



TRABAJO FINAL DE GRADO

Diseño y Fabricación de una Rueda de Bicicleta en Material Compuesto



Realizado por:

Madramany Núñez, Borja (bormadnu@etsid.upv.es)

Director:

García Manrique, Juan Antonio (jugarcia@mcm.upv.es)

Agradecimientos

Podría decir que comencé este trabajo cuando todavía cursaba 3º de Ingeniería Aero-náutica aun cuando no habían salido las posibles proyectos de final de grado, pero creo que mentiría. Comencé este trabajo desde muy joven, cuando era un gran apasionado de las motos y las bicicletas. Del amor a la velocidad me surgieron el mayor motivo para estudiar esta carrera, la aerodinámica, sin olvidar mis ansias de poder diseñar y fabricar algo con mis propias manos. A lo largo de la carrera he notado que hoy en día el ingeniero apenas pueda conectar con el producto que diseña, porque otro lo fabricará; o con el que fabrica, porque otro lo habrá diseñado.

Es prácticamente un obligación darle mi más sincero agradecimiento a Juan Antonio García, una persona y un forofó de involucrarse en cualquier proyecto fuera de lo habitual, por haberme dejado desarrollar este proyecto. No titubeó ni un instante cuando le presente mi idea, y han sido innumerables ocasiones en las que me ha animado a hacer más experimentos y no tener miedo a fallar en algo que he calculado y desarrollado por mi mismo.

Otra de las grandes mentes que he tenido el placer de disfrutar es las del reciente Doctor Rene Hoto, al cual es apasionante mostrarle una duda o inquietud debido al intereses que muestra por ella y la gran facilidad que tiene para idealizarlas.

En la universidad he pasado muchas horas realizando el proyecto, pero no más que en casa, y en ella siempre estaba mi familia mostrando el máximo intereses al explicarle algo que llevaba desarrollando 2 años y al comprenderme cuando después de numerosos experimentos comenzaba a desmoronarme. Ha sido un placer, poder involucrar a mi padre en este proyecto de manera directa, como mecánico que es, me enseñó durante muchos veranos que el que crea una pieza no tiene ni la más remota idea de como funciona. La que la conoce es la que trabaja con ella día a día, y todos esos conocimientos son capaces de solventar muchos inconvenientes que los libros y los cálculos computacionales no enseñan nunca.

Por último, debo nombrar a la persona tiene parte de este proyecto, que es mi pareja Daniela. Estos últimos meses ha escuchado con gran devoción lo que eran las mallas, su acoplamiento, los ensayos, la fibra de carbono y más tecnicismos de los que se dan en ingeniería. Nunca ha dejado que desista en mi proyecto, en mi sueño.

Quiero daros las gracias a todos porque habéis creído en mi mucho más que yo, y eso ha hecho posible este interminable proyecto.

Resumen

El siguiente proyecto intenta agrupar las fases de diseño y fabricación en las que un producto se ve envuelto. La decisión de realizar una rueda de bicicleta es debido a que en la última década se está viviendo una gran evolución tecnológica en el sector del ciclismo. Con la utilización de métodos numéricos se realiza un estudio paramétrico sobre las diferentes piezas de una rueda en los campos de estructuras y aerodinámica.

En la parte de diseño, en la parte de aerodinámica, se analiza como afecta el ancho y el largo del perfil del aro de la rueda al drag en un gran abanico de casos de viento. En la parte estructural, ese estudio se realiza sobre todos los componentes de la rueda. En el aro, también se analiza como afectan los mismo parámetros del estudio aerodinámico. Además, se estudia la cantidad y el tipo de radiado de la rueda para diferentes secciones de radios. En el buje, idealizando la geometría como un cilindro y un anillo unido a él, aparecen parámetros de diseño como son el espesor, la longitud y el diámetro de cada parte del componente. Después de los estudios, para dimensionar la rueda, un análisis computacional con material compuesto es realizado.

En la parte de fabricación, se busca encontrar un método para todas las piezas más que fabricar una rueda. Se utilizan diferentes técnicas de fabricación y solo en una se utiliza una máquina de control numérico. Otra de las máquinas usadas es una impresora 3D que sirve para fabricar moldes y poder comparar la calidad por diferentes procesos de fabricación. Otros moldes para las partes de las ruedas se consiguen en ferreterías. Se focaliza una gran parte del trabajo en la impresión 3D dado que facilita mucho la creación de moldes en el campo de la investigación debido a que es posible, en un corto intervalo de tiempo y con pocos recursos económicos, poder disponer de diferentes piezas, con geometrías diferentes, para comparar y poder ensayarlas.

Palabras clave: Diseño, Fabricación, Rueda, Bicicleta, Material Compuesto, Aerodinámica.

Abstract

This project aims to agroup many of the phases in which a product is wrapped as they are design and manufacturing. It was decided to make a wheel because in the last decade we are seeing a technological evolution in the field of cycling. Using numerical methods a parametric study is performed in the field of structure and aerodynamic.

In the design part, in the aerodynamic case, it analyses how the width and the profile of the rim affect to the drag in a wide range of cases of wind. In the structure case another parametric stude is done but with all wheel components. The widht and the profile lenght of the rim it analyzed too. Furthermore, the amount and the type of the wheel radiate with differents forms of the spoke section. In the hub, idealizing the geometry as a cylinder and a ring, appear parametres such as the thickness, the lenght and the diameter of the cylinder and the ring. After this studies, to measure the wheel, a computational analysis with composite material characterized is realized.

In the manufacturing part, only one component is manufactured with a CNC machine. The molds of the other parts of the wheel are ítems thar you can buy at any hardware store. After a 3D machine is used to manufacture the mold to compare the quality. Using this machine is an improvement in the field of research because it reduces the time of the investigation because is possible to reduce the time of manufacture the mold and you can try many more geometries.

Keywords: Design, Manufacturing, Bicycle, Wheel, Composite, Aerodynamic.

Índice general

Lista de tablas	11
Lista de figuras	13
I PROLEGÓMENO	21
1 INTRODUCCIÓN	23
1.1 Motivación	23
1.2 Contexto	23
1.3 Elección	27
1.4 Partes de una Rueda de Bicicleta	29
2 OBJETIVO	33
2.1 Punto de Diseño	33
II DESARROLLO	37
3 REGLAMENTACIÓN UCI	41
3.1 Restricciones Geométricas	41
3.2 Test de Impacto	42
4 ¿ QUÉ FUERZAS ACTÚAN EN LA RUEDA ?	47
4.1 Fuerzas Estáticas	49
4.1.1 Tensión de los radios	49
4.1.2 Presión de los neumáticos	50
4.2 Dinámicas	52
4.2.1 Fuerzas Radiales	52
4.2.2 Fuerzas Laterales	53
4.2.3 Fuerzas de Torsión	54
5 ANÁLISIS PRELIMINAR DE DIFERENTES RUEDAS	55
5.1 Análisis de diferentes Fabricantes	55
5.1.1 Zipp	55
5.1.2 Bontrager	58
5.1.3 Lightweight	59
5.1.4 Corima	60
5.1.5 Mavic	61
5.1.6 Reynolds	62

6	MODELOS DE RUEDAS DISEÑADOS	63
6.1	Aro	63
6.2	Radio	64
6.2.1	Radiado	65
6.3	Buje	65
6.3.1	Ejes del buje	65
7	AERODINÁMICA	67
7.1	Conceptos Preliminares	67
7.1.1	Viento Relativo	67
7.1.2	Tipos de Estudios	70
7.1.3	Parámetros de Estudio	71
7.2	Dominio de Estudio	72
7.3	Mallado	73
7.3.1	Módulo de mallado	74
7.3.2	Módulo de simulación	74
7.3.3	Parámetros del solver	75
7.3.4	Calidad del mallado	76
7.3.5	Mejorar la calidad de la malla	76
7.3.6	Convergencia de Malla	78
7.4	Resultados del estudio aerodinámico	85
7.4.1	Drag generado por el aro	85
7.5	Conclusiones estudio aerodinámico	87
8	ESTUDIO ESTRUCTURAL	89
8.1	Condiciones de Contorno	89
8.1.1	Test de Rigidez Frontal	89
8.1.2	Test de Rigidez Lateral	90
8.2	Mallado	92
8.3	Estudio de Rigidez Frontal	93
8.3.1	Resultados Estudio Rigidez Frontal	94
8.4	Rigidez lateral según la Cantidad y Tipo de Radiado	96
8.4.1	Resultados de Tipo de Radiado	100
8.4.2	Resultados de Número de Radios	104
8.5	Rigidez Torsional	105
8.6	Estudio de Rigidez lateral según el tipo de aro	108
8.6.1	Caso I	108
8.6.2	Caso II	111
8.7	Estudio de Rigidez Lateral según el tipo de radio	114
8.7.1	Número de radios equivalente	117
8.8	Estudio de Rigidez Lateral según el tipo de buje	118
8.9	Conclusión de los estudios	121
9	GEOMETRÍA PRELIMINAR	123
9.1	Aro	123
9.2	Buje	123
9.3	Radio	123
9.3.1	Radiado	123
9.3.2	Número y tipo de Radio.	124

9.3.3 Drag Generado por dos Tipos de Ruedas con la misma Rigidez Lateral 24

10 ANÁLISIS DE LA RUEDA CON FIBRA DE CARBONO	125
10.1 Material Disponible . . . . .	.126
10.1.1 Introducir los materiales en el Software . . . . .	.127
10.2 Idealización de la Rueda . . . . .	.127
10.2.1 Idealización del buje . . . . .	.128
10.2.2 Idealización del Aro . . . . .	.129
10.2.3 Idealización de los Radios . . . . .	.130
10.3 Ensayo I . . . . .	.131
10.3.1 Mallado . . . . .	.131
10.3.2 Laminado . . . . .	.133
10.3.3 Convergencia de malla . . . . .	.136
10.3.4 Preparación de los resultados . . . . .	.137
10.3.5 Resultados . . . . .	.138
10.4 Ensayo II . . . . .	.140
10.4.1 Laminado . . . . .	.140
10.4.2 Resultados . . . . .	.141
11 FABRICACIÓN	143
11.1 Restricciones de Fabricación . . . . .	.143
11.2 Fabricación en Material Compuesto . . . . .	.146
11.3 Ejemplo de Fabricación con Material Preimpegnado realizando Vacío . . . . .	.152
11.4 Fabricación de los Radios . . . . .	.154
11.4.1 Laminado . . . . .	.154
11.4.2 Experimento Radio 1 . . . . .	.158
11.4.3 Experimento Radio 2 . . . . .	.161
11.4.4 Experimento Radio 3 . . . . .	.162
11.4.5 Experimento Radio 4 . . . . .	.164
11.4.6 Experimento Radio 5 . . . . .	.166
11.5 Fabricación del Buje . . . . .	.168
11.5.1 Tubo principal . . . . .	.168
11.5.2 Pared del buje . . . . .	.184
11.5.3 Ensamblaje . . . . .	.199
11.6 Fabricación del Aro . . . . .	.201
11.6.1 Molde Exterior . . . . .	.202
11.6.2 Molde Interior . . . . .	.221
11.6.3 Ensamblaje de los Moldes del Aro . . . . .	.226
11.6.4 Laminado . . . . .	.227
11.6.5 Bolsa de Aire . . . . .	.230
11.6.6 Fabricación I . . . . .	.234
11.6.7 Fabricación II . . . . .	.236
III EPÍLOGO	241
12 PRESUPUESTO	243
12.1 Bienes e Inmuebles . . . . .	.244
12.2 Materiales utilizados durante el proyecto . . . . .	.245

12.3	Coste del personal . . . . .	.246
12.4	Coste Unitario de la Rueda . . . . .	.247
13	CONCLUSIÓN	249
13.1	Objetivos . . . . .	.249
13.2	Contexto General . . . . .	.250
14	TRABAJO FUTURO	251
	Bibliografía	253
	Referencias . . . . .	.253
	Anexos	258
.1	Planos . . . . .	.261

Lista de tablas

6.1	Modelos de aros	63
6.2	Modelos de radio	64
6.3	Modelos de buje	66
7.1	Variables para el desarrollo matemático del viento relativo	68
7.2	Casos de estudio para el estudio paramétrico aerodinámico	70
7.3	Drag generado por los diferentes aros para los 4 casos de estudio.	85
8.1	Resultados del test frontal	94
8.2	Deformación y tensión máxima para la configuración radial I y caso I . . .	97
8.3	Deformación y tensión máxima para la configuración radial II y caso I . . .	97
8.4	Deformación y tensión máxima para la configuración 2 cruces y caso I . .	97
8.5	Deformación y tensión máxima para la configuración radial I y caso II . . .	98
8.6	Deformación y tensión máxima para la configuración radial II y caso II . .	98
8.7	Deformación y tensión máxima para la configuración 2 cruces y caso II . .	98
8.8	Deformación y tensión máxima el estudio de rigidez torsional	105
8.9	Deformación y tensión máxima según el tipo de aro para el caso I	108
8.10	Deformación y tensión máxima según el tipo de aro para el caso II	111
8.11	Deformación y tensión máxima según el tipo de radio para el caso I	114
8.12	Relación de rigidez-volumen según el tipo de radio para el caso I	115
8.13	Deformación y tensión máxima para un rueda del mismo peso pero diferente número de radios.	117
8.14	Deformación y tensión máxima para diferentes modelos de buje para el caso I	118
9.1	Drag para dos modelos de ruedas con el mismo aro y rigidez lateral.	124
10.1	Convergencia de Malla. Valores de los tamaños de malla de cada componente.	137
10.2	Resultados. Deformación para el caso I	138
10.3	Resultados. Índices de fallo para el ensayo I	138
10.4	Resultados. Deformación para el caso II	141
10.5	Resultados. Índices de fallo para el ensayo II	141
11.1	Experimento para obtener la longitud necesaria de fibra a cortar para el radio	156
12.1	Presupuesto. Coste de la maquinaria empleada durante el proyecto	244
12.2	Presupuesto. Materiales empleados durante el proyecto	245
12.3	Presupuesto. Coste del Personal	246

12.4	Presupuesto. Coste de los moldes	247
12.5	Presupuesto. Coste unitario de la rueda	247
13.1	Objetivo. Peso de la rueda	249

Lista de figuras

1.1	Producción temporal mundial de bicicletas y automóviles. (Fuente: World-watch Institute)	24
1.2	Ventas en Gran Bretaña de bicicletas entre 2000 y 2013. (Fuente: European Bicycle Market and Industry Profile)	24
1.3	Número de licencias federativas españolas en ciclismo. (Fuente: Anuario de estadísticas deportivas. Ministerio de Cultura, Educación y Deporte)	25
1.4	Cambio inalámbrico Sram. (Fuente: Top5bicis)	25
1.5	Túnel de viento de la compañía <i>Specialized</i> . (Fuente: bikerumor)	26
1.6	Cuadro Scott Cr1. (Fuente: Scott)	26
1.7	Diferentes partes de una rueda (Fuente: Zipp)	29
1.8	Partes de un aro (Fuente: Propia)	29
1.9	Diferentes tipos de radios (Fuente: Sapim S.L.)	30
1.10	Diferentes tipos de radiado (Fuente: Enve Composite)	31
1.11	Cabecilla de un radio (Fuente: Dt Swiss)	31
1.12	Partes del buje delantero (Fuente: Dt Swiss)	32
3.1	Rueda De Contrareloj aprobada por la UCI (Fuente: Hed)	41
3.2	Resumen del test de impacto (Fuente: Sirris)	42
3.3	Zonas de impacto sobre la rueda (Fuente: Propia)	43
3.4	Geometría del martillo de impacto (Fuente: Propia)	44
3.5	Puntos de impacto para distancias entre radios superior a 20 cm. (Fuente: Propia)	44
4.1	Fuerzas que actúan sobre la rueda. (Fuente: Propia)	48
4.2	Diferentes tipos de roturas debido a la tensión de los radios (Fuente: felixwong.com y Chichonera.blogspot)	49
4.3	Neumático Tubular (Fuente: Continental Tyres).	50
4.4	Neumático de cubierta (Fuente: Continental Tyres).	51
4.5	Sección de aro de Tubular (izq.) y Cubierta (drc.) (Fuente: Bikeradar).	51
4.6	Deformación Radial (Fuente: ref. [13])	52
4.7	Deformación Radial (Fuente: Propia)	53
4.8	Movimiento de la rueda durante un sprint (Fuente: bbc.com)	53
5.1	Aro Zipp 303 (Fuente: Velonews)	56
5.2	Evolución del perfil del aro (Fuente: Jameson King)	57
5.3	Bontrager Aelous 3 3D (Fuente: Bontrager)	58
5.4	Lightweight Meilenstein (Fuente: Bikerumor)	59
5.5	Corima MCC+ (Fuente: Corima)	60
5.6	Mavic Cosmic Carbone Ultimate (Fuente: Mavic)	61

5.7	Test de rigidez frontal sobre unas ruedas Reynolds RZR (Fuente: Roues Artisanales)	62
5.8	Rueda Reynolds RZR 92 (Fuente: Reynolds)	62
6.1	Diferentes modelos de aro diseñados numerado de izquierda a derecha. (Fuente: Propia)	64
6.2	Piezas del buje (Fuente: Propia)	65
6.3	Configuración global del buje (Fuente: Propia)	66
7.1	Viento Relativo (Fuente: Reynolds Bicycle)	68
7.2	Ángulos relativos en función del ángulo del viento para diferentes velocidades del viento y la bicicleta. (Fuente: Propia)	69
7.3	Sección modelos de aros propios. (Fuente: Propia)	71
7.4	Sección modelos de aros para comparar. (Fuente: Propia)	71
7.5	Idealización de la geometría del aro. (Fuente: Propia)	72
7.6	Dimensiones del dominio de estudio. (Fuente: Propia)	73
7.7	Malla del aro realizada en el módulo de mallado. (Fuente: Propia)	74
7.8	Relación de Aspecto de un elemento. (Fuente: Propia)	76
7.9	Incremento del elemento mediante el volumen como factor para mejorar la calidad de la malla. (Fuente: Documentación NX 9.0)	77
7.10	Variación basada en la curvatura de la superficie como factor para mejorar la calidad de la malla. (Fuente: Documentación NX 9.0)	77
7.11	Número de nodos en función del número de simulaciones realizadas para la convergencia de malla. (Fuente: Propia)	78
7.12	Drag y velocidad máxima en función del número de simulaciones realizadas para la convergencia de malla. (Fuente: Propia)	78
7.13	Drag generado por cada aro de estudio para todos los casos. (Fuente: Propia)	85
8.1	Configuración del Ensayo frontal (Fuente: Propia)	90
8.2	Configuración del Ensayo lateral (Fuente: Propia)	90
8.3	Tipos de Radiado. Radial I (Izq.) y Radial II (Drc.) (Fuente: Propia)	93
8.4	Deformación máxima situada para estudio de rigidez frontal (Fuente: Propia)	95
8.5	Posición de aplicación de las fuerzas sobre los nodos de la malla que definen la rueda. (Caso II (Izq.) y Caso I (Drc.)) (Fuente: Propia)	96
8.6	Deformación máxima situada en el punto de aplicación de la fuerza, en este momento para el caso II (Fuente: Propia)	99
8.7	Tensión máxima situada en el punto de de unión del radio y el buje, en este momento para el caso II (Fuente: Propia)	99
8.8	Deformación para el caso I y todas las configuraciones (Fuente: Propia)	100
8.9	Tensión para el caso I y todas las configuraciones (Fuente: Propia)	101
8.10	Deformación para el caso II y todas las configuraciones (Fuente: Propia)	102
8.11	Tensión para el caso II y todas las configuraciones (Fuente: Propia)	103
8.12	Deformación para el estudio de rigidez torsional (Fuente: Propia)	106
8.13	Deformación máxima para todos los modelos de aro y el caso I (Fuente: Propia)	109
8.14	Tensión máxima para todos los modelos de aro y el caso I (Fuente: Propia)	110

8.15	Deformación máxima para todos los modelos de aro y el caso II (Fuente: Propia)	112
8.16	Tensión máxima para todos los modelos de aro y el caso II (Fuente: Propia)	112
8.17	Deformación máxima para todos los modelos de radio y el caso I (Fuente: Propia)	115
8.18	Tensión máxima para todos los modelos de radio y el caso I (Fuente: Propia)	116
8.19	Deformación máxima para todos los modelos de buje y el caso I (Fuente: Propia)	119
8.20	Tensión máxima para todos los modelos de buje y el caso I (Fuente: Propia)	120
10.1	Mallado. Malla del buje. (Fuente: ACP Composite)	126
10.2	Idealización. Detalle del proceso de idealización del buje (Fuente: Propia)	129
10.3	Idealización. Detalle del proceso de idealización del aro. (Fuente: Propia)	130
10.4	Mallado. Malla del buje. (Fuente: Propia)	131
10.5	Laminado. Orientación de las fibras en el radio. (Fuente: Propia)	133
10.6	Laminado. Tipos de orientación de las fibras en el aro. (Fuente: Propia)	134
10.7	Laminado. Orientación de las fibras en el tubo del buje. (Fuente: Propia)	135
10.8	Laminado. Orientación de las fibras en la pared del buje. (Fuente: Propia)	136
10.9	Convergencia de Malla. Deformación máxima en función del número de nodos. (Fuente: Propia)	136
10.10	Laminado. Laminado del aro para el ensayo II. (Fuente: Propia)	140
11.1	Impresora 3D marca Zortrax M 200 (Fuente: Impresora3dprinter.com)	144
11.2	Fresadora de Control Numérico de la empresa Barcenas modelo SW 1325 (Fuente: cncbarcenas.com)	145
11.3	Teflón utilizado para facilitar el desmoldeo (Fuente: tudiras.com)	146
11.4	Cera Desmoldeante Paste Wiz (Fuente: jamat.net)	147
11.5	Malla de Guiado I (Fuente: Propia)	148
11.6	Malla de Guiado II (Fuente: Propia)	149
11.7	Manta Absorción (Fuente: Propia)	149
11.8	Bolsa de Vacío (Fuente: Propia)	150
11.9	Masilla de Cierre para bolsa de vacío (Fuente: Propia)	150
11.10	Toma de Vacío (Fuente: Propia)	151
11.11	Laminación del radio (Fuente: Propia)	154
11.12	Corte con la ayuda de una placa metálica y un cutter (Fuente: Propia)	155
11.13	Placa de fibra de carbono para el radio sin laminar (Fuente: Propia)	155
11.14	Experimento 1. Colocación de la malla para que la resina fluya. (Fuente: Propia)	158
11.15	Experimento 1. Colocación de la manta de absorción. (Fuente: Propia)	159
11.16	Experimento 1. Montaje (Fuente: Propia)	159
11.17	Experimento 1. Resultado de la manta de absorción. (Fuente: Propia)	160
11.18	Experimento 1. Resultado del radio. (Fuente: Propia)	160
11.19	Experimento 2. Montaje (Fuente: Propia)	161
11.20	Experimento 2. Resultado del radio. (Fuente: Propia)	161
11.21	Experimento 3. Colocación de la malla de guiado. (Fuente: Propia)	162
11.22	Experimento 4. Montaje. (Fuente: Propia)	165

