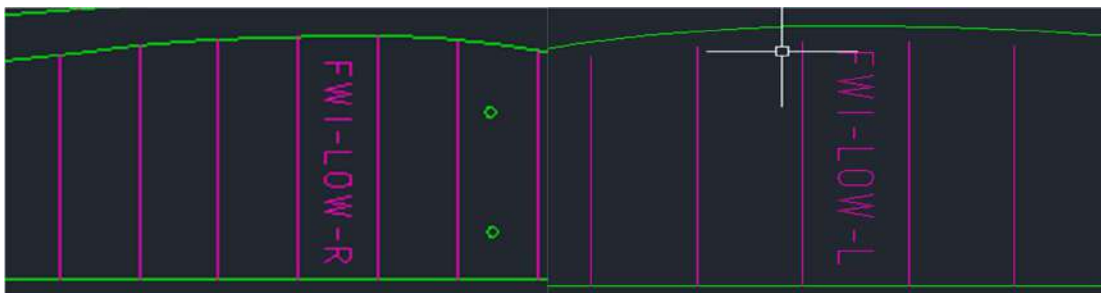


Figura 48: Guía con las referencias hasta el borde (incorrecto, izda) y con cierto margen (correcto, dcha)

- Dobles líneas: En el autoCAD había dobles líneas, la máquina corta dos veces lo mismo.
- Texto: Una vez más, el texto no se graba en la pieza.

Fabricación de la estructura interna:

El diseño de la estructura interna es correcto y ésta se ensambla sin problema.

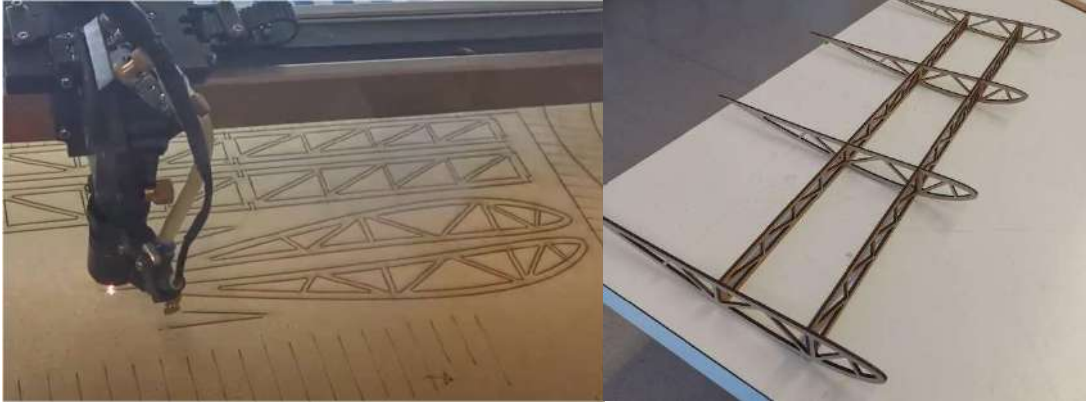


Figura 49: Corte y montaje de la estructura interna

Corte con hilo

Se ha hecho bien:

Durante los últimos experimentos, se redujo la distancia de corte desde 120cm hasta 70cm. En este caso, se reduce hasta 35cm. La razón es que aún con 70cm el hilo tiende a arquearse, por otro lado, ninguna de las piezas beneficia de un hilo de 70 cm ya que el alerón trasero mide 90cm y los flaps del delantero miden 30cm, así que un hilo de 35cm se considera la mejor opción.

- Se han obtenido mejores resultados empezando a cortar por el borde trasero, de esa forma, el borde de ataque (la zona más difícil) es “cuesta abajo” y sale mejor

Se ha hecho mal:

Como las guías tienen el problema de las líneas de referencia, ha sido difícil que el hilo no se atascara, causando dificultades extra.

Para probar la próxima vez:

Sería interesante probar a inclinar el molde en el momento del corte con el hilo para que todo sea cuesta abajo.



Figura 50: Modelos de espuma XPS

Después de unos pocos intentos, se logra obtener unos buenos modelos de XPS, que luego se usan para fabricar los moldes de cemento.



Figura 51: Fabricación de los moldes de cemento

Estos moldes son los primeros que se fabrican en tales dimensiones (unos 70x40cm), se empieza a hacer manifiesto el problema del peso ya que cada uno pesa unos 30kg.

Sobre todo, teniendo en cuenta que, si se fabrica un molde de alerón delantero, éste mediría unos 170cm de largo.

Laminado del perfil

Al igual que la prueba de desmoldado, ésta también se postpone debido a falta de material.

6.7. Tanda de experimentos 4

Dado que se decide hacer un pedido pequeño de materiales al patrocinador MELcomposites destinado únicamente a pruebas, se replantean los experimentos anteriores para incluir también un perfil macizo y un endplate

- Prueba de desmoldeo de fibra sobre cemento. (el planteamiento no cambia)
- Perfil hueco grande con los moldes ya fabricados.
- Perfil macizo pequeño.
- Endplate tamaño alerón delantero.

6.7.1. Prueba de perfil hueco

Utilizando uno de los molde que hay en el taller:

El perímetro del perfil (vista lateral) son 675mm, se hace en dos mitades y cada mitad tiene un sobrante de 40mm. 835mm. Los laminados son con 3 capas de fibra de carbono. Se considera un margen de 20mm alrededor de la pieza.

Rectángulos a cortar 835 x 660mm (3 unidades)

Resultando en 835x1980

Hacen falta 2m de tela de 1m de ancho

Peso de fibra 0,264kg

Peso de la resina 0,396kg

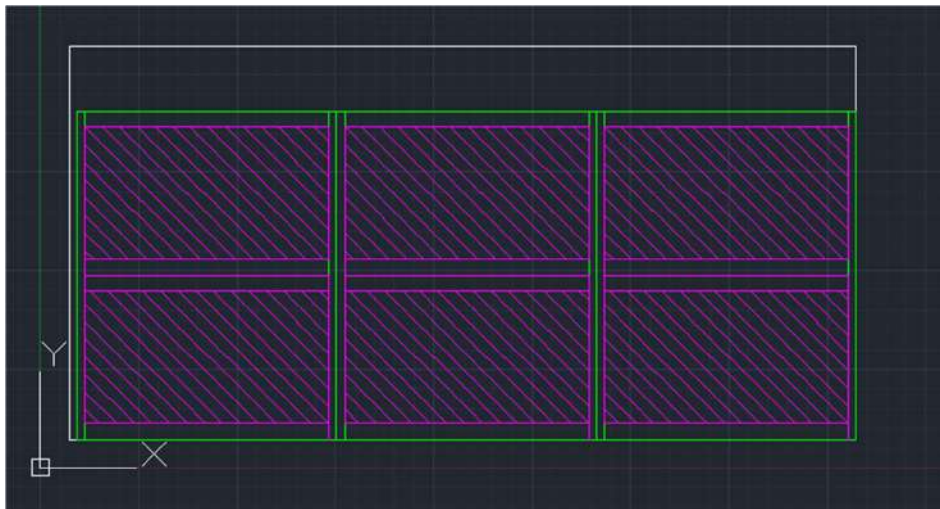


Figura 52: Corte de patrones de fibra

6.7.2. Perfil macizo

Se va a hacer un perfil macizo de tamaño pequeño (275mm de ancho 80mm de cuerda)

Fabricación del núcleo

A estas alturas de la temporada, la relación con el dpto. de expresión gráfica ha mejorado lo suficiente para empezar a utilizar las máquinas. **Se va a probar a realizar el núcleo de espuma con la máquina de corte por hilo caliente CNC.**

Primero se ha de determinar la velocidad de corte del hilo hasta que se tengan buenos resultados.

Una vez hecho eso, se comprobará si la pieza obtenida encaja con las guías de madera o si hay que añadir un desfase al CAD para compensar por el ancho de corte, en especial, importa que encaje el borde trasero.

Se apuntan los ajustes de la máquina de hilo para obtener resultados perfectos.

Laminado

La técnica propuesta consiste en recubrir un núcleo de espuma que tenga la forma deseada con fibra. Se utiliza una película de plástico rígido MYLAR para transferir el acabado superficial a la pieza.

Se va a utilizar la fibra que hay en el taller del año pasado, poniendo dos capas.

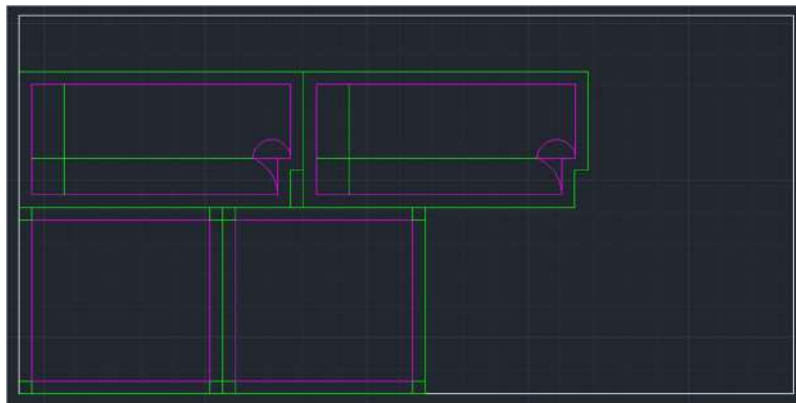


Figura 53: Patrones de corte de carbono para el flap y endplate de prueba

Rectángulos a recortar: 315x296 (x2)

Peso de la fibra: 0.04kg

Resina a comprar: 0.06kg

Mylar a comprar: 1m

6.7.3. Endplate

La normativa establece un radio mínimo de curvatura de 3mm, lo que se suele solucionar haciendo los endplates con un panel sándwich de 6mm de espesor. A menudo los equipos se ven forzados a cubrir los borde con cinta americana para pasar el scrutineering.

Se plantea la posibilidad de añadir un borde de ataque redondeado, lo que tiene beneficios aerodinámicos, estructurales y también de peso ya que permite que el endplate no sea panel sándwich.

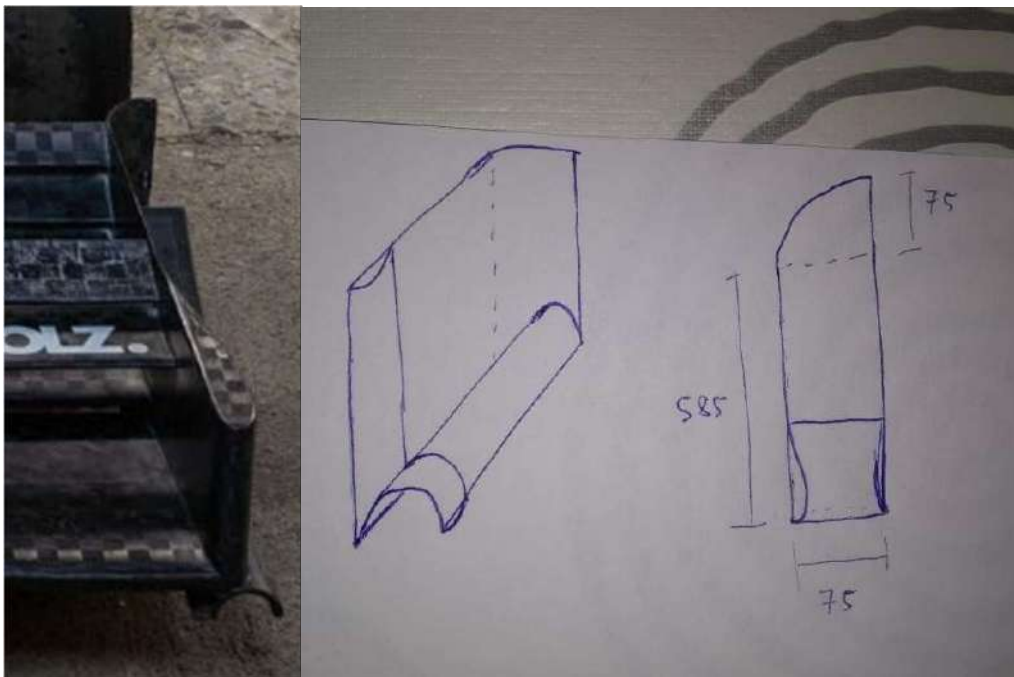


Figura 54: Modelo de endplate de prueba

El método planteado consiste en realizar el endplate combinando moldes y núcleos de espuma y utilizando MYLAR para lograr un buen acabado.

Todas las curvas ocurren en un solo plano para que los diferentes moldes se puedan fabricar mediante el hilo caliente.

6.8. Resultados tanda 4

Como era de esperar, hay discrepancias entre lo que se había planteado y lo que se ha terminado llevando a cabo.

6.8.1. Molde front wing.

Mientras se soluciona el problema de los materiales, se aprovecha para aprender a utilizar la fresadora del laboratorio fabricando un molde de alerón delantero.

Se lleva a cabo el molde de un alerón delantero genérico en cemento a partir de un máster de espuma fabricado en la fresadora del laboratorio de expresión gráfica.

En la fabricación surgen una serie de problemas:

Las uniones entre diferentes partes del molde no quedan bien, se utiliza masilla de pared porque la masilla de carroceros disuelve la espuma. Esta masilla se disuelve con la humedad del cemento así que tampoco da buen resultado.

Fresado máster

- Debido a las dimensiones de la pieza (espesor supera 6cm), el molde se debe dividir en dos alturas y fresarse en dos partes.
- La pieza mide 1500 de largo y las planchas de espuma 1250 así que el bloque para la fresadora se tiene que fabricar a partir de dos planchas.
- Se prueba a usar pegamento para poliestireno, pero el resultado es malo. Luego se prueba cola blanca y el resultado es bueno, pero tiende a atascar la fresa y una fresa atascada derrite la espuma.
- La mejor solución es unir ambas partes con cola caliente, poniendo pegamento solo en las zonas por las que no pasa la fresa.
- El tiempo que tarda la fresadora es considerable, el fresado del molde tarda 5 días de trabajo (2 días son debidos a inexperiencia)

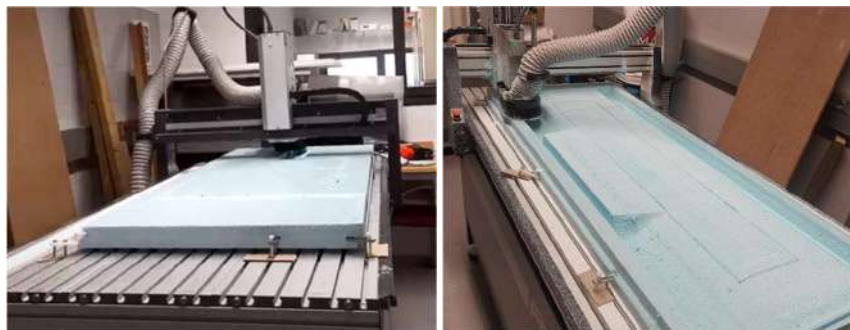


Figura 55: Pruebas de fresado de espuma

- El forro de libros no se adhiere bien a una pieza tan grande, se soluciona con alfileres, aunque no es una solución perfecta. Dejan pequeñas marcas en la pieza final así que solo se pueden poner en las zonas de sobrante. El forro no es elástico así que solo sirve para las partes rectas.
- Como el modelo está formado por varias piezas, es necesario encontrar algún tipo de masilla para estas zonas.
- La mayoría de las masillas y productos disuelven el XPS, así que se prueba con masilla de pared. El resultado es aceptable, pero se desmenuza demasiado fácil.



Figura 56: Modelo para molde de alerón completo con la masilla aplicada

Fabricación del molde de cemento

Se fabrica el molde de cemento, lo que requiere un total de 5 sacos de 25kg.



Figura 57: Modelo de espuma preparado para el vertido de cemento

Durante el curado, se observan grietas formándose en el cemento. Sin embargo, el molde se puede extraer en su totalidad del modelo de espuma.



Figura 58: Fraguado del cemento

El acabado de las zonas de forro es muy bueno pero el de las zonas de la masilla tiene una textura áspera. Lo que ha ocurrido es que la masilla se ha reblandecido con la humedad del cemento y ha quedado pegada a éste.

Se quitan los restos de masilla lijado y debajo está la superficie lisa del molde.



Figura 59: Superficie del molde de cemento

Se utilizan varillas roscadas para reducir las probabilidades de que el molde se pueda romper durante su uso. La unión entre las varillas y el cemento no es buena, no se recomienda volver a usarlas (si se mueven las varillas, se ve como el cemento se va deteriorando).

6.8.2. Prueba de desmoldeo

Se realiza la prueba de desmoldeo sobre el molde fabricado en el punto anterior.

Se prueban tres casos, 5 capas de desmoldante, 8 capas de desmoldante y la cera “miracleWax”. El resultado es un éxito rotundo, todas las piezas desmoldan perfectamente y con un buen acabado.



Figura 60: Prueba de desmoldeo

Observaciones:

- No se ha logrado que la bolsa de vacío mantenga el vacío. Puede deberse a muchas razones ya que es la primera vez que se hacía y el proceso ha sido caótico. Después de solicitar consejo a uno de nuestros patrocinadores, se concluye que la realización de bolsas de vacío es un proceso más complejo de lo que se suele indicar en las referencias utilizadas.
- Las piezas parecen tener una cantidad insuficiente de resina. La cantidad mezclada ha sido adecuada, pero se puede observar que el peelply ha absorbido una cantidad excesiva. Para evitar esto, se ha de esperar a que la resina gelifique antes de aplicar la presión de vacío.



Figura 61: Superficie de la probeta fabricada

6.8.3. Perfil grande.

Se lamina un perfil a partir de dos moldes de cemento que se habían fabricado hacía tres meses.

Se hace la bolsa sobre una pizarra blanca del taller.

Al quedar los moldes fijos a la pizarra, que solo cabe en el horno en vertical, se decide hacer el horno "in situ" alrededor de la propia pieza.



Figura 62: Bolsa de vacío y horno "in situ"



Figura 63: Laminados terminados y pieza final

Conclusiones

- El método funciona en líneas generales
- La unión a lo largo del borde delantero es preocupante al no tener solape para el adhesivo.
- Quedan pequeñas motitas de cemento pegadas al perfil.
- También algún defecto estético en el carbono.
- Las arrugas que el forro de libros dejó en el cemento salen en la pieza.

6.8.4. Perfil pequeño macizo

Se fabrica el perfil pequeño con la técnica de recubrimiento de espuma con fibra.



Figura 64: Perfil pequeño con núcleo de espuma

Conclusiones

- El resultado es muy bueno, la superficie queda pulida directamente al salir de la bolsa.
- Estructuralmente, el perfil es extremadamente rígido.
- Es más difícil cubrir la pieza de lo que parece en los tutoriales, es un trabajo para varias personas.
- Cubrir el leading edge sin que quede arrugado cuesta mucho, sobre todo teniendo en cuenta que no se puede apretar la pieza ya que se marca la espuma.
- El trailing edge conviene sujetarlo externamente ya que al ser tan fino, es fácil que si la bolsa se doble, la pieza quede doblada



Parte 2: Temporada

Se consideran como pertenecientes a la temporada, aquellas actividades de planificación, diseño o fabricación enfocadas directamente al paquete aerodinámico final.

El transcurso de la temporada consta de tres partes marcadas:

Una primera parte de planteamiento de la fabricación y diseño mecánico de componentes, la cual se solapa con el final de la pretemporada y del diseño aerodinámico.

Fabricación real: Durante la propia fabricación, siempre hay variaciones con respecto a la planificación ya que las situaciones son cambiantes. En especial en este caso en el que la experiencia previa era nula, y por lo tanto los conocimientos y habilidades van creciendo exponencialmente durante el propio proceso.

Vida útil: Durante la vida útil del monoplaza, también se producen cambios. Al tratarse del primer paquete aerodinámico en la historia del equipo, existen múltiples incógnitas que no se descubren hasta el momento de ponerlo en pista.

Estas etapas ocurren de forma secuencial solapada en la temporada real ya que en teoría primero se realiza un diseño, luego se fabrica y luego se prueba, pero en la realidad, existen diferentes fechas límite para diferentes componentes, algunos se retrasan o adelantan de forma inesperada debido a los requerimientos del diseño aerodinámico y algunos se deben probar pronto mientras que otros pueden retrasarse casi hasta la presentación del monoplaza.

Para mejorar la legibilidad del documento, se va a abandonar el orden cronológico y se va a estructurar según el tipo de componente, tratando las fases de diseño, fabricación y vida útil de cada tipo de componente por separado. Al final de cada sección se incluirá un apartado de lecciones aprendidas donde se realizará una pequeña conclusión a nivel técnico sobre dicha sección.

Al final del documento, se recogerán las conclusiones generales del proyecto.



7. Perfiles grandes (FW main y RW main)

7.1. *Diseño mecánico*

Los perfiles grandes o principales son el elemento estructural más crítico. Por la forma aerodinámica típica de un alerón, el perfil principal es de un tamaño considerablemente mayor al resto. Debido a esto, estos perfiles suelen ser las piezas estructurales clave del alerón, anclando el perfil principal al chasis y luego el resto de los elementos del alerón a éste.

Lista de requerimientos:

- Facilidad a la hora de anclar otros elementos al perfil: anclajes del alerón, flaps, endplates deben ir anclados al perfil principal.
- Rigidez suficiente: se deben pasar las pruebas de rigidez establecidas por la normativa
- Resistencia suficiente: Debe sobrevivir a su vida útil, lo que incluye impactos contra el asfalto, contra conos, golpes, el transporte, pisotones accidentales etc.
- La ligereza es crítica debido al tamaño de éstos perfiles.
- Se debe poder fabricar con los medios disponibles y en el menor tiempo posible.

Soluciones comunes:

Primero se estudian diferentes soluciones empleadas y se evalúa qué tal se ajustan a la situación del equipo y al problema presente.

Perfil macizo de espuma (Solo aplicable a perfiles rectos)

El alerón está formado por un núcleo de espuma envuelto en una fina capa de fibra. La espuma estabiliza la fibra, que a su vez soporta los esfuerzos. En este caso, se establece la limitación geométrica de perfil recto, lo que abre opciones de fabricación.

Ventajas:

Ligereza; la espuma suele ser más ligera que una estructura interna u otras opciones. Además, al estabilizar la fibra, se puede evitar aumentar el número de capas por motivos de rigidez.

Precio: hay espumas muy asequibles, además se puede hacer fabricación sin moldes. Por otro lado, ya que la capa de fibra está estabilizada, ésta puede ser mas fina.

Tiempo de trabajo: El método de fabricación “sin moldes” permite reducir enormemente el tiempo de fabricación de las piezas.

Desventajas:

Estudio estructural más complejo: Para poder estudiar la rigidez estructural, se debe simular todo el alerón, ya que es la superficie de este la que soporta los esfuerzos. En casos como los de las estructuras tubulares o de vigas y costillas, se puede realizar un estudio simplificado buscando resultados experimentales.

Punto débil: La unión entre la espuma y la fibra es un claro punto débil, debido a la poca integridad de la espuma, la unión entre ambos materiales nunca va a ser mas fuerte que la propia espuma. Si se produce cualquier esfuerzo localizado, la fibra se puede separar de la espuma lo que puede ser catastrófico.

Dificultad para anclar elementos: Este tipo de construcción presenta dificultades a la hora de anclar otros elementos al perfil.



Figura 65: Sección de un perfil con core de espuma

Perfil hueco con estructura interna basada en tubos de carbono

Consiste en utilizar tubos de fibra de carbono como elementos estructurales principales del alerón. Dichos tubos tienen gran rigidez y se pueden comprar en una gran variedad de medidas.

Los tubos se pegan a unas costillas de aluminio que se pegan a las superficies exteriores de carbono.



Figura 66: Perfil con tubos estructurales de CFRP

Ventajas:

Estructura sólida: Debido a la forma tubular y a ser productos comprados, los tubos son autosuficientes estructuralmente, además muchos fabricantes ensayan sus tubos por lo que la flexión del alerón es fácil de estimar sin necesidad de simulaciones.

Desventajas:

Precio: Tanto los propios tubos de carbono como el corte láser de aluminio suponen un gasto considerable, además como la superficie de fibra es hueca, no puede ser demasiado fina.

Rigidez torsional: Como los tubos son continuos a lo largo de todo el alerón, la unión entre los tubos y las costillas no encaja, sino que depende en su totalidad del adhesivo. En caso de que el alerón sufriera un esfuerzo a torsión, los tubos no trabajan de forma eficiente y además las uniones sufrirían esfuerzos localizados.

Eficiencia estructural: La gran mayoría del material que forma los tubos no contribuye a la rigidez y como no llegan a apoyar en la superficie, tampoco sirven de “alma”. En definitiva, este tipo de estructura se utiliza ya que los tubos de carbono tienen unas propiedades extremadamente buenas, y son productos que se pueden adquirir en el mercado, pero no son eficientes.

Perfil hueco con estructura interna de costillas y vigas

Técnica muy común en aviación, consiste en un perfil hueco con una estructura interna de vigas y costillas.