11.23	Experimento 4. Deformación de los extremos del radio. (Fuente: Propia)	166
11.24	Experimento 5. Resultado del radio final. (Fuente: Propia)	166
11.25	Experimento 5. Detalle de la superficie del radio final. (Fuente: Propia)	167
11.26	Experimento 5. Detalle de la superficie después de la etapa de mejora de la superficie. (Fuente: Propia)	167
11.27	Experimento 1. Montaje (Fuente: Propia)	169
11.28	Experimento 1. Detalle de como fluye la masilla para tapar los poros (Fuente: Propia)	170
11.29	Experimento 1. Residuos de resina en ambos tubos (Fuente: Propia)	170
11.30	Experimento 1. Desglose de los elementos después del curado. (Fuente: Propia)	171
11.31	Experimento 1. Vista isométrica del Tubo de Carbono . (Fuente: Propia)	171
11.32	Experimento 1. Vista lateral del Tubo de Carbono. (Fuente: Propia)	172
11.33	Experimento 2. Montaje. (Fuente: Propia)	173
11.34	Experimento 2. Resultado del tubo de carbono fabricado con fibra unidireccional. (Fuente: Propia)	174
11.35	Experimento 2. Resultado del tubo de carbono fabricado con fibra 0-90°. (Fuente: Propia)	174
11.36	Experimento 3. Tubo realizado mediante impresión 3D. (Fuente: Propia)	175
11.37	Experimento 3. Detalle de la superficie del tubo realizado mediante impresión 3D. (Fuente: Propia)	176
11.38	Experimento 3. Diámetro externo del molde inicial. (Fuente: Propia)	176
11.39	Experimento 3. Diámetro externo del molde con una capa de teflón. (Fuente: Propia)	177
11.40	Experimento 3. Instalación de la malla de guiado I. (Fuente: Propia)	177
11.41	Experimento 3. Instalación de la manta de absorción sobre la malla de guiado II. (Fuente: Propia)	177
11.42	Experimento 3. Preparación de la bolsa de vacío. (Fuente: Propia)	178
11.43	Experimento 3. Bolsa de vacío con un compartimento que realiza el vacío sobre las dos caras del molde. (Fuente: Propia)	178
11.44	Experimento 3. Restos de resina en la malla de guiado II. (Fuente: Propia)	179
11.45	Experimento 3. Exceso de resina en la unión del tubo de carbono y el molde. (Fuente: Propia)	179
11.46	Experimento 3. Después del proceso de curado el molde deja de tener una sección circular. (Fuente: Propia)	180
11.47	Experimento 5. Restos de resina en la manta de absorción. (Fuente: Propia)	182
11.48	Experimento 5. Restos de resina en la malla de guiado II. (Fuente: Propia)	182
11.49	Experimento 5. Restos de resina en la malla de guiado II. (Fuente: Propia)	183
11.50	Experimento 5. Resultado del tubo después del lijado para eliminar las imperfecciones. (Fuente: Propia)	183
11.51	Diseño del Molde. Piezas que componen el molde. (Fuente: Propia)	185
11.52	Diseño del Molde. Rebaba para poder conocer la longitud final de la pieza. (Fuente: Propia)	186
11.53	Fabricación del Molde. Colocación de las piezas en la bancada de la maquina. (Fuente: Propia)	186
11.54	Fabricación del Molde. Pre-visualización de las piezas que se van a fabricar. (Fuente: Propia)	187

11.55	Fabricación del Molde. Durante el proceso de fabricación de los moldes. (Fuente: Propia)	188
11.56	Fabricación del Molde. Vista isométrica del molde acabado. (Fuente: Propia)	188
11.57	Fabricación del Molde. Vista trasera del molde acabado. (Fuente: Propia)	189
11.58	Fabricación del Molde. Detalle de los soportes creados para que el material se deposite adecuadamente. (Fuente: Propia)	189
11.59	Preparación del Molde. Molde Interior habiendo retirado la malla inferior. (Fuente: Propia)	190
11.60	Preparación del Molde. Sustracción del soporte inferior y los realizados para poder fabricar en condiciones la pieza. (Fuente: Propia)	190
11.61	Preparación del Molde. Resultado molde exterior. (Fuente: Propia)	191
11.62	Preparación del Molde. Colocación de todas las partes del molde. (Fuente: Propia)	191
11.63	Preparación del Molde. Detalle superior de los problemas de ensamblaje del molde. (Fuente: Propia)	192
11.64	Preparación del Molde. Detalle inferior de los problemas de ensamblaje del molde. (Fuente: Propia)	192
11.65	Laminado. Resultado del laminado sin curar. (Fuente: Propia)	193
11.66	Laminado. Ensamble del molde con la laminación realizada. (Fuente: Propia)	194
11.67	Desmoldeo buje. Restos de resina sobre la malla de guiado II y la manta de absorción. (Fuente: Propia)	195
11.68	Desmoldeo buje. Restos de resina sobre el propio molde. (Fuente: Propia)	195
11.69	Desmoldeo buje. Estado del molde después del curado. (Fuente: Propia)	196
11.70	Desmoldeo buje. Estado del molde del buje después de la rotura de una parte del molde exterior. (Fuente: Propia)	196
11.71	Desmoldeo buje. Detalle del exceso de material acumulado. (Fuente: Propia)	197
11.72	Resultado Pared del Bujes. Pared del buje final. (Fuente: Propia)	198
11.73	Resultado Pared del Bujes. Detalle de la parte inferior. (Fuente: Propia)	198
11.74	Resultado Pared del Bujes. Detalle del extremo de la pieza. (Fuente: Propia)	199
11.75	Ensamblaje. Diámetro exterior del tubo fabricado y rectificado. (Fuente: Propia)	199
11.76	Ensamblaje. Diámetro interior de la pared del buje. (Fuente: Propia)	200
11.77	Punto crítico donde se genera la sombra y obliga a realizar un mínimo de 3 piezas para realizar el molde. (Fuente: Propia)	201
11.78	Molde Exterior. Diseño del molde exterior. (Fuente: Propia)	202
11.79	Molde Exterior. Detalle de los puntos donde se realizan los agujeros para alinear las dos partes. (Fuente: Propia)	203
11.80	Molde Exterior. Detalle del sistema de referencia. (Fuente: Propia)	204
11.81	Molde Exterior. Zonas disponibles para ser desbastadas. (Fuente: Propia)	205
11.82	Experimento 1. Resultado de la simulación de la operación de semi-acabado. (Fuente: Propia)	206
11.83	Experimento 1. Resultado de la simulación de la operación de acabado. (Fuente: Propia)	207
11.84	Experimento 1. Resultado del mecanizado. (Fuente: Propia)	208

11.85	Experimento 1. Detalle de la cantidad de crestas dejadas durante la operación. (Fuente: Propia)	209
11.86	Experimento 2. Resultado de la simulación de la operación de semi-acabado. (Fuente: Propia)	210
11.87	Experimento 2. Resultado de la simulación de la primera operación de acabado. (Fuente: Propia)	211
11.88	Experimento 2. Resultado de la simulación de mecanizado del experimento 2. (Fuente: Propia)	212
11.89	Experimento 2. Resultado global del mecanizado. (Fuente: Propia)	213
11.90	Experimento 2. Resultado en detalle de la superficie del mecanizado. (Fuente: Propia)	213
11.91	Experimento 3. Resultado global del mecanizado. (Fuente: Propia)	214
11.92	Experimento 3. Resultado en detalle de la superficie del mecanizado. (Fuente: Propia)	214
11.93	Experimento 4. Durante el momento de mecanizado. (Fuente: Propia)	216
11.94	Experimento 4. Molde exterior mecanizado. (Fuente: Propia)	216
11.95	Preparación del Molde. Corte del tocho donde están las dos partes del molde. (Fuente: Propia)	217
11.96	Preparación del Molde. Realización de los agujeros para poder dejar fijados las dos partes. (Fuente: Propia)	218
11.97	Preparación del Molde. Diferencia entre la parte lijada del molde y la que no lo ha sido. (Fuente: Propia)	219
11.98	Preparación del Molde. Disco especial para pulido. (Fuente: Propia)	219
11.99	Preparación del Molde. Molde después del pulido. (Fuente: Propia)	220
11.100	Molde Interior. Diseño del molde interior. (Fuente: Propia)	221
11.101	Experimento 1. Área de corte I del molde interior. (Fuente: Propia)	222
11.102	Experimento 1. Área de corte II del molde interior. (Fuente: Propia)	222
11.103	Experimento 1. Simulación del mecanizado del molde interior. (Fuente: Propia)	223
11.104	Experimento 1. Estado del tocho después de que el cabezal golpee los límites del tocho. (Fuente: Propia)	223
11.105	Experimento 2. Resultado del molde interior mediante impresión 3D. (Fuente: Propia)	224
11.106	Experimento 2. La base se ha levantado y deformado debido al calor durante el proceso de impresión. (Fuente: Propia)	225
11.107	Experimento 2. Calidad de la superficie después del proceso de impresión 3D. (Fuente: Propia)	225
11.108	Ensamblaje. Proceso de retirada de material del molde interior para que pueda ser instalado. (Fuente: Propia)	226
11.109	Laminado. Configuración del laminado del aro. (Fuente: Propia)	227
11.110	Laminado. Método para comprobar una correcta laminación. (Fuente: Propia)	228
11.111	Laminado. Colocación de las láminas. (Fuente: Propia)	228
11.112	Laminado. Resultado una vez finalizado el proceso de laminación. (Fuente: Propia)	229
11.113	Bolsa de Aire. Embudo para poder introducir el aire dentro de la bolsa. (Fuente: Propia)	230
11.114	Bolsa de Aire. Configuración del experimento 1. (Fuente: Propia)	231

11.115	Bolsa de Aire. Colocación de la bolsa en la parte externa del molde. (Fuente: Propia)	232
11.116	Bolsa de Aire. Colocación de la bolsa en la parte externa del molde. (Fuente: Propia)	233
11.117	Fabricación I. Molde abierto debido a la excesiva presión. (Fuente: Propia)	234
11.118	Fabricación I. Resultado del la primera fabricación del aro. (Fuente: Propia)	235
11.119	Fabricación I. Colocación de la bolsa en la parte externa del molde. (Fuente: Propia)	236
11.120	Fabricación II. Exceso de resina en la conexión del tubo y el molde. (Fuente: Propia)	237
11.121	Fabricación II. Estado del molde tras el desmoldeo. (Fuente: Propia)	237
11.122	Fabricación II. Resultado del aro tras el curado [Vista Isométrica]. (Fuente: Propia)	238
11.123	Fabricación II. Resultado del aro tras el curado [Extremo I]. (Fuente: Propia)	238
11.124	Fabricación II. Resultado del aro tras el curado [Vista Extremo II]. (Fuente: Propia)	239
11.125	Fabricación II. Resultado del aro tras el curado [Vista Superior]. (Fuente: Propia)	239
11.126	Fabricación II. Resultado final del aro. (Fuente: Propia)	240
11.127	Fabricación II. Espesor de la pared vertical del aro. (Fuente: Propia)	240
1	Planos. Buje. (Fuente: Propia)	261
2	Planos. Radio. (Fuente: Propia)	262
3	Planos. Aro. (Fuente: Propia)	263
4	Planos. Detalle de la sección del aro. (Fuente: Propia)	264

Parte I
PROLEGÓMENO

INTRODUCCIÓN

En esta primera parte del presente documento se hablará sobre la motivación que se ha tenido para elegir el trabajo final de grado (de ahora en adelante TFG). Además, debido a que es un proyecto ingenieril se describirán el posible alcance que pueda obtener este proyecto. Por último se explicará cual será la organización de los contenidos del TFG "Fabricación de Ruedas de Bicicleta en Material Compuesto".

1.1 Motivación

Durante el proceso de realización del Grado en Ingeniería Aeronáutica se han ido adquiriendo conocimientos en áreas como la aerodinámica, la resistencia de materiales, los materiales compuestos, la fabricación, entre otros. Por lo tanto, se ha querido recoger todos esas lecciones aprendidas y agruparlas para ser capaz de realizar el proceso de diseño y fabricación de una pieza. El motivo de haber elegido esta tarea es el poder agrupar todas las fases que han de unirse para poder realizar el proceso de obtención de una pieza, algo que no se había realizado con anterioridad a lo largo del grado y que es de vital importancia de cara al futuro laboral poder ser capaz de tener conocimiento de un proceso global y no solo de partes del mismo, con todo los problemas que ello puede llevar.

1.2 Contexto

Definido el proceso, queda definir la pieza. Para ello se realiza una búsqueda para ver que nichos de mercado son los que actualmente se pueden explotar y tengan relación con los conocimientos que se quieren exportar. Aparece por tanto el sector del ciclismo tanto como actividad deportiva y como medio de transporte alternativo al coche. Realizando una primera búsqueda este sector a nivel mundial ha sido uno de los pocos que no se han sido altamente azotados por la crisis que se ha vivido desde hace una década y que tanto ha afectado a muchos sectores de la industria ingenieril. En la figura 1.1 se aprecia el aumento desde los años '70 hasta el año 2005 de la producción de bicicletas frente a los automóviles. Para tener cifras de años más próximos es necesario centrarse en países específicos y en la figura 1.2 se muestra las ventas de bicicletas en Gran Bretaña, que refleja la tendencia de la mayoría de países desarrollados, es decir; un aumento desde 2000 y que en los últimos años se está manteniendo constante.

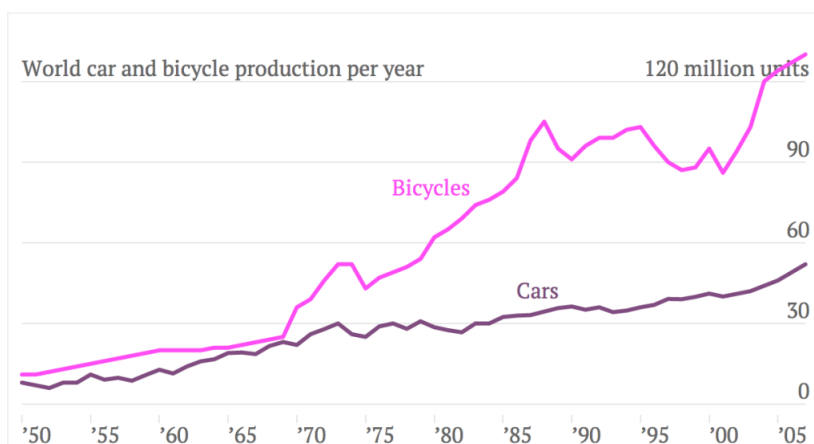


Figura 1.1: Producción temporal mundial de bicicletas y automóviles. (Fuente: World-watch Institute)

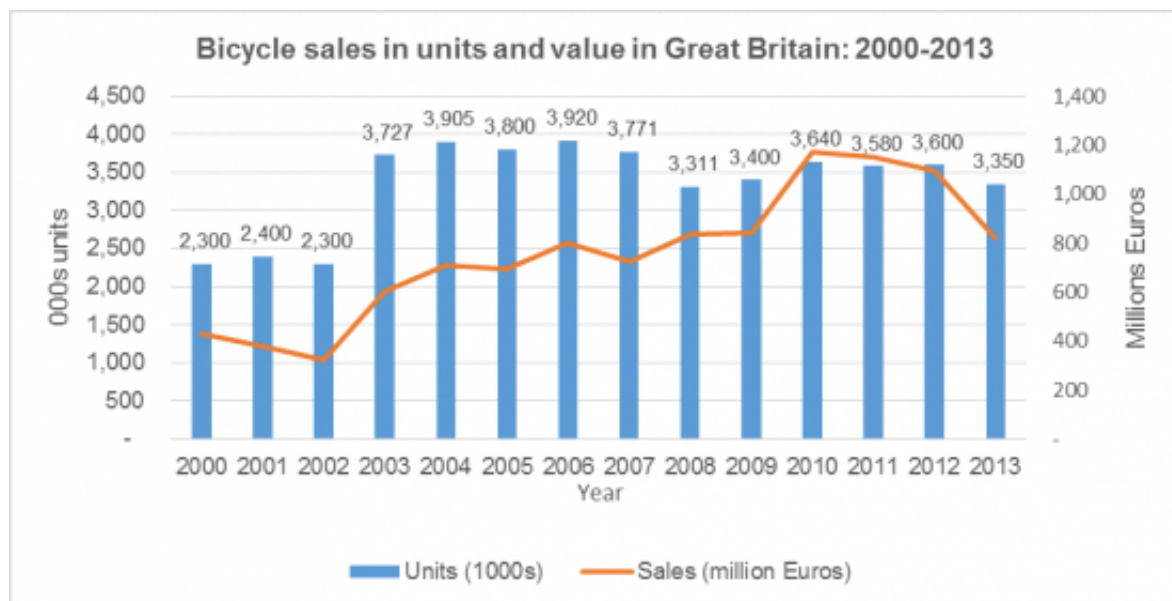


Figura 1.2: Ventas en Gran Bretaña de bicicletas entre 2000 y 2013. (Fuente: European Bicycle Market and Industry Profile)

Por lo tanto desde el punto de vista económico es un sector que goza de cierta libertad para la entrada de un nuevo producto, pues existe un público constante que demanda. Para poder tener unos objetivos ingenieriles que sean similares a los que se han venido estudiando durante el grado, se buscará una pieza dentro del sector del ciclismo como actividad deportiva y no como transporte. En este ámbito este deporte también goza de una gran estabilidad debido a que en España las licencias deportivas se han visto aumentadas en los últimos años como muestra la figura 1.3.



Figura 1.3: Número de licencias federativas españolas en ciclismo. (Fuente: Anuario de estadísticas deportivas. Ministerio de Cultura, Educación y Deporte)

Por lo que se puede apreciar como en los últimos años el número de personas que practican deporte como actividad recreacional o con fines deportivos ha incrementado. En este aspecto se puede apreciar la gran evolución tecnológica que ha ocurrido en el ciclismo de competición en la última década. Se puede citar como ejemplos los siguientes:

- **Sistema de transmisión electrónico.** En 2008 la compañía *Shimano* fue la pionera de la industria sacando al mercado una transmisión electrónica alimentada por baterías. En la actualidad existe otra empresa, *Sram*, que está sacando una transmisión inalámbrica. En la figura 1.4 se puede apreciar el cambio trasero inalámbrico de *Sram*.



Figura 1.4: Cambio inalámbrico Sram. (Fuente: Top5bicis)

- **Aerodinámica.** La compañía estadounidense *Zipp* fue pionera en la década del 2000 por realizar los primeros estudios CDF (Computational Fluid Dynamics) para reducir el drag de las ruedas de las bicicletas y cambió muchas de las teorías que se tenían hasta la fecha sobre como afecta la aerodinámica a la bicicleta. Es por eso que actualmente se conoce varios fabricantes de componentes de bicicletas disponen de sus propios túneles de viento, como es el caso de la propia *Zipp*, *Specialized*, *Trek*, etc. para el estudio y desarrollo de sus productos. En la figura 1.5 se puede ver el tunel de viento de baja velocidad que dispone la marca *Specialized* para sus pruebas.



Figura 1.5: Túnel de viento de la compañía *Specialized*. (Fuente: bikerumor)

- **Estructurales.** Desde que en 1986 la empresa *Kestrel* introdujese el primer cuadro en material compuesto en el sector del ciclismo, nunca se ha dejado de investigar y obtener cuadros y componentes cada vez más ligeros y fiables. Se han estudiado otros materiales alternativos al aluminio como son el titanio o la madera pero ninguno de ellos han conseguido desbancar a la fibra de carbono como el material más elegido para hacer los mejores componentes en el sector de las bicicletas. Como anotación se puede ver en la figura 1.6 el cuadro Scott CR1 con un peso por debajo de un kilo de peso. Este hecho lo consiguió por primera vez la marca suiza Scott en 2001 gracias a un estudio de como realizar la orientación del material compuesto para poder optimizar la laminación.



Figura 1.6: Cuadro Scott Cr1. (Fuente: Scott)

Desde el punto de vista ingenieril poder desarrollar una pieza desde la nada sin ninguna restricción de diseño más que una ventaja puede ser un inconveniente. Así que, intentando dar al TFG un formato más semejante al proceso industrial se seguirán la normativa fijada por la Unión Ciclista Internacional (UCI) para la certificación de la rueda. Existen diferentes asociaciones sobre la cual se podría validar la rueda, como puede ser la Unión Internacional de Triatlón (UIT) o la Unión Ciclista Americana pero la gran totalidad de sus normas están restringidas a las de la UCI. Aunque la certificación de la UCI no sea válida para pruebas que estén fuera de su rango, el poder ser capaz de obtener la certificación UCI hace que puedas obtener el resto de certificaciones. En otras palabras, no ha habido ningún caso conocido en que unas ruedas con certificación UCI no se puedan validar bajo otras restricciones de cualquier otra asociación.

1.3 Elección

Una vez vistos los últimos avances se decide que el TFG tratará sobre el diseño y fabricación de una rueda delantera de bicicleta de material compuesto. El por que de esta decisión se fundamenta en los siguiente motivos.