Se puede diseñar desde dos puntos de vista:

- Una estructura que es capaz de soportar los esfuerzos a la que se añaden finas superficies aerodinámicas exteriores, como era en los primeros aeroplanos donde las superficies eran de tela o papel y no tenían función estructural.
- Una estructura que tiene la función de núcleo, estabilizando las superficies exteriores que soportan los esfuerzos (común en alas de composite)

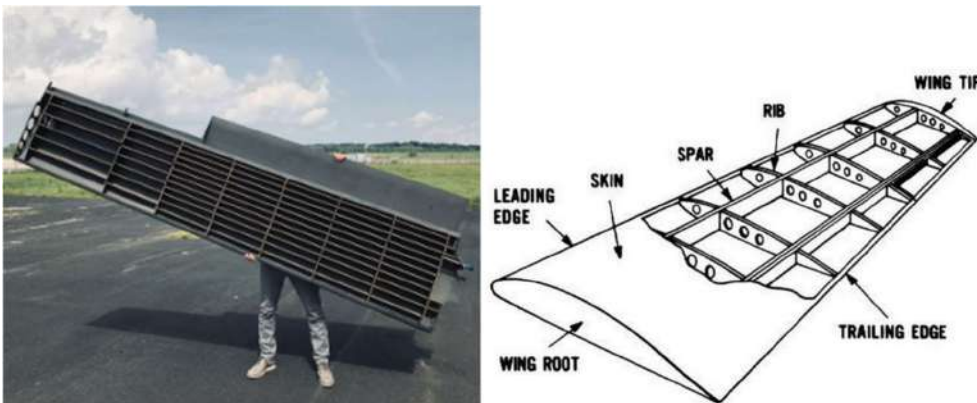


Figura 67: Perfil con estructura interna de costillas y vigas

Ventajas:

Facilitar el anclaje de elementos: Es muy sencillo acoplar elementos al alerón ya que se pueden anclar a la propia estructura, que reparte las cargas localizadas de forma eficaz.

Eficiencia estructural: Este sistema forma un perfil en “I” entre las superficies y las vigas, permitiendo aprovechar las cubiertas de carbono como elemento estructural. Los esfuerzos a torsión se absorben por las cubiertas también.

Estructura que encaja: Ya que la estructura está formada por elementos planos, éstos se pueden diseñar para que encajen entre sí, haciendo que las uniones con adhesivo sean mucho más seguras.

Comportamiento predecible: El comportamiento se considera más predecible que los perfiles con core de espuma porque éstos tienen el riesgo de delaminación entre la fibra y el núcleo. También se consideran más predecibles que la opción de los tubos, ya que el comportamiento a torsión de esa opción depende de una capa fina de fibra no estabilizada.

Libertad de diseño: Esta opción permite fabricar geometrías complejas en el alerón ya que la estructura se fabrica mediante corte láser (ni los tubos ni la espuma se pueden fabricar con geometrías complejas)



Desventajas:

Alta carga de trabajo: Diseñar y fabricar la estructura interna supone un trabajo extra pero sobre todo, esta opción requiere una fabricación de moldes para las cubiertas de fibra.

Precio: Tanto si se fabrica mediante corte láser como si se fabrica de composite, la estructura interna supone un coste extra. También se requiere una cantidad considerable de adhesivos estructurales.

Alta dependencia en adhesivos: Las uniones en la propia estructura son muy seguras ya que las piezas encajan pero las uniones entre las cubiertas y entre las cubiertas y la estructura son críticas. Se debe tener en cuenta que la última cubierta se debe pegar “a ciegas” ya que el adhesivo queda dentro del alerón.

Perfil semihueco con estructura trapezoidal

Consiste en colocar una estructura trapezoidal dentro del perfil, que a su vez tiene parte del volumen ocupado por un core de espuma.

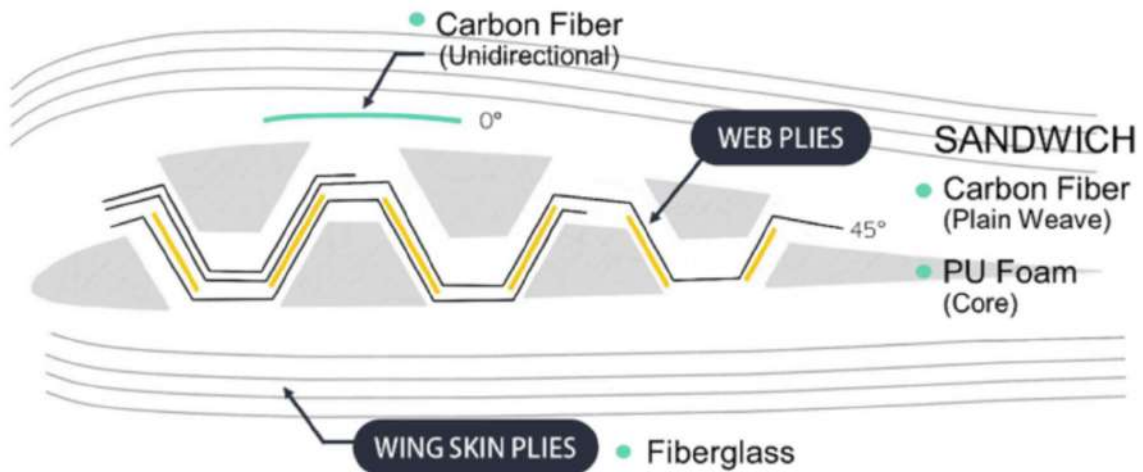


Figura 68: Posible concepto para perfil semihueco con estructura trapezoidal y cores de espuma

La forma trapezoidal, a veces denominada “top hat stiffeners” no se debe a razones estructurales sino de fabricabilidad, ya que si los bordes fueran a 90°, sería difícil evitar problemas de bridging en la bolsa de vacío y por tanto problemas de acumulación de resina.



Figura 69: Montaje de perfil con estructura trapezoidal



7.2. Solución elegida: perfiles huecos con estructura interna.

La solución adoptada es la de perfiles alares huecos. Después de analizar las alternativas y los medios disponibles, se considera que esta opción ofrece las mejores ventajas y que las desventajas presentes tienen solución.

- La principal ventaja de este tipo de estructura es la facilidad y fiabilidad a la hora de diseñar los anclajes entre el alerón y el coche. Basta con diseñar unos salientes en la propia estructura interna, que sobresalgan de la piel. De esta forma, se puede garantizar que las cargas se repartirán uniformemente a todo el alerón por medio de la estructura.
- Las principales desventajas son la gran carga de trabajo que supone, pero se considera que, si se fabrica la estructura mediante corte láser de aluminio, podría ser asumible.
- La otra gran desventaja es la dependencia de uniones adhesivas, pero gracias a la obtención de patrocinio por parte de la empresa Loctite, se puede contar con adhesivos estructurales de altas prestaciones.

7.3. Alerón delantero

La geometría del alerón delantero se caracteriza por tener una anchura de 1511mm, formada en gran parte por dos grandes zonas en voladizo a ambos lados del morro.

Además, por motivos aerodinámicos, la sección central es muy reducida.

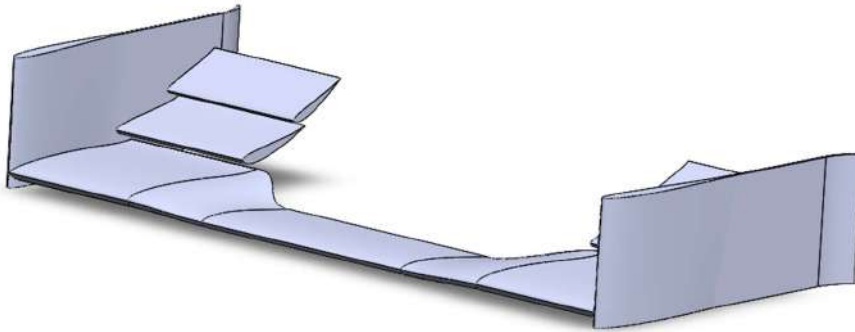


Figura 70: Diseño aerodinámico FW vista ISO

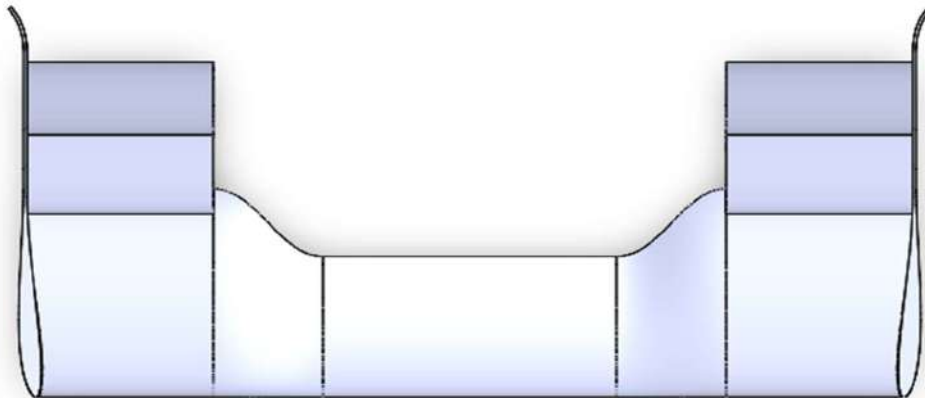


Figura 71: Diseño aerodinámico FW vista planta



Figura 72: Diseño aerodinámico FW vista sección central

Diseño de la estructura interna.

Para el interior del alerón, se diseña una estructura tipo celosía. Las dimensiones de sección vienen determinadas por las capacidades de fabricación del proveedor ya que existen secciones mínimas que son mayores que lo deseado.

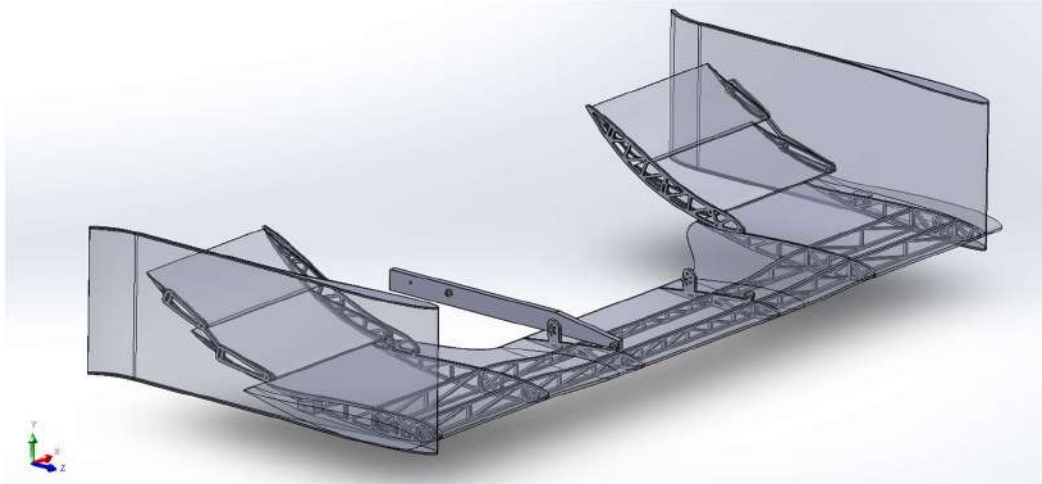


Figura 73: Estructura interna del FW

Como se puede observar, las diagonales son descendentes desde la línea central, se han diseñado de esta manera para trabajar principalmente a tracción y eliminar la posibilidad de fallo prematuro por pandeo.

Elementos de diseño empleados:

Las diferentes piezas encajan entre sí, esto simplifica el ensamblaje al eliminar los problemas de posicionamiento y reduce la exigencia en las uniones adhesivas.

Se hace un primer diseño de la estructura interna usando una estructura de celosía y encajando las piezas de forma que las vigas se introduzcan de forma diagonal por dentro de las costillas, cuando llegan a su posición, se ponen rectas encajando en las ranuras.

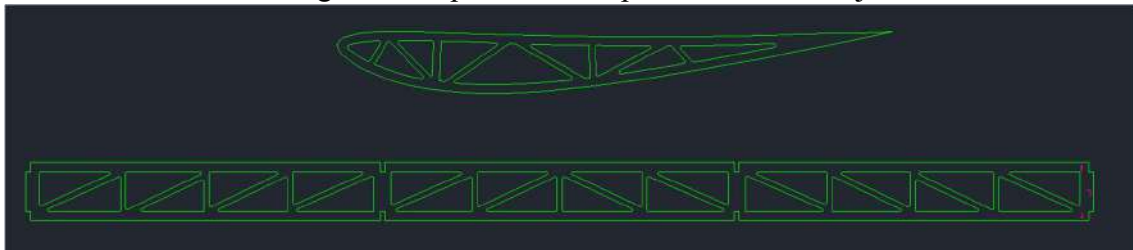


Figura 74: concepto de diseño heredado del perfil experimental

7.4. Alerón trasero

El alerón trasero tiene el mismo tipo de estructura que el delantero. La principal diferencia radica en las proporciones. Se trata de un perfil mucho menos esbelto por lo que lograr la rigidez suficiente es más sencillo.

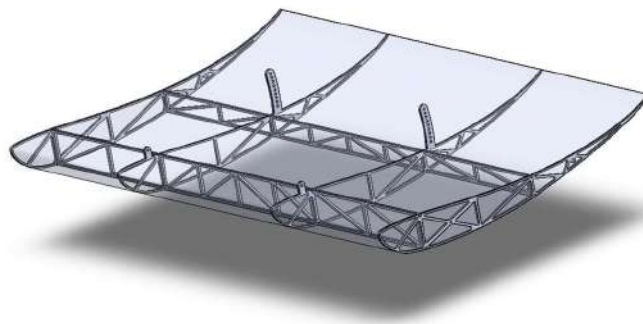


Figura 75: Estructura interna del alerón trasero

7.5. Plan de fabricación

El diseño mecánico planteado consta de una superficie externa de CFRP y una estructura interna de aluminio, este método tiene la desventaja del volumen de trabajo ya que requiere la fabricación tanto de las pieles de carbono (a partir de sus modelos y moldes) como de la estructura interna.

Condiciones impuestas al alerón trasero (RW):

Los perfiles del alerón trasero se han diseñado con la restricción de que deben ser “rectos”. Se entiende por “rectos” como un volumen generado extruyendo un perfil 2D de forma perpendicular al plano y con una línea conductora recta.

Esta condición se impone para reducir la complejidad y la carga de trabajo en la fabricación de los modelos y los moldes.



Figura 76: Alerones "rectos" (izquierda) vs alerones "curvos" (derecha)

Condiciones del perfil principal del alerón delantero (FWMP)

Aerodinámicamente, el alerón delantero es uno de los elementos más críticos del paquete ya que tiene que gestionar el flujo que entra a todo el coche y a la vez generar el suficiente downforce para equilibrar el generado por el alerón trasero. Debido a esto, se considera que merece la pena permitir una geometría más compleja en esta pieza.

El diseño no estaba finalizado en este momento, pero se acordó con el equipo de diseño que el alerón estuviera formado por 3 zonas "rectas" unidas entre sí por 2 zonas de geometría compleja no demasiado abrupta.

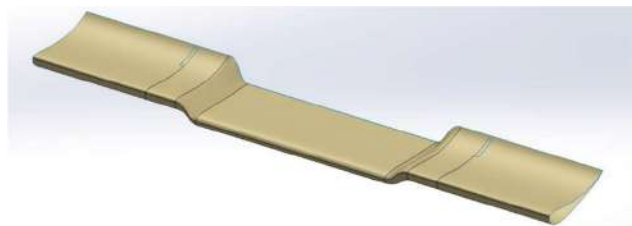


Figura 77: Modelo preliminar de FW Main

7.5.1. Superficies aerodinámicas (skins)

- **Diseño de moldes**

El diseño de moldes para composites parece sencillo, pero se deben seguir una serie de pasos y consideraciones. Este es el proceso seguido, al que se ha llegado investigando y mediante prueba y error.

Se va a utilizar un molde en negativo fabricado en cemento, para obtenerlo, se va a fabricar un modelo en positivo en espuma.

El molde se diseña teniendo en cuenta que, para laminar, se debe dejar un sobrante alrededor de la pieza y otro para colocar la bolsa de vacío.

El diseño del molde también depende de la forma en la que se pretenden unir las dos skins de fibra una vez hayan sido fabricadas.

Antes de comenzar a diseñar se debe tener en cuenta que la máquina de corte por hilo caliente CNC del laboratorio utiliza archivos DXF y es sensible a líneas duplicadas, trozos de línea muy cortos etc. Se debe tener cuidado durante el diseño para evitar problemas posteriormente.

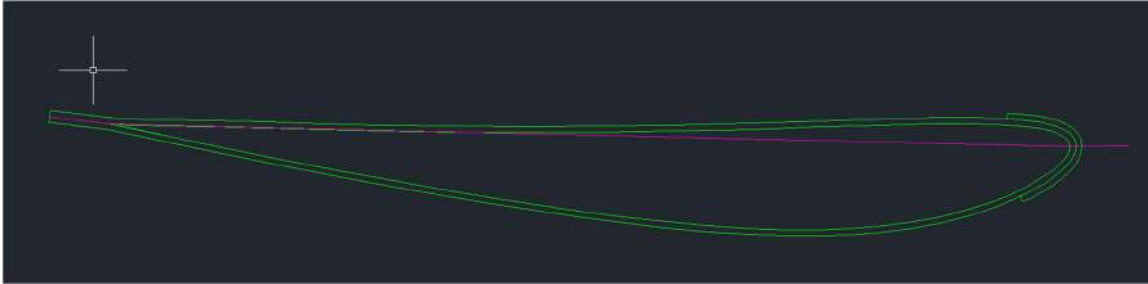


Figura 78: Perfil alar con las piezas de carbono

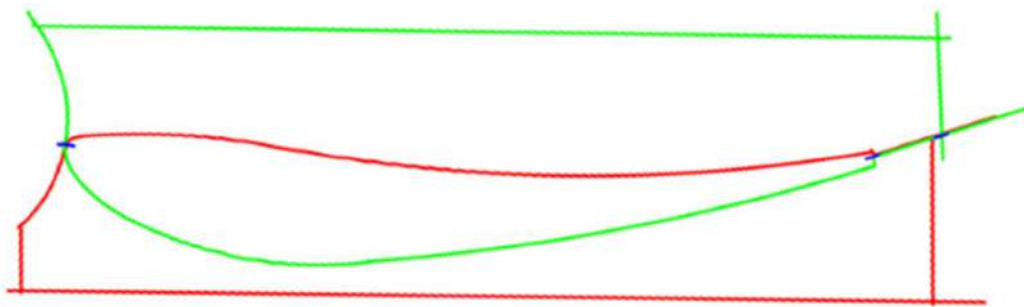


Figura 79: Perfil alar con ambos moldes que lo formarían

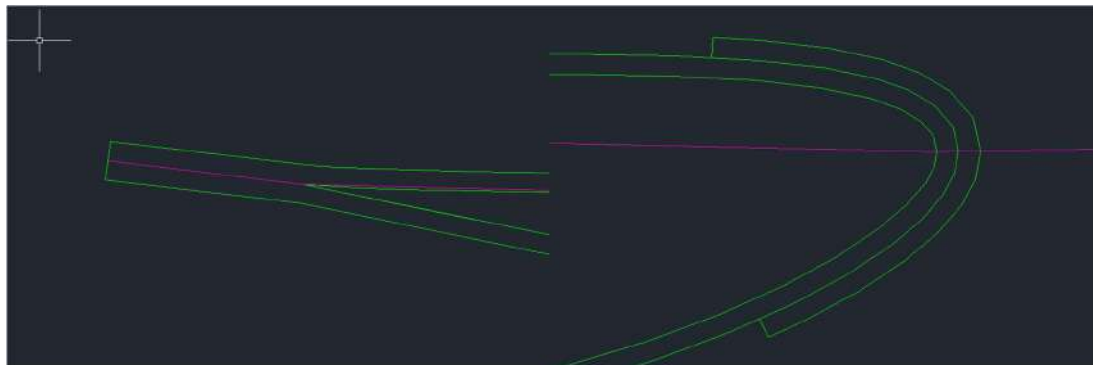


Figura 80: Solapes de la fibra en los bordes delantero y trasero

La unión del borde trasero va a realizarse pegando las las dos skins, por lo tanto, ambas mitades del molde deben tener el mismo ángulo en la superficie donde se lamina el sobrante.

En el borde de ataque, se va a realizar la unión con ambas skins mediante una junta “a tope”. Como la superficie de la unión es pequeña, se plantea añadir un laminado extra sobre el borde de ataque.

En el momento, siguiendo el consejo de personas con más experiencia, se decide en contra de realizar el solape y se decide pegar ambas mitades directamente. Esta decisión dará lugar a problemas más adelante.

En el laminado de CFRP, los bordes siempre se deben desechar. Por lo tanto, se debe añadir una región de sobrante alrededor de la pieza.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, así es como deben salir las skins una vez fabricadas.

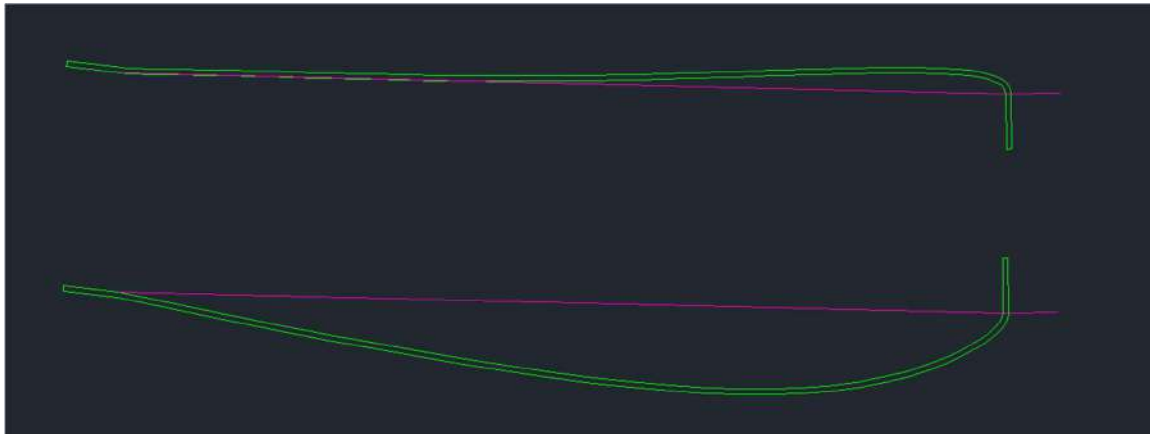


Figura 81: Ambas mitades de la pieza separadas y con el sobrante de fibra añadido

Una vez se ha dibujado la forma que va a tener el laminado, se debe dibujar el molde.

Se comienza trazando una recta entre los extremos de la superficie exterior de la pieza (la que va sobre el molde. En rojo) y se pone horizontal.

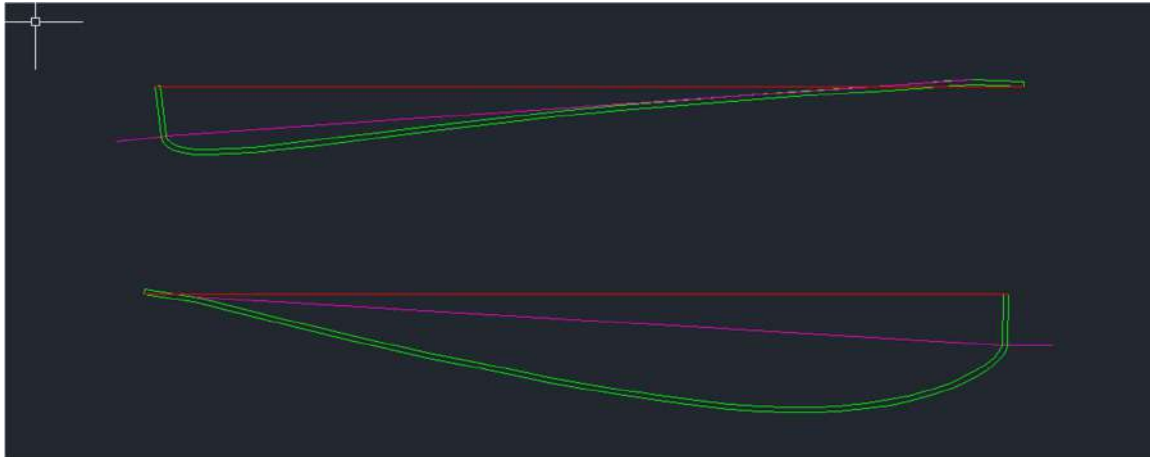


Figura 82: Moldes con la línea de partición del molde

Se dibuja el molde teniendo en cuenta que:

- Se deben dejar mínimo 5cm de margen de superficie plana superior para colocar la cinta tacky tape y pegar la bolsa de vacío
- El espesor del cemento no debe ser menor a unos 3cm para que el molde no sea débil.