- **Resistencia de materiales aplicada al material compuesto.** Como se ha citado, se busca agrupar una gran parte de las lecciones aprendidas durante el grado como son la fabricación, la aerodinámica y la resistencia de materiales aplicada a los materiales compuestos. A día de hoy la gran mayoría de los componentes de una bicicleta se podrían realizar en fibra de carbono salvo algunos de ellos como pueden ser los neumáticos y componentes específicos de la transmisión.
- **Aerodinámica.** Desde el punto de vista aerodinámico existen 3 componentes que generan la mayor cantidad de resistencia de la bicicleta: el conjunto cuadro, horquilla y las ruedas. Existen diferentes modalidades de ciclismo y en el que más prima la aerodinámica es en el de carretera y/o pista, por lo que la pieza deberá ir destinada a este subsector del ciclismo. En el artículo ("CYCLING'S A DRAG, BUT IT DOESN'T HAVE TO BE", ref. [8]) se cita que las ruedas pueden presentar una mejora del 60% en la resistencia mientras que el conjunto cuadro y horquilla del 15%. Por lo que la elección de la rueda como proyecto podría conllevar unas conclusiones en el sector de la aerodinámica para el ciclismo bastante notables.
- **Proceso de Fabricación.** No solo se puede centrar todo el análisis en el diseño sino que hay que tener en cuenta el proceso de fabricación y agruparlo dentro de todo el proceso global de diseño y fabricación. Las marcas de bicicleta tardan en torno a 4 años en obtener un diseño mejorado o nuevo de la versión de un cuadro y horquilla y en torno a 3 años para el caso de las ruedas de bicicleta. Lo que hace pensar que el proceso de fabricación de una rueda puede ser algo más sencillo, además si se analiza una rueda se pueden diferenciar técnicas de fabricación según cada componente. En cambio en el cuadro, lo más avanzado es la realización de un cuadro monocasco por lo que se obtiene es una pieza entera, sin posibilidad de utilizar diferentes técnicas que no tengan como objetivo obtener un cuadro de una pieza y no como unión de varias.

Estos motivos hacen que se elija como proyecto una rueda. Se elige la rueda delantera por el hecho de que las fuerzas que le llegan a la misma son más simples como el caso de un bache en el asfalto y el aire que ve. Si se eligiese la rueda trasera se tendría que añadir todo el conjunto delantero de la bicicleta en los análisis aerodinámicos por el hecho de que su presencia influirá en la forma con la que incide el aire sobre la rueda.

Además al realizar una búsqueda de empresas de ruedas de bicicleta se llega a la conclusión de que las ruedas más codiciadas y que mejores prestaciones obtienen son la denominadas "full-carbon", es decir, ruedas que salvo elementos de transmisión o uniones, como son rodamientos, están realizados en material compuesto. Por este motivo, se plantea como TFG el diseño y fabricación de una rueda delantera de bicicleta de carretera en fibra de carbono.

1.4 Partes de una Rueda de Bicicleta

En este apartado se va a realizar una breve explicación de las partes que componen una rueda de bicicleta delantera para poder seguir el trabajo con una mejor comprensión de las partes de las cuales se hablan. Las ruedas de bicicleta se componen de un aro, unos radios, uno buje y en el caso de ruedas 'full carbon' no tienen porque haber las cabecillas de los radios pero si en ruedas con radiado de aluminio. A continuación se muestra una fuera donde se muestran dichas partes.

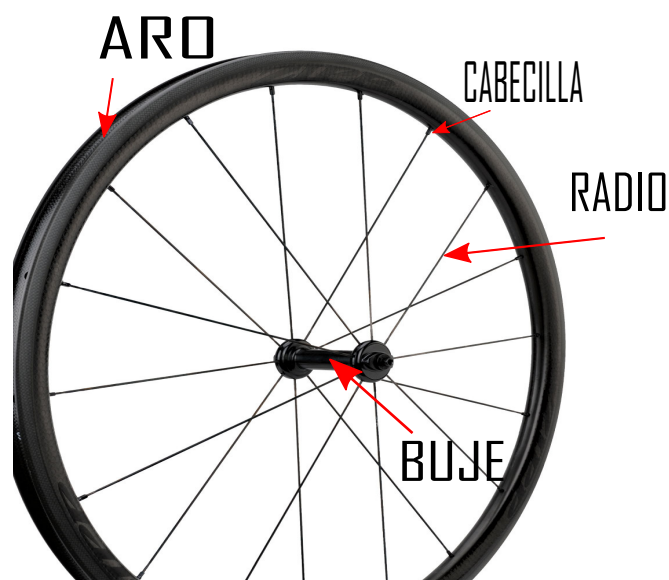


Figura 1.7: Diferentes partes de una rueda (Fuente: Zipp)

- **Aro.** Es una sección cerrada donde están alojados los radios y la rueda. Este componente recibe todas las fuerzas del suelo. Aunque actualmente este cambiando por los frenos de disco, tiene una banda donde se apoyan las zapatas del freno. En la figura 1.8 se pueden apreciar las diferentes partes de las que se compone el aro.

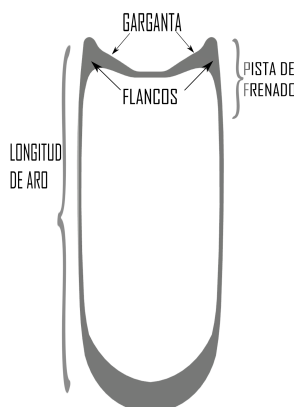


Figura 1.8: Partes de un aro (Fuente: Propia)

Se ha de tener en cuenta que la sección de la garganta y los flancos se verá modificada si el neumático elegido es de tubular o de cubierta. En el apartado de fuerzas sobre la rueda se verá la diferencia sustancial de estas dos opciones y el por que de las mismas.

- **Radio.** Es un elemento que se encarga de unir y transmitir las fuerzas desde el aro al buje. El material del cual se fabrican los radios suele ser acero, aunque también existen casos de radios de titanio y fibra de carbono. Existen infinidad de tipos de radios y formas de radiar una rueda.

- Tipos de radios.

Los radios pueden ser de cualquier forma y sección pero habitualmente son redondos, ovales, elípticos ... incluso ciertos fabricantes han usado perfiles NACA como sección del radio. Tienen una dimensión característica, que es la longitud del mismo, y las dos dimensiones que definen su sección transversal son bastante reducidas. El largo de los radios suele oscilar entre 15 y 30 cm. según la longitud del aro. La longitud máxima de alguna de sus dimensiones transversales no suele superar el centímetro de longitud. En la figura 1.9 se puede apreciar algunos tipos de radios.



Figura 1.9: Diferentes tipos de radios (Fuente: Sapim S.L.)

- Radiado.

Se define el radiado como el patrón de cruces que se crean en los radios en su unión desde el buje hasta el aro. Las diferentes configuraciones dependen en mayor medida de las fuerzas que deban soportar las ruedas. Existen multitud de tipos de radiado pero los más comunes se muestran en la figura 1.10. Según la configuración del radiado el tipo de cabeza de radio se verá modificada para poder tener el patrón especificado.

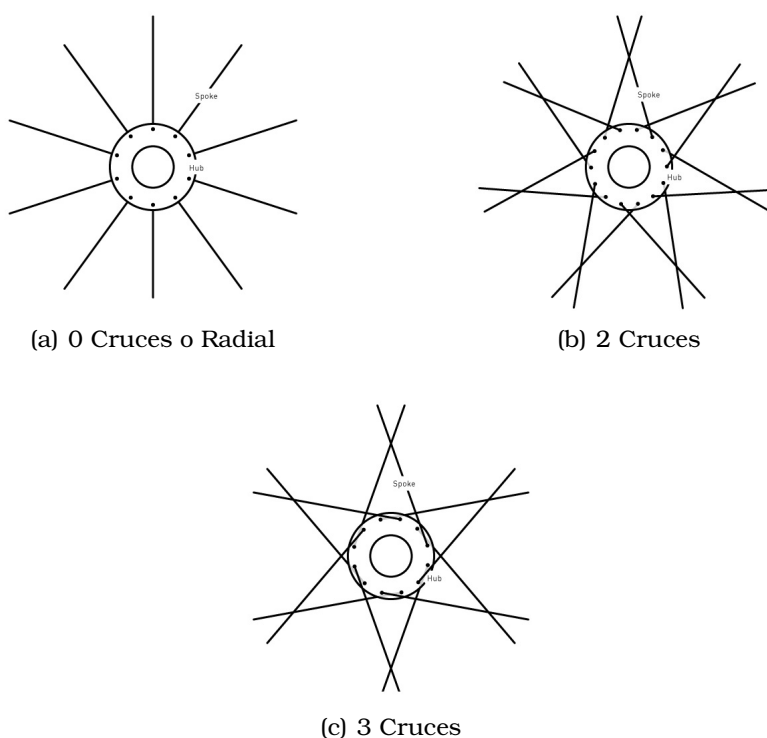


Figura 1.10: Diferentes tipos de radiado (Fuente: Enve Composite)

- **Cabecilla.** Son el componente que unen el radio con el aro. Su función, aparte de unir el aro al radio, es poder darle una tensión al radio, aspecto que se comentará posteriormente. Suelen ser metálicos. El punto donde se sitúan es uno de los principales zonas de rotura de los aros debido a que son un concentrador de tensiones. Hay fabricantes de ruedas en fibra de carbono, donde se pueden soldar el aro y el radio, para poder reemplazar los radios, siguen utilizando cabecillas. En la figura 1.11 se puede apreciar este componente.



Figura 1.11: Cabecilla de un radio (Fuente: Dt Swiss)

- Buje** Es la parte central de la rueda, de el salen hacia el aro los radios. Es el punto de unión entre la rueda y la horquilla, por lo tanto, de la rueda y el resto de la bicicleta. Se compone de un eje, unos rodamiento, y la carcasa exterior. Existe una distinción entre el buje de la rueda delantera y el de la trasera debido a que la rueda trasera es la encargada de transmitir el movimiento de torsión al suelo a través de la cadena, que es solidaria al buje trasero. En cambio, el delantero únicamente debe poder rotar con respecto a tu centro con la mayor facilidad posible para obtener unas pérdidas por fricción mínimas. Las diferentes piezas del buje se pueden apreciar en la figura 1.12.

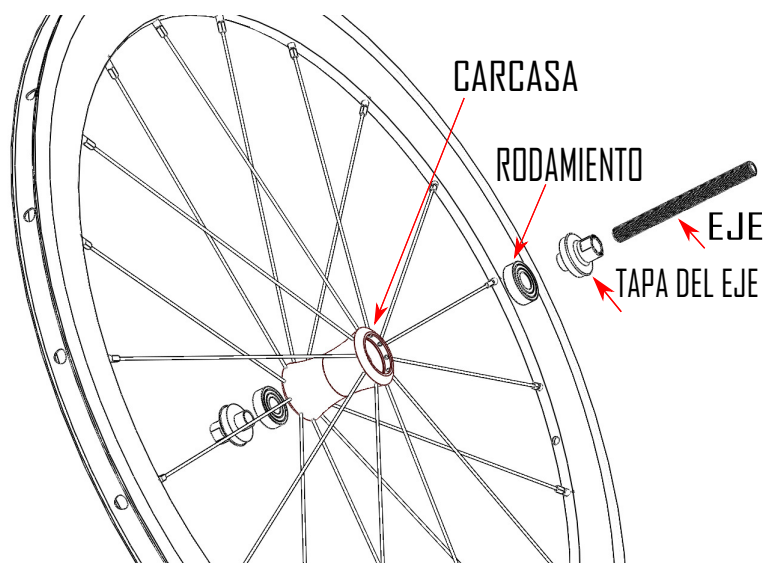


Figura 1.12: Partes del buje delantero (Fuente: Dt Swiss)

OBJETIVO

En este apartado se explicarán cuales son los objetivos detallados del trabajo y cuales son las herramientas que se usarán a lo largo del proyecto de tal manera que posteriormente pueda analizarse si se han logrado los objetivos que a continuación se citarán.

2.1 Punto de Diseño

Después de contactar con varias empresas de fabricación de ruedas de bicicleta para buscar una orientación sobre el proceso de diseño y que herramientas utilizaban se ha aconsejado utilizar única y exclusivamente métodos numéricos para la realización de los estudios. Esto es debido a que los métodos analíticos que existen no tienen una buena respuesta en la práctica debido a que mucha de las evoluciones que se han llevado en el campo del ciclismo ha sido debido a estudios experimentales y no existen métodos de cálculo analítico. Para llevar a cabo dicha labor se utilizarán el software Siemens NX 9.0 y/o Ansys 14.0 debido a que se han estado utilizando a lo largo del grado y la universidad politécnica de Valencia tiene licencia de ellos. Se utilizarán tanto para realizar el diseño, los estudios aerodinámicos y estructurales utilizando los diferentes módulos de los que disponen.

En la ruedas de bicicleta existen 3 propiedades fundamentales:

- Rigidez
- Peso
- Aerodinámica

Evidentemente, como en cualquier proceso de diseño, lo que es idóneo para una, es contraproducente para el resto. Por ejemplo, si se desea una rueda muy ligera es lógico pensar que se tendrá que utilizar poco material y por lo tanto el perfil del aro de la rueda deberá ser lo menor posible así como el número de radios. Pero eso genera, que la rigidez que posea la rueda se vea reducida, sobre todo por el número de radios (véase ref. [9]) . Por lo tanto hay que lograr un punto de diseño que será que característica/s predomine la rueda.

Cada empresa de ruedas de bicicleta disponen de diferentes modelos orientados según las necesidades de cada ciclista. Posteriormente, en el capítulo de diseño (6) se

justificarán con más detalle los siguientes motivos, pero se diseñará una rueda polivalente, con un perfil del aro comprendido entre 30 y 50 mm. Estas ruedas polivalentes se definen porque son válidas para cualquier tipo de terreno. Es decir, si se tiene un terreno llano, se utilizarán ruedas con un perfil muy grande, superior a 50 mm., para aprovechar la ganancia aerodinámica en contra del peso debido a que en el llano es un aspecto que no afecta demasiado. En cambio, para terrenos montañosos se busca una rueda que pese poco, para que el ciclista deba vencer una fuerza vertical lo menor posible. Es por eso que se buscan ruedas con un perfil muy reducido, menor a 32 milímetros, para tener una rueda más ligera y reactiva al tener una menor inercia que permite mejores aceleraciones. Con respecto a la rigidez en los últimos años se han visto que no influye tanto el número de radios sino con el material del que están hechos. Las ruedas con radios en fibra de carbono poseen una rigidez muy superior a las ruedas radiadas con radios metálicos, independientemente del número de radios.

Así por tanto, de manera personal, se deciden los siguientes porcentajes sobre el punto de diseño.

- 1.- Rigidez: 50 %.
- 2.- Aerodinámica: 30 %.
- 3.- Peso: 20 %.

Se busca una rueda muy rígida debido a que existe gran una influencia del uso de material compuesto sobre esta propiedad y es algo que se busca estudiar. Existen muchos casos y configuraciones de ruedas con rigideces similares y se pretende utilizar una gran cantidad de recursos en dichos estudios. Para ello, guiándose de los estudios que la revista *Roues Artisanales* realizó (véase ref. [16]) se fija una rigidez lateral objetivo de 70 N/mm. En el apartado de estudios estructurales (capítulo 8) se estudiarán tanto el tipo de ensayo como el valor fijado.

En el apartado del peso, se tiene una limitación de fabricación, y es el tipo de material compuesto que se dispone debido a que su ratio de rigidez-densidad es muy bajo en comparación a otros materiales. Es por esto que este parámetro no es el primordial porque se busca más obtener un método de cálculo y fabricación que una rueda que pueda hacer frente en prestaciones a una que se encuentre en el mercado. Por ello, las ruedas delateras "full-carbon" tienen un peso entorno a 500 gramos frente a los 600-700 gramos que tienen las ruedas con buje y radiado metálico. Por tanto, se buscará que el peso final de la rueda no exceda de los 800 gramos con el material del que se dispone, que no es el tipo de material que se usa en la industria del ciclismo.

En cambio, el apartado de aerodinámica se buscará estudiar sobre todo el efecto del aro, que es lo algo que más están modificando las empresas de ruedas, dejando un poco de lado tanto el buje y los radios. Si que se realizará un estudio aerodinámico a posteriori con la rueda completa, para ver la influencia del resto de componentes. Todos los estudios aerodinámicos detallados que se realizan en las ruedas de bicicleta son en ruedas destinadas tener una buena eficiencia aerodinámica. Para eso, como se ha comentado, es habitual que la longitud del perfil del aro sea elevada, en torno a 80 milímetros. Además, la rueda más aerodinámica posible es una rueda lenticular, y en

ambos casos dichas configuraciones difieren en exceso de la que busca esta rueda. Por lo tanto, poder comparar la rueda de este proyecto con las que aparecen en los estudios sería un error. Así pues, y ante la imposibilidad de comparar con otra rueda, no se buscará un valor concreto de drag si el diseño que mejor se comporte en comparación con el resto.

Parte II

DESARROLLO

En la siguiente parte del TFG se desarrollará todo el proceso de diseño y fabricación de la rueda. Se fraccionará esta parte en dos, la primera estará vinculada al proceso de diseño y la segunda al proceso de fabricación. En cada parte de comenzará explicando cuales son las restricciones que se tienen, ya sean por parte de algún organismo regulador o propias de los materiales e instalaciones a los que se tienen acceso.

Una vez detalladas las restricciones, entre las que se encuentran las que están las fijadas por la Unión Ciclista Internacional, las provenientes de las fuerzas que actúan sobre la rueda, los materiales de los que se disponen en la universidad así como las instalaciones de las que se puede hacer uso.

REGLAMENTACIÓN UCI

Como se ha citado anteriormente (cap. 1.2) las ruedas estarán amparadas por las restricciones de la UCI. Estas restricciones se encuentran detalladas en la versión del 23 de Mayo de 2014, la información sobre las ruedas se encuentra en el artículo 1.3.018 (ref. [10]) que a continuación se expondrá únicamente para el caso de las ruedas de carretera debido a que se ha visto ligeramente modificado. En él se puede diferenciar las restricciones geométricas y posteriormente las condiciones estructurales para su certificación.

3.1 Restricciones Geométricas

- **Diámetro.**

El diámetro de la rueda no puede ser superior a 70 cm. ni inferior a 55 cm. incluyendo el neumático. Los neumáticos de carretera oscilan con alturas de entre 3 y 4 cm., dependiendo del fabricante y modelo, por lo tanto el radio del aro a diseñar no podrá ser superior a 66 cm. Para las ruedas de carretera es habitual utilizar la normativa ISO 5775 sobre ruedas y usar un diámetro de 700 C o 622 mm.

- **Radiado.**

Las ruedas para poder participar en etapas de línea, es decir, quedan excluido el programa de contrareloj, deberán tener un mínimo de 12 radios. Para el caso de contrareloj no es necesario tener dicha cantidad de radios. Esto se puede apreciar en las ruedas de la marca Hed, entre otras, que disponen de este tipo de ruedas muy usadas debido a sus ventajas aerodinámicas por crear una menor turbulencia, véase la figura 3.1.



Figura 3.1: Rueda De Contrareloj aprobada por la UCI (Fuente: Hed)

Además, la forma de los radios deberá ser redonda, oval o aplanada. No se cita si un perfil NACA entra dentro de las definiciones anteriores en el reglamento oficial pero la UCI ha corroborado que dicha sección es válida por lo tanto será un aspecto a considerar en el estudio de la geometría de la rueda. En este caso la empresa americana *Reynolds* es la única a nivel mundial que posee una rueda con radios de secciones NACA, y además es la rueda más aerodinámica en su sector. Este punto se verá con mayor detalle en el apartado de diseño.

Ninguna sección del radio podrá superar los 10 mm. Por ejemplo en el caso de usar un perfil NACA como radio la cuerda no podrá superar los 10 mm.

3.2 Test de Impacto

Una vez detallados los requisitos geométricos se deberá realizar un análisis de impacto por una empresa certificada por la UCI. En la actualidad tan solo existe una empresa que se dedique a realizar dichos ensayos, *Sirris*. Después de contactar con dicha empresa gracias a la autorización de la UCI se pudo acceder a información más detallada del ensayo (ref. [11]).

El ensayo, de manera simplificada, consiste en una bancada fija que se encarga de sujetar a la rueda y una segunda bancada que impacta contra la misma. Por lo tanto es un ensayo de impacto claramente. En la figura 3.2 se puede apreciar a grosso modo como es el procedimiento del ensayo.

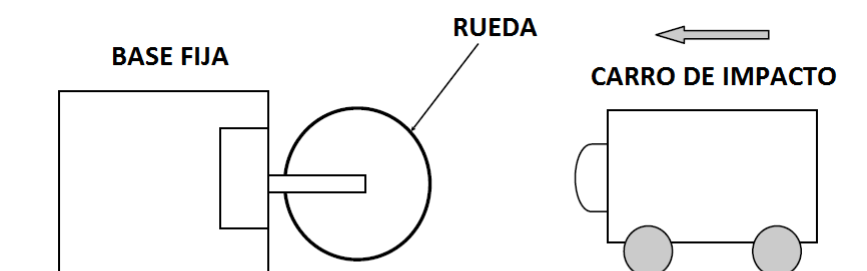


Figura 3.2: Resumen del test de impacto (Fuente: Sirris)

El ensayo se realiza en unas condiciones atmosféricas estándar, es decir, 23°C y una humedad relativa del 50% según el reglamento Europeo EN-62.

Se han de realizar dos tipos de impactos.

- **Impacto I.**

El primero de ellos se realiza en el medio de la rueda, estando la rueda en una disposición tal que un radio se encuentre de forma perpendicular a la herramienta de impacto. La zona de impacto será la distancia horizontal mas alejada al centro de la rueda.

■ **Impacto II.**

El segundo impacto se realiza para simular el efecto generado al pasar la rueda por un bache, bordillo, badén que exista en la carretera. Por lo tanto, la zona de impacto queda definida por la recta que pasa por el dentro de la rueda y tiene un ángulo de 45° con la horizontal.

En la figura 3.3 se aprecia las dos zonas de impacto del martillo o herramienta de impacto en las ruedas.

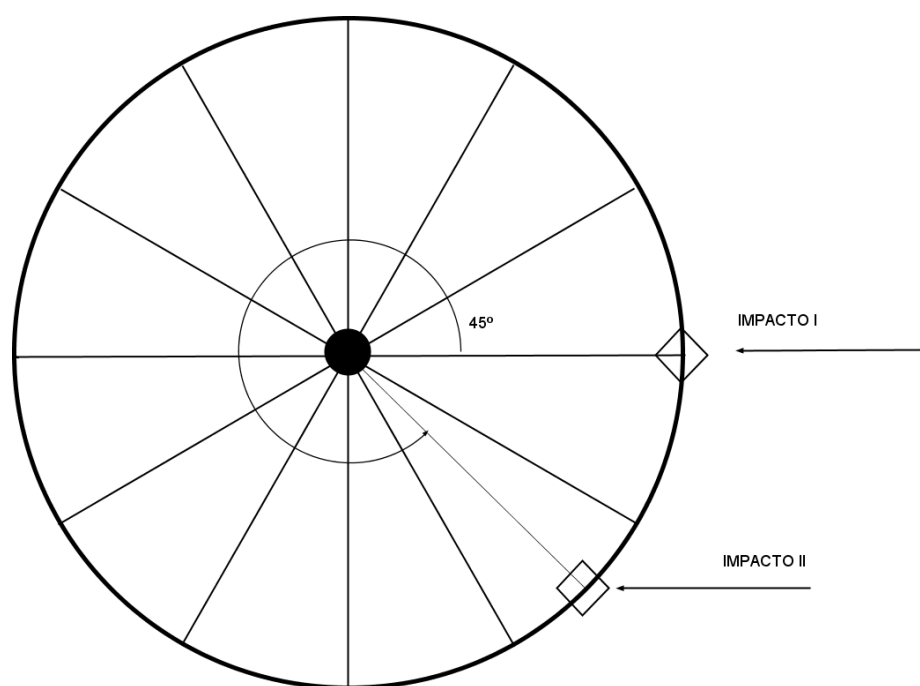


Figura 3.3: Zonas de impacto sobre la rueda (Fuente: Propia)

Con respecto a la herramienta de impacta formada por el martillo y el carrito:

- En el momento del impacto, el martillo se mueve a una velocidad de 10 km/h.
- El conjunto tan solo se puede desplazar de manera horizontal antes y después del golpe por estar restringido sus movimientos.
- El conjunto de la herramienta de impacto es de 100 kilos.
- En los estudios físicos se ha obtenido que la deformación del carrito y el martillo son irrelevantes.
- El desplazamiento horizontal del carro esta limitado mediante dos topes en cada lado para frenar la herramienta de impacto y que esta no golpee a la bancada que sujeta la rueda y que pueda disminuir en cierta medida la cantidad de energía que debe absorber la rueda. En el reglamento de la UCI y los documentos de los diferentes laboratorios no aparece especificado ni acotado cuales serán los puntos donde se sitúen los topes ni el recorrido que tendrá la bancada de impacto.
- La superficie de contacto entre el martillo y la rueda esta definida. Esta superficie es redondeada y desde la UCI o los diferentes laboratorios habilitados consultados

no se ha especificado un radio común a todos los test. En la figura 3.4 se muestra un pequeño plano de la vista transversal del martillo.

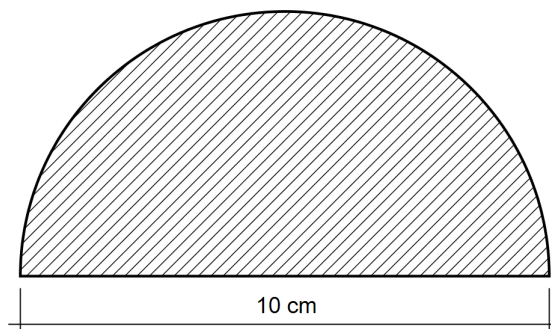


Figura 3.4: Geometría del martillo de impacto (Fuente:Propia)

Con respecto a la rueda se deberá tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La rueda dispondrá de un neumático montado con una presión de 7 bares que es una presión media para los neumáticos de carretera. Existen diferentes tipos de neumáticos como son los tubulares o las cubiertas, que son los más comunes y por último, el tubeles. El uso de los mismo dependerá de la geometría que tenga el aro de la rueda para fijar el neumático.
- Si la distancia entre dos radios consecutivos es de más de 20 cm. Se deberán realizar los dos tipos de ensayos de impacto en sobre dos posiciones diferentes:
 - El punto de impacto debe coincidir con la proyección horizontal del radio sobre el aro.
 - El punto de impacto deberá ser la proyección del punto medio entre dos radios.

Estos dos puntos de impacto, indicados por los rombos, se pueden ver con mayor claridad en la figura 3.5.

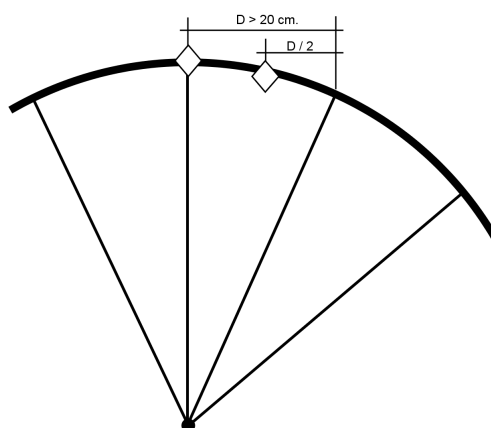


Figura 3.5: Puntos de impacto para distancias entre radios superior a 20 cm. (Fuente: Propia)

Una de las últimas novedades en el reglamento es que las ruedas definidas como tradicionales están exentas de realizar el test de impacto. Se definen las ruedas tradicionales como ruedas de al menos 16 radios metálicos, un radiado de forma redonda, alargada o ovalada con una sección transversal máxima no superior a 2.4 mm. y con un ancho de llanta máximo de 25 mm.. Este cambio se ha originado debido a que con los materiales empleados actualmente todas las ruedas que cumplan con las especificaciones anteriores son capaces de pasar el test de impacto. Para el caso de este proyecto la rueda se clasifica como no estándar o tradicional por el hecho de que los radios no van a ser metálicos.

Como se ha citado se ha mantenido contacto con varias empresas internacionales de ruedas, así como la UCI y la empresa encargada de realizar el ensayo. Todas estas empresas han confirmado que este ensayo se realiza de manera experimental, es decir, su complejidad es tal que no se realiza de manera computacional. Esto es debido a la gran complejidad de los elementos de los que se debe analizar. Por una parte hay que ver como se comporta el neumático una vez inflado a la presión indicada, por otra; la unión del neumático con la llanta, ya sea con pegamento si es tubular como por unas muescas en el caso de la cubierta. Todo esto es ya un inconveniente difícil de caracterizar pero además se añade que al ser un ensayo de baja velocidad, cabe recordad que el impacto es a 10 km/h, el tiempo de simulación debe de ser de alrededor de 3-4 segundos. Haciendo caso omiso de las recomendaciones, se hicieron varias simulaciones y el tiempo de cálculo para impactos con una duración de 1 milisegundo eran de 1 hora. En cambio, para una simulación de 2 segundos el cálculo se detuvo después de 30 horas. Es por eso que se debió de cancelar la simulación de este tipo de ensayo, aunque si es cierto que las compañías aseguran que dentro del rango de desplazamiento objetivo que se han definido, la rueda no tendría ningún problema de obtener la certificación UCI.

¿ QUÉ FUERZAS ACTÚAN EN LA RUEDA ?

Para el proceso de diseño de cualquier componente es necesario conocer a que solicitaciones se ve sometida. Sin estos conocimientos será imposible concretar unas limitaciones y el punto de diseño de las ruedas. Por lo tanto, en el siguiente apartado se estudiarán las fuerzas que actúan sobre una rueda de bicicleta, y como estas afectan a los parámetros de diseño de las mismas.

Se estudiarán las fuerzas que actúan sobre el aro, el buje y el radiado. No se estudiará lo que ocurre en el eje y los rodamientos de la rueda pues estos son estándar y la única prioridad de los mismos es obtener un peso y un coeficiente de fricción muy reducido. Si se hablará de los mismos en el apartado de materiales para la rueda.

Antes de analizar que fuerzas actúan en la rueda se va a analizar como afecta la unión de los diferentes elementos de la rueda entre si. Si se analiza un rueda de bicicleta a priori se tiene la intuición de que los radios de la mitad superior soportan el peso del buje, que están unidos al mismo y que a su vez estiran del aro. Esta concepción de las fuerzas que actúan es errónea. Lo que ocurre es que durante el montaje a los radios se le someten a una tensión, lo cual cambia completamente los fenómenos que ocurren en las ruedas. Existen fabricantes que han desafiado esta imposición histórica y han creado ruedas con radiado sin tensión como es el caso de las ruedas *Reynolds Pro VTI* que fueron unas ruedas "full carbon". En este caso estas ruedas no obtuvieron una buena respuesta en el mercado debido a sus características y en modelos posteriores volvieron a tensionar los radios (véase ref. [18]). Este hecho afecta, como se verá más adelante, a la rigidez frontal y lateral.

Antiguamente, en las ruedas de madera, las fuerzas de compresión podían ser soportadas. En cambio, cuando se remplazó la madera por material metálico, los radios, por ser elementos con una longitud predominante, cuando recibe una fuerza en dicha dirección flectan con mucha facilidad. Es decir, los radios no son capaces de soportar cualquier esfuerzo a compresión al que se le someta a la rueda. Estas tensiones se pueden analizar de la siguiente manera. Si la tracción se define como positiva y la compresión como negativa, un radio que tenga una tensión positiva inicial cuando este sometido a compresión únicamente será la diferencia de ambas tensiones la que actúe sobre el radio. Por este motivo se consigue que los radios no rompan cuando se le someten a tensiones de compresión superiores a la de su punto de ruptura cuando no están tensionados.

Con esta explicación se puede apreciar como ahora el buje no esta soportado por los radios superiores. Sino que todos los radios estiran del buje con la misma tensión.

En la rueda de una bicicleta se pueden hablar de dos grandes grupos de fuerzas, las estáticas y dinámicas. Estas dos generan componentes radiales, laterales y de torsión. En la figura 4.1 se pueden apreciar los causantes de dichas fuerzas que en los siguientes apartados se van a estudiar.

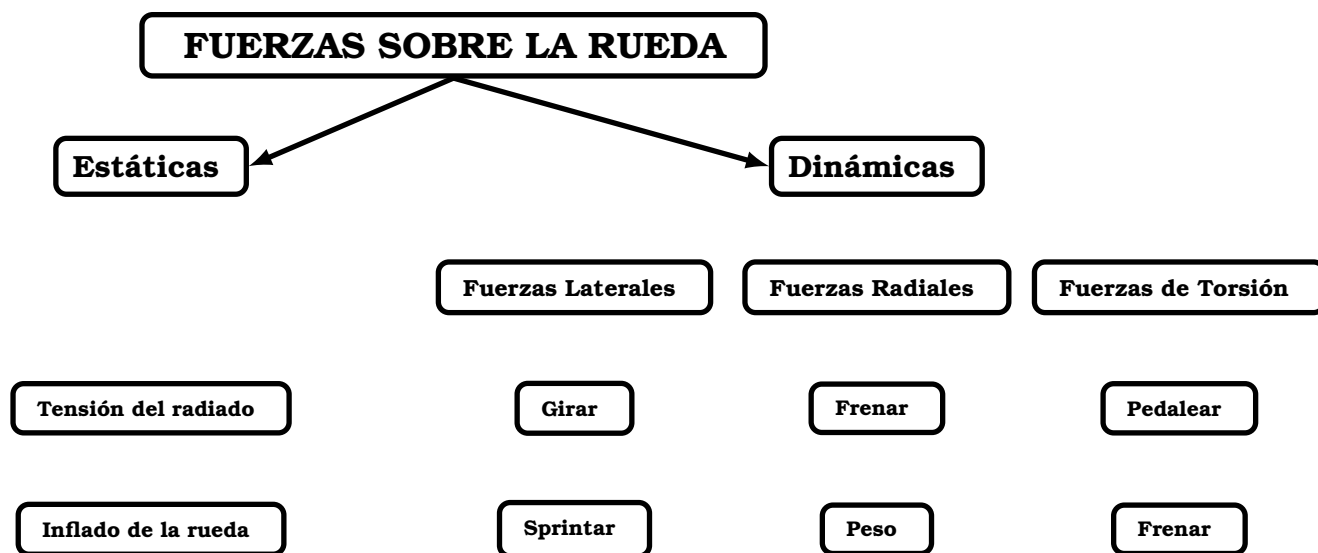


Figura 4.1: Fuerzas que actúan sobre la rueda. (Fuente: Propia)

4.1 Fuerzas Estáticas

Como aparece en la figura 4.1 se tienen la tensión de los radios y la presión del neumático como fuerzas estáticas.

4.1.1 Tensión de los radios

Como se ha citado anteriormente, los radios se deben tensionar para que no sean capaces de flectar ante una fuerza de compresión. Con lo cual habrán 3 zonas sensibles a soportar dichas fuerzas. La primera de ellas, como es evidente, será el radio. La tensión que adquiere cada radio, si es metálico, esta comprendida entre los 500 y 2500 Newtons (ref. [12]) y en la actualidad no hay datos para la tensión de los radios de fibra de carbono, pero los valores no deberán oscilar en exceso. Por lo tanto a parte del propio radio, se tendrán que tener en cuenta las zonas de unión del radio con los diferentes componentes como son el buje y el aro. Estas zonas son un punto de rotura bastante habitual, como se puede apreciar en la figura 4.2.



(a) Rotura unión radio-buje



(b) Rotura unión radio-aro

Figura 4.2: Diferentes tipos de roturas debido a la tensión de los radios (Fuente: felix-wong.com y Chichonera.blogspot)

4.1.2 Presión de los neumáticos

En el apartado de componentes de la rueda se han citado los tipos de neumáticos que existen pero no se han comentado pues no se consideran una parte específica de la rueda. Su influencia en las fuerzas que actúan sobre la rueda es uno de los principales motivos para la elección de un tipo de neumático o otro, en este caso entre tubular y cubierta.

Tubular

Un neumático tubular, figura 4.3, es una estructura cerrada en la cual el aire queda encerrado es una sección en forma de tubo de 360°. Cuando un tubular se llena de aire tiende a alargarse, rotar sobre si mismo y asumir un diámetro más pequeño. Por lo tanto, en el momento que el tubular se instala sobre la garganta del aro tiende a adaptarse a la forma de este último. El aro de la rueda para tubulares no tiene ninguna sección en el cual contenga al neumático, por lo que la zona de contacto entre el tubular y el aro se unen con un pegamento específico. Este hecho hace que la sección del aro sea más simple, ya que el material del tubular y el pegamento hace que el neumático adquiera la forma de la sección superior o cuna del aro.



Figura 4.3: Neumático Tubular (Fuente: Continental Tyres).

Existirá una fuerza de compresión ejercida por todo el tubular sobre el aro, que afecta al radiado. En el libro *"Bicycle Wheel"*, Anexo [13], se afirma que en un tubular a una presión de 8.6 bares (presión media para cualquier tubular) el aro percibe una fuerza de 300 N. En comparación con la tensión de los radios, esta tensión sin llegar a ser despreciable, es mucho menor en el caso del tubular. En otra fuente, anexo [14], se cita que para una presión de 6.8 bares la tensión comunicada al aro es insuficiente como para que los radios pierdan parte de la tensión inicial que tienen.

Otro aspecto relevante es que los aros tubulares soportan mejor el calor en caso de frenado debido a que existe una mayor distancia entre la zona de frenado que se encuentra a una alta temperatura y la zona donde se encuentra el aire a presión. Esto, como se comentará a continuación es una parte negativa en los aros de cubierta.

Cubierta

Un neumático de cubierta de bicicleta es una sección de tubo abierto que se queda unido al aro cuando se le introduce una presión de aire. En este caso la sección del aro deberá tener prevista una zona cóncava donde se quede unida la cubierta. En la figura 4.4 se puede apreciar como es un neumático de cubierta.



Figura 4.4: Neumático de cubierta (Fuente: Continental Tyres).

En este caso la presión que ejerce el fluido actúa sobre los flancos del aro. Este genera que la compresión que se ejerce en el sentido radial sea prácticamente despreciable en comparación con la de un tubular. En cambio, ahora existe una fuerza en los flancos del aro. Estas zonas no tienen un espesor superior a 3-4 mm. Esta presión será proporcional al área de contacto entre aro y neumático. Por este motivo si se aumenta el tamaño del neumático, superior será la fuerza lateral. Actualmente, mientras que el límite de presión de un tubular viene dado por el fabricante del mismo, en el caso de las cubiertas el límite suele referirse a limitaciones del aro y no del neumático.

Además, la presión lateral hace que la zona de frenado deje de ser perpendicular, lo que puede ocasionar que la garganta se abra y se salga el neumático. Otro aspecto importante es que en la zona de frenado, donde se ha mostrado con anterioridad que puede llegar a tener temperaturas de 200° (véase ref. [28]), esta muy cerca del aire que esta en el neumático. Si el aire que esta entre el aro y la cubierta aumenta de temperatura, también lo hará el volumen pudiendo llegar al caso de que el neumático destalone.

Por estos motivos, los aros destinados a neumáticos de cubierta deben estar más reforzados, lo que conlleva un aumento del peso. Además las formas de la garganta de un aro de cubierta son muy complejas y su fabricación con fibra de carbono es muy complicada. En la figura 4.5 se puede apreciar la sección de un aro de tubular y otro de cubierta.



Figura 4.5: Sección de aro de Tubular (izq.) y Cubierta (drc.) (Fuente: Bikeradar).

4.2 Dinámicas

Las fuerzas dinámicas son causadas, como se puede apreciar en la figura 4.1, por frenar, pedalear, por el movimiento de giro de la rueda y por esprintar o pedalear de pie sobre la bicicleta. No se ha citado el peso del ciclista debido a que esta incluido en el movimiento de la rueda. Este, sobre todo, es la fuerza principal que actúa sobre la rueda debido al peso del ciclista, la velocidad a la que gire la rueda y las imperfecciones del terreno.

Las fuerzas dinámicas son las encargadas de romper los componentes de la rueda como pueden ser los radios, el aro o el buje. Estas fuerzas sobre todo son importantes debido a la cantidad de ciclos de actuación de las mismas. A continuación se explicaran con mayor detalle los tipos de fuerzas dinámicas.

4.2.1 Fuerzas Radiales

Las fuerzas radiales son debidas en gran medida al peso del ciclista, esta fuerza cobra vital importancia con la cantidad de ciclos con que actúe dicha fuerza. En este apartado influyen mucho el tipo y la cantidad de radios. En este caso es necesario aplicar una fuerza muy elevada, del orden de 150-200 kg. para deformar la rueda 1 solo milímetro. Estos valores se han obtenido de uno de los estudios de ruedas más importantes en el mundo, véase anexo [16]. En la figura 4.6 se puede obtener el efecto que tiene la fuerza radial sobre la rueda.

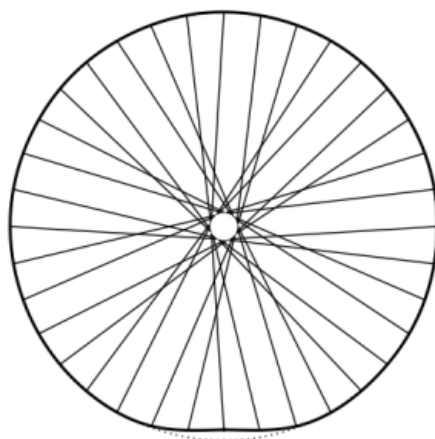


Figura 4.6: Deformación Radial (Fuente: ref. [13])

Fuerzas de frenado

El frenado genera una fuerza radial que afecta a la tensión de los radios. Al frenar la llanta, aparece una fuerza en dirección opuesta a la del movimiento de la rueda. Además, se tiene una fuerza de rozamiento en el punto de contacto de la rueda con el suelo. Por esto, aparece una fuerza de reacción sobre el buje, por ser el centro de gravedad, donde busca dejar de ser el centro de la circunferencia que forma la rueda. Esta fuerza pasa a los radios, donde una mitad de los radios esta sometido a una

tracción y la otra a compresión (véase figura 4.7). Debido a esto la rueda se deforma. Esta fuerza suele estar comprendida en torno a 200-300 Newtons (ref. [15]).

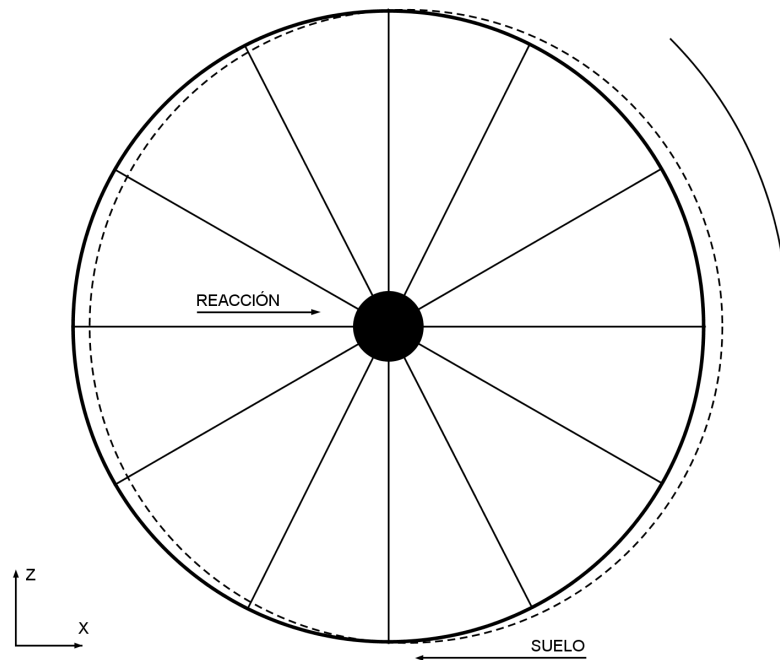


Figura 4.7: Deformación Radial (Fuente: Propia)

4.2.2 Fuerzas Laterales

Fuerzas esprintando

Cuando un ciclista se encuentra sentado en la bicicleta pedaleando las ruedas van perpendiculares al suelo, ahora bien, cuando el ciclista se levanta y comienza a pedalear, comúnmente conocido como sprintar (véase la figura 4.8); se puede apreciar como las ruedas dejan de estar verticales (vistas de frente) y esto es debido a una fuerza lateral ejercida por el hecho de que el peso del ciclista va cambiando de un lado a otro.