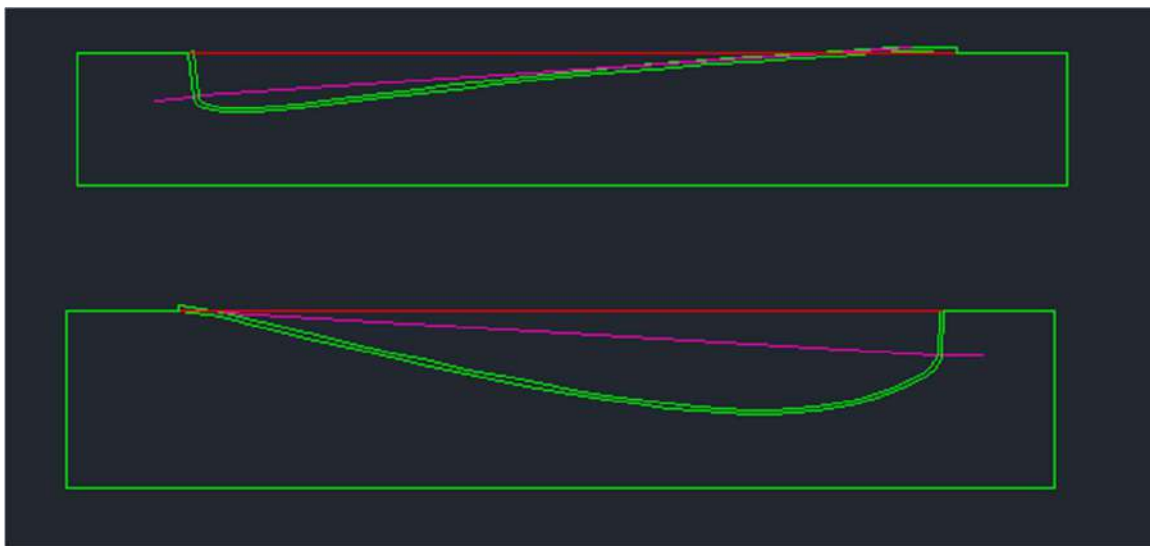


Figura 83: Sección final del molde

Una vez dibujados los moldes de cemento, se pueden dibujar los modelos de espuma que se utilizarán para obtenerlos. En este paso se puede borrar el laminado y las líneas de

referencia, aunque lo que se recomienda no es modificar el dibujo en cada paso sino ir copiando y pegando.



Figura 84: Sección de los modelos de espuma

Para dibujar el modelo de espuma se debe tener en cuenta que la plancha de espuma tiene un espesor de 60mm y que la máquina de hilo caliente del laboratorio no puede bajar hasta la mesa. El procedimiento mostrado es apto para perfiles de sección constante como los del RW. Para piezas con curvas 3d, se puede utilizar la toolbox de moldes de Solid Works.

● Fabricación del modelo de espuma XPS

Fabricación con hilo caliente

El corte por hilo caliente permite fabricar con espuma de forma increíblemente rápida, con el inconveniente de que tiene limitaciones de geometría ya que no puede cortar curvas tridimensionales.

Hilo caliente CNC

La máquina de hilo caliente CNC del laboratorio de expresión gráfica permite ejecutar trayectorias de forma precisa con la posibilidad de controlar la velocidad y temperatura del hilo. El volumen de trabajo es limitado.

Hilo caliente manual.

El hilo caliente manual fabricado por nosotros permite fabricar de forma rápida aunque requiere de MDF cortar guías por corte láser antes.



****importante:** Las guías del hilo usadas para el hilo caliente deben tener curvas suaves, la máquina requiere dos personas para ser operada.

El hilo caliente manual es un método de fabricación funcional y **PROBADO** para realizar el molde de perfiles grandes y rectos, sin embargo, depende de la habilidad de las personas que lo operan y debido a ello, no tiene resultados consistentes.

Por estos motivos, solo se va a usar el hilo caliente CNC a no ser que alguna situación imprevista requiera el uso del hilo manual.

Fabricación mediante fresadora de CNC

El molde del perfil grande del FW requiere un método de fabricación que permita realizar curvas tridimensionales.

Para ello, lo mejor es realizar el molde mediante la fresadora de CNC del laboratorio de prototipado.

Dimensiones máximas de la pieza que se puede fresar = 1500x600x60

Preparación del material en bruto y fresado del molde

Como material para el modelo se van a utilizar planchas de espuma XPS, éstas planchas solo están disponibles en dimensiones de 1200x600x60, por lo tanto es necesario unir varias planchas para llegar a la cota de 1500 mm del alerón delantero.

La unión entre las planchas se va a realizar mediante una geometría tipo dovetail y utilizando cola blanca como adhesivo.

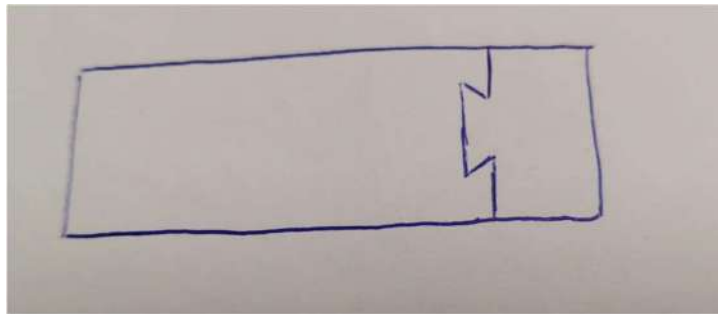


Figura 85: Unión tipo cola de milano para fabricar el bloque de espuma

Esta unión es más problemática de lo que parece ya que la mayoría de los adhesivos disuelven la espuma de poliestireno.

Cabe destacar que se ha probado a utilizar pegamento específico para poliestireno (Novopren), se va a evitar este producto ya que su viscosidad hace muy difícil su manejo y la unión resultante entre planchas no es fuerte.

Durante las pruebas se ha descubierto que, si la fresa pasa por la zona con cola blanca, ésta puede atascar el borde de corte, lo que evita que la fresa funcione y causa quemaduras por fricción en la espuma.

El adhesivo se va a aplicar en la unión, teniendo especial cuidado de que no llegue a la zona por donde va a pasar la fresa.

La fresadora deja una superficie cuya calidad es variable y depende de muchos factores, algunos se pueden controlar como la velocidad de giro y avance y otros dependen de la geometría de la pieza como el ángulo de incidencia de la fresa y de la dirección del



movimiento de ésta. Debido a esto, la pieza va a tener zonas con una buena superficie y zonas donde la espuma tenga grandes poros abiertos.

Se realiza un pequeño estudio en el que se prueban diferentes velocidades de avance y giro de la fresadora. Se diseña una pieza con la misma geometría repetida en forma de matriz. En cada fila se aumenta la velocidad de giro y en cada columna la de avance.

Los resultados revelan que a mayor velocidad de giro, mejor acabado y que la velocidad de avance no afecta (lógico, teniendo en cuenta que la espuma es mucho más débil que los materiales que se suelen fresar).

Por último se repite la prueba con espumas de diferentes proveedores de la zona (Leroy Merlin, Bauhaus y Obramat). Se observa que el acabado en la espuma de Bauhaus, marca “Soprema” es notablemente superior. Es difícil extraer conclusiones ya que la información acerca del material es escasa (está pensado para un uso completamente diferente)

Acabado del molde

En las zonas de perfil recto se va a utilizar una capa de plástico adhesivo entre la espuma y el cemento (forro libros), este plástico no es elástico y por lo tanto, los pequeños poros se eliminan al ponerlo, tal y como se ha visto en los experimentos.

En las zonas de curva compleja, el plástico no sirve debido a su falta de elasticidad. Se va a utilizar un agente sellador, en los experimentos se ha probado con masilla de pared pero el resultado se desmenuza fácilmente y además es soluble en agua por lo que la humedad del cemento reblandece la masilla.

Descartada la masilla de pared, no quedan muchas opciones ya que la mayoría de masillas plásticas del mercado disuelven la espuma, se va a utilizar una fina capa de resina epoxi mezclada con Fumed Silica (un espesante que permite dar a la resina una consistencia tipo gel).



Figura 86: Molde retocado con masilla de pared durante la fase de experimentación

Otro factor importante a tener en cuenta es la forma en la que el software de la fresadora genera la trayectoria de acabado. Lo hace generando una espiral desde el centro de la pieza con una equidistancia predeterminada entre pasadas. Esta forma de trabajar implica que en zonas con mucha pendiente, si la fresa se mueve de forma perpendicular a la línea de máxima pendiente, se forman grandes escalones.

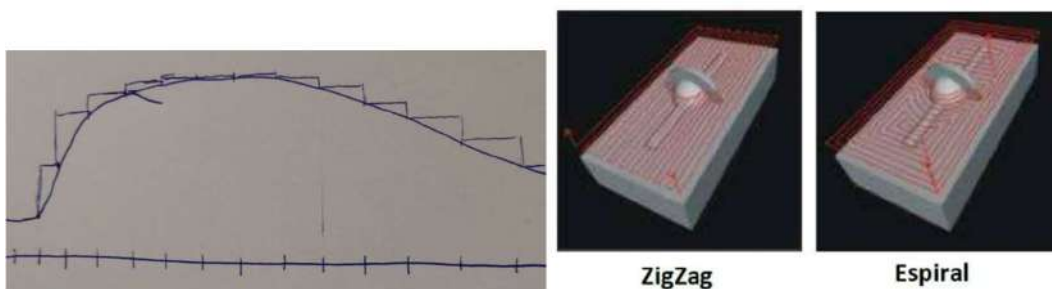


Figura 87: Diferentes tipos de trayectorias y efectos en el acabado

Por lo tanto, en el software se va a modificar el tipo de corte a uno del tipo “Zig-zag”, que permite generar trayectorias con forma de zig-zag. Se modifica el ángulo de la trama para

que la fresa se mueva siempre perpendicular al borde del alerón, eliminado el problema de los escalones casi por completo.

Molde negativo de cemento

El proceso será el mismo probado en los experimentos, se va a realizar un cambio en la mezcla del cemento, que consiste en verter primero el agua y añadir el cemento poco a poco mientras se bate de forma continua.

Laminado

Para laminar se va a aplicar un tratamiento desmoldante al molde de cemento:

El cemento se limpia con acetona y se le aplican 5 capas de desmoldante (Marbocote), esperando 15 minutos entre capas y 20 minutos después de la capa final. El desmoldante de tipo cera también funciona pero deja un acabado superficial inferior en la pieza.

Se mezcla una masa de resina de 0,75* (masa de tela seca).

Se pesa la fibra que se va a laminar:

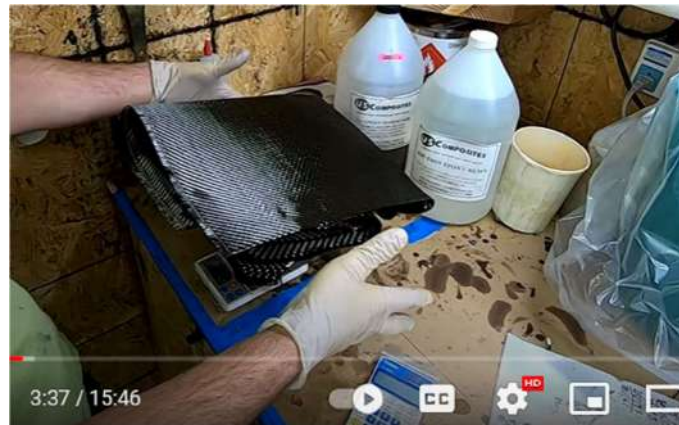


Figura 88: Pesaje de la fibra seca

Con el ratio de 0.75 se calcula la cantidad total de resina que se ha de preparar, se echa la cantidad calculada del componente principal de la resina. Se pesa la cantidad y se recalcula la cantidad de hardener necesaria.



Figura 89: Mezclado de la resina bicomponente

Se mezcla el hardener según lo indicado por el fabricante.

Luego se siguen los siguientes pasos:

- Se aplica una capa de resina con $1/n^{\circ}$ de capas
- Se coloca la primera capa de tela y se pasa el rodillo sacaburbujas
- Se aplica otra capa de resina
- Se vuelve a colocar tela y pasar el rodillo

Se sigue repitiendo hasta colocar todas las capas del laminado.



Figura 90: Laminado sobre un vidrio

Se puede utilizar una espátula de plástico para extender la resina.

Se colocan las capas de tela de refuerzo locales:

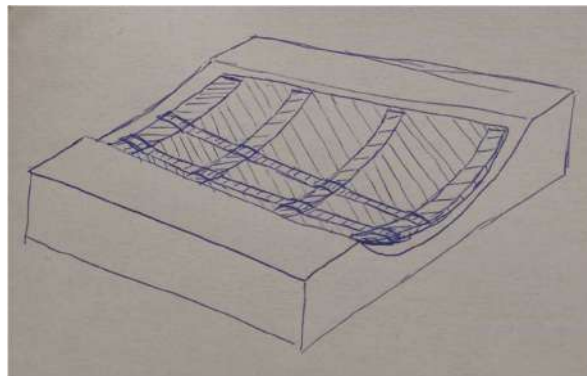


Figura 91: Concepto de laminado con refuerzos locales

Las skins de fibra de carbono van a tener un laminado de 3 capas, añadir más capas supone un aumento de peso y de coste. Sin embargo, puede ser interesante añadir refuerzos locales internos para aumentar la rigidez de las zonas adhesivadas y de la pieza entera. Las uniones adhesivas tienen la tendencia a sufrir “peeling” si uno de los sustratos es flexible, así que rigidizar estas zonas puede prevenir un fallo prematuro del adhesivo.

El espesor añadido se tendrá en cuenta en el diseño del esqueleto, para que siga encajando. Una forma común de estimar el espesor de un laminado es mediante los gsm (“Grams per Square Meter”) de las capas $100\text{gsm}=0.1\text{mm}$ de espesor en el laminado total.

Una vez colocada la fibra y resina sobre el molde, se coloca una capa de peel-ply para lograr un acabado superficial rugoso en la cara interna, ideal para realizar uniones con adhesivo.

Se coloca una capa de manta respiradora encima de la pieza, para que el aire pueda fluir, logrando así una buena presión de vacío, se colocan capas adicionales de breather sobre las aristas y cualquier otro punto afilado para reducir la probabilidad de pinchazo.

También se coloca breather sobre cualquier zona que pudiera impedir el paso del aire (zonas con forma de escalón etc.)

Por último, se colocan 3 capas de respirador localmente en la zona donde se vaya a colocar la toma de vacío y se coloca la mitad interna de la misma, se utiliza cinta de carroceros para sujetar los recortes de respirador y la toma en sus sitios.

La posición de la toma debe estar fuera de la pieza para evitar que se marque pero debe tener un buen flujo de aire hasta la capa principal de respirador.



Figura 92: Bolsa de vacío completa con toma de vacío

Bolsa de vacío

Un cambio que se debe realizar con respecto a los experimentos es la utilización de bolsas completas. En los experimentos se han colocado los moldes sobre pizarras y se han hecho las bolsas de vacío cerrando sobre la propia superficie de éstas. Esto no es viable ya que las pizarras solo caben en el horno en posición vertical y no se pueden colocar de esa forma con un molde de cemento sujeto a su superficie únicamente por el vacío.

Debido a esto, se van a realizar “bolsas completas” en las que se coloca una lámina de bolsa de vacío debajo del molde y una encima, que luego se realiza una junta con tacky tape a lo largo del perímetro.

Estructura interna

La estructura interna se va a fabricar externamente en aluminio mediante corte láser, los espesores empleados van a ser 4 y 6mm en el FW y 4mm en el RW.

La estructura se fija con adhesivo estructural Loctite HY-4070 en dos fases de curado.

Primero se adhiere la estructura en sí misma;

- Prueba de fitment e inspección de entrada: se comprueba que todas las piezas encajan entre sí con una tolerancia adecuada (sin holguras pero sin tener que forzar), y que las dimensiones son correctas.
- Retrabajo: Se retrabajan las superficies de contacto hasta lograr las tolerancias adecuadas.
- Activación superficial: Se activan las superficies de contacto con lija de grano grueso (<120) para lograr una buena unión.
- Limpieza: En el momento inmediatamente previo a la unión, se limpian las superficies de contacto con el limpiador Loctite SF 7200.



- Se coloca una cánula mezcladora en el cartucho de Loctite HY-4070 y se aplica un cordón de adhesivo de unos 2cm sobre un papel para desechar la parte inicial que puede mezclarse mal.
- Se aplica otro cordón sobre otro papel como testigo y se deja marcado con la fecha hora y pieza en la que se ha usado.
- Finalmente, se aplica el adhesivo y se realiza la unión.



Montaje del alerón

Se recortan las creces en ambas pieles, para los cortes rectos se utiliza una regla de carpintero, para cortes curvos se pueden cortar guías de MDF en la cortadora láser. Los cortes se realizan con herramienta rotativa y discos de corte.

Se hacen los agujeros pertinentes en la skin superior (agujeros por donde deben sobresalir luego las chapitas de las costillas donde se anclan las cogidas y los soportes de los flaps)

El proceso de pegado es el mismo, se realiza primero la unión de la piel inferior y luego la de la piel superior, prestando especial atención a los agujeros donde deben sobresalir las costillas de aluminio.

7.6. *Fabricación real*

- **Diseño de moldes (FW)**

El diseño de los moldes para el alerón delantero se lleva a cabo mediante la herramienta de moldes de Solidworks. Debido a la compleja geometría de la pieza y después de solicitar el consejo de profesionales del sector, la idea original de generar una superficie tangente a la pieza por la línea de partición para que las creces en el carbono no tengan una marca, se abandona.

En vez de eso, se modela una superficie de partición que se extiende horizontalmente desde la línea de partición.

- **Diseño de moldes (RW)**

En el caso del RW, el molde se diseña igual que como se tenía planificado, con la intención de cortarlo con el hilo caliente.

No obstante, en el proceso de pulido del molde se observan unas ondulaciones. Después de revisar el CAD, se concluye que la causa de las ondulaciones es que el alerón trasero había sido diseñado usando spline con muchos puntos de control (alrededor de 30 por spline), esto ha tenido la consecuencia de que aunque visualmente la curva era suave, al tacto y al lijar se notaban ondulaciones.

Debido a esto y usando la experiencia obtenida en el FW, se decide modificar la estrategia a un molde en tres partes, siendo éstas la parte superior, parte inferior y Leading Edge. Debido a la geometría mayormente plana, la parte superior e inferior se diseñan “en negativo”

La parte del leading edge se diseña para moldeo en positivo, utilizando otros medios para lograr el acabado superficial.

Este diseño de molde evita la presencia de una unión a lo largo del leading edge y la sustituye por dos uniones con solape en zonas relativamente planas de la cara superior e inferior; unas uniones mucho más sencillas y realizables.

- **Fabricación del modelo de espuma XPS (FW)**

El fresado de los dos moldes se lleva a cabo con éxito pero tardando un tiempo considerablemente mayor al esperado. Según el software de mecanizado, ambos programas tardan alrededor de 6h. Por lo que la planificación es de un día de trabajo para cada molde.

En realidad, se tarda un día de trabajo solo en preparar el material en bruto, fijarlo a la mesa, generar el código y calibrar la máquina. Hecho esto, el programa de fresado tarda prácticamente el doble de lo estimado.

El resultado final es un tiempo de 5 días para mecanizar ambos moldes del FW.



Figura 93: Modelo de FW al salir de la fresadora CNC

Una vez mecanizados, se lijan ligeramente para retirar la rebaba que la fresadora genera en la superficie.

Una vez hecho esto, se lleva a cabo una mezcla de resina con fumed silica hasta lograr una consistencia tipo gel y se aplica una fina capa sobre toda la superficie del molde.



Figura 94: Modelo de FW con capa de resina aplicada

Se aplica un ciclo de curado completo a ambos moldes.



Figura 95: Curado en horno de las capas de resina

Se da un tratamiento de lijado, la resina tiene una alta dureza por lo que este proceso tiene una gran cantidad de trabajo manual.

Antes de llegar a un lijado fino, se aplica otra fina capa de resina si es necesario para eliminar los defectos grandes. En la fabricación real se terminan aplicando varias.

El lijado se realiza de forma progresiva, comenzando con lija nº80 y terminando con lija al agua nº600.

Una vez llegado a ese punto, se pasa al pulido mediante máquina rotativa y pulimento.



Figura 96: Acabado superficial espejo del modelo de espuma

En total el proceso toma una semana y media compuesta de una cantidad considerable de trabajo manual, monótono a la vez que delicado. También se concluye después de este proceso, que el diseño de molde no da un buen resultado en la zona del borde de ataque ya que no se puede acceder bien con la lija ni con el pulimento.

- **Fabricación del modelo de espuma XPS (RW)**

En el caso del RW, la forma del molde se obtiene con la máquina de hilo caliente de CNC, que permite fabricar ambos moldes en unas pocas horas y logrando una calidad superficial excelente (dentro de ser espuma)

Debido a la geometría más simple del RW, se decide evitar el molde de cemento y hacer el laminado directamente sobre el molde de espuma. A su vez, en vez de cubrir en resina y pulir la superficie, lo que se decide hacer es laminar sobre plástico MYLAR y luego colocar tanto el laminado como el plástico sobre la espuma.

La razón de esta decisión es principalmente debido al cronograma establecido y al tiempo extra consumido por el FW y por el molde desechado de RW. Este nuevo procedimiento supone un riesgo ya que la espuma tiene poca rigidez lo que podría dar lugar a una pieza deformada. No obstante, se toma la decisión de asumir este riesgo ya que el vacío sujeta la espuma contra una superficie rígida y como la primera fase de curado es a temperatura ambiente, la pieza ya es rígida cuando entra al horno.

Molde negativo de cemento (FW)

Se lleva a cabo de forma idéntica a lo planificado, sin incluir herrajes o varillas roscadas en el cemento. Durante la fragua, se forman algunas grietas en la parte trasera del cemento.

No obstante, la superficie de laminado en ambos moldes se encuentra perfecta.



Figura 97: Uno de los moldes de cemento del FW

Laminado

Se aplica el desmoldante sobre el cemento de la misma forma que se había planteado. En el caso del RW, al laminarse sobre MYLAR, no es necesario.

En cuanto al laminado, se realizan varias mejoras de proceso:

En vez de laminar utilizando brochas o espátulas, se va a llevar a cabo mediante rodillos de pintor. El rodillo permite extender la resina de forma más rápida y eficaz que la brocha.

La cantidad de resina mezclada va a calcularse con un factor de 0.6 con respecto a la masa de fibra (en vez de un 0.75). Esto se debe también al uso de rodillo, que permite una distribución de resina más uniforme y por lo tanto, permite lograr un resin ratio más cercano al óptimo.



Figura 98: Laminado del FW

Otro cambio consiste en retirar de la mezcla una pequeña cantidad de resina nada más mezclarla para utilizarla como testigo y poder comprobar el estado de gelificación en todo momento. El motivo es que según se ha observado, si se hace el vacío completo nada más laminar, el tejido pelable absorbe demasiada resina y la pieza queda por debajo del óptimo. La solución consiste en esperar a que la resina gelifique (comprobar mediante el testigo) antes de hacer el vacío completo.

Estas mejoras de proceso se aplican a todos los laminados posteriores siempre que no se indique lo contrario.



Finalmente, no se llevan a cabo los refuerzos internos, la razón principal es que todos los tejidos de fibra de los que se dispone son bidireccionales. Debido a esto, si se cortan tiras largas y estrechas de fibra, la mitad de la masa añadida está en forma de fibras cortas desalineadas con la dirección que se busca reforzar y por lo tanto trabajan de forma muy ineficiente. Debido a esto se considera que la posible mejora de rigidez no compensa el aumento de masa y de complejidad de fabricación.

Bolsa de vacío

El FW se compacta mediante bolsas completas alrededor del molde de cemento como se había planificado.



Figura 99: Bolsa de vacío y curado del FW

En el caso del RW, debido al uso de moldes de espuma, se realiza la bolsa sobre la superficie de una pizarra.



Figura 100: Laminado del RW



Figura 101: Laminados del FW sacados del horno

Pasado el ciclo de curado, el desmoldeo se lleva a cabo sin problema y el resultado es correcto tanto en acabado superficial como en precisión dimensional. No obstante, se observan ciertos defectos estéticos producto del cemento. Se especula que podría deberse a zonas con diferente humedad en el cemento, ya que se sabe que la presencia de humedad puede dar un color blanquecino a la resina.



Figura 102: Laminados del RW sacados del horno

El resultado del laminado del RW es correcto, no obstante, el borde delantero se repite debido a la formación de una arruga a lo largo del mismo borde.

Estructura interna

En lo que respecta a la estructura interna, se lleva a cabo el importante cambio de sustituir las vigas de aluminio por unas fabricadas en composite.

Este cambio se lleva a cabo debido a la incapacidad del proveedor para fabricarlas. En el momento de recibir las piezas, se realiza una inspección visual y se observa que las vigas tienen una curvatura considerable (si se apoyan los extremos, éstos forman un ángulo de unos 15° con respecto a la superficie).

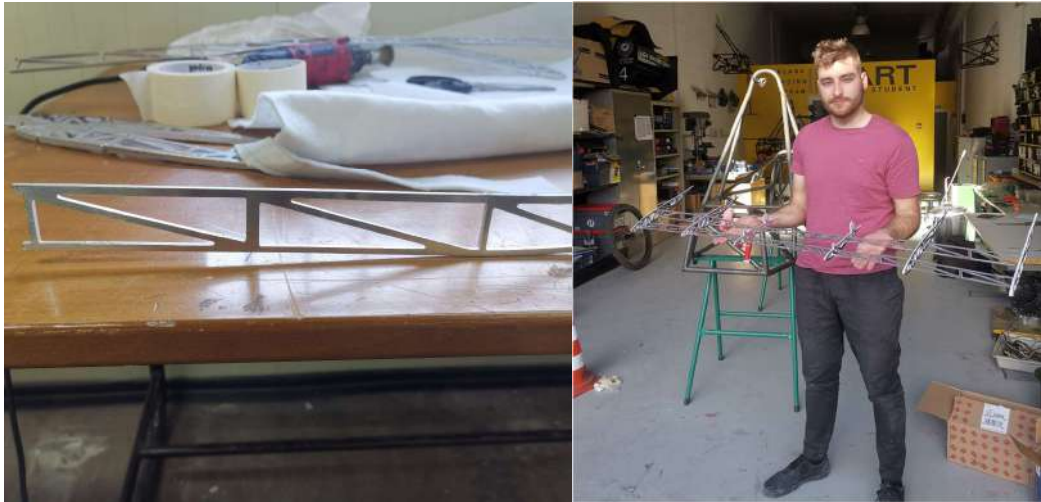


Figura 103: Estructura interna de FW, defectuosa en revisión de entrada

Después de tratar el problema con el proveedor y recibir otro envíos más presentando el mismo defecto, la empresa declara no saber la causa del error y, por lo tanto, se decide buscar otra solución.

Debido a la compleja forma de estos elementos, la solución empleada consiste en realizar las vigas en madera MDF de 3mm mediante la cortadora láser del laboratorio de la universidad y luego cubrirlas de fibra de carbono.

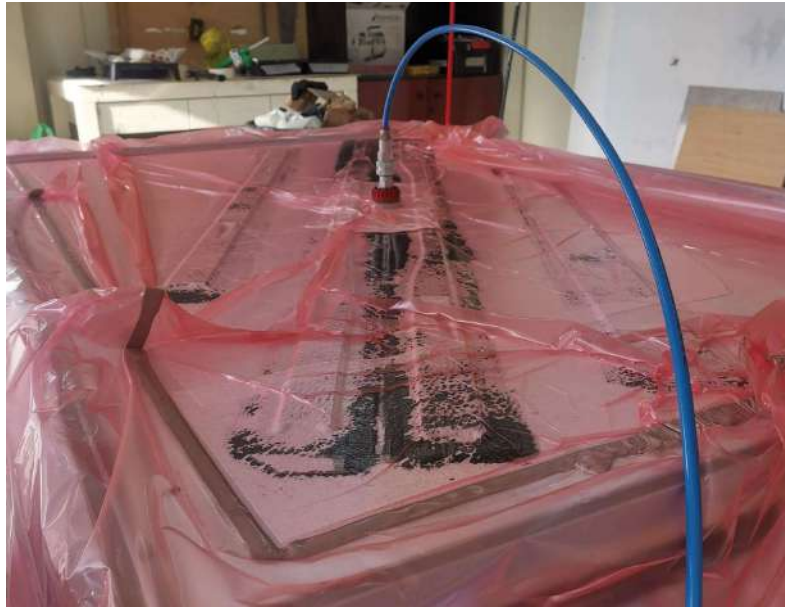


Figura 104: Laminado de vigas de CFRP para estructura interna

La solución en cuestión no es óptima ya que la madera MDF es un material que pese a su relativamente alta densidad tiene escasas propiedades mecánicas. Además de esto, la fabricación de esta forma implica una cantidad considerable de trabajo manual ya que los sobrantes del laminado se deben cantar a mano.



Figura 105: Vigas de CFRP con núcleo de MDF de 3mm

No obstante, pese al aumento de peso, precio y trabajo, la estructura se fabrica con éxito de esta manera.

Montaje del alerón

El montaje de los perfiles principales se lleva a cabo según lo previsto.



Figura 106: Montaje del FW Main I



Figura 107: Montaje del FW Main II



Figura 108: FW Main montado I



Figura 109: FW Main montado detalle del leading edge



Figura 110: FW Main montado II



Figura 111: RW montado

7.7. *Vida útil de los componentes*

7.7.1. *Alerón delantero.*

Se lleva a cabo una prueba de montaje del paquete aerodinámico entero el 2 de junio de 2024. La universidad brinda la posibilidad al equipo de utilizar el parking de salud como pista de pruebas previo aviso en fin de semana. De esta forma es posible probar el prototipo en un recinto cerrado y controlado de tamaño suficiente.

El objetivo de este test es comprobar la integridad estructural del paquete aerodinámico pues este momento marca la primera vez en la historia del equipo en la que uno de nuestros monoplazas corre con alerones.

En especial se busca comprobar la integridad del alerón delantero, no solo se trata del elemento más esbelto y con un voladizo mayor de todos los que forman el paquete, sino que además se encuentra a escasa altura del asfalto.

Algunas de las preocupaciones en ese momento eran la posibilidad de que en una frenada, el balancearse el coche hacia adelante, el alerón entrara en contacto con el suelo, se enganche en el mismo y pueda llegar a partirse.

Debido a esto, se plantea una tanda en la que el piloto va aumentando progresivamente el ritmo y agresividad mientras ojeadores dispuestos estratégicamente en las zonas de frenada alrededor del circuito están preparados para alertar en caso de ver contacto.



Figura 112: Monoplaza MA24RT en su primera vuelta con alerones



Para mi alivio personal y el del equipo, el alerón no se partió en su primera tanda y 6 meses de trabajo no se hicieron añicos contra el asfalto.

Después de un breve momento de celebración, se lleva a cabo una pequeña revisión del estado y se comprueba lo detectado por los ojeadores, el alerón estaba rozando contra el suelo en determinados puntos del circuito, pero aparentemente sin riesgo de engancharse.



Figura 113: Desgaste en la zona inferior del endplate

En el momento en el que se detiene la tanda, el piloto todavía se encuentra lejos del máximo ritmo del monoplace.

Según lo observado, los puntos donde el alerón roza más se encuentran en zonas donde el circuito tiene baches y no tanto en zonas de frenada. Además, también se aprecia que el alerón no arrastra de forma continuada durante varios metros, sino que arrastra de forma intermitente.

En base a estas observaciones, se concluye que el roce no se debe tanto al cabeceo del monoplace sino a oscilaciones producidas en el propio alerón a raíz de los baches (en alerón tiene tendencia a “aletear”)

Esta posibilidad había sido considerada por lo que se dispone de unos tensores de cable de acero, que se colocan entre el alerón y el chasis.



Figura 114: Tensores colocados en el alerón delantero

Después de colocar los tensores, se vuelve a sacar el coche a pista y se aumenta el ritmo progresivamente hasta llegar al ritmo máximo del monoplace.

En esta tanda se puede observar como el alerón contacta suavemente con el suelo en algunas zonas, pero ya no son los violentos golpes observados en la anterior tanda y ahora solo se producen cuando el coche rueda a máxima velocidad.

Pasado este momento, se lleva a cabo una sesión de testing con normalidad hasta terminar el día y se considera un enorme éxito debido a la cantidad de vueltas que se llevan a cabo sin ningún imprevisto.



Figura 115: Primer día de testing

La sesión de testing del dos de junio se lleva a cabo sin morro ya que en ese momento se encuentra en un taller de pintura.

Debido a esto, los sensores se colocan directamente en el chasis, solución funcional pero no compatible con el morro.

Reparación de los bordes

Tal y como se ha visto en anteriores apartados, el alerón delantero tiene una unión adhesiva entre ambas pieles a lo largo del borde de ataque. Después de la primera sesión de testing se observa que dicha unión ha fallado en varias zonas.

Debido a esto, se toma la decisión de reforzar la unión externamente con fibra de carbono laminada directamente sobre el propio alerón.

Como el alerón es hueco, compactar el laminado mediante vacío podría dar lugar a un colapso del mismo, por este motivo se utiliza plástico MYLAR sobre el laminado y cinta para compactar.

Las zonas de cambio de sección se consideran demasiado complejas por lo tanto solo se refuerzan las zonas central y laterales. Una vez laminado, se aplica más adhesivo sobre las zonas no reforzadas.



Figura 116: Reparación y bordes ya reparados del FW

El arreglo es satisfactorio tanto en su eficacia ya que desde la segunda sesión de testing, no se vuelve a presentar el problema en toda la vida útil del alerón como en su calidad, logrando una buena superficie aerodinámica y una buena estética.



Figura 117: FW con el borde delantero arreglado durante el segundo testing



Figura 118: Altura del alerón delantero en condiciones dinámicas

Tensores definitivos

El principal obstáculo a la hora de diseñar los tensores es el morro. El morro es una pieza que se debe poder poner y quitar de forma muy rápida para hacer ajustes en la zona de la pedalera.

Por lo tanto, no es posible que el tensor se ancle al coche por delante de la línea de partición que separa el morro del resto de la carrocería.

Lo ideal sería que el tensor tuviera un ángulo de 90° con respecto a la horizontal, sin embargo, debido al problema del morro, el tensor real tiene un ángulo inferior a 45° . La consecuencia es que el tensor no resulta tan efectivo a la hora de sujetar el alerón y la propia elasticidad del cable y de las uniones se ve magnificada ya que la tensión presente en el mismo es muy superior a la componente vertical (la que es de interés).

Algunas posibles soluciones son planteadas, pero se considera que todas ellas tienen más contras que pros en el cómputo general. Por lo tanto, se mantiene el diseño actual cambiando la sección del cable a una mayor y añadiendo un tensor que para ajustar la tensión de forma rápida y sencilla.

De forma adicional, se añade una bifurcación en el tensor, que, si bien no afecta al problema anterior ya que el ángulo es el mismo, sirve para colocar un punto de anclaje en la parte trasera del alerón, aumentando la rigidez a torsión del mismo.



Figura 119: Tensores definitivos ya en Austria

Falta de rigidez en el alerón delantero

Mencionados el tema de los tensores y el tema de los bordes de ataque, queda por mencionar el principal y mayor problema del elemento principal del alerón delantero: su falta de rigidez.

Si bien el alerón es perfectamente rígido a la vista, de hecho, es increíblemente rígido para ser una pieza de menos de 2kg y 1500mm de largo (main FW), en el exigente contexto de la competición, su rigidez es insuficiente.

Según las normas de la competición, el alerón debe soportar 20kg en cualquier punto y tener una flecha máxima de 10mm, considerando que tiene un voladizo de 750mm y la carga puede estar colocada en un extremo, la pieza debe ser extremadamente rígida para superar la prueba.

Después de realizar la prueba utilizando botellas de agua, se mide la flecha y son 12mm. Finalmente se consigue reducir por debajo de los 10mm tensando los cables, pero esto sube la altura de los extremos del alerón en un estado de reposo, lo que los acerca peligrosamente al límite de altura establecido por la normativa.



Figura 120: Recreación de la prueba de rigidez realizada

En resumen, por suerte la rigidez termina siendo suficiente, pero está cerca de no serlo. Seguramente la principal causa es una sección demasiado esbelta en la zona central del alerón (espesor inferior a 25mm).

7.7.2. Alerón trasero

El alerón trasero es un elemento que, por su localización y forma, tiene una exigencia inferior al alerón delantero. El alerón presenta una rigidez excelente en todo momento.

El único problema presentado por el alerón es la interfaz entre el perfil principal y los endplates. Si bien no todos los tornillos forman una línea, se encuentran relativamente cerca, por lo tanto, se observa un cierto efecto bisagra: Si se ejercen fuerzas laterales en los vértices del endplate, hay bastante movimiento, pero no se debe a deformación en la pieza sino que viene de la unión entre el endplate y el main element.

Para reducir este movimiento, se añaden tensores.



Figura 121: Tensores en el alerón trasero

8. Perfiles pequeños

8.1. *Diseño mecánico*

En el caso de los perfiles pequeños o flaps, el concepto de diseño mecánico tiene una opción clara, una construcción de fibra de carbono sobre núcleo de espuma.

Para realizar el anclaje en los flaps, se pegan dos costillas de aluminio a los extremos del core de espuma antes de laminar. En cada costilla de aluminio, se realizan dos roscas para anclar los flaps con tornillos.

8.2. *Plan de fabricación*

Fabricación del core de espuma

Se comenzará fabricando el core de espuma, que tendrá la forma del perfil alar y hará la doble función de molde y núcleo del componente final.



Figura 122: Corte de núcleo (Easy Composites Ltd., 2022)

Esta pieza se fabrica mediante la cortadora de hilo caliente de CNC del laboratorio de prototipado. Después de lo visto en la fase de pretemporada, se buscan los mejores ajustes de la máquina para cortar piezas de 300mm de espesor (se elige esta medida para poder realizar los flaps normales de una pieza y el flap del RW en 3 secciones).

Ajustes de la máquina de hilo caliente para un perfil de 300mm de largo

Offset 0.5mm, Overfeed 6%, T° 42%.

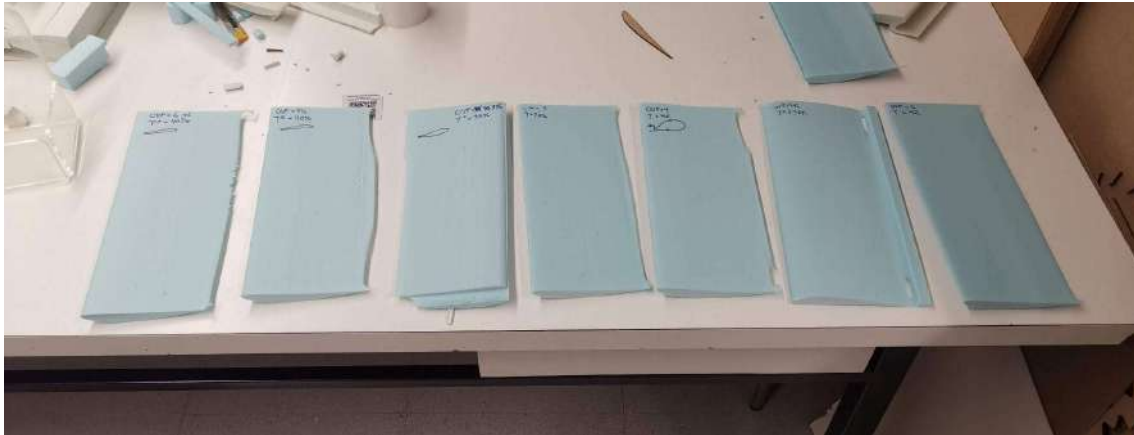


Figura 123: Probetas realizadas para determinar los parámetros de la máquina de hilo



Figura 124: Una de las probetas fabricadas

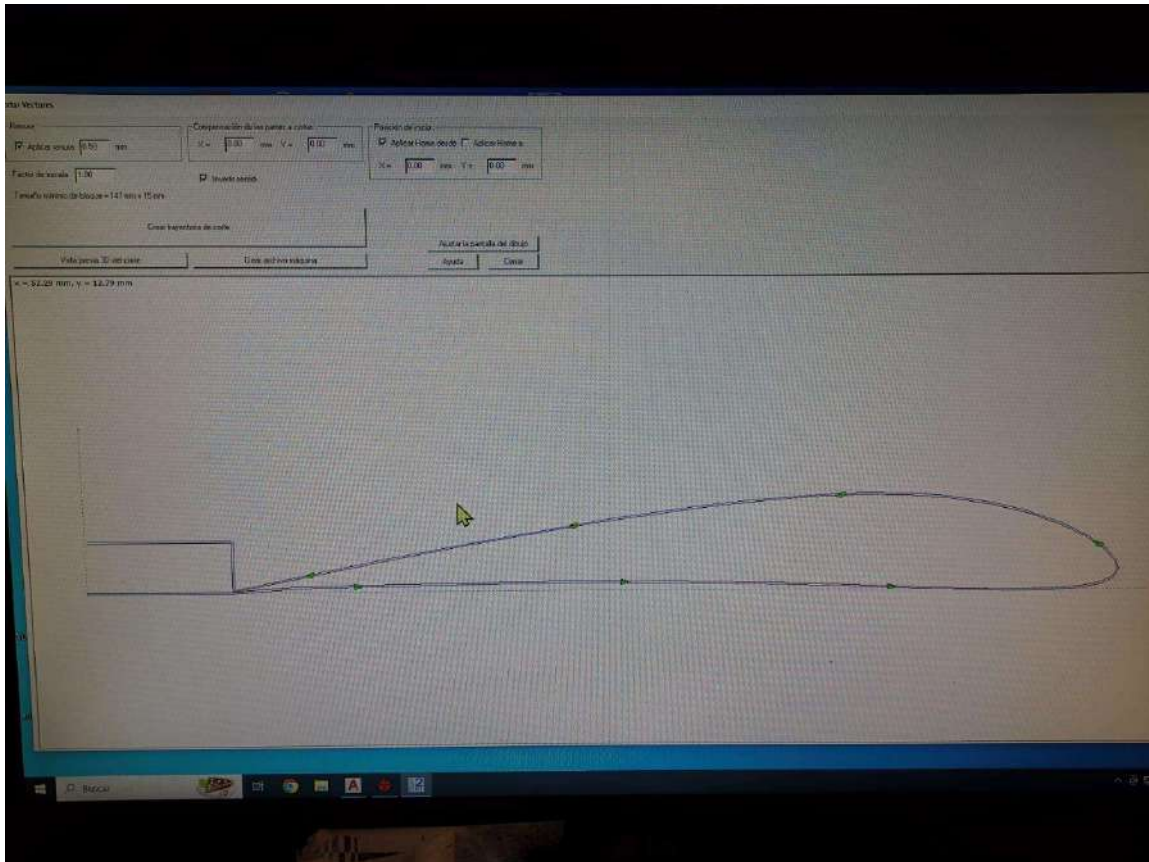


Figura 125: Trayectoria empleada

Otro de los factores a tener en cuenta es la trayectoria de entrada y salida. Los bordes de entrada y salida son las zonas más difíciles.

El borde de salida no se puede fabricar en una única trayectoria ya que el hilo no puede realizar el cambio de dirección formando un ángulo tan agudo, además en el cambio de dirección, hay un instante en el que el hilo se detiene y quema la pieza.

Por lo tanto, la mejor forma encontrada consiste en empezar por el borde de salida, hacer toda la forma y terminar de nuevo en el borde de salida.

Se ha comprobado la buena precisión dimensional con estos ajustes y trayectoria.

Fabricación de costillas exteriores

Las costillas de aluminio se fabrican mediante corte láser, luego se pegan en los extremos del core de XPS antes del laminado utilizando epoxy con espesante. Antes de ello, se activa la superficie lateral de las costillas.



Figura 126: Colocación de las costillas de aluminio (Easy Composites Ltd., 2022)

Durante el laminado, la fibra envuelve el aluminio y se genera una unión adhesiva en el canto de las costillas. Ésta es la unión principal que sujeta las costillas al flap, por este motivo el espesor no puede ser demasiado fino.

Laminado

La superficie se lleva a cabo utilizando laminación manual de fibra de carbono sobre una lámina de MYLAR, que luego se coloca sobre el core de espuma y se cura manteniendo el vacío.

La función del plástico MYLAR es doble, tanto agente desmoldante como “molde” para lograr un buen acabado superficial exterior.

1. Primero se preparan las capas de tela seca, cortando a la medida necesaria.
2. Se pesa la tela que se ha cortado y se mezcla el doble de masa en resina.
3. Se coloca el MYLAR sobre una superficie plana y se vierte encima del plástico (1/nº de capas), por ahora se planea utilizar dos capas en estos perfiles así que se extendería la mitad de la resina sobre el plástico. Se extiende bien con una brocha.
4. Se extiende la tela sobre el plástico y se pasa el rodillo sacaburbujas para que la resina empape la tela.
5. Se echa sobre la tela 1/nº de capas de resina (la otra mitad), se extiende bien con una brocha, se pasa el rodillo y se coloca la otra capa de fibra.
6. Se vuelve a pasar el rodillo.

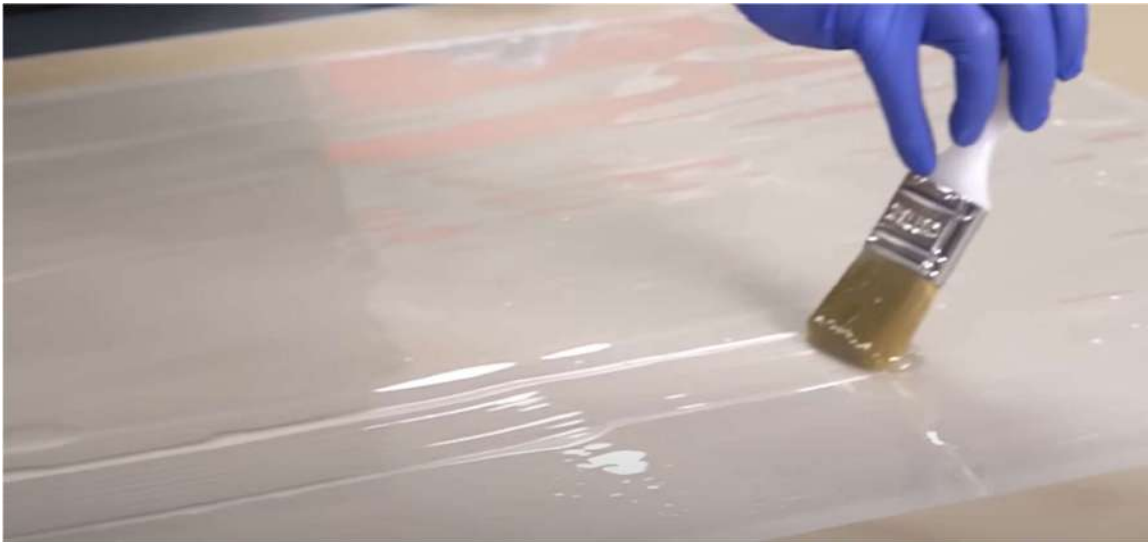


Figura 127: Capa de resina sobre el MYLAR (Easy Composites Ltd., 2022)



Figura 128: Compactación mediante rodillo y siguiente capa aplicación de resina (Easy Composites Ltd., 2022)

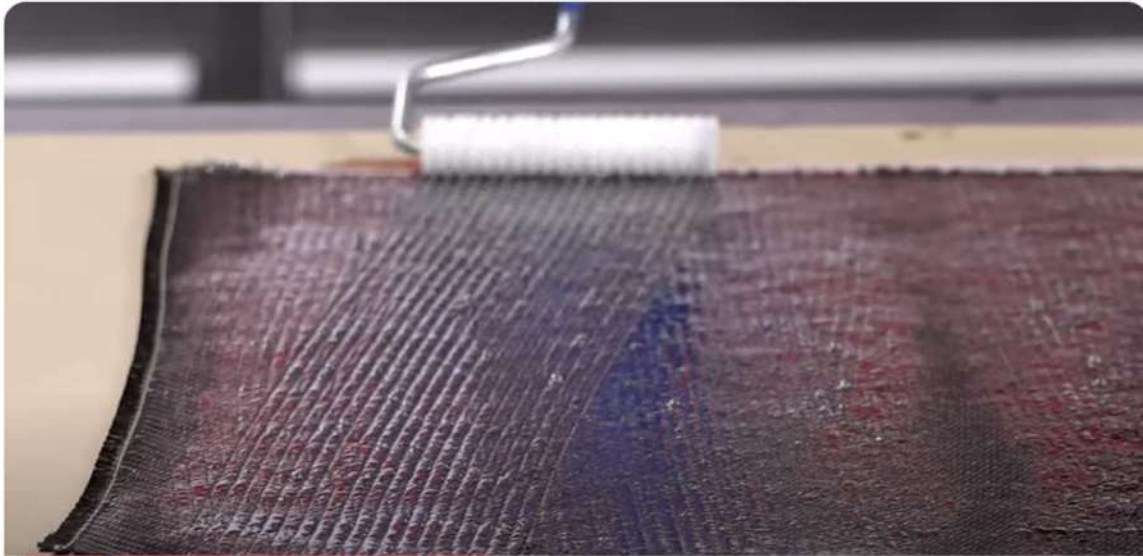


Figura 129: Sigüientes capas del laminado (Easy Composites Ltd., 2022)



Figura 130: Envoltura del core con la fibra (Easy Composites Ltd., 2022)

Se coloca el core sobre el laminado (se puede ver que hay sobrante a ambos lados) y se rodea el core por el laminado.

Se coloca el laminado en la bolsa de vacío de forma que el borde de ataque quede contra el borde de la bolsa (donde tiene el doble).