Figura 4.8: Movimiento de la rueda durante un sprint (Fuente: bbc.com)

La respuesta de unas ruedas ante esta fuerza es muy representativa porque si la rueda flexa poco significa que no existe una pérdida muy grande de la fuerza que se transmite al suelo. Además, la distancia entre la llanta y las zapatas de freno oscila entre los 2 milímetros a 1 centímetro, por lo tanto si las ruedas no son muy rígidas puede que la llanta roce con las zapatas haciendo que la bicicleta se frene. Esta fuerza suele oscilar sobre los 100 y los 300 Newton (ref. [15]) y se explicará con más detalle en los estudios estructurales.

Fuerzas girando

A la hora de cambiar de dirección en una bicicleta en marcha es necesario inclinar la bicicleta y con ello las ruedas. Esta inclinación hace que aparezca una fuerza de reacción sobre el buje debido a la que existe por el rozamiento con el suelo en la componente tangencial al movimiento. Esta fuerza, al no estar compensada como en la de frenado, genera un momento que tiende a doblar la rueda lateralmente. Se puede considerar una fuerza porque un momento no deja de ser un par de fuerzas actuando en sentido opuesto y, salvo deslizamiento, la parte en contacto con el suelo no se va a desplazar, por lo tanto lo que se tiene es una fuerza lateral actuando sobre la parte superior de la rueda. Esta fuerza dependerá de la velocidad a la que se realice el giro y la inclinación de la bicicleta. Su caracterización es similar a la fuerza esprintando así según la bibliográfica, la magnitud de la fuerza resultante es similar a la fuerza esprintando.

4.2.3 Fuerzas de Torsión

Fuerzas pedaleando

Cuando se ejerce una fuerza sobre los pedales, esta es transmitida desde las bielas a conjunto de piñones por medio de la cadena. Estos piñones van conectados al buje y ejercen un momento de torsión sobre el buje. Esta fuerza afecta a la rueda trasera.

Fuerzas de Frenado

Hay que tener en cuenta que se va a fabricar una rueda convencional, es decir donde el frenado se realiza sobre la propia rueda. Si se hiciera una rueda donde el sistema de frenado se efectuase sobre un disco, este generaría un momento de torsión sobre el buje que se transmitiría a los radios. Este momento hace que se tenga que considerar un momento que será muy importante en la distribución de fuerzas que actúan sobre la rueda y en el caso de frenar sobre la llanta no es tan relevante.

ANÁLISIS PRELIMINAR DE DIFERENTES RUEDAS

Como cualquier proceso de diseño industrial, es necesario para fijar un objetivo y unas dimensiones aproximadas realizar un análisis de mercado del producto que se va a diseñar. Evidentemente este proceso de estudio se realiza antes de fijar un objetivo, por lo que en este capítulo se pretende dejar constancia de todo este proceso que va a guiar el proceso de diseño. El autor, por el hecho de haber competido durante una gran periodo de tiempo en ciclismo de carretera, ha podido probar diferentes de alta gama y poder realizar un análisis previo de que ruedas se comportan mejor y peor, y como ingeniero, buscar los motivos de esto. Existen diferentes marcas que realizan ruedas con un precio de venta al público de 1000 euros o superior y se analizarán la gran mayoría de las mismas. Las marcas que se analizarán son: *Zipp, Bontrager, Mavic, Madfiber, Lightweight, Corima, Reynolds y FastFoward*. Existen otras marcas que a las que no se le han hecho un análisis más exhaustivo por el hecho de que en diferentes test independientes no han obtenido grandes resultados y las observaciones después de haberlas probado el propio autor tampoco han sido de gran mención. Entre ellas se encuentra *Hed, Roval, Campagnolo, Shimano, Xentis...*

A continuación se mostrarán las investigaciones y logros de diferentes marcas que son punteras en la fabricación de ruedas de gama alta en bicicleta de carretera. Estos logros son tanto aerodinámicos como estructurales y muchos de ellos se utilizan como referencia en el proceso de diseño.

5.1 Análisis de diferentes Fabricantes

5.1.1 Zipp

De la empresa americana Zipp se ha analizado los modelos 202, 303 y 404 debido que de los 3 de ellos se han obtenido las ruedas y se han podido probar y obtener la geometría externa de los componentes. Zipp es una empresa que destaca por la gran eficiencia aerodinámica de sus ruedas y lo han conseguido sobre todo optimizando modelo a modelo la forma del aro. Entre sus innovaciones destacan la creación de aros con superficies rugosas y la modificación del perfil del aro.

Aros con superficies rugosas

En 2006 sacaron al mercado un tipo de aro con una superficie similar a la de las pelotas de golf, (ref. [19]). Hicieron un estudio sobre como afecta la rugosidad al fluido con el objetivo de crear una zona donde se modificará la capa límite de laminar a turbulenta para que esta fuese capaz de adherirse durante más longitud creando una estela mucho más pequeña. Una capa límite laminar genera un drag menor pero es muy inestable y si se ve alterada, el fluido deja de adherirse y crea una estela donde se genera un drag muy grande. Por tanto, hay veces en el que la suma del drag de la capa límite y la estela es inferior cuando la capa límite es turbulenta debido a la que el punto de entrada en pérdida esta más alejado del borde de ataque. En la figura 5.1 se puede ver esta superficie.



Figura 5.1: Aro Zipp 303 (Fuente: Velonews)

Esto sobre todo se notaba con viento lateral ya que el drag que generaban era muy inferior al de la competencia. A día de hoy, todavía es la única marca en utilizar dichos aros en lugar de una superficie lisa siendo una de las referencia para mucho usuarios. El problema es la dificultad de poder realizar esta estudio debido a que Zipp hizo dichas investigaciones de manera experimental en un túnel de viento. Los pequeños surcos que poseen el aro no tienen más de 2-3 mm. de diámetro y una profundidad de 1 mm. Por lo tanto poder estudiar este comportamiento y su posterior fabricación parece una tarea excesivamente compleja viendo que tan solo una fabrica en la industria del ciclismo es capaz de poder realizarlo.

Aro con perfil toroidal o "Firecrest"

Desde la década de los 2000 muchas empresas apostaron por los beneficios aerodinámicos y eso hizo que se cambiaran las formas del perfil del aro desde los denominados tipo "V" hasta los tipo "U" actuales, que Zipp denominó "Firecrest". En este proceso muchas de las innovaciones han sido de la marca Zipp. En la figura 5.2 se pueden dicha evolución de la forma del perfil.



Figura 5.2: Evolución del perfil del aro (Fuente: Jameson King)

Esta nueva forma del aro hace que aunque haya una mayor superficie, el cambio de geometría sea más gradual haciendo que el flujo pueda adherirse con mayor facilidad a la superficie y el punto de entrada en pérdida se retrase (véase ref. [29]). En los últimos años sobre todo lo que se ha realizado es un aumento en el ancho de la garganta con el objetivo de poder instalar neumáticos de un mayor ancho debido a que, aunque exista una creencia inversa, para una presión dada un mayor ancho de neumático genera una reducción en la fricción con el asfalto (ref. [20]). Para poder instalarlos es necesario aumentar el ancho del aro. Antiguamente se utilizaban tubulares de 19" y ahora mismo se utilizan de 28" y para ello hay que reacondicionar los aros.

Estas mejoras reducen el drag a prácticamente la mitad en comparación a ruedas convencionales (ref. [21]). Además las ruedas de la marca Zipp son unas de las que menos drag generan si se comparan con ruedas de la misma longitud de perfil (ref. [22]). Por lo tanto, el tipo de perfil de Zipp debe de ser una referencia para el proceso de diseño.

5.1.2 Bontrager

Bontrager es la marca de componentes de bicicleta que pertenece a la compañía de bicicletas *Trek*. Sus innovaciones no han tenido la misma importancia que las de *Zipp* pero en los últimos años gracias a que *Trek* dispone de un túnel de viento propio y a un gran aumento de la investigación en el sector de la aerodinámica han conseguido obtener ruedas que generan un drag muy reducido (ref. [23]). Situándose como una de las marcas a tener en cuenta. Sus ruedas tampoco son "full-carbon" sino que son ruedas más convencionales como las *Zipp* donde el aro es de carbono y el resto de componentes son metálicos. Los radios, también son como los de *Zipp*, redondos. En anteriores modelos usaron radios ovalados pero sus resultados no fueron buenos. Esto hace ver que el camino que comenzó *Zipp* es correcto y que se puede empezar a pensar que la forma del radio no sea tan importante como la cantidad de los mismos, hecho que parece que las marcas otorgan gran relevancia. En la figura se puede observar una de sus ruedas estrella como es la *Bontrager Aeolus 3D* con una longitud de perfil de 45 mm. y su similitud con *Zipp*.



Figura 5.3: Bontrager Aeolus 3 3D (Fuente: Bontrager)

5.1.3 Lightweight

Sin duda alguna hablar de Lightweight es hablar de unos de los referentes en ruedas "full-carbon" del mercado. Sus primeras ruedas nacieron en 1985 de manera completamente artesanal. Su rueda delantera tiene un peso de 475 gr. con un perfil de 47.5 mm. Sus principales puntos fuertes son la rigidez y el gran poder de reacción de las ruedas debido a su poco peso. Sus componentes tienen una geometría sencilla, los aros son tipo "V", el buje es un cilindro de carbono con dos tapas circulares donde se unen los radios y estos últimos se asemejan mucho a una placa plana de fibra de carbono. Hasta hace 10 años se consideraban las ruedas con mayor rigidez del mercado y muchos profesionales las utilizaban en casos puntuales a pesar de no poder hacerlo por temas contractuales. En la figura 5.4 se puede ver el modelo Meilenstein y la simplicidad de sus geometrías.



Figura 5.4: Lightweight Meilenstein (Fuente: Bikerumor)

De estas ruedas es conveniente analizar el método de fabricación y muchas de sus dimensiones y formas pues han sido las ruedas "full-carbon" referencia durante muchos años.

5.1.4 Corima

La empresa francesa Corima, en sus últimos modelos de ruedas "full-carbon", ha conseguido obtener los mejores resultados en todos los test independientes realizados en rigidez lateral para ruedas delanteras (véase ref. [18]). Además el peso de su rueda delantera es 409 gr. cerca de 70 gr. menos que las Lightweight y con una rigidez lateral superior. La geometría de esta rueda también es interesante debido a que los radios no están equiespaciados unos de otros sino que se encuentran la unión radio-aro dos a dos, es decir, existen zonas del aro donde se unen los radios de cada lateral de la rueda. Además si han realizado estudios aerodinámicos ya que su aro es de tipo "U". Tienen en común con Lightweight que sus geometría es básica, los bujes tienen un patrón similar y los radios no son planos pero son cilindro de fibra de carbono, que también son fáciles de fabricar. Para el aro utilizan una espuma de poliuretano como molde interno que tiene unos grandes beneficios de vibración y que gracias a su baja densidad no influye en el peso. En la figura 5.5 se puede ver esta rueda.



Figura 5.5: Corima MCC+ (Fuente: Corima)

De las Corima MCC + es importante analizarlo todo, debido a que en todos los estudios a la cabeza de las ruedas "full-carbon".

5.1.5 Mavic

Las ruedas Mavic, en concreto el modelo Cosmic Carbone Ultimate son "full-carbon" aunque la rueda delantera tiene el concepto patentado de Lightweight pero unas dimensiones más reducidas. Tanto el aro, de tipo "V"; como el buje son más pequeños y el area de los radios utilizados disminuye pero en cambio aumentan en número. Su peso es de 520 gr., 50 más que Lightweight y casi 100 más que Corima. Sus valores de rigidez son similares a los de Lightweight pero no a los de Corima. En la figura 5.6 se puede ver esta rueda y su similitud con las Lightweight.



Figura 5.6: Mavic Cosmic Carbone Ultimate (Fuente: Mavic)

El autor de este proyecto ha tenido la oportunidad de probar las Mavic, Corima y Lightweight en diferentes periodos y en comparación a ruedas no "full-carbon" se observa una rigidez apabullante y una reacción a la hora de transmitir los movimientos muy elevada. De todas ellas la que mejores propiedades tenía fueron las Corima MCC + debido a su alta rigidez. Al no poder comparar las ruedas el mismo día y en la misma situación no se tiene un estudio del cual se puedan obtener unas conclusiones objetivas.

5.1.6 Reynolds

Junto a Lightweight, la empresa americana Reynolds es un referente en la fabricación de ruedas de bicicleta. También han fabricado unas ruedas "full-carbon" aunque sus resultados de rigidez son muy bajos, debido a que no imponen una tensión inicial al radio en el momento de unión con el buje y el aro. Esto hace que tanto la rigidez frontal sea baja, véase la figura 5.7 donde los radios flectan al poner un peso de 50 kg en dirección frontal, algo muy inusual en las ruedas de bicicleta.



Figura 5.7: Test de rigidez frontal sobre unas ruedas Reynolds RZR (Fuente: Roues Artisanales)

En cambio, han realizado numerosos estudios aerodinámicos en cooperación con la agencia NACA y han fabricado una rueda con radios con sección de perfil aerodinámico de la NACA. Para ello tienen los modelos "full-carbon" RZR con longitudes de perfil de 46 y 92. El modelo RZR 46 no parece tener unas buenas críticas en cambio el modelo RZR 92, figura 5.8, es uno de los más usados en competiciones de triatlón y contrareloj por la gran eficiencia aerodinámica que poseen (véase ref. [24]). Su geometría de buje es similar a la Lightweight, con un buje cilíndrico sin más, el aro es tipo "U" similar al estilo de Zipp y los radios, como se han citado son perfiles NACA.



Figura 5.8: Rueda Reynolds RZR 92 (Fuente: Reynolds)

MODELOS DE RUEDAS DISEÑADOS

6.1 Aro

Como se ha citado en el apartado de Partes de la Rueda (1.4) existen dos parámetros básicos, la longitud del perfil y el ancho de la garganta, véase figura 1.8). La primera de ellas no tiene una limitación pero la segunda si lo esta aunque no de manera directa. La UCI fija una anchura máxima del aro de 25 milímetros y la garganta usualmente siempre ha sido esta dimensión aunque en los últimos años ciertos fabricantes renombrados han modificado ese hecho como son *Zipp*, *Hed* o *Bontrager* ya que el aro tenía un perfil redondeado donde el punto más ancho se situaba más abajo de la zona superior del aro.

Por tanto se diseñan 8 tipos de aro diferentes entre los que hay 4 longitudes diferentes de perfil y 2 de ancho. En la tabla 6.1 se muestra las dimensiones de cada modelo. Además, se tienen la geometría exterior del aro de 3 ruedas de altas prestaciones del mercado, y también se estudiarán con motivo de poder comparar debido a que no existen datos sobre el análisis que se va a realizar.

TIPOS DE MODELOS DE ARO

Modelo	Ancho máximo (mm)	Perfil (mm)
1	25	28
2	25	36
3	25	44
4	25	52
5	23	28
6	23	36
7	23	44
8	23	52
Mavic Cosmic Ultimate	21.6	40
Zipp 303	24	45
Zipp 404	24	58

Tabla 6.1: Modelos de aros

Además hay que tener en cuenta el espesor del aro, utilizando de referencia diferentes aros de otras compañías se muestra que el espesor en la parte inferior del aro es de aproximadamente 4 mm. mientras que en los laterales es de 1 mm. Por último, se realiza un redondeo en la zona de la garganta con el fin de ganar resistencia estructural porque debido a las fuerzas térmicas generadas en el frenado es una zona crítica. Fijando estos datos como variables fijas y modificando el ancho y el largo del aro se obtienen los diferentes modelos donde se muestra el área frontal en la figura 6.1.

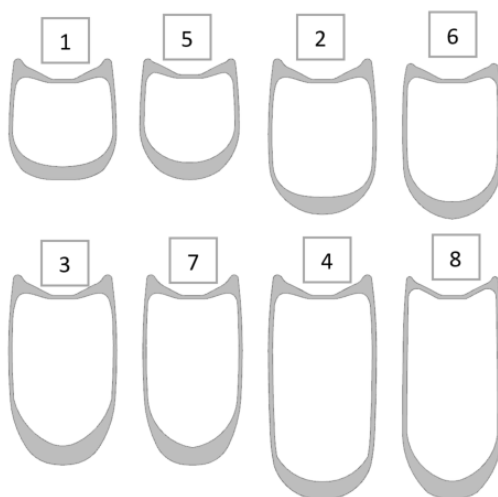


Figura 6.1: Diferentes modelos de aro diseñados numerado de izquierda a derecha. (Fuente: Propia)

6.2 Radio

Para los radios se utilizan dos conceptos pensando más en la fabricación que en el diseño. Se utilizarán radios con forma ovalada y redonda. Usualmente los radios metálicos redondos tienen un diámetro de 2 mm. mientras que los de la marca Corima son de 4.5mm. por lo que habrá que realizar los estudios con unas dimensiones similares. En la tabla 6.2 se definen los radios con los que se realizaran los ensayos.

TIPOS DE MODELOS DE RADIO		
Modelo	Forma	Medidas (mm)
1	Circular	Diámetro: 3
2	Circular	Diámetro: 4
3	Circular	Diámetro: 5
4	Circular	Diámetro: 6
5	Ovalado	2 x 1
6	Ovalado	2.5 x 1
7	Ovalado	3.5 x 1.5

Tabla 6.2: Modelos de radio

6.2.1 Radiado

Se estudiará el comportamiento de la rueda con diferentes radiados que se explicarán con más detalle en el apartado de ensayo estructural debido a que a no todos los modelos de rueda se les aplicarán todas las configuraciones.

6.3 Buje

Del mismo modo que ocurre con los radios, el diseño del buje tiene más que ver con aspectos de fabricación para que esta sea más sencilla. Se tendrá un cilindro de fibra de carbono y luego otra pieza que ira adherida al cono y donde se unirán los radios. Esta pieza es similar al cilindro y tendrá de diámetro interno lo mismo que el diámetro externo del anterior con el objetivo de que pueda desplazarse sobre el primer cilindro. Esto se hace porque para dar una tensión a los radios de carbono se harán más cortos de lo que sería habitual para una vez unidos a la segunda pieza del buje, cuando esta pieza se desplace hacia el exterior, dotar al radio de una tensión. En la figura 6.2 se muestran estas dos piezas.

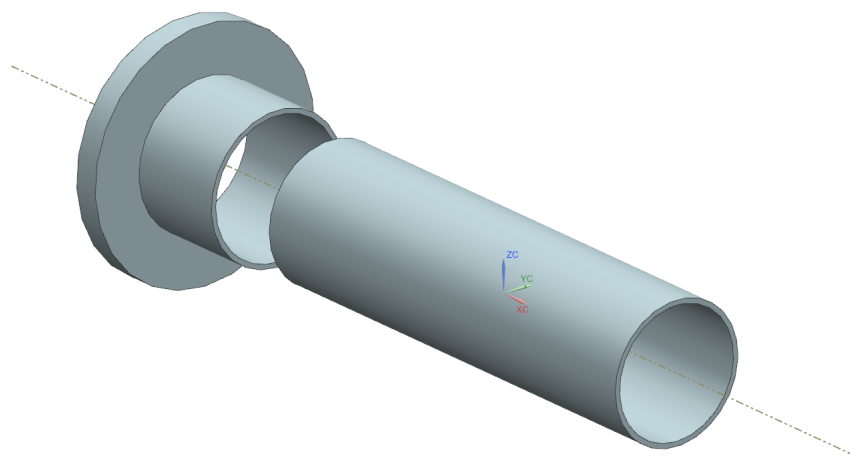


Figura 6.2: Piezas del buje (Fuente: Propia)

6.3.1 Ejes del buje

Faltaría como pieza para el buje los ejes y los rodamientos para que la rueda pueda girar. Para ello se utilizarán el eje y los rodamiento, el 61803, de uno de los bujes mejor valorados del mercado como son el Dt Swiss 180. Tiene un peso de 40 gr. y un precio total de 100 €al comprar la totalidad de sus piezas (véase ref. [25], [26] y [27]). Con estas piezas se tienen las medidas del diámetro interno cilindro principal y la longitud del mismo que son 26 mm de diámetro y 100 mm. de largo. En la figura 6.3 se muestra la disposición global del buje.

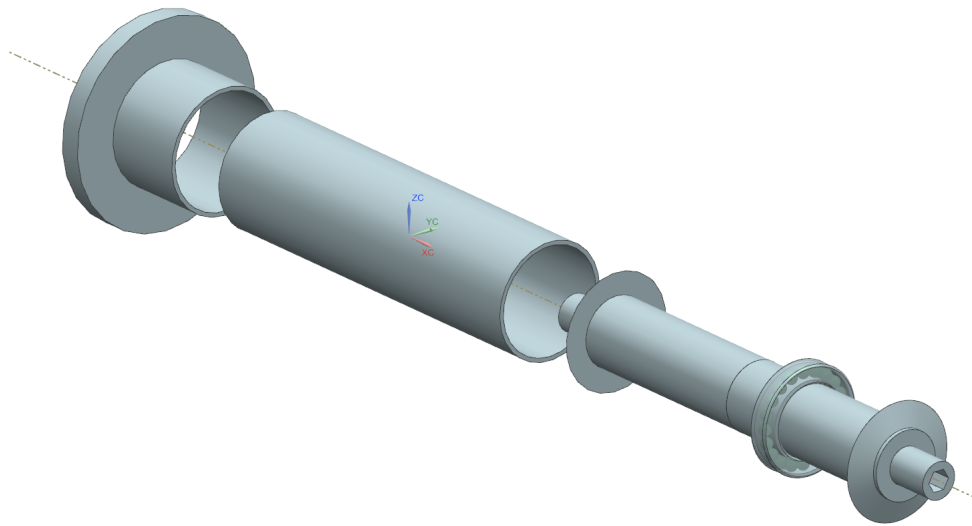


Figura 6.3: Configuración global del buje (Fuente: Propia)

Por lo tanto se modificará el espesor del cilindro principal y el diámetro exterior y el espesor del segundo cilindro. En la tabla 6.3 se muestra los diferentes valores del mismo.

TIPOS DE MODELOS DE RADIO			
Modelo	Espesor cilindro principal (mm)	Diámetro cilindro secundario (mm)	Espesor cilindro secundario (mm)
1	8	50	4
2	6	50	4
3	5	50	4
4	3	50	4
5	5	60	4
6	5	40	4
7	5	30	4
8	5	50	5
9	5	50	6

Tabla 6.3: Modelos de buje

AERODINÁMICA

En el siguiente capítulo se explicará el estudio aerodinámico que se ha realizado para obtener la geometría exterior del aro. Para este capítulo se comenzará describiendo lo que es y como afecta al estudio el viento relativo en la bicicleta. Posteriormente, se citarán los parámetros que se modificaron los estudios que se realizarán, estos 3 puntos se agrupan dentro de la sección de Conceptos Preliminares. Seguidamente se hablará de los diferentes modelos de rueda que se tienen para el estudio y de la idealización de la geometría. Después se analizará tanto el dominio de estudio como la convergencia de malla para poder mostrar los resultados y poder obtener las conclusiones necesarias para fijar la geometría final exterior del aro.

Para este estudio se utilizará el módulo de simulación avanzada del software Siemens NX 9.0 donde se realizará un análisis de fluidos utilizando el solver propio de NX.

7.1 Conceptos Preliminares

7.1.1 Viento Relativo

Una de las cosas que hay que tener en cuenta en los estudios aerodinámicos es con que velocidad, ángulo de incidencia y tipo de flujo recibe la rueda. Para este último se define el flujo en el caso ideal, es decir, no perturbado. Aunque por el hecho de estar realizando estudios a baja velocidad y densidades del aire a nivel del mar, es decir, con flujo laminar. Este flujo incidente se verá modificado en las proximidades de la geometría. Por lo tanto queda por definir la velocidad y el ángulo de incidencia. En carreras profesionales las medias suelen estar situadas en torno a 40 km/h, si el terreno es llano esta velocidad será superior y si es montañoso será menor. Algo que no es constante es el viento, ni en magnitud ni en dirección. Por el hecho de que la bicicleta, y por tanto la rueda, se encuentra en movimiento el ángulo de incidencia del aire que ve la rueda no tiene porque ser el mismo que el del viento. Para estos estudios, siguiendo la línea del resto de estudios hallados (véase ref. [30]), se dejará la rueda fija, es decir la rueda no se encuentra girando respecto a su centro.

El concepto de viento relativo es la magnitud y dirección que recibe un objeto en movimiento envuelto en una corriente de aire definida en dirección y magnitud. En el caso que nos confiere se tiene como parámetros la velocidad del viento, debido a la facilidad de obtención de sus valores, y la velocidad lineal de la rueda. No es necesario

conocer la orientación de la rueda pues siempre se toma la orientación de la rueda como uno de los ejes de coordenadas. En la figura 7.1 se puede ver la configuración que se tiene, en la tabla 7.1 el nombre de las variables y seguidamente el desarrollo matemático.

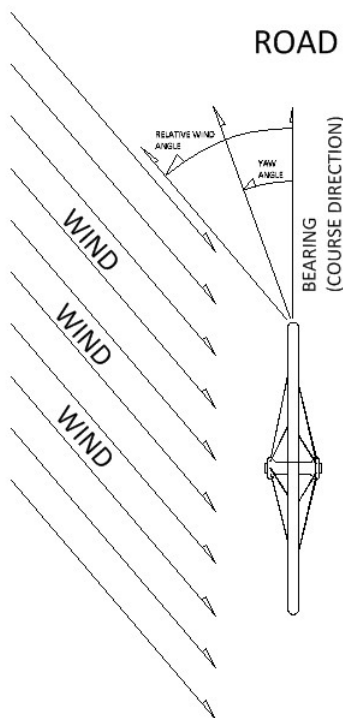


Figura 7.1: Viento Relativo (Fuente: Reynolds Bicycle)

Variable	Significado
V_w	Velocidad del Viento m/s
V_B	Velocidad de la rueda
V_w^H	Velocidad horizontal del viento
V_r	Velocidad relativa
α_w	Ángulo de incidencia del viento
α_r	Ángulo relativo

Tabla 7.1: Variables para el desarrollo matemático del viento relativo

$$V_r^H = V_B - V_w \sin(\alpha_w) \tag{7.1}$$

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{V_w \sin(\alpha_w)}{V_H}\right) \tag{7.2}$$

$$V_r = \frac{V_r^H}{\cos(\alpha_r)} = \frac{V_B - V_w \sin(\alpha_w)}{\cos(\alpha_r)} \tag{7.3}$$

Una vez definido las ecuaciones de la velocidad y el ángulo relativo, ecuación 7.2 y 7.3 respectivamente, solo queda definir la velocidad del viento, de la bicicleta y el ángulo del viento con respecto a la rueda. Para ver como se ve afectado las dos variables de las condiciones de entrada se puede ver la figura 7.2 donde se muestran dichas variables en función de la velocidad del viento para una velocidad de la bicicleta de 40 km/h, que como se ha citado, es la velocidad media de los ciclistas profesionales y una velocidad muy extendida en los análisis aerodinámicos.

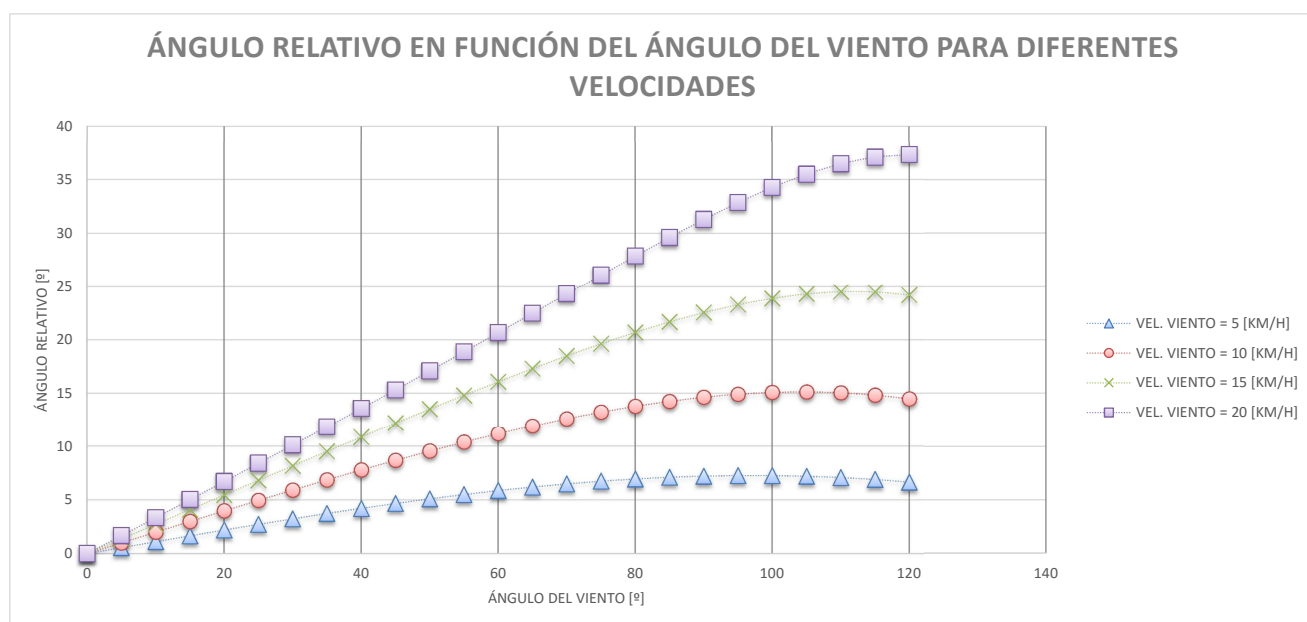


Figura 7.2: Ángulos relativos en función del ángulo del viento para diferentes velocidades del viento y la bicicleta. (Fuente: Propia)

Se puede apreciar en la figura anterior como para ángulos de viento incidente reducidos, entre 0 y 10°, la velocidad del viento influye poco. En cambio, se alcanza el máximo en 90°, viento completamente perpendicular; y se aprecia que un aumento de la velocidad en 5 km/h genera un incremento del ángulo relativo de 7° aproximadamente. Si el viento sigue aumentando su incidencia, es decir, superior a 90°, el viento y la rueda se desplazan en la misma dirección y ahora el viento relativo que recibe la rueda es inferior y eso genera un descenso en el ángulo relativo. Se aprecia como el rango de ángulos relativos oscila entre 5 y 25° aproximadamente para los casos analizados. Estos datos obtenidos se pueden verificar con una análisis en túnel de viento realizado por la empresa *Reynolds* (véase ref. [17]).

7.1.2 Tipos de Estudios

Muchos de los artículos que muestran revistas y fabricantes no muestran la velocidad del aire al que realizan el estudio salvo en alguno. Para ello se realizarán dos tipos de estudios, uno dedicado a comparar los diferentes modelos entre si con un criterio establecido a juicio del autor y otro estudio, donde se comparará la rueda al completo frente a otras ruedas del mercado. Este último ensayo se podrá ver en el capítulo de Análisis Aerodinámico (??).

Estudio Paramétrico

Se tendrán 4 casos de estudio para cada modelo de ruedas, quedan reflejado en la tabla 7.2. Los motivos de elegir estos valores es que se ha querido recoger los posibles casos más posibles, es decir, que el ángulo del viento sea nulo, y luego, como se ve en la figura 7.2 para abarcar el mayor número de sucesos posibles se eligen ángulos relativos de 5, 10 y 15°. Para los dos primeros con una velocidad del viento de 10° y para el tercero una velocidad del viento de 15°.

CASOS DE ESTUDIO AERODINÁMICA			
Número	Velocidad Relativa (km/h)	Ángulo relativo (°)	Ángulo del viento (°)
1	40	0	0
2	49.24	4.947	30
3	46.49	10.37	55
4	50.1	15.05	56

Tabla 7.2: Casos de estudio para el estudio paramétrico aerodinámico

Por lo tanto se tendrán 4 casos de estudio para cada modelo de rueda que se analice.

7.1.3 Parámetros de Estudio

Como se ha citado en el capítulo de diseño (ref. 6) se ha definido la geometría de los diferentes modelos de aro. En este caso será necesario utilizar unacamente la geometría exterior que es la que esta en contacto con el aire. Por lo stanto los modelos a ensayar son los que se muestran en la figura 7.3. Mientras que en la figura 7.4 se muestran la sección del aro de los modelos con los que se va a comparar.

En la figura 7.3 se muestran la sección del aro para cada modelo. Mientras que en la figura 7.4 se muestran la sección del aro de los modelos con los que se va a comparar.

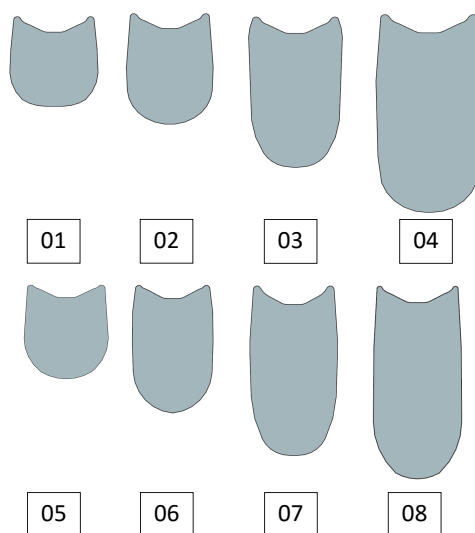


Figura 7.3: Sección modelos de aros propios. (Fuente: Propia)

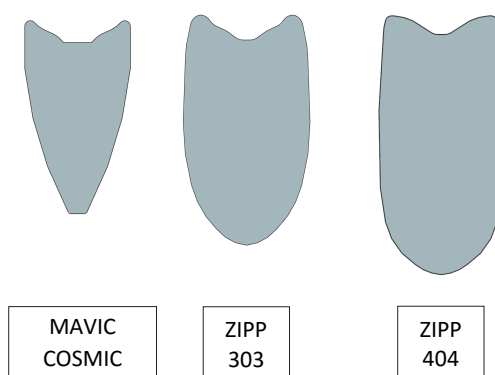


Figura 7.4: Sección modelos de aros para comparar. (Fuente: Propia)

Hay que tener en cuenta que el estudio se realiza con el aro y el neumático montado. Para ello se utilizará un neumático tubular de 23 milímetros de ancho, que es la medida más común entre los fabricantes de tubulares.

Idealización de la geometría

Así pues se tienen 11 modelos a estudiar por 4 casos, lo cual son 44 casos en total de estudio paramétrico. El siguiente paso una vez definida la geometría es idealizarla, con el fin de reducir el tiempo de cálculo en la solución final obviando ciertas partes de la rueda que no sean relevantes. Como el neumático también forma parte de la geometría a simular, este genera un borde donde la malla debería tener un tamaño muy pequeño para poder ver exactamente que pasa. Por lo tanto, este borde se elimina y se realiza una unión del neumático y el aro más redondeada. En la figura 7.5 se muestra la diferencia la geometría real y la idealizada.

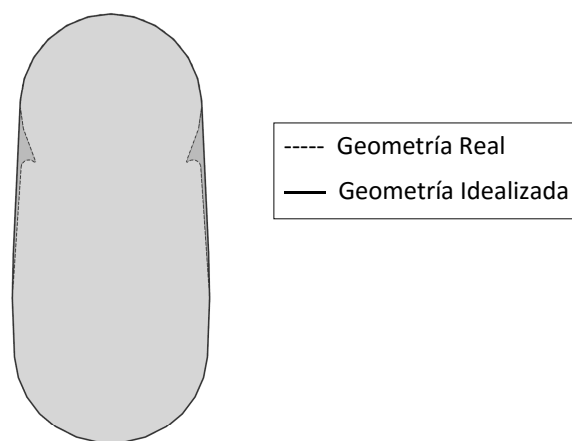


Figura 7.5: Idealización de la geometría del aro. (Fuente: Propia)

7.2 Dominio de Estudio

El dominio de estudio es el volumen de fluido en el cual se van a calcular punto a punto, o nodo a nodo, todas las variables deseadas. Existen normas para muchos productos sobre las dimensiones del dominio de estudio en referencia a una longitud característica de la pieza de estudio. Para el caso de la rueda de bicicleta no se ha encontrado ninguna norma certificada, en la referencia [31], muestra los datos que se tuvieron en cuenta para dicho análisis pero fueron seleccionados de manera arbitraria. Por lo tanto, tomando como longitud característica el diámetro exterior de la rueda, se dimensiona el volumen de control que se muestra en la figura 7.6, con las dimensiones de 1 diámetro de ancho, por un 1.5 diámetros de alto y 2.5 diámetros de largo. Cabe recordar que el diámetro de la rueda es de 622 milímetros. Este volumen de control tiene un largo tan reducido debido a que tan solo se busca estudiar el drag generado por el aro y para eso será necesario recoger la información en la capa límite de la rueda. Si el objetivo fuese realizar un análisis aerodinámico de la estela que produce la rueda si sería necesario, a priori, utilizar un dominio más largo para que el fluido pueda desarrollarse por completo.

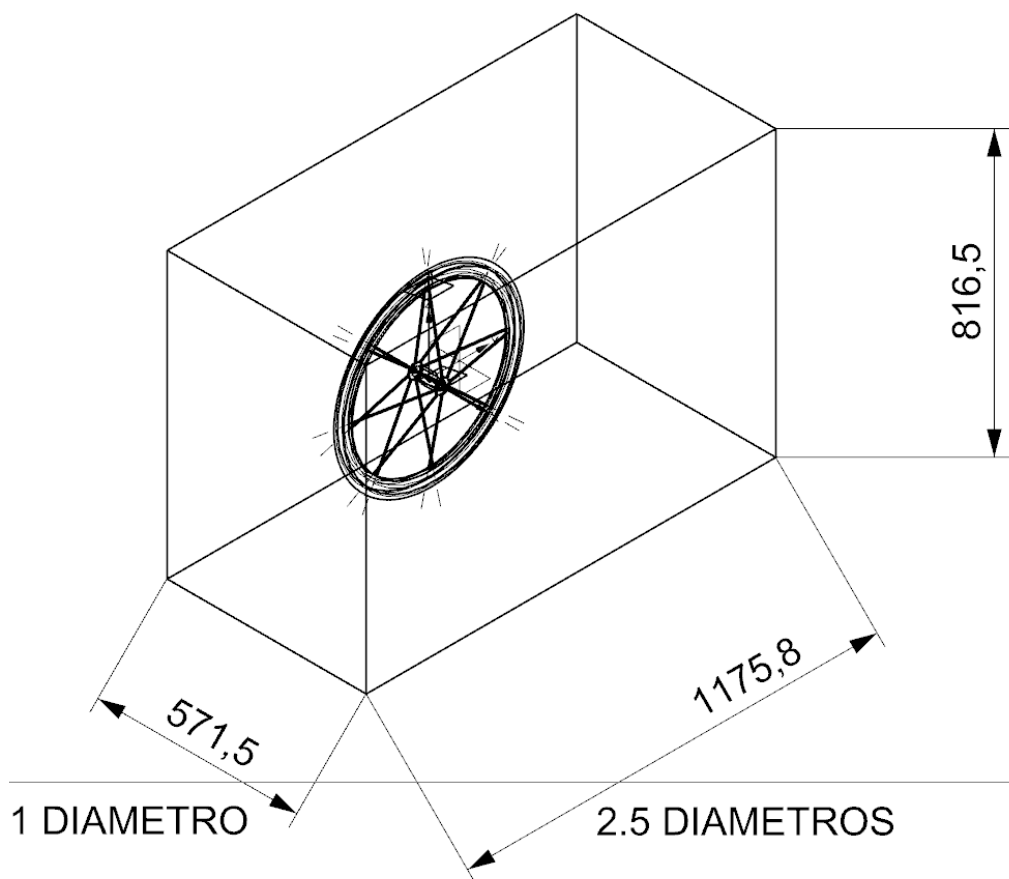


Figura 7.6: Dimensiones del dominio de estudio. (Fuente: Propia)

Así pues se define, como también puede verse en la figura 7.6, las diferentes condiciones de control del dominio de estudio. Se tiene que la entrada es un flujo uniforme y la salida del dominio de control esta abierta, es decir, el flujo puede salir por ella según haya quedado influenciado por la rueda.

7.3 Mallado

El mallado es un proceso fundamental en la realización de estudios mediante método numéricos, en esta fase lo más importante es la convergencia de malla. La cual es el proceso donde el resultado obtenido de los cálculos realizados deja de depender de malla utilizada. Esta fase es primordial porque sin ella los resultados carecen de significado. Un método bastante usual es comparar el número de nodos con una de las variables que se desean obtener, en este caso se han elegido tanto la velocidad máxima como el drag generado por la rueda. A continuación se explicará el proceso de mallado con este software y las modificaciones realizadas hasta encontrar los parámetros adecuados para mallas el dominio. El proceso de mallado se puede dividir según lo que hay que

realizar en el módulo de mallado, el módulo de simulación y en los parámetros del solver.

7.3.1 Módulo de mallado

Al solo querer estudiar el efecto del la rueda sobre el fluido y al revés, se malla la superficie exterior de la rueda con elementos 2D. Esto se hace debido al ahorro de tiempo de cálculo, pero en cambio no se puede estudiar los efectos del fluido sobre la rueda. Es decir, no se puede estudiar si debido al fluido la rueda sufre deformaciones en algún punto. Para el caso de estudio esto carece de relevancia porque el viento máximo tiene una velocidad de 50 km/h, por lo tanto, se puede carecer de dicha información para centrarse en lo más importante, el drag que genera la rueda. Se utiliza por tanto una malla 2D con un elemento triangular de 3 Nodos (3CTRIA según NX) debido a que el software detecta que este tipo de elemento es el que mejor se adapta a la geometría. Además el software sugiere un tamaño de elemento al analizar la geometría, este tamaño se utilizará como punto de partida para el estudio.

Posteriormente se mostrará que la malla de la rueda en este módulo sirve para poder definir el tipo de mallado del dominio, por lo tanto el tamaño del elemento deberá ser lo más pequeño posible. El programa sugiere un tamaño de 11.2 mm. tras analizar la geometría, pero tras numerosas iteraciones se muestra que el mejor tamaño es 4 mm. debido a que la malla del dominio se adapta mucho mejor. En cambio, reduciendo el tamaño a 3.4 mm. aumenta mucho el tiempo de cálculo pero los resultados y la calidad de la malla no varia debido a que depende más la malla que se defina en el dominio que esta. Por esta razón para todo el estudio de convergencia, se fija un tamaño del elemento de malla para la rueda de 4 mm. Se puede observar en la figura 7.7.

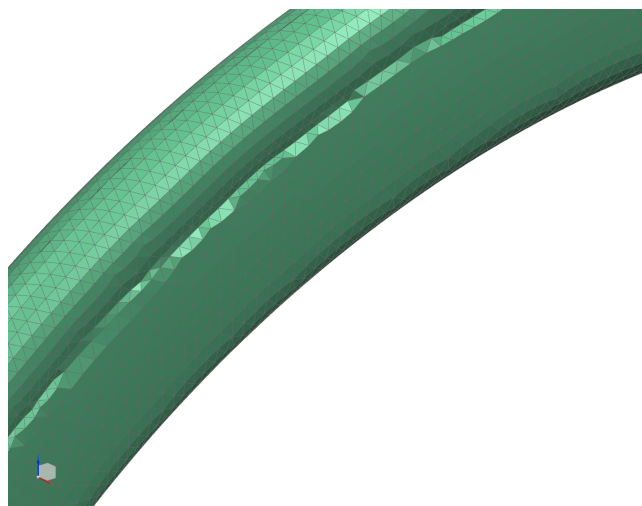


Figura 7.7: Malla del aro realizada en el módulo de mallado. (Fuente: Propia)

7.3.2 Módulo de simulación

Una vez definida la malla de la rueda, no es necesario seguir en el módulo de mallado de NX ya que el resto del dominio se malla como si fueran condiciones de contorno.