Figura 131: Preparación de la bolsa de vacío (Easy Composites Ltd., 2022)

Se coloca una tira de manta breather de alta capacidad sobre el borde trasero para absorber el sobrante de resina.

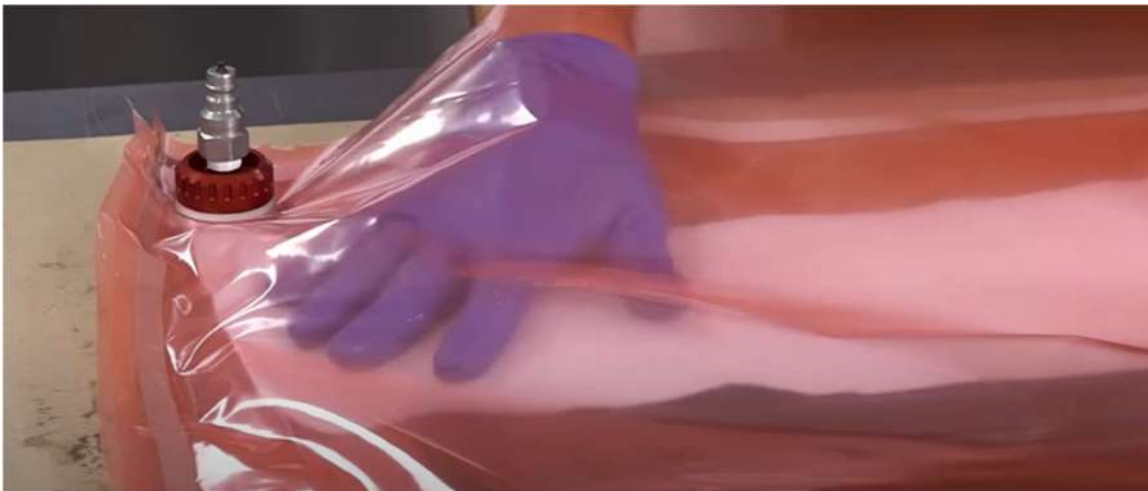


Figura 132: Colocación de la toma de vacío (Easy Composites Ltd., 2022)

La presión de vacío se aplica progresivamente.

Cada vez que se hace un poco más de vacío, se para la bomba y se tira del MYLAR hacia el borde trasero, para que quede bien ajustado al core y sin arrugas. También se busca mover la resina sobrante hacia el borde trasero.

Para esto, se desliza un trozo de espuma cubierta de manta respiradora.



Figura 133: Extracción de arrugas (Easy Composites Ltd., 2022)

(El movimiento es siempre del borde delantero hacia el trasero)

Cuando se está contento con la posición del MYLAR y no hay arrugas, se deja curar.



Figura 134: Aplicación gradual del vacío (Easy Composites Ltd., 2022)

Se puede volver a los 15 minutos y comprobar si el vacío tiene fugas



Figura 135: Pieza final curada (Easy Composites Ltd., 2022)



8.3. Fabricación real

El proceso de fabricación de flaps se elige sobre todo por su simplicidad así que la fabricación real transcurre prácticamente igual a lo planificado, cambiando solo unos pocos detalles.

Fabricación del core de espuma

La fabricación de los núcleos de espuma se lleva a cabo tal y como estaba planificada.

Costillas

Las costillas se fabrican y pegan siguiendo la planificación.

Laminado

- Se descubre que pese a ser algo que hacen en mucho del material de referencia, no conviene verter la resina del vaso y luego extenderla ya que es difícil obtener una distribución uniforme de esta manera. La forma elegida consiste en usar bandejas de pintor y rodillos, “pintando” la pieza con muchas pasadas con un rodillo que tenga algo de resina pero no mucha cantidad.
- También se llega a la conclusión de que usar un ratio de resina 2:1 como mostraban en los materiales de Easy Composites es innecesario. Para estas piezas, el ratio final utilizado es 1:1.
- Otro cambio realizado es realizar el curado con el trailing edge sobre una superficie con un trozo de espuma encima, la razón es que el trailing edge es tan fino, que cualquier fuerza lo puede deformar.



Figura 136: Endplate con core de espuma



Figura 137: Alerón delantero montado por primera vez



Figura 138: Montaje de los flaps y endplate



8.4. Vida útil de los componentes

Los perfiles con núcleo de espuma dan un gran resultado demostrando un buen acabado y gran rigidez. Sin embargo, con el uso sale a la luz la debilidad del diseño: las costillas de aluminio en los extremos.

Las roscas mecanizadas directamente en las finas costillas (4mm de espesor) son delicadas y tienen la tendencia a pasarse lo que implica tener que sacar el tornillo y luego aumentar la rosca de M4 a M5. Llegado cierto momento, se pasan todas las roscas a M5 preventivamente.

Por otro lado, la unión entre la costilla y el flap. La unión se produce durante el propio laminado usando la resina como adhesivo. La costilla se une a la espuma mediante adhesivo en su cara lateral y a la piel de fibra mediante adhesivo en el canto.

La unión a la espuma no es buena ya que la espuma tiene muy poca consistencia y tiende a romperse ante esfuerzos tipo peel.

La unión a la fibra tampoco es buena ya que la superficie es muy reducida.

A lo largo de la vida útil del paquete, varios flaps sufren un despegue de sus costillas laterales. Normalmente el fallo ocurre durante el montaje, al apretar los tornillos.

Para solucionar este problema, se plantea un cambio de adhesivo o meter las costillas un poco más adentro y añadir un extra de adhesivo. Sin embargo éstas soluciones no se consideran “definitivas”

Como solución definitiva se vuelve a colocar la costilla y se lamina una capa de fibra de carbono que rodea la cara externa y luego solapa sobre las superficies superior e inferior del flap, quedando la costilla completamente encapsulada entre la espuma y la fibra.

9. Paneles sandwich/ Endplates

9.1. *Diseño mecánico*

La construcción tipo panel sándwich se va a utilizar en múltiples elementos del paquete como son: endplates, undertray, soportes de ambos alerones y otros.

Los paneles van a estar formados por un núcleo de honeycomb de aluminio con un laminado de carbono pegado a cada lado (llamados comúnmente pieles del panel).

El diseño de paneles sándwich implica por un lado factores generales como la elección de laminados, núcleo y adhesivo y por otro, factores locales como la colocación de insertos o el saneado de bordes o adhesivado de componentes.

9.2. *Plan de fabricación*

Fabricación de las pieles

Las pieles se fabrican como cualquier otro laminado, teniendo la particularidad de usar siempre tejido pelable para dejar una superficie rugosa en la cara interna.

En este caso se van a utilizar insertos embebidos por lo que los agujeros y ranuras se mecanizan en las pieles antes de ensamblar el panel.

Los insertos se fabricarán mediante corte láser en aluminio.

Se lija la superficie de los insertos con lija gruesa (80) para activarlas y hacer posible una buena unión adhesiva. Después de lijar, las superficies se limpian con acetona y se dejan secar durante 15 minutos.

Se pegan los insertos a una de las planchas con adhesivo estructural HY4070



Figura 139: Adhesivado de insertos embebidos a piel de CFRP (Easy Composites Ltd., 2022)

Preparación del honeycomb:

Se coloca el honeycomb sobre el panel y se corta con una cuchilla afilada.

Se deja un pequeño margen en el exterior donde se sellará el panel (1 cm más o menos)

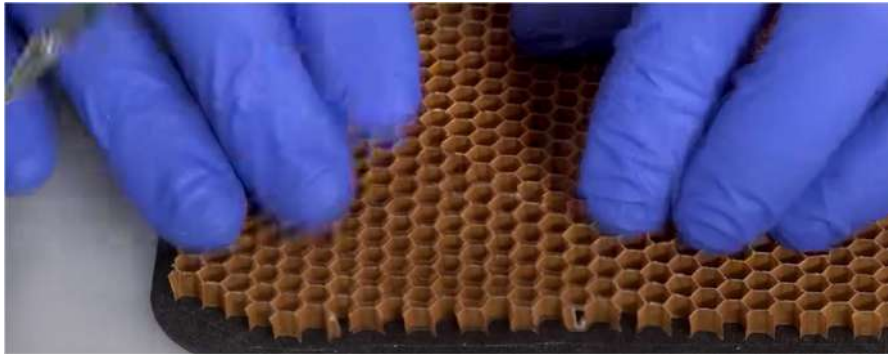


Figura 140: Preparación del núcleo de Honeycomb de aramida (Easy Composites Ltd., 2022)

Se cortan huecos en el honeycomb para los insertos, los huecos deben ser un poco más pequeños que los insertos, luego se comprime el honeycomb para que encaje perfectamente alrededor de los insertos.

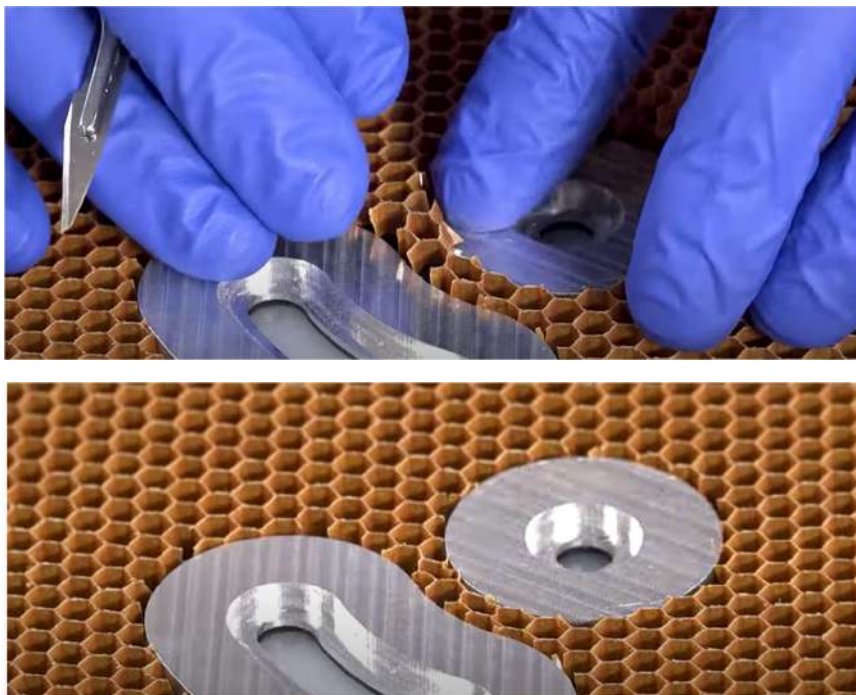


Figura 141: Ajuste del honeycomb a los insertos (Easy Composites Ltd., 2022)

Preparación del adhesivo para el honeycomb:

La forma más común para realizar la unión es mediante adhesivos tipo film, pero por razones de coste, se va a utilizar resina en su forma normal.

Múltiples fuentes coinciden en que el factor clave es la viscosidad de la resina, se utiliza el espesante de resina “fumed silica”. Se pesa la parte A de la resina y se va añadiendo espesante hasta lograr una consistencia tipo gel.



Figura 142: Resina espesada con Fumed Silica (Easy Composites Ltd., 2022)

Una vez lograda la consistencia adecuada, se añade el endurecedor.

La resina se extiende sobre la plancha que tenga los insertos, se van a aplicar unos 500g/m².

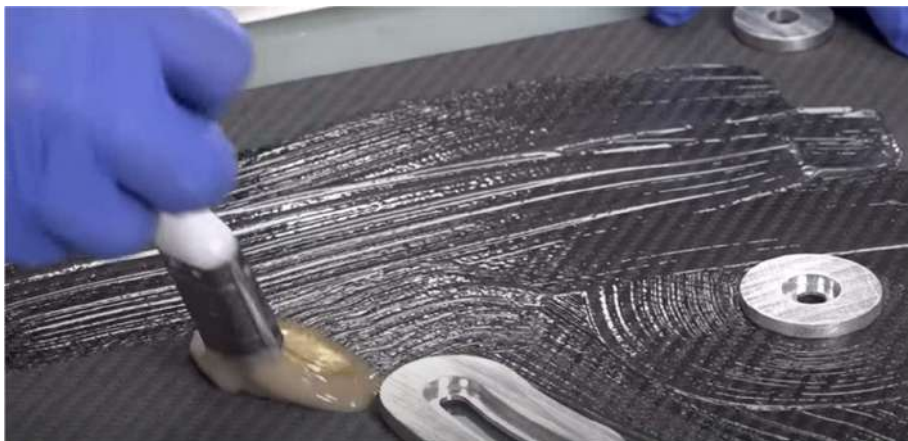


Figura 143: Aplicación de la resina sobre la piel de carbono (Easy Composites Ltd., 2022)

Se coloca el honeycomb dentro de una bolsa grande y se introduce aire caliente mediante un secador o pistola de caliente durante 15 minutos para eliminar la humedad presente.

Se coloca el honeycomb y se mueve un poco de lado a lado para que la resina se adhiera a las paredes de las celdas.

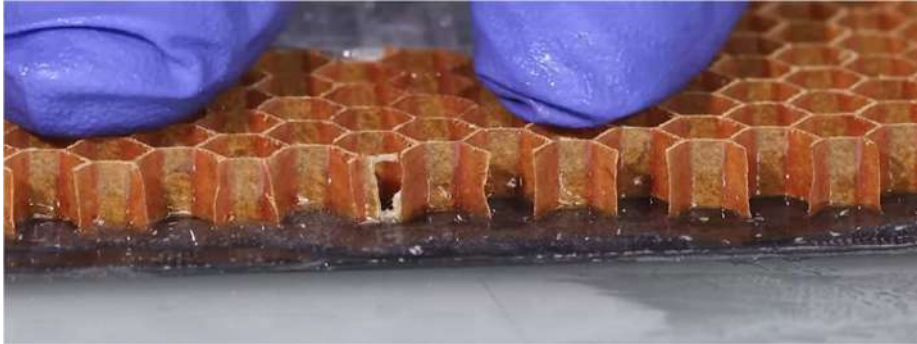


Figura 144: Colocación del honeycomb

Hay dos formas de realizar la unión de la piel superior, se puede dejar curar la piel inferior y luego pegar la superior o se puede pegar directamente.

El motivo de curar las pieles por separado es que debido a la gravedad y a la fluencia de la resina, siempre se puede esperar un comportamiento ligeramente diferente entre ambas.

No obstante, debido a la consistencia lograda por el espesante, se decide hacer el curado de ambas pieles a la vez.

Para asegurar una buena unión, el curado del adhesivo se realiza al vacío.

9.3. *Fabricación real*

En el caso de los paneles sándwich, el método de fabricación ha cambiado por completo con respecto a lo planificado.

La fabricación de paneles con núcleo de honeycomb presenta una serie de dificultades debido a las cuales se toma la decisión de abandonar este tipo de construcción.

- Número de ciclos de curado: La fabricación de un panel sándwich con núcleo de honeycomb requiere un mínimo de 3 curados, uno por cada piel y uno para cerrar el panel (a veces las pieles pueden salir de un laminado mayor si son pequeñas o se puede curar a la vez si se dispone de espacio en el horno y varios moldes).
- Dificultad de realizar la unión adhesiva: En las pruebas realizadas, la unión entre el núcleo y el panel no se ha conseguido ejecutar a la perfección ya que se oyen crujidos cuando se aplican fuerzas en el panel.
- Peso: Solamente el adhesivo ya implica un peso mínimo de 1kg/m² de panel, y eso es sin tener en cuenta la fibra y el núcleo.
- Flexibilidad de diseño: Los espesores de los paneles dependen del núcleo disponible y éste se debe pedir con mucha antelación.

Debido a estos motivos, se decide cambiar los paneles con núcleo de honeycomb por paneles con núcleo de espuma. La espuma utilizada es XPS por lo que las propiedades mecánicas a compresión y cortante son muy inferiores a las que tiene un núcleo de honeycomb de aluminio. En todos los demás aspectos, la espuma es todo ventajas.

- Los paneles con núcleo de espuma se pueden fabricar en un “one-shot”, laminado sobre un molde, colocando el núcleo y laminando la segunda capa directamente encima de la espuma. De esta forma, se puede obtener un panel completamente terminado en un solo ciclo.
- La unión adhesiva utiliza la propia resina del laminado como adhesivo, gracias al vacío y a la presencia de la fibra como medio de difusión de la misma, es sencillo obtener una buena distribución de adhesivo y una buena unión.
- La densidad de la espuma es de 30kg/m³, lo que permite fabricar paneles extremadamente ligeros siempre que la exigencia mecánica no sea excesiva, por ejemplo en el caso del laminado de los endplates del RW, el panel completo tiene un peso de 1,26kg/m² mientras que el mismo laminado con honeycomb habría superado los 3kg/m². Una aclaración es que los paneles con núcleo de honeycomb tienen una mejor relación peso rigidez conforme se aumenta el número de capas y el espesor del panel, pero en esta aplicación concreta, el núcleo de espuma permite llegar a un peso mínimo muy bajo.
- Los paneles de espuma dan mucha flexibilidad ya que se pueden fabricar núcleos a medida en la cortadora de hilo CNC sin necesidad de esperar y a un precio ultra reducido. No solo eso sino que se puede elegir el espesor del panel para que sea

exactamente el que más convenga, incluso se podría hacer uso de espesores variables.

Proceso de fabricación de paneles sándwich con núcleo de espuma XPS

1. Preparación del núcleo, se corta la espuma al espesor deseado utilizando la máquina de corte por hilo caliente del laboratorio. Si se busca una cobertura completa de los cantos del panel con fibra durante el propio laminado, se puede usar la máquina de hilo para cortar el perímetro de la pieza final.
2. Se marcan en el núcleo de espuma las posiciones de los insertos, se cortan los huecos con cutter.
3. Se liján las superficies externas de los insertos y se limpian con acetona.
4. El molde se limpia con acetona y se le aplica desmoldante igual que cualquier otro laminado.
5. Se lamina la fibra sobre el molde, siguiendo el procedimiento estándar.
6. Se coloca el núcleo sobre el laminado
7. Se aplica resina sobre los insertos y se colocan en sus huecos
8. Se lamina la capa de superior sobre la espuma, con cuidado de no marcar el núcleo al usar el rodillo saca burbujas.
9. Se coloca una lámina de MYLAR sobre el laminado superior.
10. Se hace la bolsa de vacío y se cura con normalidad.



Figura 145: Montaje de los endplates en el RW



9.4. Vida útil de los componentes

Los paneles planos con núcleo de espuma dan un resultado en general muy positivo, son muy ligeros, fiables y su fabricación es rápida y sencilla. Los únicos problemas presentes son:

- Los insertos embebidos tienen el problema de que si se despegan tienen difícil arreglo. En todos los insertos embebidos presentes en el coche, este problema solo aparece una vez. Con un inserto que falla a torsión al aplicarle mucho par en el mecanizado de una rosca.
- Otro problema son los bordes, según la normativa, el monoplaça no debe tener bordes cortantes o afilados. Debido al pequeño espesor de las pieles de carbono de los paneles, los jueces los consideran un riesgo, por lo que en competición se cubren todos los bordes con cinta.

10. Undertray

10.1. *Diseño mecánico*

El fondo del coche es una pieza predominantemente plana. En la zona delantera tiene tres bordes de ataque con geometrías 3D. En la zona trasera, el diseño incluye un difusor. Debido a su geometría plana parece una pieza relativamente sencilla de ejecutar, sin embargo existen una serie de cuestiones que se han de tener en cuenta.

La problemática más importante a tener en cuenta en materia de diseño mecánico es la altura mínima obligada por normativa: ningún elemento del coche puede estar a menos de 30mm del suelo.

El fondo es el único elemento que se encuentra por debajo del chasis. Debido a ello, cada milímetro de espesor que tenga el fondo implica subir el coche entero esa distancia. Por otra parte, si la cabeza de un tornillo sobresale por debajo del fondo, éste pasará a ser el punto más bajo del coche y habrá que subir el coche entero para cumplir normativa.

Subir en coche es extremadamente dañino para la dinámica de paso por curva del vehículo por lo que se debe minimizar esta subida.

Otro factor a tener en cuenta es el tamaño del fondo, para hacer posible su transporte, éste componente se debe poder dividir en varias piezas.

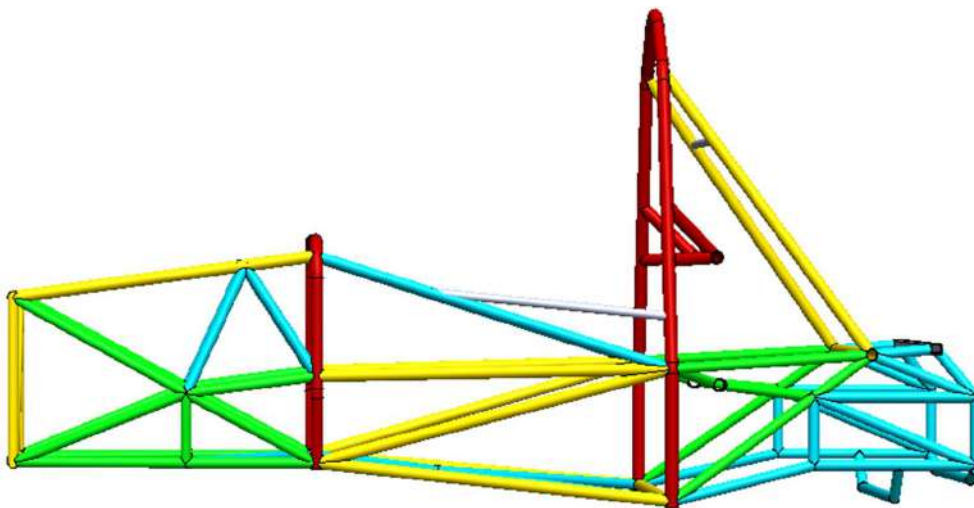


Figura 146: *Diseño del chasis del M24RT*

El diseño propuesto consiste en dividir el fondo en cuatro zonas: En la zona donde apoya el chasis, el fondo está formado por una única capa de fibra de carbono por lo que el espesor total será de alrededor de 1mm. La falta de rigidez no es un problema ya que, en esa zona, el fondo se encuentra anclado y apoyado en el chasis.



Figura 147: Concepto del suelo modular

Las zonas laterales tienen una construcción sándwich ya que sobresalen en voladizo por los laterales del coche y deben soportar las cargas de uso y de inspección. Por último, en la parte trasera está el difusor.

Como método de ensamblaje se diseña una aleta que sobresale del perímetro de la pieza central y solapa con las piezas laterales. Se colocan tornillos en dicho solape que roscan en insertos de aluminio embutidos en las piezas laterales durante la laminación. Los tornillos son lo suficientemente cortos para no sobresalir por debajo del fondo.

Las partes laterales se sujetan a la parte central, que va sujeta al chasis. Tendrá un punto de anclaje delantero bajo la zona de la pedalera y dos en la parte trasera a la altura del main hoop.

El difusor está en voladizo casi en su totalidad, por lo que se considera que sujetarlo al resto del fondo no es suficiente para obtener la rigidez necesaria. Se plantean dos cogidas que sujetarán el difusor directamente al chasis. Además de anclarse de forma rígida, el propio difusor debe ser en sí mismo rígido. Para lograrlo, se incluyen dos insertos trapezoidales de espuma en el laminado, haciendo la función de rigidizadores (Top hat stiffeners).

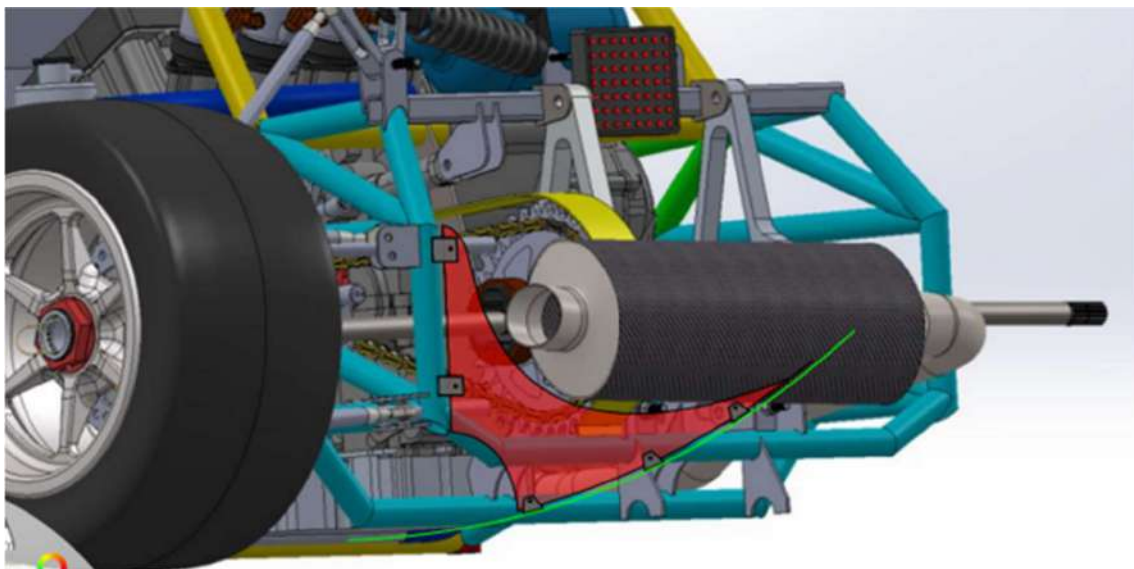


Figura 148: Concepto de cogidas del difusor

10.2. *Plan de fabricación*

Zona central

Consiste en una única pieza que consta de tres tipos de laminado.