Malla de volumen del dominio

En la sección de dominio se elige el tamaño del elemento del dominio y puede ser absoluto, con un tamaño definido; o relativo a la malla. En el proceso de convergencia de malla se modificarán los dos parámetros. En este caso Nx parte con un valor absoluto por defecto.

Malla de la superficie del dominio

Se tiene la malla tridimensional del volumen del dominio pero todavía no se ha asignado que cuerpo se encuentra dentro. Será necesario seleccionar la malla de la rueda que se ha creado en el módulo de mallado, no la rueda. Por este motivo es necesario realizar un buen mallado de la rueda. Esta opción también se usa para modificar los elementos de la entrada y la salida del volumen de control. Se deberá de definir o según la densidad de la malla en la superficie y/o creando una capa límite para adecuar la malla del cuerpo a la del dominio.

- Densidad de la malla de superficie Densidad de la malla de superficie. Es el método que se utiliza cuando se realiza la malla del volumen del fluido y se debe definir un tipo de tamaño o absoluto o relativo, del mismo modo que anteriormente.
- Capa Límite Se deberá especificar el espesor de la capa límite y controlar como se realiza la transición hacia el fluido. Se puede realizar especificando el espesor global o con la relación de espesor relativo.
 - Espesor Global. Se habrá de especificar el espesor de la primera sección, el total de la capa límite y el número de secciones.
 - Relación de espesor relativo. Se deberá seleccionar la relación de grosor de las capas y o bien el espesor de la primera sección o el número de secciones que conforman la capa límite.

7.3.3 Parámetros del solver

Una vez están definidos todos los parámetros de la malla de la rueda y del dominio será necesario activar en el solver la capacidad de que los elementos de la malla puedan tener diferentes tamaños a lo largo de la misma. Es decir, si se fija un valor para el dominio de 200 mm. y un valor para la rueda de 4 mm. debe de haber una transición de malla para que la malla coincida. Si este parámetro no se activa el software no podrá mallar.

7.3.4 Calidad del mallado

Una vez realizada la malla es posible comprobar la calidad de la misma y existen 3 parámetros que definen dicha calidad.

- Relación de Aspecto del Elemento (AR). Se muestran en pantalla elementos que se han formado de una manera inadecuada y que puede causar problemas de convergencia y precisión. La relación de aspecto se define como el largo x el alto del elemento, como si fuera un triángulo. En la figura 7.8 se puede ver la configuración.

$$AR = \frac{L}{h} \quad (7.4)$$

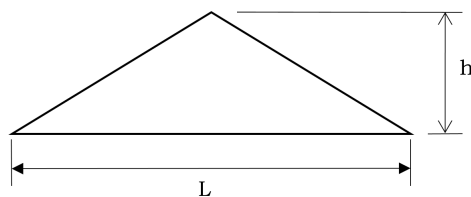


Figura 7.8: Relación de Aspecto de un elemento. (Fuente: Propia)

Por lo tanto, como el tipo de elemento elegido es triangular, conforme la relación de aspecto sea lo más próxima a 1 (puede ir de 1 a infinito) mayor calidad tendrá la malla.

- Tamaño del elemento. Se representa en 3D los elementos del dominio con el objetivo de poder ver si alguna transición no se está realizando correctamente y el valor es muy grande o muy pequeño. Esta variable es un poco más compleja de interpretar pues no hay un criterio claro con respecto a cuando el elemento es demasiado grande o demasiado pequeño.
- Inclinación del elemento. Es una opción para los elementos triangulares tridimensionales y mide el grado de asimetría que tienen. Se mide el porcentaje de volumen del elemento en cuestión con el elemento óptimo. La inclinación del elemento queda definida en la ecuación 7.5 que proporciona valores entre 0 y 1, siendo 0 el valor que genera una calidad de malla superior.

$$S_{3D} = \frac{V_{optim} - V_{elem}}{V_{optim}} \quad (7.5)$$

7.3.5 Mejorar la calidad de la malla

A parte de elegir bien los parámetros que definen la malla de la rueda y del dominio, ya sea por tamaños absolutos o relativos, el software permite modificar ciertos parámetros para adecuar la malla a una serie de valores. La ventaja y la desventaja de este método es la misma, estas variables afectan a toda la malla por igual y aumentar la calidad por este método resulta computacionalmente más costoso porque es el software

quien tiene que identificar y modificar los parámetros, en lugar de fijarlos el usuario.

- Fijar unos valores de calidad de malla. Lo que se hace por este método es fijar unos valores de calidad de la malla en las variables de relación de aspecto, inclinación y ángulo máximo del elemento y hacer que la malla fije unos elementos que se adecuen a dicha calidad o valor de refinamiento.
- Refinado de la forma del elemento. Se añade un factor de refinamiento que modifica el tamaño del elemento de malla según la ecuación 7.6 donde RF es el factor de refinamiento (entre 0 y 1) y MS el tamaño inicial de la malla.

$$MS_{new} = RF \times MS \quad (7.6)$$

- Incremento del elemento mediante el volumen. Con un factor entre 0 y 1 se realiza el ratio de la transición del tamaño de malla de las regiones más finas a las más gruesas. En la figura 7.9 se puede ver que en el caso (1) se tiene una calidad de malla mala, cercana a 0, y en el caso (2) una calidad muy buena, cercana a 1.

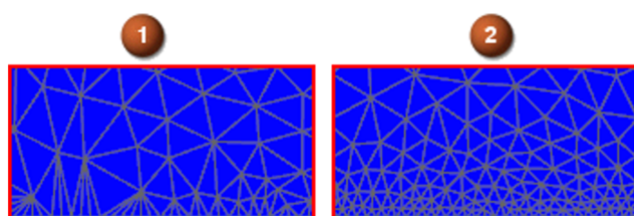


Figura 7.9: Incremento del elemento mediante el volumen como factor para mejorar la calidad de la malla. (Fuente: Documentación NX 9.0)

- Variación basada en la curvatura de la superficie. Es un factor entre 0.01 y 0.4 que hace reducir el tamaño del elemento para aproximar en mayor o menor medida la malla a la superficie del cuerpo. Cuanto menor sea el factor, más refinada será la malla. Esto se puede apreciar en la figura 7.10 donde el caso (1) tiene un valor de 0.4 y el caso (2) un valor de 0.03.

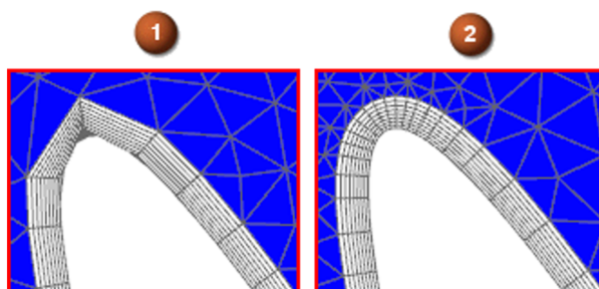


Figura 7.10: Variación basada en la curvatura de la superficie como factor para mejorar la calidad de la malla. (Fuente: Documentación NX 9.0)

7.3.6 Convergencia de Malla

A continuación se mostraran todas las simulaciones llevadas a cabo para obtener la convergencia de malla. En las figuras 7.11, 7.12 se muestra los nodos, la velocidad máxima y el drag para una simulación con viento a 40 km/h y ángulo de incidencia nulo para el modelo de aro 2 con una rueda sin idealizar hasta la simulación 14 y posteriormente idealizado. Posteriormente se mostrarán los cambios realizados de un mallado a otro y el motivo de los mismos. Cabe citar que se mostrarán los cambios en el dominio, en la superficie de frontera ("Entrada-Salida") y en la superficie de la rueda.

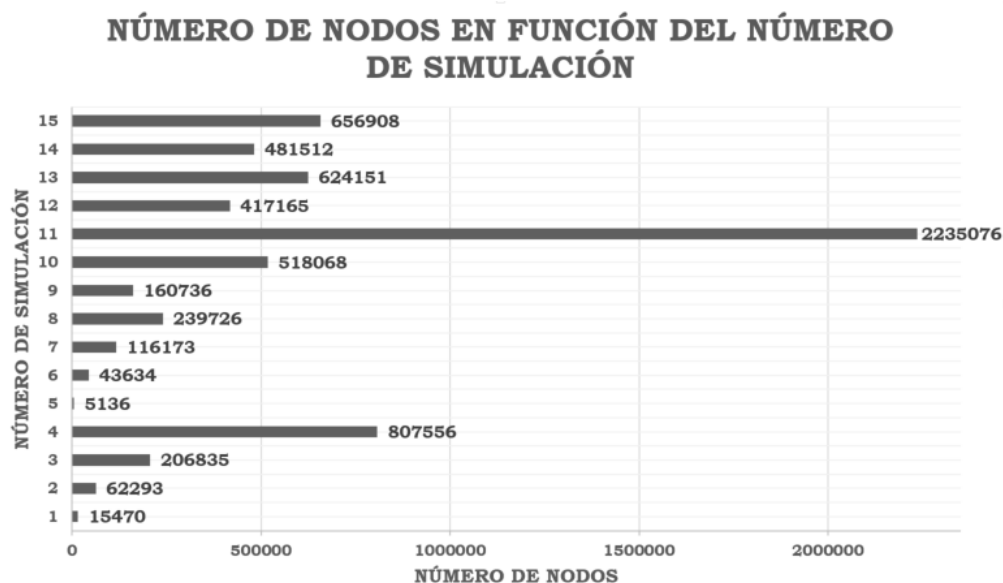


Figura 7.11: Número de nodos en función del número de simulaciones realizadas para la convergencia de malla. (Fuente: Propia)

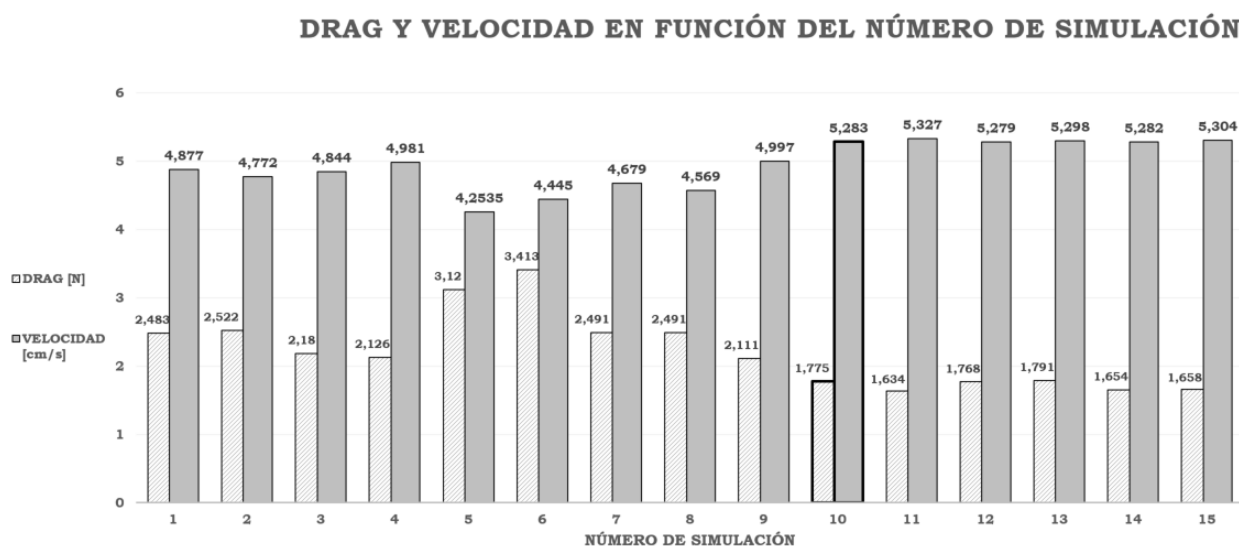


Figura 7.12: Drag y velocidad máxima en función del número de simulaciones realizadas para la convergencia de malla. (Fuente: Propia)

Simulación 1

- Mallado.
 - Dominio. Tamaño absoluto de 150 mm.
 - Entrada-Salida. Tamaño absoluto de 70mm.
 - Rueda. Tamaño absoluto de 10mm.
 - Nodos. 15470.
- Resultado.
 - Velocidad. 48.77 km/h.
 - Drag. 2.483 N.
 - Tiempo. 1' 53".
- Conclusión. Una malla con una calidad muy mala a simple vista ya que la rueda no tiene ningún detalle bien marcado.

Simulación 2

- Mallado.
 - Dominio. Tamaño absoluto de 100 mm.
 - Entrada-Salida. Tamaño absoluto de 40mm.
 - Rueda. Tamaño absoluto de 5mm.
 - Nodos. 298719.
- Resultado.
 - Velocidad. 47.72 km/h.
 - Drag. 2.522 N.
 - Tiempo. 3' 30".
- Conclusión. La rueda se aprecia con buen detalle pero la transición al dominio es muy mala.

Simulación 3

- Mallado.
 - Dominio. Tamaño absoluto de 40 mm.
 - Entrada-Salida. Tamaño absoluto de 15 mm.
 - Rueda. Tamaño absoluto de 5mm.
 - Nodos. 1067952.
- Resultado.
 - Velocidad. 48.44 km/h.
 - Drag. 2.18 N.

- Tiempo. 7' 3".
- Conclusión. La transición mejora pero el dominio tiene elementos muy pequeños, sobre todo las fronteras. De la simulación 1 a la 2 el drag descende, y ahora con más nodos, el drag aumenta. El principio no es válido para la convergencia de malla.

Simulación 4

- Mallado.
 - Dominio. Tamaño absoluto de 20 mm.
 - Entrada-Salida. Tamaño absoluto de 15 mm.
 - Rueda. Tamaño absoluto de 3 mm.
 - Nodos. 807556.
- Resultado.
 - Velocidad. 49.81 km/h.
 - Drag. 2.126 N.
 - Tiempo. 23' 26".
- Conclusión. Una calidad en la superficie de la rueda muy buena pero un dominio muy pequeño con una transición de malla muy elevada. Es innecesario tanta precisión en las fronteras y la malla cerca de la rueda debe mejorar.

Simulación 5

- Mallado.
 - Dominio. Relativo con un valor de 0.06 (por defecto).
 - Entrada-Salida. Relativo con un valor de 0.06 (por defecto).
 - Rueda. Relativo con un valor de 0.06 (por defecto).
 - Nodos. 5136.
- Resultado.
 - Velocidad. 42.53 km/h.
 - Drag. 3.2 N.
 - Tiempo. 20".
- Conclusión. Calidad de malla malísima.

Simulación 6

- Mallado.
 - Dominio. Relativo con un valor de 0.03.
 - Entrada-Salida. Relativo con un valor de 0.04.
 - Rueda. Relativo con un valor de 0.01.

- Nodos. 43634.
- Resultado.
 - Velocidad. 44.45 km/h.
 - Drag. 3.413 N.
 - Tiempo. 6' 24".
- Conclusión. Mejora la transición entre el dominio y la frontera y la rueda pero la rueda no tiene una buena calidad de malla.

Simulación 7

- Mallado.
 - Dominio. Relativo con un valor de 0.015.
 - Entrada-Salida. Relativo con un valor de 0.04.
 - Rueda. Relativo con un valor de 0.01.
 - Nodos. 116173.
- Resultado.
 - Velocidad. 46.79 km/h.
 - Drag. 2.491 N.
 - Tiempo. 3' 50".
- Conclusión. Malla similar a la simulación 4 pero con un tiempo de cálculo menor y las variables de control con resultados muy diversos.

Simulación 8

- Mallado.
 - Dominio. Relativo con un valor de 0.01.
 - Entrada-Salida. Relativo con un valor de 0.03.
 - Rueda. Relativo con un valor de 0.007.
 - Nodos. 239726.
- Resultado.
 - Velocidad. 45.69 km/h.
 - Drag. 2.491 N.
 - Tiempo. 7' 15".
- Conclusión. Dominio en general muy pequeño con una transición aceptable y una buena calidad en la superficie de la rueda. El drag se mantiene constante y la velocidad aumenta en línea con las simulaciones anteriores.

Simulación 9

- Mallado.
 - Dominio. Relativo con un valor de 0.02.
 - Entrada-Salida. Relativo con un valor de 0.015.
 - Rueda. Relativo con un valor de 0.005.
 - Nodos. 160736.
- Resultado.
 - Velocidad. 49.97 km/h.
 - Drag. 2.11 N.
 - Tiempo. 10' 18".
- Conclusión. Las fronteras tienen un tamaño de elemento muy pequeño pero el dominio si tiene un buen tamaño, el problema es la mala transición entre ambos. En la rueda si se tiene una buena transición con una buena calidad de malla. Hay un gran aumento de la velocidad en comparación a la simulación anterior, de momento no parece que converjan las soluciones.

Simulación 10

- Mallado.
 - Dominio. Relativo con un valor de 0.02.
 - Entrada-Salida. Relativo con un valor de 0.01.
 - Rueda. Relativo con un valor de 0.003.
 - Nodos. 518068.
- Resultado.
 - Velocidad. 52.83 km/h.
 - Drag. 1.775 N.
 - Tiempo. 18' 29".
- Conclusión. Calidad de la superficie de la rueda y su transición al dominio excelente. El problema es la transición entre el dominio y la frontera. Existe un cambio muy grande en el drag y la velocidad en esta simulación.

Simulación 11

- Mallado.
 - Dominio. Relativo con un valor de 0.012.
 - Entrada-Salida. Relativo con un valor de 0.01.
 - Rueda. Relativo con un valor de 0.001.
 - Nodos. 2235076.
- Resultado.

- Velocidad. 53.27 km/h.
 - Drag. 1.634 N.
 - Tiempo. 3h 42' 52".
- Conclusión. Calidad de la superficie de la rueda y su transición al dominio inmejorable. El problema continua con la transición entre el dominio y la frontera. Debido al tiempo de simulación es inabordable realizar 24 simulaciones pues serían muchas horas de cálculo. Lo que se toma como válido son los resultados y se intentará que con otros parámetros de mallado se consiga resultados similares.

Simulación 12

- Mallado.
- Dominio. Relativo con un valor de 0.04.
 - Entrada-Salida. Absoluto de 100 mm..
 - Rueda. Relativo con un valor de 0.003.
 - Nodos. 417165.
- Resultado.
- Velocidad. 52.79 km/h.
 - Drag. 1.738 N.
 - Tiempo. 35' 41".
- Conclusión. Se continua con una calidad de la superficie y su transición al dominio muy buena y en este caso con un tamaño del dominio lejos de la rueda muy grande, lo que se traduce en un tiempo de cálculo mucho menor. Aun así la transición entre la frontera y el dominio no es buena. Tanto el drag como la velocidad no son muy diferentes a la simulación 11, que es la de referencia.

Simulación 13

- Mallado.
- Dominio. Relativo con un valor de 0.04.
 - Entrada-Salida. Absoluto de 100 mm..
 - Rueda. Relativo con un valor de 0.002.
 - Nodos. 624151.
- Resultado.
- Velocidad. 52.98 km/h.
 - Drag. 1.791 N.
 - Tiempo. 30' 08".
- Conclusión. Se mejora la calidad y la transición en la superficie de la rueda. Por lo demás el bastante similar a la simulación anterior, tanto en calidad de malla como en resultados y se ha conseguido reducir en 5' el tiempo de cálculo. Debido a la alta inestabilidad de los resultados y tras consultar con varias fuentes, se decide idealizar la geometría.

Simulación 14

- Mallado.
 - Dominio. Relativo con un valor de 0.03 .
 - Entrada-Salida. Relativo con un valor de 0.08.
 - Rueda. Relativo con un valor de 0.0025.
 - Nodos. 481512.
- Resultado.
 - Velocidad. 52.82 km/h.
 - Drag. 1.654 N.
 - Tiempo. 27' 72".
- Conclusión. Con la geometría idealizada se obtiene una calidad de malla en general muy similar a la de la simulación de referencia aunque debido al cambio de la geometría tanto el número de nodos como el tiempo de cálculo se ha visto reducido. Además los resultados del drag y la velocidad no son muy dispares. Por lo tanto se decide modificar los parámetros del solver antes citados.

Simulación 15

- Mallado. Idem al anterior en el apartado de dominio, entrada-salida y rueda.
 - Variación del tamaño de la malla dentro del dominio. Se permite modificar el tamaño tanto en elementos 2D como 3D utilizando el parámetro de oblicuidad con un factor de 0.85.
 - Refinado de la forma del elemento. Con factor RF de 0.23.
 - Incremento del elemento mediante volumen. Se fija una calidad de 1, es decir la máxima posible.
 - Variación basada en la curvatura. Se fija un valor de 0.01, que es el mínimo permitido y define una calidad máxima.
 - Nodos. 656908.
- Resultado.
 - Velocidad. 53.04 km/h.
 - Drag. 1.658 N.
 - Tiempo. 31' 22".
- Conclusión. Los resultados de drag y velocidad son muy similares a los anteriores, se puede concluir que la convergencia de malla es evidente. Se aprecia que la transición en todo el dominio es muy buena, sobre todo en las partes cercanas a la rueda que es donde mayor calidad de malla se necesita, así como en la superficie de la rueda.

7.4 Resultados del estudio aerodinámico

7.4.1 Drag generado por el aro

Una vez obtenidos los parámetros para realizar el mallado únicamente hace falta realizar todos los cálculos para cada aro. A continuación, en la figura 7.13 para verlo de manera más gráfica, se muestra el drag para cada modelo y cada caso de estudio y el promedio de todos los casos. Además, en la tabla 7.3 se muestran los valores numéricos de dicho estudio.