- Zona central delantera: panel sándwich con núcleo de espuma de 1cm de espesor, con una capa en la cara superior y dos en la inferior.
- Zona central trasera: Lámina monolítica de carbono a la altura mínima (laminada sobre molde)
- Zona de aleta para anclaje de laterales: Zona monolítica de carbono que debe quedar por encima del espesor de las alas laterales, se van a colocar unos espaciadores sobre la mesa para lograr la doble altura.

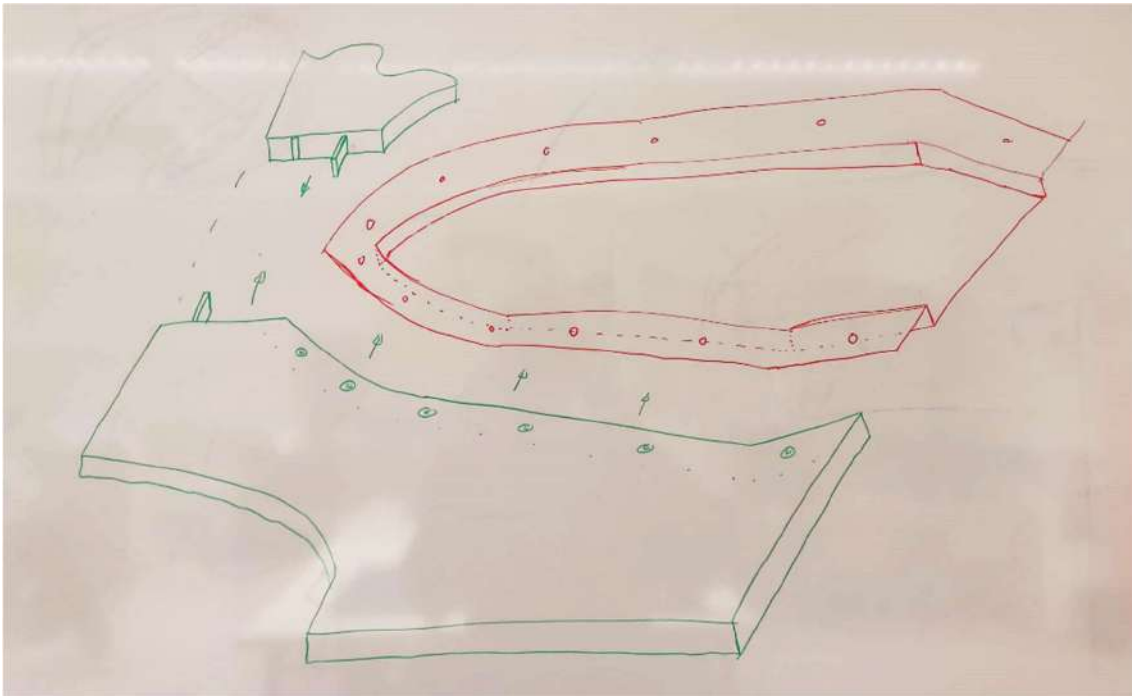


Figura 149: Concepto inicial para la partición del fondo modular



1. Se va a realizar el laminado sobre la pizarra blanca grande. Se limpia con acetona y se realiza la aplicación estándar de desmoldante.
2. Se colocan los espaciadores laterales de espuma y se fijan a la mesa usando cinta adhesiva y plastilina.
3. Se coloca una capa de plástico sobre los espaciadores, MYLAR en las zonas planas y plástico film alimentario en el escalón.
4. Se laminan dos capas de carbono poniendo especial atención a la zona de cambio de nivel.
5. Se coloca el núcleo de espuma sobre la zona central
6. Se lamina la capa superior
7. Se coloca una lámina de plástico MYLAR sobre la superficie superior
8. Se aplica el vacío.

Zonas laterales

Las zonas laterales se fabrican como un panel sándwich estándar.

Para llevar a cabo la delantera, que consta de una geometría tridimensional, el núcleo se fabrica en varias partes, una parte grande plana fabricada con el hilo caliente y dos partes fabricadas con la fresadora cnc que se pegan a la parte principal utilizando epoxy. Una vez fabricado el núcleo de ambos laterales, se cubre de fibra de carbono.

Se realizan taladros en las zonas con inserto y se mecanizan roscas M4 con machos manuales de roscar.

Difusor

El difusor se lleva a cabo de la misma forma que el alerón delantero, se fabrica un modelo en espuma utilizando la fresadora CNC, el molde se cubre con resina epoxy y se pule, que luego es utilizado para fabricar un molde de cemento. El molde recibe un tratamiento desmoldante y finalmente se lamina sobre éste.

10.3. *Fabricación real*

Zona central

La fabricación real de la zona central del UT se lleva a cabo prácticamente sin cambios con respecto a la planificación.



Figura 150: Fabricación de la zona central del fondo y pieza final

La única diferencia es la aplicación posterior de resina en alguna zona que había quedado demasiado seca.



Figura 151: Zonas pobres de resina y contaminación por la plastilina



Figura 152: Fondo recién desmoldado



Figura 153: Recorte de los sobrantes del fondo

Zonas laterales

La fabricación real de las zonas laterales acaba cambiando casi por completo:

1. Se lamina la parte plana solo en vez de toda la pieza incluyendo bordes de ataque: Los bordes de ataque no son planos por lo que impiden realizar la pieza mediante bolsa simple (ya que tendería a aplastarlos contra la mesa), mientras que utilizar una bolsa completa supone un riesgo de que la pieza se combe y pierda la planitud; se trata de piezas muy grandes a la par que delgadas y solo caben en el horno en posición vertical.



Figura 154: Pizarra en el horno colocada en vertical

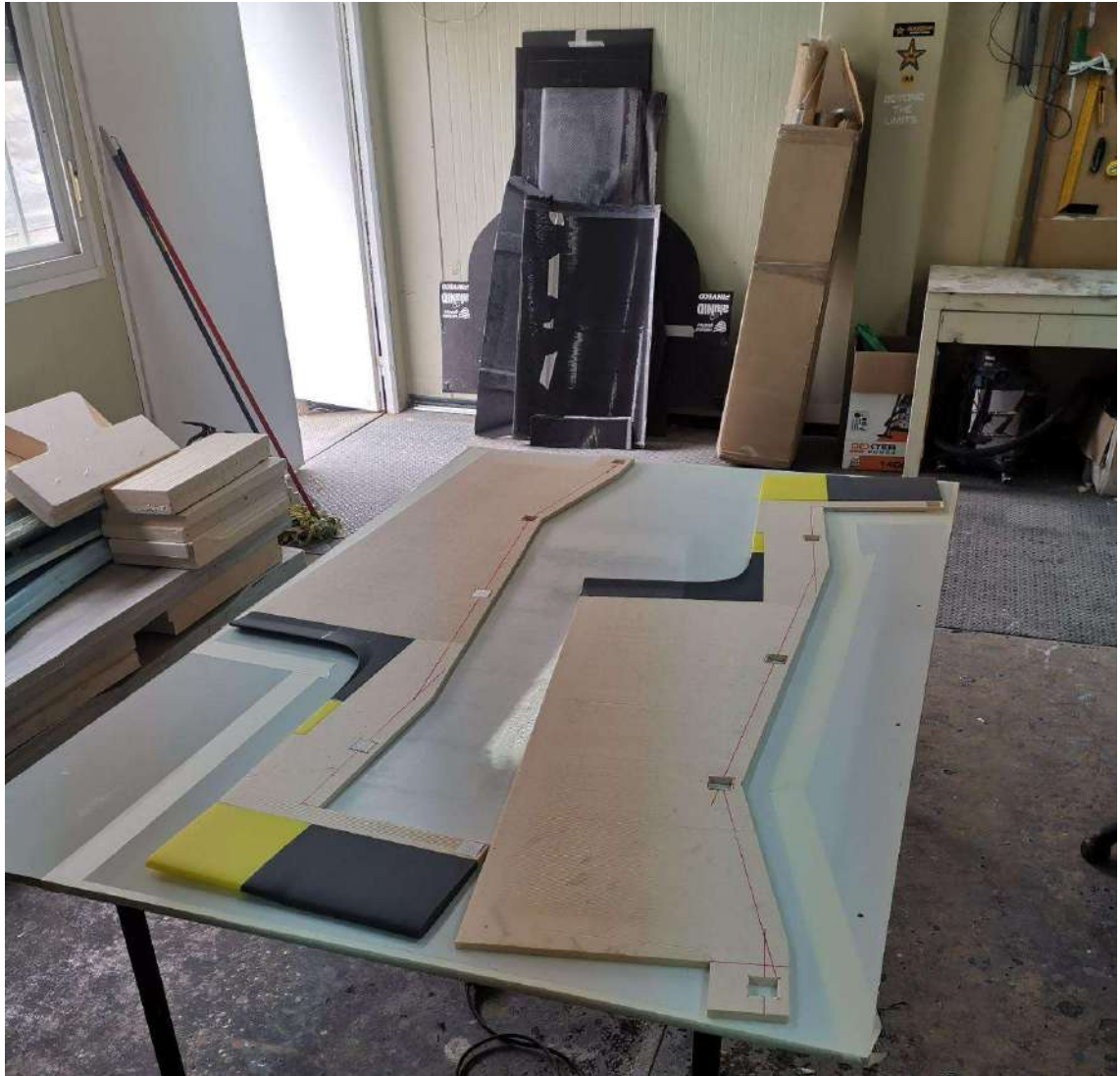


Figura 155: Núcleos de los laterales preparados con insertos metálicos y de impresión 3d



Figura 156: Primer laminado de los laterales del fondo

2. Una vez laminada la parte plana, se trabajan los bordes, retirando el sobrante y añadiendo resina donde sea necesario.
3. Se pegan los núcleos de los bordes de ataque al resto de la pieza. Núcleos que finalmente no son de espuma sino de impresión 3D. Este cambio se realiza después de varios intentos fallidos de realizar los bordes en la fresadora. La espuma es muy poco rígida y la geometría es muy fina lo que hace que la pieza se mueva durante el fresado dando lugar a una geometría errónea. Las piezas impresas en 3D tienen una buena geometría y se realizan en poco tiempo, sin embargo su peso es muy alto; añadir las cuatro pequeñas piezas impresas en 3D multiplica por 2 el peso total de la pieza, pese a que éstas eran casi huecas.



Figura 157: Impresión de los insertos y fondo con los mismos colocados

4. Se lamina sobre las impresiones 3D, este paso termina siendo un proceso extremadamente tedioso y difícil, ya que la pieza tiene una combinación entre un gran tamaño que dificulta su manipulación y zonas de geometría intrincada con pequeños detalles. El resultado es un acabado mucho peor de lo que se habría querido obtener, la fibra presenta arrugas en algunas zonas, zonas donde la geometría no se cubre del todo con fibra y zonas donde se genera produce bridging. Otro problema que surge es que el proceso se vuelve tan tedioso y largo, que no se pueden hacer los dos laterales en un mismo día.
5. Después del ciclo de curado se aprecia que, pese a que supuestamente la impresión 3D era capaz de soportar la temperatura, la combinación entre el calor y la presión de vacío terminan deformando ligeramente la geometría.



Figura 158: Fondo plano, detalles 3D I



Figura 159: Fondo plano, detalles 3D II

6. Por último, ambos laterales reciben un extenso retrabajo (alrededor de una semana de trabajo en total para ambas mitades, solo en retrabajo) en el que se lija la superficie, se vuelve a laminar sobre las zonas con desperfectos, se vuelve a lijar y finalmente se pule toda la pieza.

Difusor

La fabricación del difusor transcurre según lo planeado inicialmente, fabricando el molde y llevando a cabo el laminado sobre cemento. En el propio laminado se implementan los rigidizadores trapezoidales.



Figura 160: Molde del difusor salido de la fresadora



Figura 161: Laminado del difusor sobre molde de cemento



Figura 162: Difusor desmoldado, superficie inferior



Figura 163: Superficie superior del difusor

Posterior al laminado principal se realiza el gurney flap, el cual tal vez no se había estudiado en una profundidad suficiente. Se añade un contorno de espuma a la parte trasera del difusor con la forma del Gurney y se trata de laminar encima utilizando resina para reparaciones debido a su rápido curado, la intención es utilizar este curado rápido para sujetar el carbono manualmente.

El resultado obtenido es funcional pero mejorable en cuanto a acabados. En varias ocasiones posteriores se añade más resina y más fibra en un intento de mejorar el resultado, consiguiéndolo a medias.



Figura 164: Laminado del Gurney flap en el difusor



Figura 165: Fondo completo ensamblado por primera vez



Figura 166: Difusor colocado con sus cogidas

10.4. *Vida útil de los componentes*

El fondo es el componente más grande del monoplaza y además está formado por varias piezas. Por lo tanto, es de esperar que, durante su uso, surjan más imprevistos y problemas que en otros casos.

- Necesidad de tensores: El diseño original es sin tensores, no obstante, desde etapas tempranas de la fabricación (incluyendo el primer testing), se añaden dos tensores a cada lado debido ya que se prevé son necesarios para soportar las cargas de 20kg de normativa. Ya en Austria en la competición, los jueces obligan a colocar otro tensor más a cada lado, en la zona delantera, quedando en total 3 por lado.



Figura 167: Múltiples tensores en el monoplaza

- Suelo flectado: Se detecta durante la competición en Austria que la zona central trasera del fondo no se mantiene plana sino flecta debido a la fuerza vertical hacia arriba que ejercen los tensores en los laterales del fondo. La zona trasera del centro del suelo se compone de una única lámina de carbono sin núcleo por lo que tiene una reducida rigidez a flexión. La solución empleada consiste en fabricar un punto de anclaje en el centro de la zona afectada mediante otro tensor colocado internamente. Se trata de una solución improvisada y provisional que se lleva a cabo horas antes de la competición, pero cumple su función.

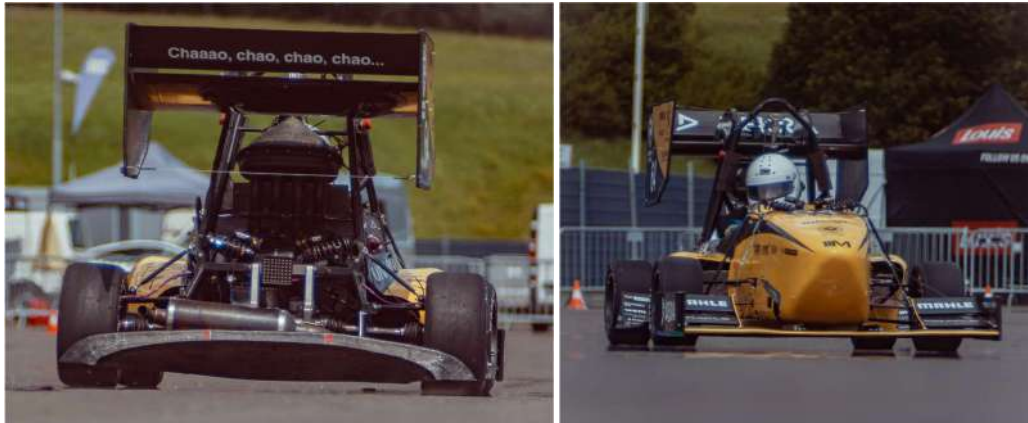


Figura 168: Fondo del coche combado (izda) y arreglado (dcha)

- Roscas M4 en aluminio: De la misma forma que el resto de los paneles sándwich con insertos embebidos y roscados a M4, ocurre el problema de las roscas que se pasan con demasiada facilidad. Se soluciona aumentándolas todas a M5.
- Tiempo de montaje/ desmontaje: El fondo tiene dos operaciones principales de montaje; la zona central y los laterales. El montaje de la zona central es complejo debido a la localización de difícil acceso de los tornillos. Sin embargo, esta pieza suele permanecer montada por lo que no supone grandes impedimentos. Las piezas laterales no son difíciles de montar, pero tienen muchos tornillos a los que hay que sumar los de los tensores. Es por ello por lo que el montaje de los laterales tarda una cantidad considerable de tiempo. La solución a corto plazo consiste en adquirir más llaves de vaso de 8mm y explicar al mayor número de personas, de forma que siempre se pueda montar en 3 o 4 personas, reduciendo mucho el tiempo.
- Montaje del difusor: El sistema de montaje del difusor basado en pinzas que sujetan el fondo y cogidas atornilladas propias es un gran éxito, ya que estructuralmente funciona a la perfección y es relativamente rápido de montar/ desmontar, especialmente si se tiene en cuenta la zona de difícil acceso en la que se encuentra.

No obstante, sí que surge un pequeño problema y es la tendencia de las pinzas de aluminio a despejarse. La solución empleada consiste en ejecutar de nuevo la unión adhesiva y luego reforzar con remaches.

11. Cogidas

11.1. *Diseño mecánico*

Sistema de ensamblaje de elementos del FW

La pieza estructural central del FW es la estructura interna del Main, es a dicha estructura donde se anclan el resto de los elementos.

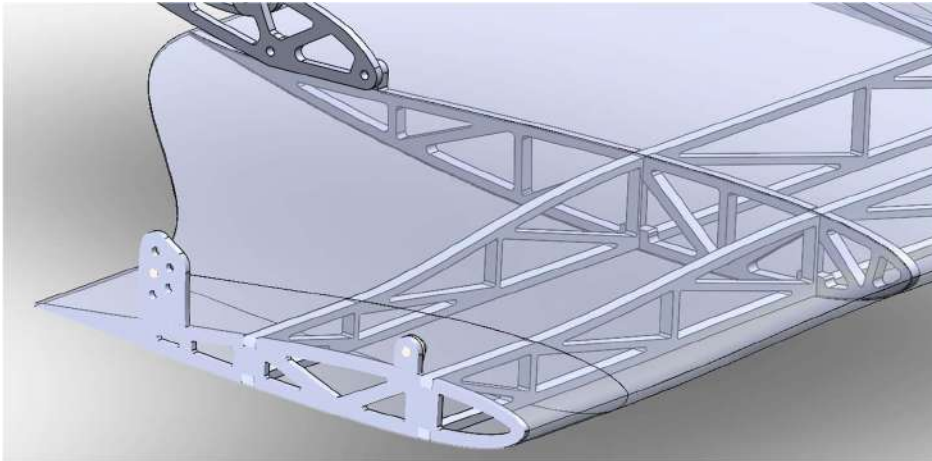


Figura 169: Puntos de anclaje de las cogidas del FW

Sistema de cogidas y ajuste de ángulo

El término “cogidas” es utilizado comúnmente para referirse al elemento o elementos que unen estructuralmente un componente aerodinámico al chasis del vehículo. Como tal, las cogidas, pese a tener una función estructural, también deben considerar su efecto sobre la aerodinámica.

Por razones de aerodinámica se decide utilizar un sistema de cogidas inferiores al morro del monoplaça. Esto aporta rendimiento en términos de la limpieza del flujo al suelo, pero supone dificultades estructuralmente, ya que el espacio en la parte inferior del morro es muy reducido.

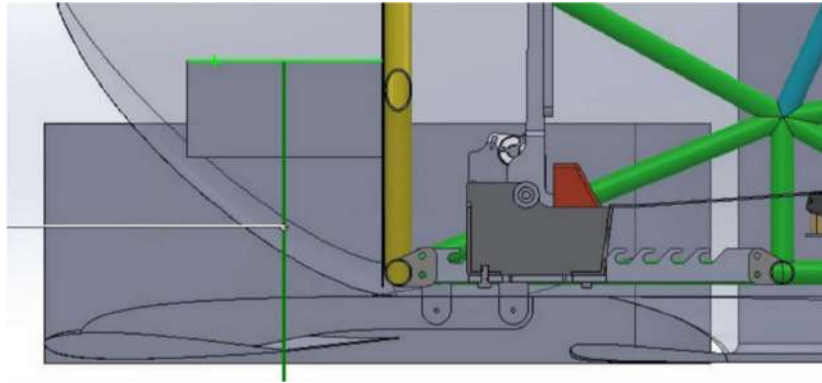


Figura 170: Espacio disponible bajo el chasis para las cogidas

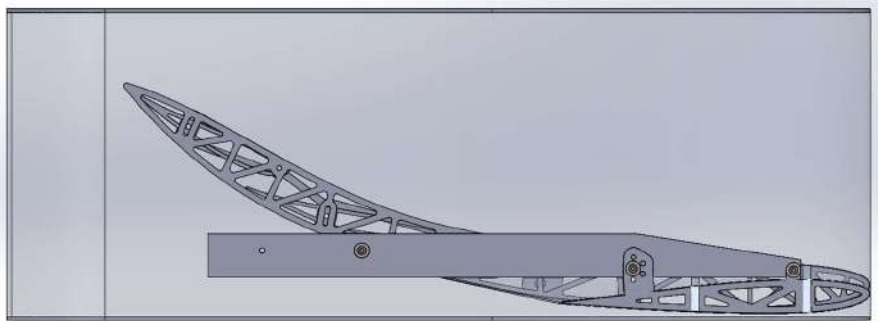


Figura 171: Diseño preliminar de las cogidas

En la parte trasera, las cogidas se atornillan a 4 chapas de acero soldadas en la parte inferior del chasis, en cada chapa hay tres agujeros, lo que permite realizar un ajuste de la altura del alerón. Para posicionar las chapas para soldadura, se fabrica un utillaje auxiliar de madera, al que se atornillan las chapas y que se sujeta al chasis durante la soldadura.

En la parte delantera, las cogidas van atornilladas a las costillas centrales de la estructura interna, varios agujeros existen para poder ajustar el ángulo de ataque del alerón.

Anclaje y ajuste de ángulo de flaps

Cada uno de los flaps tendrá una costilla de aluminio embutida en cada uno de sus extremos, se mecanizarán roscas directamente en la costilla y esa será la forma de anclaje.

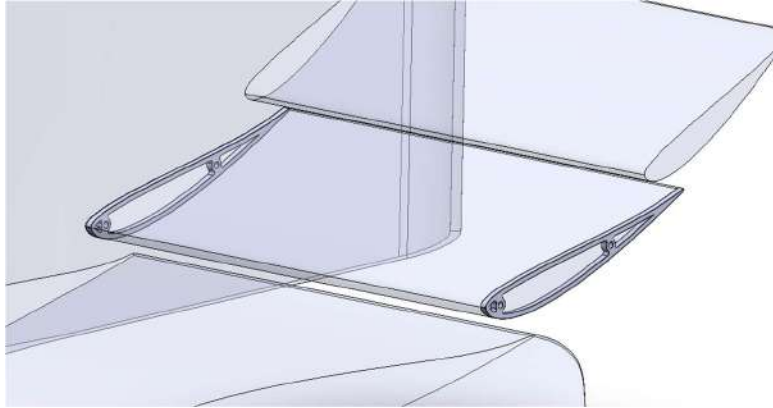


Figura 172: Costillas laterales de un flap del FW

En el lado exterior, los flaps se atornillan a través del endplate, que tendrá un inserto de aluminio embutido en el núcleo.

En el lado interno, hay una pieza de aluminio a la que se ha denominado “In-plate” de forma interna. El inplate se atornilla a la estructura interna igual que las cogidas. De los dos tornillos, el trasero encaja en una ranura para poder ajustar el ángulo de los flaps.

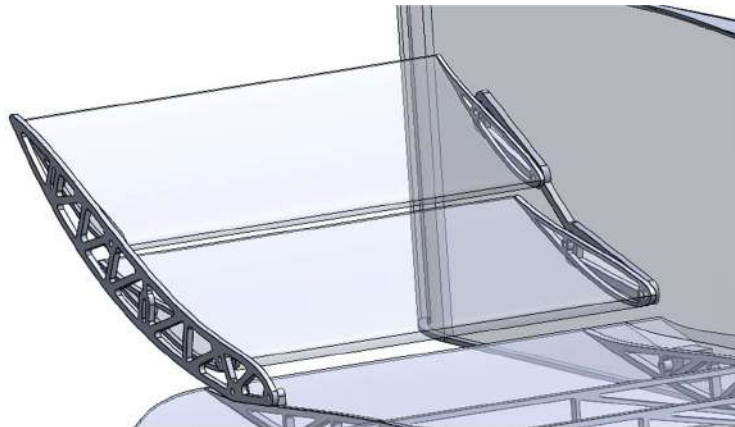


Figura 173: Montaje de los flaps

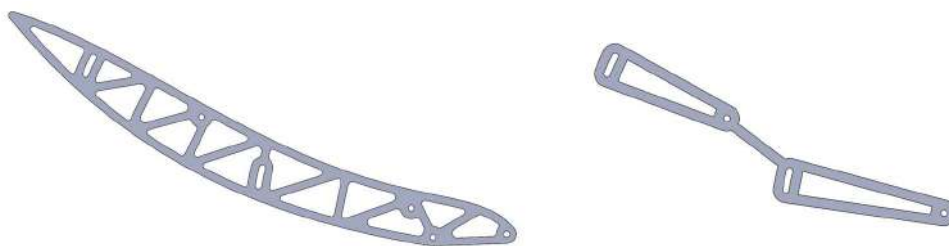


Figura 174: Inplate e inserto lateral de colocación de flaps

Sistemas de ensamblaje del RW

Al igual que en el caso del alerón delantero, la forma y localización de las cogidas afecta en gran manera a la eficacia aerodinámica del alerón. Los alerones traseros se suelen colocar detrás/ encima del coche. Debido a esto, la forma natural de sujetar estos elementos sería por delante /debajo del alerón, sin embargo, observando vehículos de competición, este no es el caso.

La curiosa forma que suelen tener este tipo de elemento se debe a que, por la naturaleza del aire, los perfiles aerodinámicos generan mucha más carga en la cara de baja presión (inferior en un alerón, superior en un ala) que en la cara de alta presión. Los soportes del alerón son unos elementos que inevitablemente estorban al flujo del aire y reducen el rendimiento.

Por este motivo, los alerones suelen anclarse por su cara superior siempre que sea posible, para que esa pérdida de rendimiento se produzca en la cara menos potente y por tanto la pérdida neta de rendimiento sea menor.

Una vez decidido que el anclaje en el alerón se va a realizar sobre la cara superior, se ha de elegir los puntos del chasis donde se va a anclar el otro extremo de las cogidas.

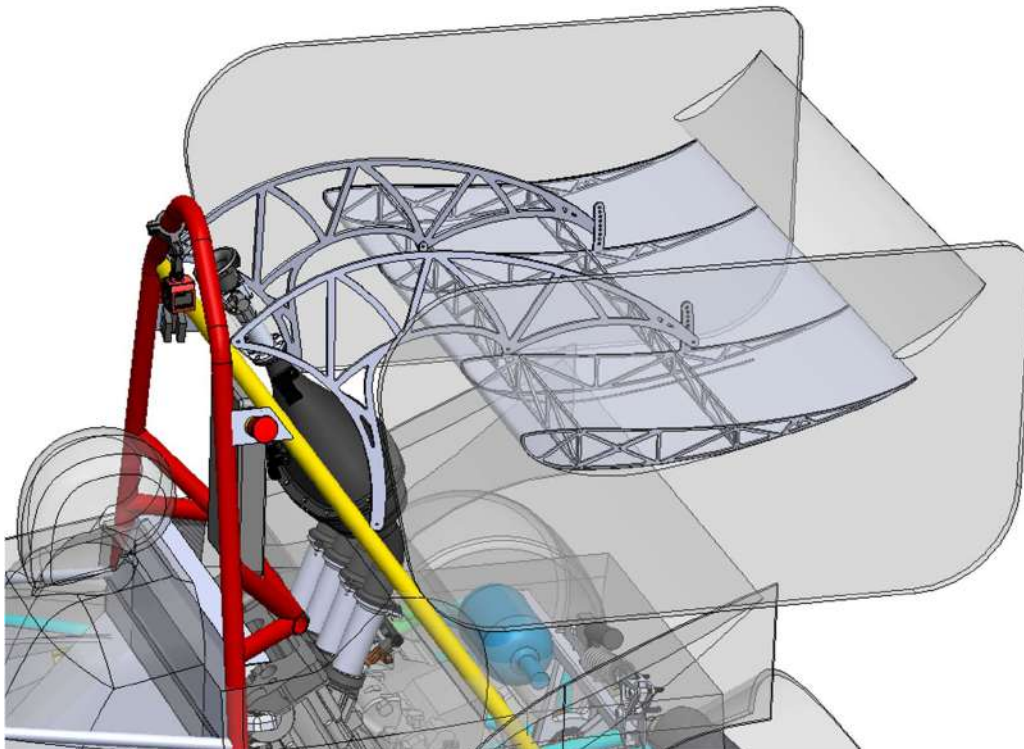


Figura 175: Ensamblaje completo del RW Main con sus cogidas



El punto lógico es el “main hoop bracing”, uno de los tubos de chasis que la normativa exige colocar en el coche, cuya función es sujetar el main hoop, que es el tubo que protege al piloto en caso de vuelco.

Para hacer frente a la aplicación de una carga lateral, se incluye en la estructura una barra diagonal entre uno de los apoyos del lado derecho del chasis y uno de los del lado izquierdo del alerón. Este elemento se lleva a cabo mediante una barra de carbono que puede trabajar tanto a tracción como a compresión.

Otra de las opciones planteadas es la utilización de dos tensores formando una X, esta opción tiene la ventaja de ser simétrica, un menor efecto sobre la aerodinámica y posiblemente un menor peso. Sin embargo, se considera que los tensores pueden suponer una fuente de problemas en la competición debido que deben estar ámbos suficientemente tensos y tener ambos la misma tensión.



11.2. Fabricación planificada

Cogidas del FW:

Las cogidas del alerón delantero se fabrican en fibra de carbono con un núcleo de espuma. Se colocan insertos de aluminio en los puntos de anclaje. Se utiliza el método ya mencionado para paneles sándwich con núcleo de espuma pero utilizando un laminado con muchas más capas. De forma adicional, para lograr una construcción completamente encapsulada, se realiza el laminado entero sobre la mesa de una pieza y luego se enrolla alrededor del núcleo, logrando cubrir todas las caras de éste.

Elementos del FW

Todos los insertos y elementos del FW se fabrican mediante corte láser de aluminio en diferentes espesores dependiendo de la aplicación.

Cogidas del RW

Las cogidas del RW se fabrican mediante corte láser de aluminio con un espesor de 10mm.

La barra diagonal se fabrica utilizando un tubo de CFRP comercial de 12mm. En los extremos del tubo se pegan welding-bushings, donde luego se atornillan rod-ends. La unión adhesiva se prepara activando ámbas superficies con lija gruesa y luego se limpian en profundidad con acetona.

11.3. Fabricación real

Cogidas del FW:

Las cogidas del alerón delantero se fabrican tal y como se tenía planificado.



Figura 176: Montaje de las cogidas del FW en el Main

Elementos del FW

Los inplatets sufren un cambio en cuanto a método de fabricación. Debido a problemas con la empresa proveedora de corte láser, se decide proceder de forma idónea a las vigas transversales del alerón delantero, optando por una construcción de madera MDF de 3mm cubierta por ámbas caras con un laminado de fibra de carbono. Éste cambio supone un trabajo extra sobre todo en cuanto a horas de retrabajo ya que el contorno se debe cortar a mano.

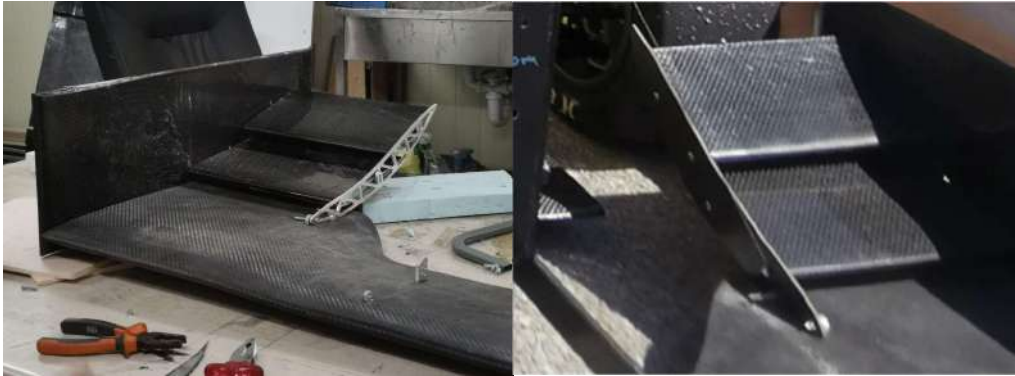


Figura 177: In-plate original y versión final de CFRP

Cogidas del RW

Las cogidas del RW se fabrican mediante corte láser de aluminio con un espesor de 10mm tal y como se tenía previsto.



Figura 178: Cogidas originales RW y primer montaje en el coche

Sin embargo, las cogidas sufren un drástico rediseño debido a un error cometido por nuestra parte a la hora de aplicar la normativa técnica. El error consiste en no aplicar una norma que figura en la sección referente al diseño del chasis, una sección de la normativa con la que los miembros de aerodinámica no están tan familiarizados pero que en este caso aplica.

Como se ha comentado previamente, la cogida se apoya en la barra de chasis denominada “main hoop bracing”. Como éste es un elemento estructural crucial para la seguridad del



piloto, existe una normativa que gobierna su diseño incluyendo la posibilidad de anclar elementos en el mismo. La norma que aplica en esta situación es:

T3.10.6 If any item which extends outside of the primary structure is attached to the main hoop braces, additional bracing is required to prevent bending loads in a rollover situation.

Dado que el alerón trasero sobresale de la estructura primaria, en caso de vuelco podría impactar con el suelo y transmitir cargas de flexión al main hoop bracing, pudiendo facilitar un fallo por pandeo de este, en caso de que el main hoop estuviera ejerciendo cargas de compresión sobre el bracing.

Por lo tanto, las opciones son:

- Anclar el alerón a otro elemento diferente.
- Añadir un refuerzo adicional al chasis para triangular el nodo donde se va a anclar el alerón y evitar así los esfuerzos a flexión
- Anclar las cogidas en los extremos del main hoop bracing, que ya se encuentran triangulados en el diseño original del chasis.

Se opta por extender las cogidas hasta los nodos en los extremos del Main hoop bracing ya que ninguna otra barra de chasis se encuentra en una posición conveniente y triangular el chasis es una opción laboriosa, cara y que añadiría masa innecesaria al monoplaza.

El concepto de la cogida asume una carga principal hacia abajo, lo que genera una tensión en la parte superior de la cogida, el esfuerzo compresivo en el anclaje inferior de la versión original se divide entre ambos anclajes mediante un arco.

El rediseño tiene dos consecuencias directas:

- Retraso en el cronograma: Pese a que no se está haciendo una mención detallada al cronograma del proyecto en este documento, la fecha límite es ajustada. Solicitar piezas de corte láser tarda entre 1 y 3 semanas, lo cual supone un retraso difícil de asumir.
- Cambio del requerimiento de diseño: El nuevo diseño de las cogidas tiene una separación mucho mayor hasta el anclaje inferior. Dado que esa zona es la que trabaja a compresión, se debe tener en cuenta el riesgo de fallo por pandeo. Aumentar el espesor de la cogida no solo no es posible para el proveedor, sino que además supondría un aumento de peso considerable.

Debido a esta situación, se opta por fabricar las cogidas en fibra de carbono con núcleo de espuma, lo que permite aumentar la sección hasta 20mm en las zonas que se considere necesario y aplicar un número superior de capas en partes críticas.

Esta opción ya se había planteado inicialmente, pero no se eligió ya que, durante las fases iniciales de diseño, la experiencia en composites era nula y fabricar una pieza estructural de este tamaño y complejidad, se consideraba un riesgo que no merecía la pena asumir.

El laminado es similar al de cualquier otro sándwich, cabe destacar el uso de 3 capas extra en la parte esbelta que se extiende verticalmente hasta el anclaje inferior para prevenir el fallo por pandeo. También cabe destacar la realización de cortes de alivio en la fibra, que permiten cubrir los bordes y encapsular la pieza completamente. El encapsulado completo no se lleva a cabo para mejorar las propiedades mecánicas sino para mejorar la durabilidad de la pieza ya que los bordes de espuma expuestos son zonas que se suelen dañar rápidamente con el uso.

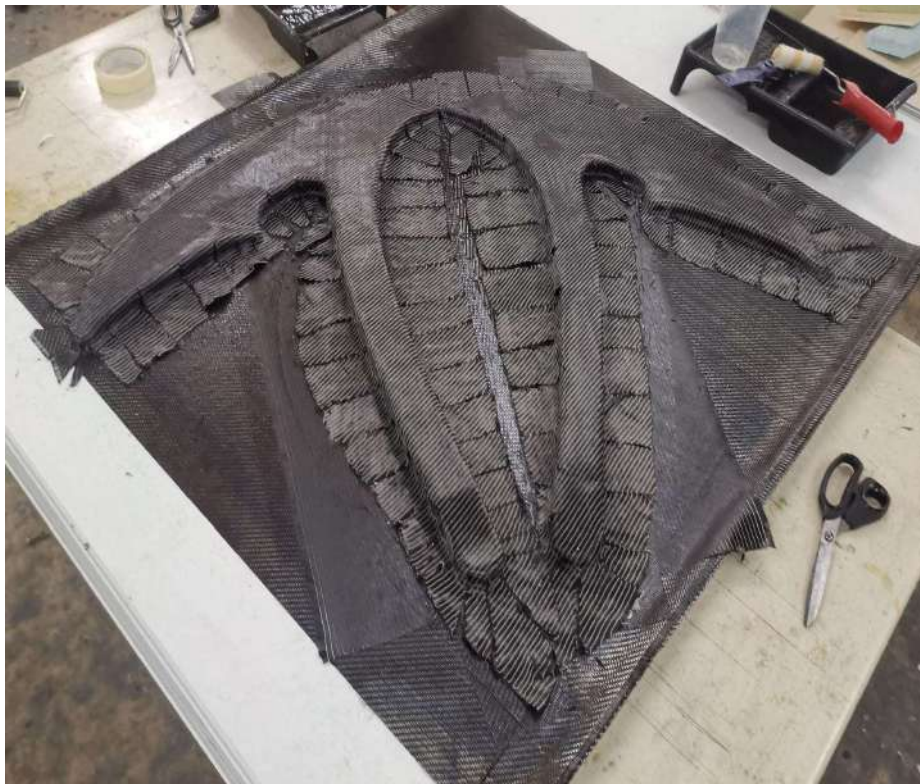


Figura 179: Laminado de las cogidas definitivas del RW



Figura 180: Cogidas definitivas del RW desmoldadas

El resultado es una pieza con la que se logra NO aumentar el peso con respecto a las cogidas originales de aluminio (que no cumplían la normativa) a la par que se logra un aumento extremo en la rigidez.



Figura 181: Una de las cogidas del RW ya cortada y canteada

Seguramente las nuevas cogidas estén sobredimensionadas y tal vez pudieran haber sido más ligeras pero teniendo en cuenta que el lapso de tiempo desde que se descubre la no-conformidad en la normativa hasta que se montan las nuevas cogidas en el coche es de tan solo 4 días, y siendo las nuevas cogidas ampliamente superiores a las originales, se considera el rediseño como un gran éxito.



Figura 182: Primer montaje del RW con sus cogidas definitivas



11.4. *Vida útil de los componentes*

Cogidas del FW

Las cogidas del FW dan un resultado mixto ya que si bien es cierto que logran su objetivo: sujetar el alerón, superar las inspecciones técnicas y las pruebas dinámicas, todo ello con un diseño esbelto y por debajo del morro para no afectar negativamente a la aerodinámica.

También es cierto que:

- Contribuyen a la suficiente pero escasa rigidez del FW.
- Los puntos de anclaje son poco accesibles lo que aumenta el tiempo de montaje/desmontaje.
- Debido al ajustado espacio bajo el morro, la capacidad de ajuste de altura del FW se ve ajustada a ± 10 mm desde su posición neutra lo cual supone un factor limitante a la hora de probar set-ups del coche.

Cogidas del RW

Las cogidas del RW cumplen perfectamente su función y seguramente se trate de uno de los elementos que mejor han funcionado en relación con el tiempo que se les ha dedicado en el ámbito de diseño y fabricación. Este hecho no es casualidad, sino que se debe a que su diseño y fabricación ocurre al final de la temporada y las experiencia en cuanto a diseño y fabricación del equipo se ha desarrollado enormemente para ese punto.

El principal punto a mejorar de las cogidas del RW es el sistema de montaje de la barra diagonal. La barra se monta en los mismos tornillos que la propia cogida por razones de simplicidad.

Esto tiene la desventaja de que cada vez que se quiere quitar o poner el alerón, se debe desmontar la barra diagonal de uno de sus extremos.

Por otro lado, el montaje de la barra es tedioso ya que el ángulo que forman los rod-ends es superior al que es recomendable, debido a esto, para poder colocarla, se deben forzar los rod-ends, la barra y la propia estructura de las cogidas.

Para mitigar este problema, la barra se monta utilizando una específica secuencia de varias tuercas bloqueantes, tuercas no bloqueantes y arandelas.

En caso de rediseño, la barra debería anclarse en agujeros propios sobre las cogidas y disponer de algún tipo de adaptador de ángulo para evitar forzar los rod-ends.



12. Presupuesto y mass budget.

El manejo del presupuesto es una de las tareas transversales cruciales que se deben llevar al día a lo largo de todo el proyecto, en este caso, es de especial importancia manejar el presupuesto durante la etapa de planificación, ya que el presupuesto económico va estrechamente ligado al “presupuesto de masa”.

El “presupuesto de masa” es un concepto ampliamente utilizado en el sector aeroespacial en el que la masa de componentes y sistemas siempre es un factor crítico. Normalmente se establece un mass budget que viene dado por la capacidad de carga del cohete o avión. En este caso, el mass budget se fija alrededor de los 20kg según observaciones realizadas a otros equipos.

Lo que se quiere resaltar es la idea de que una u otra forma de planificar la fabricación afecta a la vez al coste económico, y al peso estimado del paquete (factor crucial en un monoplaza). Por ejemplo, ciertos métodos de fabricación pueden ser asequibles, pero dar lugar a piezas más pesadas, o ser más caros, pero permiten obtener piezas más ligeras.

12.1. Herramienta de cálculo estimado

La dificultad radica en que a menudo, calcular el coste o masa estimada no es rápido ya que depende de una serie de condiciones de fabricación, de los productos empleados y de las dimensiones de la pieza concreta. Esto dificulta la comparación de casuísticas y la toma de decisiones informadas.

Para hacer frente a esta problemática, se plantea generar una hoja de cálculo interactiva en la que se modelan de forma genérica los diferentes métodos de fabricación como funciones que relacionan una pieza de dimensiones conocidas con una serie de productos conocidos para calcular de forma automática el coste que supondría fabricar la pieza de esa forma y el peso final estimado.

La hoja consta con “datos de entrada” formados por una lista de las piezas con sus dimensiones y una lista de productos con sus costes y masas asociadas. Introducidos los datos, la hoja permite variar diferentes parámetros y comparar resultados. Dichos parámetros hacen referencia a decisiones de fabricación y diseño como el número de capas de fibra, el ratio de resina etc.

Página 2: Lista de materiales

En la página 2 figuran todos los materiales que podrían ser utilizados en el proyecto. La filosofía de la página es recopilar datos de muchos materiales sin importar si finalmente se usan o no.

Los resultados obtenidos son las cantidades totales necesarias de cada material y el coste asociado a dichas cantidades. Esta página se utiliza para volcar los resultados al presupuesto general del equipo y gestionar las compras.

Producto	Proveedor	Precio unitario	Unidades	Compra única	Pagado	Peso unitario	Cantidad a comprar	Coste
Desmoldante	MEL		0 litros	si	si		0	0
Tela 300gsm twill	MEL	22,35	m2	no	no	0,3	9,258758	206,9332413
Tela 300gsm biax	MEL	15,09	m2	no	no	0,3	9,258758	139,7146582
Tela seca 200g twill 2/2	MEL	28,2	m2	no	no	0,2	12,72085714	358,7281714
Tela seca biax 205g	MEL	18,14	m2	no	no	0,2	7,371457143	133,7182326
Resina laminar	MEL	25,54	kg	no	no	1	11,89587479	303,8206421
Insertos ALU			0 uds	no	no		64	0
Corte chapa ALU			uds	no	no		54	0
Corte chapa Acero			uds	no	no		0	0
Lija 80	Leroy	1	uds	no	no		3,2	3,2
Acetona	Chino		litros	no	no		0,192	0
Loctite HY4070	Loctite		0 uds	no	no		0	0
AluNID 9mm	AluNID		0 m2	no	no		2,737531	0
Cinta de vacío	Easy Comps	0,484	ml	no	no		129,898	62,870632
Bolsa de vacío	MEL	1,032	ml	no	no		12,312349	12,70634417
PeelPly+Breather	MEL	8,82	ml	no	no		10,199509	69,56065138
Fumed Silica Thixotropic			15,31 uds	si	no		0,37035632	5,670063399
Espuma XPS	Leroy	5,6	uds	no	no	1,425	25,03596882	140,2014254
Espátula plástico/ brochas	Leroy		1 uds	no	no		16	16
Vasos resina	Makro		0,1 uds	no	no		32	3,2
Forro libros	Chino		1,2 m2	no	no		9,8078	11,76936
Masilla				no	no		4,6	0
Lijas finas	Leroy		0,8 uds	no	no		0	0
Cemento saco 25kg	Obramat		4,05 uds	no	no		20,65473432	83,651674
Loctite HY4070+FC30-K35	Loctite		0 uds	no	no		0	0
Plancha MDF 3mm	Leroy		5,99 uds	no	no		0,9	5,391
Plancha MDF 1cm	Leroy		11,99 uds	si	no		0	0
Loctite EA- u otro epoxi	Loctite o Leroy		10 uds	no	no		1,15	11,5
MYLAR release film	Easy Comps		5,75 m2	no	no		1,41544	8,13878
Tornillos M4 35mm	Fataban		0,1 uds	no	no	0,01	0	0

Figura 184: Página dos de la hoja de cálculo, lista de materiales

Resto de páginas: Funciones de método

El resto de páginas son “funciones de método”, hay una por cada método y su función es establecer una relación entre el método de fabricación, las dimensiones de cada pieza y el consumo de cada material concreto, calculando los consumos de material para todos los elementos que se fabrican por ese método concreto.

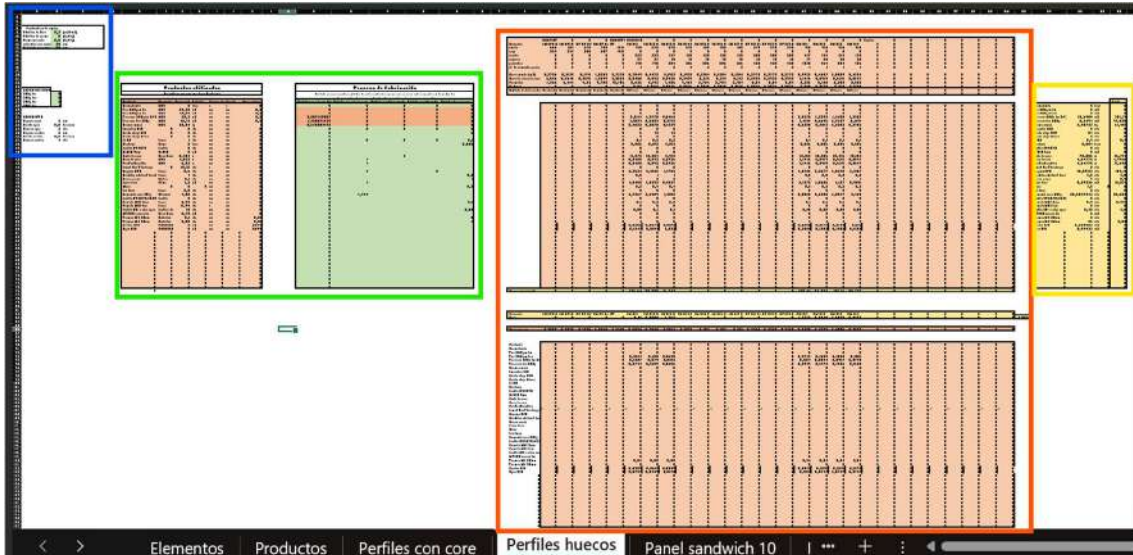


Figura 185: Resto de páginas, funciones de método

La hoja parece compleja pero no lo es si se comprende su lógica y la función de cada zona.

Zona azul: Introducción de parámetros del laminado como número de capas, fracción de resina etc.

Zona verde: Introducción de la “función del método”

Zona naranja: Cálculos y transformaciones

Zona amarilla: Resultados

Zona de introducción de parámetros:

Se introducen parámetros del laminado como el número de capas y el tipo de fibra que se va a emplear.

	A	B	C
1			
2			
3			Metodo de fabricacion
4			Afhueco
5			
6			
7			
8			Parámetros de control
9		0,3 (m2/m2)	Pérdidas de fibra
10		0,1 (kg/kg)	Pérdidas de resina
11		0,75 (kg/kg)	Resina mezclada
12		20 mml	sobrante para laminar
13		50 mml	Sobrante para bolsa
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			CAPAS DE FIBRA
25		0	300g twill
26		0	300g biax
27		2	200g twill
28		1	200g biax
29			

Figura 186: Introducción de parámetros

Zona de “Función del método”

La estrategia de cálculo consiste en aproximar que el consumo de todos los materiales está relacionado de forma proporcional con alguna de las características dimensionales de la pieza: longitud, perímetro, área, volumen y en caso de no estarlo, se puede relacionar con el número de unidades de pieza a fabricar.

Se genera una tabla en la que se relaciona el número de unidades de cada producto con una de las dimensiones de la pieza: longitud, área, perímetro, etc.

Esa tabla es la que “representa el método” y se rellena utilizando la experiencia.

Productos utilizados						Proceso de fabricación					
No modificar aquí sino en la hoja: Productos						Se debe calcular cuantas unidades de cada producto son necesarias para cada elemento en función de: área laminada, área de la bolsa, perímetro de la pieza, volumen de la pieza o número fijo por pieza					
Producto	Proveedor	Precio unitario	Unidades	Compra única	Pagado	Peso unitario	Unidades por ud área fijas	Unidades por ud área fijas	Unidades según perímetro	Unidades según volumen	Unidades fijas por pieza
Desmoldante	MEL	0	litros	si	si	0	0	0	0	0	0
Tela 300gsm twill	MEL	23,85	m ²	na	no	0,3	0	0	0	0	0
Tela 300gsm biax	MEL	15,09	m ²	no	no	0,3	0	0	0	0	0
Tela seca 200g twill 2/2	MEL	28,2	m ²	no	no	0,3	2,897142857	0	0	0	0
Tela seca biax 205g	MEL	18,14	m ²	no	no	0,3	1,428571429	0	0	0	0
Resina laminar	MEL	25,54	kg	no	no	1	0,642857143	0	0	0	0
Insertos ALU	0	0	uds	no	no	0	0	0	0	0	0
Corte chapa ALU	0	0	uds	no	no	0	0	0	0	0	0
Corte chapa Acero	0	0	uds	no	no	0	0	0	0	0	0
Lija 80	Leroy	0	1 uds	no	no	0	0	0	0	0	0,1
Acetona	China	0	litros	no	no	0	0	0	0	0	0,006
Loctite H14070	Loctite	0	uds	no	no	0	0	0	0	0	0
AluNID 5mm	AluNID	0	m ²	no	no	0	0	0	0	0	0
Cinta de vacío	Easy Comps	0,484	m	no	no	0	0	0	2	0	0
Bolsa de vacío	MEL	1,032	ml	no	no	0	0	1	0	0	0
FlexiFly+Breather	MEL	6,82	ml	no	no	0	0	1	0	0	0
Fumed Silica Thixotropic	0	15,31	uds	si	no	0	0	0	0	0	0
Espuma 3PS	Leroy	3,6	uds	no	no	0	0	0	4	0	0
Espátula plástico/ brochas	Leroy	0	1 uds	no	no	0	0	0	0	0	0,5
Vasos resina	Makro	0,1	uds	no	no	0	0	0	0	0	1
Ferra libros	China	1,2	m ²	no	no	0	1	0	0	0	0
Malla	0	0	0	no	no	0	0	0	0	0	0
Lijas finas	Leroy	0	0,8 uds	no	no	0	0	0	0	0	0,2
Cemento saco 25kg	Obramat	4,05	uds	no	no	0	0	0	4,444	0	0
Loctite H14070/FC30 K35	Loctite	0	uds	no	no	0	0	0	0	0	0
Plancha MDF 9mm	Leroy	5,99	uds	no	no	0	0	0	0	0	0,1
Plancha MDF 12m	Leroy	13,99	uds	si	no	0	0	0	0	0	0
Loctite EA- u otro epoxi	Loctite o Lerx	10	uds	no	no	0	0	0	0	0	0,05
MYLAR release film	Easy Comps	3,75	m ²	no	no	0	0	0	0	0	0
Formillas M4 35mm	Entaban	0,1	uds	no	no	0,01	0	0	0	0	0
Formillas M4 50mm	Entaban	0,08	uds	no	no	0,01	0	0	0	0	0
Costillas ALU	PENDIENTE	0	m ²	no	no	1699	0	0	0	0	4

Figura 187: Función de método

Por ejemplo, se puede observar que, según la experiencia, se estima el uso de cuatro sacos de cemento para cada metro cuadrado de pieza que se desee fabricar. En este caso se ha decidido relacionar el cálculo con el área de la pieza y no con el volumen de la misma ya que los moldes son relativamente planos y de espesor similar, haciendo que el volumen del molde dependa más del área de la pieza que de su volumen.

La sección de cálculos y transformaciones solamente calcula longitudes, áreas, perímetros etc de cada pieza y los multiplica por los factores de la anterior tabla. También realiza alguna transformación fila/columna necesaria. Tiene una gran cantidad de celdas pero no se considera de interés.

La sección de resultados recoge los resultados de cada material para que sean representados en el resto de las hojas.

12.3. Coste real del proyecto

Después de finalizar la temporada se lleva a cabo una recopilación de todas las facturas y compras realizadas durante la misma para llevar a cabo un estudio sobre el presupuesto real y compararlo con el presupuesto estimado.

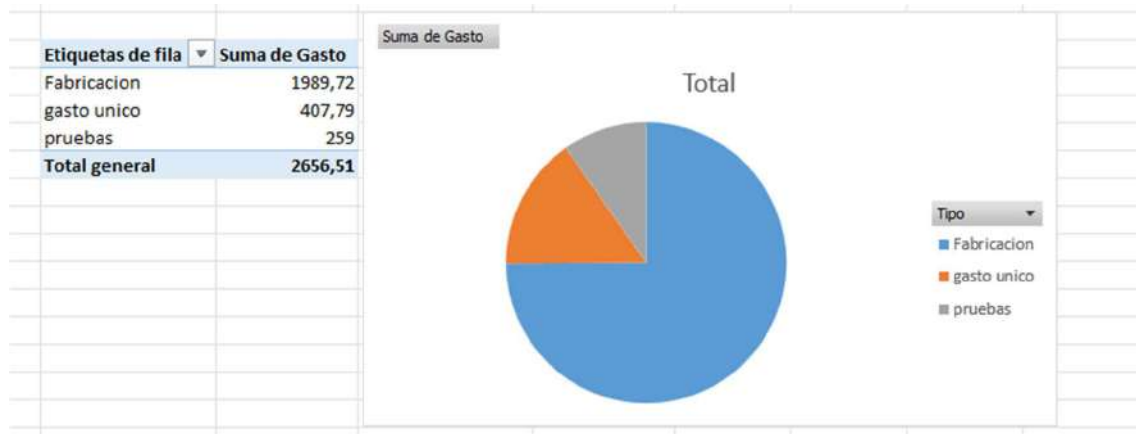


Figura 188: Representación de costes según su destino

La primera representación de datos se lleva a cabo para diferenciar gastos empleados en la mejora de equipos y capacidades del dpto. de gastos realizados en la propia temporada. Los gastos hechos en la propia temporada se dividen en aquellos empleados de la fase de experimentos y aquellos invertidos directamente en el paquete.

Según se observa, el gasto total es de 2656,51 euros, de los cuales 1989,72 se invierten en materiales utilizados en la fabricación del paquete, 259 en materiales para experimentos y 407,79 en equipos que permanecerán en el equipo para futuras temporadas.

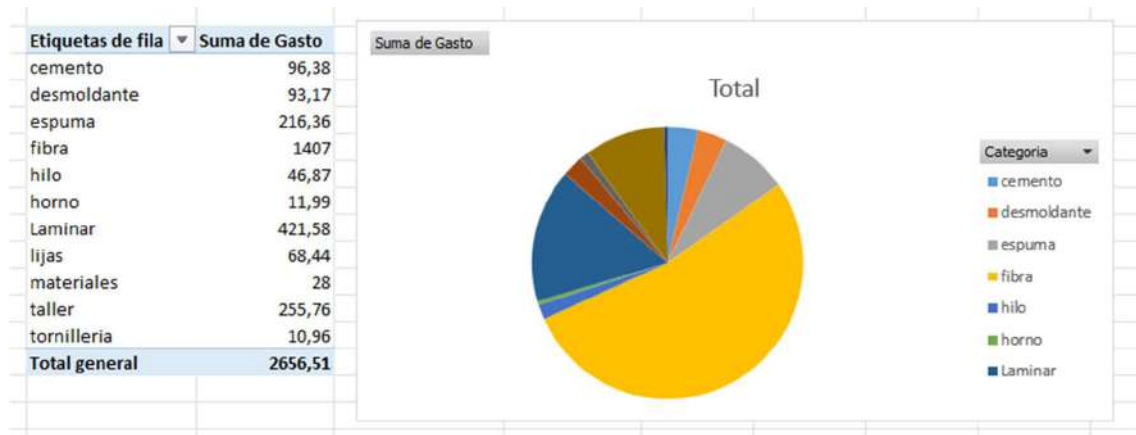


Figura 189: Representación de costes según material

Otra forma interesante de visualizar los datos es en función del material o producto. Esta representación permite tomar decisiones sobre la búsqueda de patrocinadores, aunque en este caso no aportan muchas conclusiones inesperadas; como era de esperar, la fibra de carbono (tela y resina) conforman más de la mitad del gasto.

Una conclusión interesante es la posibilidad de reducir el gasto en lijas ya que, durante la temporada, este gasto se ha subestimado, comprando lijas de forma esporádica en función de la necesidad. Teniendo en cuenta que el gasto total asciende a casi 70 euros, tal vez sea conveniente adquirir las lijas en un solo pedido de mayor volumen.

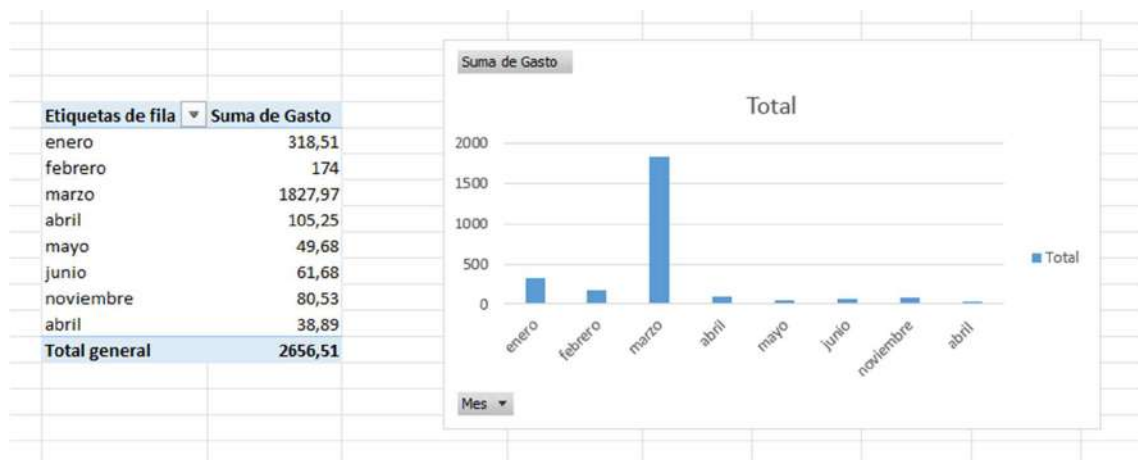


Figura 190: Representación temporal de costes

Utilizando las fechas de las facturas, se pueden colocar los gastos en un marco temporal donde se observan dos picos, uno debido al pedido de fibra de carbono y sus materiales auxiliares en marzo y otro en enero debido a la adquisición de equipos permanentes y materiales para los experimentos.

7. Paso por competición

En julio de 2024, el monoplaza MA24RT tiene su paso por la competición. El equipo viaja a Austria para competir en el evento organizado en el circuito de Fórmula 1 llamado “Red Bull Ring”

En primer lugar, tienen lugar las pruebas estáticas en las que el equipo debe defender su diseño frente a un panel de jueces, cada juez se especializa en algún área del monoplaza y puntúa el monoplaza en ese ámbito concreto de la técnica.

En la categoría de aerodinámica, el equipo obtiene una de las mejores notas con un 7,6, lo cual es muy positivo teniendo en cuenta que es la primera vez que MART presenta un paquete completo y otros equipos llevan más de 15 años haciéndolo.

Los jueces dan la enhorabuena por la calidad de la fabricación y por haber llevado a cabo un paquete tan ambicioso en nuestra primera temporada.



Figura 191: Miembros de MART que participan en la defensa del diseño

Para poder pasar a las pruebas dinámicas (competiciones en pista con el coche), se deben pasar las inspecciones técnicas y las pruebas de seguridad.

El paso por las inspecciones técnicas es bastante exitoso en lo que respecta al paquete aerodinámico ya que los únicos cambios requeridos son la inclusión de sensores en el fondo y RW, la protección de bordes cortantes con cinta y el uso de fijaroscas en algunos

tornillos. Todas estas no conformidades son relativamente sencillas y rápidas de solucionar, lo cual es un alivio ya que Formula Student Austria es conocida por tener las inspecciones técnicas más exigentes de todas las competiciones.

El resto de los subsistemas del monoplaza no tiene la misma suerte que el paquete aerodinámico ya que los inspectores encuentran disconformidades en: Sistema de dirección, sensor del pedal de acelerador, BSPD, cinturones de seguridad, bombona neumática del cambio, abrazadera de la tapa del depósito de combustible



Figura 192: Monoplaza en la cola de espera para inspección técnica en el Red Bull Ring

Esto resulta sorprendente ya que el monoplaza había pasado previamente con éxito las inspecciones en dos competiciones, España y Alemania y muchos de los subsistemas mencionados habían tenido pocos o ningún cambio. Debido a la gravedad de los problemas, al extremadamente corto límite de tiempo y a la falta de medios por estar tan lejos del taller, la probabilidad de que el coche pueda llegar a correr es muy reducida.

No obstante, los integrantes de MART se ponen manos a la obra y después de 72h de trabajo continuo y mucha cafeína, consiguen pasar las inspecciones y el vehículo es determinado apto para competir.



Figura 193: Integrantes de MART trabajando en el monoplace

En particular, fue relevante la experiencia en composites para realizar reparaciones en la bombona de alta presión y en la admisión de aire del motor.

Las dos primeras pruebas dinámicas son la prueba de skidpad (circuito en 8) y aceleración de 75m. El equipo no participa en ninguna ya que ocurren antes de poder pasar las inspecciones).

La prueba de autocross es la primera en la que el equipo llega a competir, logrando un 9º puesto, con el segundo mejor tiempo de las universidades españolas. Todo ello sin haber podido realizar el proceso de ajuste de suspensiones.



Figura 194: Monoplaza durante la prueba de Autocross

El proceso de ajuste de suspensiones coloquialmente llamado “setup” consiste en ajustar los diferentes parámetros de las suspensiones: algunos de ellos son:

- Equilibrado de pesos en ruedas
- Ajuste de altura delantera y trasera
- Camber y toe de las cuatro ruedas
- Presiones de neumáticos
- Motion ratios, rebotes y rigideces
- ...

Se trata de un proceso largo que requiere concentración. Dado que el equipo pasa las inspecciones justo antes de realizar el autocross, no hay tiempo para hacer el setup.

Durante esa noche, el dpto. de suspensiones se queda hasta las 5:00am realizando el setup para la prueba más importante de la competición: La endurance.



Figura 195: Monoplaza preparado para entrar a la endurance

La prueba comienza con un buen ritmo. El ritmo demostrado coloca el monoplaza alrededor de un 7-9 puesto en términos de rendimiento del coche.



Figura 196: Monoplaza durante la Endurance



Figura 197: Monoplazas compitiendo en la endurance

Por desgracia, el monoplaza sufre un fallo en la electrónica y durante el cambio de piloto, el equipo retira el coche.



Figura 198: Ceremonia de cierre de fórmula student Austria

Se trata de un agrisulce final para una temporada dura en la que el equipo divide sus esfuerzos entre una última competición con un monoplaza de combustión (FS Austria) y una primera competición con un monoplaza eléctrico (FS Spain).

Una prueba más del dicho que se repite casi como un mantra en los circuitos. No importa si es F1 con sus coches millonarios o “las 24h horas de Limones” con sus coches de 500 dólares, “Racing is hard”.

13. Conclusiones

Conclusiones técnicas:

En términos generales se considera que el proyecto ha sido un gran éxito ya que:

- El paquete aerodinámico es funcional: Todas las piezas son capaces de superar las inspecciones técnicas y participar en la competición, algo nunca conseguido previamente en el equipo.
- El paquete aerodinámico contribuye positivamente al rendimiento: En los testings se hacen tandas con y sin el paquete y se confirma con datos empíricos que el paquete tiene un efecto positivo. Esto se debe a un buen diseño aerodinámico y a una fabricación lo suficientemente ligera.
- Paquete aerodinámico competitivo: El peso final del paquete completo está alrededor de los 15kg, una cifra muy competitiva con la que MART se pone por delante de muchos equipos veteranos en su primera versión de paquete aerodinámico.
- Coste: El coste final se mantiene dentro de las posibilidades del equipo. El coste se puede dividir en dos partes, el coste neto de la fibra de carbono y resina, que no se puede reducir y el resto, que representa el coste de proceso. En este caso, el coste de proceso ha sido un 25% del total lo que indica un diseño de proceso eficiente en costes, utilizando materiales extremadamente económicos y logrando resultados competitivos pese a ello.

Puntos a mejorar en futuras iteraciones del paquete:

- El principal punto a mejorar es una mejor comunicación entre el dpto. de diseño aerodinámico y el de diseño mecánico/ fabricación para optimizar mejor los esfuerzos, en el presente diseño hay elementos con un impacto reducido en el rendimiento total que han supuesto un gran impacto en la carga de trabajo. En definitiva, este es el punto clave ya que la extrema carga de trabajo de esta temporada no es sostenible. Por ejemplo, los bordes de ataque en el fondo son un detalle pequeño cuya inclusión ha supuesto semanas de trabajo y que debido a su complejidad, no han sido ejecutados con el mismo nivel de calidad que otros elementos más sencillos. En resumen, la filosofía debería ser: diseñar siempre las geometrías más simples posibles y mantener el número de componentes complejos al mínimo, dedicando en cada caso tiempo a establecer si merece la pena o no ese aumento de complejidad.
- En líneas similares al anterior punto, plantear un cambio de método de fabricación para fabricar los perfiles grandes con núcleo de espuma de la misma forma que los pequeños, según se ha demostrado en la temporada, los perfiles con núcleo de espuma tardan horas o días en ser fabricados en vez de semanas y estructuralmente han demostrado ser mas rígidos y resistentes. Este cambio implicaría resolver una



serie de problemas, en concreto, la dificultad de realizar anclajes a perfiles sin estructura interna, no obstante, se considera que las ventajas previamente expuestas justifican la búsqueda de una solución a dicho problema.

- Mejorar la rigidez de FW y UT para evitar el uso de tensores:
 - FW: El uso de fibras unidireccionales de alto gramaje en zonas localizadas como forma de aumentar la rigidez sin impactar en el peso.
 - UT: Rediseño del suelo modular para evitar los problemas de rigidez.
- Reducir el tiempo de ensamblaje/ desensamblaje de los componentes: El tiempo en competición es un recurso crítico, por lo que se considera que implementar mecanismos tipo quick-release podría suponer una gran ventaja, aunque supusiera un ligero aumento de peso.
- Mejoras de rendimiento (ligereza): No se considera un punto crítico de mejora ya que el paquete actual es competitivo en peso, pero:
 - Sustituir insertos macizos de aluminio en paneles sándwich por insertos huecos, de carbono forjado, impresión 3D de resina u otra alternativa más ligera.
 - Reducir el número de capas de carbono en elementos no estructurales como flaps.
 - Evitar el uso de grandes y pesados insertos de impresión 3D en zonas de geometría compleja (bordes del fondo)

Conclusiones personales:

Me gustaría redactar este apartado en primera persona y dedicarlo en especial a cualquier persona que se plantee formar parte de un equipo de formula student. Cuando digo formar parte, no me refiero a meramente ser un nombre más en el excel de miembros sino a darlo todo, a dejar una huella indeleble tanto en equipo como en ti mismo. De los 70 miembros que forman un equipo, es una realidad manifiesta que más de la mitad de las horas se reparten entre unas 10-20 personas. Cualquier persona que haya tomado un papel de responsabilidad en un equipo de formula student coincidirá conmigo en que es una experiencia vital única, el precio a pagar es elevado y el beneficio es el que cada uno personalmente saque ya que no hay un salario al final de cada mes.

El coste personal de la realización de este proyecto no es pequeño ni se debe tomar a la ligera. En mi caso alrededor de 1500h horas de trabajo en los 9 meses que dura la temporada, constando de 3 meses de ritmo medio y 6 meses de trabajo frenético los 7 días de la semana, semana tras semana.

Una reducción considerable del tiempo dedicado a la universidad (no por gusto), meses en los que no se le dedica nada de tiempo fuera de las clases, sino que se estudia y se hacen los trabajos y tareas de unas asignatura durante las clases de otras. (Ruego al personal docente que lea este documento que no tome de forma personal esta medida desesperada)



Por primera vez durante el transcurso del máster aprobados justos y convocatorias “no presentadas” y no solo una sino dos.

Vida social inexistente y mínimo tiempo dedicado a hobbies o deporte entre los meses de febrero y julio.

Mencionado el coste, es lo propio mencionar también el beneficio obtenido:

- En mi caso, ser fichado por una empresa del sector espacial para trabajar a tiempo completo como ingeniero de materiales compuestos antes de acabar el máster. Entrar en un sector apasionante sin siquiera tener que pasar un periodo de prácticas.
- Desarrollo personal: Habilidades de liderazgo para gestionar un equipo de 9 miembros, la capacidad de ser resolutivo ante situaciones complejas y de estrés. El saber cómo es llevar un proyecto cuando no hay un profesor, un padre o un jefe al que rendir cuentas sino solo tu compañeros que confían en ti y las exigencias que te impones a ti mismo.
- Desarrollo técnico: Adquisición de conocimientos y experiencia en un ámbito apasionante como son los materiales compuestos y la fabricación en general.
- Networking: Yo lo creo, pero es difícil demostrar que pasando por los equipo se acaba conociendo a los ingenieros mas brillantes de la promoción. Lo que no es difícil de demostrar es que se acaba conociendo a los ingenieros más trabajadores y apasionados, así como representantes de muchas empresas.

Dicho todo esto, me gustaría concluir admitiendo que en realidad nunca estuve en el equipo por ninguna de las razones previamente mencionadas sino por la simple llana y egoísta razón de que me encanta.



Bibliografía

- Arnold's Design. (2017). *DIY Hot wire foam cutter, what it does, and how to cut an airfoil* <https://www.youtube.com/watch?v=ZlQZFib8PiM>.
- Comseal Composite. (2025). *Comseal composite catalogue* <https://comsealcomposites.com/product/carbon-fibre-prepreg/>.
- Easy Composites Ltd. (2022). *Building a Rear Wing with Carbon Fibre and Nomex* <https://www.youtube.com/watch?v=jsT561opKrU&t=943s>.
- Fast Mag. (2020). *La primera carrera de autos se celebró un 22 de julio* <https://fast-mag.com/la-primera-carrera-de-autos-se-celebro-un-22-de-julio/>.
- Formula Student Oulu. (2025). *Team* <https://fsoulu.fi/team/>.
- Good Roads. (2021). *Making a Hot wire cutter for shaping Foam* <https://www.youtube.com/watch?v=vXT49RqF6Qc>.
- Hitachi Electron Microscope. (2021). *It's International Civil Aviation Day* https://x.com/hitachi_em/status/1468133562700660737.
- MART_FS. (2025). *Archivos históricos del equipo*.
- Penn, Z. (2015). *Vacuum infusion dynamics questions* <https://www.thehulltruth.com/boating-forum/727441-vacuum-infusion-dynamics-questions.html>.
- Racecar Engineering by Wouter Remmerie. (2019). *What is an Aero Map?* <https://www.racecar-engineering.com/tech-explained/what-is-an-aero-map/>.
- Real Academia Española. (s.f.). *Diccionario de la Lengua Española*.
- reddit, C. (2021). *With all the talk about the clean 2022 aero rn I just wanted to remind everyone of what front wings looked like a few years ago (2018)* https://www.reddit.com/r/formula1/comments/su7iet/with_all_the_talk_about_the_clean_2022_aero_rn_i/.
- Reddit, D. (2021). *The RB16B's Bargeboard in Turkey Last Year was Truly a Thing of Beauty* https://www.reddit.com/r/formula1/comments/wj9biv/the_rb16bs_bargeboard_in_turkey_last_year_was/.
- Sicomín. (2015). *SR 1700 High performance epoxy laminating resin TDS* https://sicomin.com/datasheets/sr1700_sd280x_sd7820.pdf.
- Tech, W. T. (2019). *Willem Toet explains...CFD Post Processing* <https://www.racetechmag.com/2019/02/willem-toet-explains-cfd-post-processing/>.



Total Boat. (2025). *WET LAY UP* <https://www.totalboat.com/pages/wet-layup-2>.

wikipedia. (2025). *Lotus 49* https://en.wikipedia.org/wiki/Lotus_49.