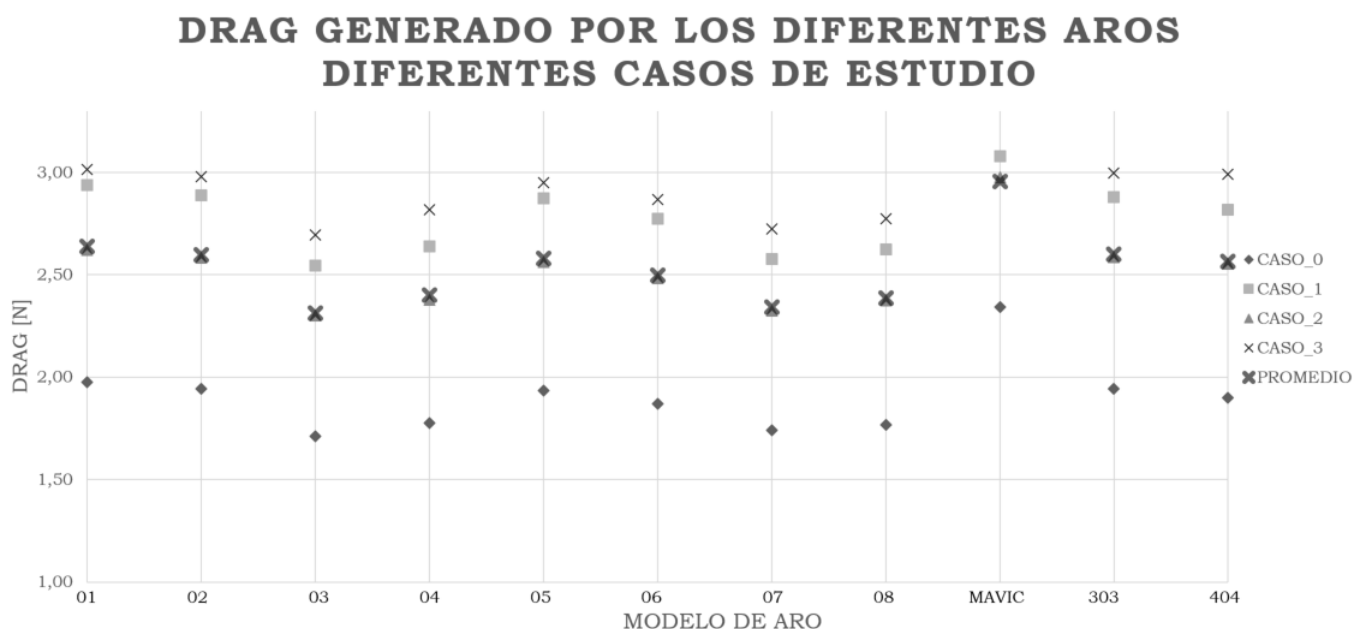


Figura 7.13: Drag generado por cada aro de estuio para todos los casos. (Fuente: Propia)

DRAG GENERADO POR LOS AROS DE ESTUDIO

Modelo	CASO 0	CASO 1	CASO 2	CASO 3	PROMEDIO
1	1.98	2.94	2.62	3.01	2.63
2	1.94	2.89	2.58	2.98	2.6
3	1.71	2.55	2.3	2.69	2.31
4	1.78	2.64	2.38	2.82	2.4
5	1.94	2.88	2.56	2.95	2.58
6	1.87	2.77	2.48	2.87	2.5
7	1.74	2.58	2.32	2.72	2.34
8	1.77	2.62	2.37	2.77	2.39
Mavic Cosmic Ultimate	2.34	3.08	2.97	3.41	2.95
Zipp 303	1.94	2.88	2.58	2.99	2.6
Zipp 404	1.9	2.81	2.553	2.99	2.56

Tabla 7.3: Drag generado por los diferentes aros para los 4 casos de estudio.

De estos resultados es fácil poder obtener rápidas conclusiones que ayuden a ir eliminando modelos de cara a la decisión final. En promedio el aro que menos drag genera es el modelo 3, que tiene un ancho de 25 mm. y una longitud de perfil de 44 mm. En cambio, el que más drag genera, del conjunto de aros propios, es el modelo 1, con un ancho de 25 mm y un perfil de 28. Se aprecia una constancia entre unos casos y otros, es decir, los aros que mejores se comportan lo hacen en todos los casos de estudio no solo en uno. Por lo tanto, el aro que se elija será el más idóneo para un gran abanico de casos que pueden suceder en la realidad. En cambio, si compara con los 3 modelos existentes, se tiene que el aro de la rueda Mavic Cosmic Ultimate es el que más drag genera, debido a que es un aro tipo "V" donde las líneas de corriente no pueden adaptarse al cambio brusco de geometría en el borde de ataque y el flujo se desprende. En todos los casos este aro es el que más resistencia genera. Por lo tanto se tiene que los modelos que generan un menor drag son el modelo 3, 7 y 8, es decir, modelos con el perfil elevado.

Evidentemente se tiene que para el caso 0, donde el ángulo de incidencia es nulo, el aro presenta una resistencia inferior. En cambio, el aumentar la velocidad influye en mayor medida sobre el drag que aumentar el ángulo de incidencia. Las velocidades son 49, 46 y 50 km/h para los casos 1, 2 y 3 respectivamente y se tiene que los casos que más drag generan son el 3, el 1 y el 2 por este orden. Por tanto, a mayor velocidad de estudio se tiene un drag superior, pese a que el ángulo de incidencia aumenta. Por ejemplo, el caso 1 y 2 es con un viento de 10 km/h de velocidad con una incidencia de 30 y 55° respectivamente, se tiene que el caso 2 se genera una resistencia en el sentido de la marcha superior.

Fijándose en la longitud del perfil se aprecia como valores pequeños de los mismo, ofrecen un drag muy alto, en cambio al tener un menor volumen de aro, tienen un peso menor. Del modelo 1 al 3 existe una disminución gradual de resistencia, en cambio, del modelo 3 al 4 existe un aumento de la misma. Parece ser que existe un óptimo en la relación que existe entre la longitud del perfil, el ancho del aro y la eficiencia aerodinámica. Esto es debido a que en el modelo 1 el aro se asemeja en parte a un círculo pues tiene lo mismo de perfil que de ancho, y como muchos estudios aerodinámicos muestran, se generan una gran cantidad de torbellinos en su estela debido a que las líneas de corriente no pueden adaptarse a la superficie. Si se aumenta la longitud del perfil, se pierde la forma del círculo para llegar a una especie de elipse, donde el flujo se adapta mucho mejor. Pero, si se sigue aumentando la longitud del perfil, se tiene un cuerpo con una sección superior y el drag es proporcional a la sección, por lo tanto no siempre aumentar la longitud es bueno, como se puede ver.

Se aprecia que al disminuir el ancho del aro, el drag generado se ve reducido debido a que el área es menor y las líneas de corriente se adaptan de la misma manera. En general el promedio de los modelos con un ancho de 25 mm. genera un drag de 2.49N mientras que para un ancho de 23 mm. el drag es de 2.45 N. El comportamiento es muy similar pero si se aprecia que un ancho de 23 mm. es más idóneo que el de 25 mm. También cabe decir que si se sigue disminuyendo el ancho del aro, lo habitual es que el flujo se desprenda en una región más próxima al borde de ataque. Esto hecho queda reflejado si se analizan los aros Zipp 303 y 404, con un perfil de 45 y 58 mm. respectivamente y un ancho de aro de 24 mm. En este caso el modelo con mayor perfil genera

menos drag en todos los casos. Estos modelos se podrían comparar con el modelo 3 y 4 donde ocurre lo contrario. Se puede concluir, que para cada ancho del aro habrá un perfil que aumenta la eficiencia aerodinámica o viceversa.

Se puede concluir que los modelos 1, 2, 4, 5 y 6 quedan descartados pues generan un drag superior al resto. El criterio para discernir que aro será el elegido será el peso. Es el peso y no las propiedades estructurales porque como el aro es hueco, se puede aumentar o modificar el espesor del aro con el fin de obtener las mismas propiedades mecánicas que con un aro o más ancho o con más perfil. Por lo tanto, hasta el estudio estructural no se podrá definir que modelo de aro es el elegido.

Con respecto a las fuerzas de resistencia perpendiculares a la dirección del flujo, su valor es de 2 ordenes de magnitud inferior al drag longitudinal. Por lo tanto, al ser una fuerza muy pequeña, se necesitaría una calidad de malla muy alta para poder comparar resultados entre modelos, hecho que no se dispone. Por lo tanto, no se puede realizar cualquier comentario al respecto, aunque como se ha comentado, esta componente de la resistencia carece de un elevado significado en este caso.

7.5 Conclusiones estudio aerodinámico

- El aro que menor drag genera es el modelo 3, con un ancho de 25 mm. y una longitud de perfil de 44 mm. En general, presenta una menor resistencia que los 3 aros de fabricantes de la competencia.
- Las ruedas con muy poco perfil (<40mm.) generan un drag superior debido a que su forma se asemeja más a la de un círculo que a la de una elipse.
- Muchos de los estudios aerodinámicos citados han de evaluarlos con cautela, como se ha visto; no un mayor ancho del aro genera una drag menor por el hecho de que las líneas de corriente se adhieran mejor a la superficie. Para cada ancho de aro, existe una longitud de perfil óptima con el objetivo de reducir la eficiencia aerodinámica.

ESTUDIO ESTRUCTURAL

Después de realizar el estudio aerodinámico se va a realizar un estudio estructural sobre las diferentes piezas que forman la rueda. Se realizarán estudios paramétricos sobre la cantidad y tipo de radiado, sobre el tipo de aro y el buje. Las empresas en todos sus análisis hacen referencia a test propios de los cuales solo dan una cierta cantidad de datos, sobre todo los que a ellos les conviene, por lo tanto no es una fuente fiable de datos con los que consultar. Realizando una búsqueda se ha encontrado el test estructural de la empresa independiente "Roues Artisanales" sobre un gran cantidad de ruedas en 2008 (ref. [16]) y sobre ruedas "full-carbon" en 2011 (ref. [18]).

Aunque la rueda vaya a realizarse en fibra de carbono, por el hecho de simplificar el estudio, ya que el objetivo es ver que componentes afectan en mayor medida a la rigidez de la rueda, todos los componentes que se van a simular estarán caracterizados con Aluminio 7075. Se ha elegido este material porque las ruedas más convencionales utilizan este tipo de material en concreto. Es más, muchas ruedas de alta gama utilizan este material para fabricar tantos los radios como los bujes.

Se detallarán cuales son las condiciones de contorno para los test que se van a realizar. Posteriormente, se irá mostrando estudio por estudio cual es el tipo de mallado utilizado, los resultados y las conclusiones.

8.1 Condiciones de Contorno

Durante una competición en bicicleta existen numerosas fuerzas que actúan sobre la rueda de la bicicleta. El peso del ciclista es una de ellas, la fuerza lateral ya sea por el viento, por pedalear o por tomar una curva, etc. Muchas de ellas son extremadamente complejas de modelizar como podrían ser las vibraciones o los impactos. Por ello, se deciden hacer únicamente dos tipos de ensayo, uno de rigidez frontal y otro de rigidez lateral.

8.1.1 Test de Rigidez Frontal

El test experimental realizado por "Roues Artisanales" consistía en fijar la rueda por su buje, como si estuviese colocada en la bicicleta, y aplicar una fuerza en la parte superior del aro, estando la parte inferior en contacto con el suelo. Por lo tanto se tiene que los extremos del buje no se van a desplazar, pues se encuentran fijos. La fuerza que se realiza es vertical, como se muestra en la figura 8.1, y se hará un solo tipo de ensayo

con una fuerza de 1000 Newtons, que vendría a ser un ciclista de un peso de 100 kg. En este caso no se tiene en cuenta que el ciclista esta apoyado en los pedales, el sillín y el manillar y que todo ese peso se repartirá en toda la bici, por lo tanto, este ensayo reproduce la situación de una persona de 100 kg. subida encima de la rueda, que es mucho más de lo que recibe la rueda en una situación normal.

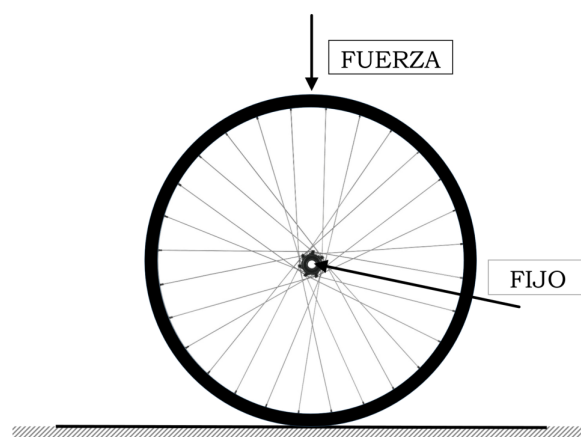


Figura 8.1: Configuración del Ensayo frontal (Fuente: Propia)

8.1.2 Test de Rigidez Lateral

Para este test se siguen las mismas indicaciones que para el test frontal, lo único que ahora la fuerza se realiza sobre un lateral del aro. Como se van a realizar ruedas con la cantidad mínima de radios posibles por la UCI y con una configuración especial, también se decide aplicar la fuerza en el aro sobre el punto medio entre dos radios, véase figura 8.2.

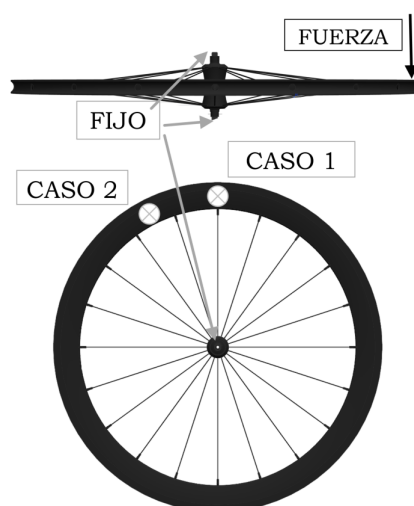


Figura 8.2: Configuración del Ensayo lateral (Fuente: Propia)

Obtener la fuerza lateral que actúa sobre la rueda es muy complicado. Según el ensayo que se está utilizando como referencia, indican que se aplican diferentes pesas con

un valor máximo de 240 Newtons. Para ver de donde se ha obtenido este valor se realiza un pequeño experimento. Con la rueda montada en la bicicleta, ejerciendo fuerza en el caso 1 o 2 con un dedo de la mano una rueda convencional se desplaza hasta 1 centímetro. Si ahora se realiza esa misma fuerza sobre una báscula se obtiene un peso de entorno a 15 kilos, que son equivalentes a 150 N. por lo que es coherente hacer un ensayo de fuerzas de hasta 240 N. Este desplazamiento es excesivo debido a que antes la llanta roza con la zapata de freno aunque este montada siguiendo las especificaciones del fabricante. Por lo que una rueda que durante su uso no roza con la zapata, que esta a menos de un 1 centímetro y hace falta 150 N. para hacer que toquen, si se le aplica una fuerza superior, se esta realizando un estudio en el peor de los casos. Por lo tanto se aplicarán fuerzas de 100, 150, 200 y 250 Newtons para cada caso con el objetivo de poner tener una recta que muestre la rigidez lateral de la rueda suponiendo que se comporta de una manera lineal.

8.2 Mallado

La malla para un estudio estructural no es tan relevante como en los casos aerodinámicos por el hecho de que los tiempos de cálculo son mucho más reducidos, en torno a 2-3 minutos con una tamaño de elemento muy pequeño. Por lo tanto se puede utilizar un tamaño de elemento bastante pequeño aunque el tiempo de cálculo se eleve debido a que aun así será reducido. En muchas ocasiones lo que ha marcado la calidad de la malla ha sido el hecho de que se pudieran unir los diferentes componentes. Es decir, se ha mallado cada componente por separado con la condición de que en la unión de los mismos la malla sea idéntica. Con este método se consigue poder utilizar diferentes mallas en cada componente y diferentes condiciones de contorno en las uniones de los mismos. Para hacer un estudio paramétrico no es un apartado relevante pero cuando se estudio la rueda para obtener la laminación será importante ver que condiciones existen en los puntos de unión de los componentes pues puede haber problemas de delaminación.

A continuación se explicará la malla de cada componente de la rueda.

Radio

Se comienza por el radio debido a que es el componente que más detalle precisa pues es el que tiene un geometría con las dimensiones más reducidas. Por ser elementos con una longitud predominante se realiza una malla de barrido tridimensional con elementos hexagonales de 8 nodos por elemento. Se fija un tamaño del elemento para todos los radios de 1.5 mm. debido a que la diferencia de apariencia entre la geometría y la malla era muy significativa y no se conseguía reproducir el radio con exactitud.

Aro

Para el aro se utilizará un elemento tridimensional tetraédrico de 10 nodos en cada elemento. El tamaño del elemento será la mitad de lo que el software estime idóneo. Estos valores oscilan entre los 3.5 y 4.5 mm de tamaño del elemento. Estos valores son debidos para que el aro y el radio adquieran la misma malla en su punto de unión ya que sino el software era incapaz de cumplir dicha condición.

Buje

Para la totalidad del buje se usa el mismo tipo de malla que para el aro. La única salvedad es que el factor que se usa para obtener el elemento de malla ahora es de 0.7 y no de 0.5 como lo era en el aro. Esto hace que según el tipo de modelo la malla oscile entre los 5 y 7 mm. Este factor se define porque con 0.8 la condición de acoplamiento de malla no se cumplía y los resultados desde 0.7 a 0.3 eran idénticos.

8.3 Estudio de Rigidez Frontal

El primer estudio estructural a realizar será el de rigidez frontal, y como citan anteriores estudios, es un parámetros que influye poco a la hora de comparar dos ruedas debido a los valores tan altos que proporcionan las ruedas generalmente. Para ello se comenzará analizando la rueda en el peor de los casos, es decir, con el aro más estrecho y corto posible y con la cantidad mínima de radios posibles, 12. Para el buje se utiliza la configuración con menos espesores en todas sus partes, es decir, el modelo 5. Por tanto, otro tipo de configuraciones, con mayor cantidad de material, generará una rigidez superior. Algo que no es evidente es como afectará el tipo de radiado, por lo tanto se hará un estudio con un radio redondo de 4 mm., después de haber analizado otras ruedas similares, y un radiado sin cruces con los radios equiespaciados, sin cruces pero con la unión aro-radio muy cercana y otro con un radiado a 2 cruces. En la figura 8.3 se muestra los dos tipos de radiados sin cruces.

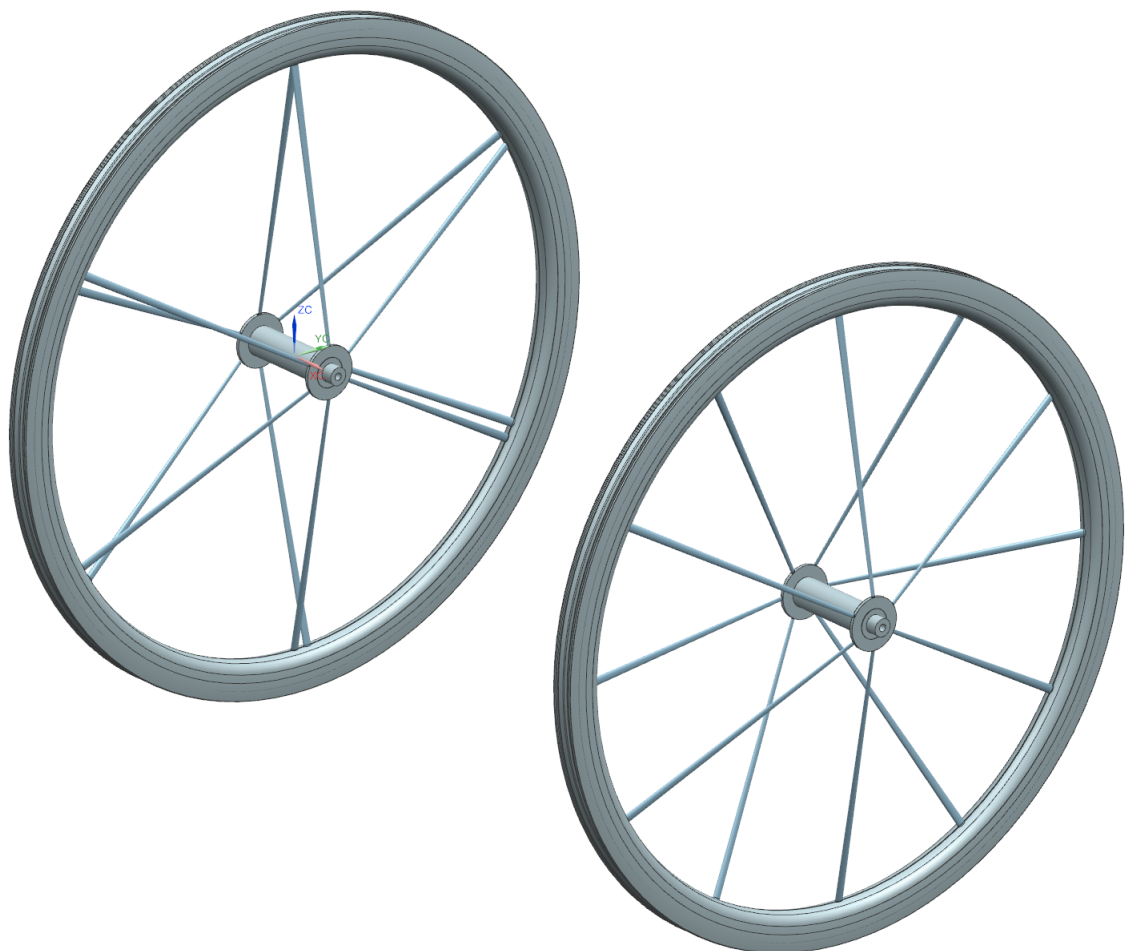


Figura 8.3: Tipos de Radiado. Radial I (Izq.) y Radial II (Drc.) (Fuente: Propia)

8.3.1 Resultados Estudio Rigidez Frontal

En la tabla 8.1 se muestran los resultados de los 3 tipos diferentes de ensayos para calcular la rigidez frontal.

RESULTADOS ESTUDIO RIGIDEZ FRONTAL

	Radial I	Radial II	2 Cruces
Desplazamiento Max. (mm)	0.516	0.83	0.421
Tensión Max. (MPa)	114.3	123.54	128.63

Tabla 8.1: Resultados del test frontal

Analizando los desplazamientos y las tensiones máximas para dichos desplazamientos se puede verificar que se está trabajando dentro de la zona elástica del aluminio. Por lo tanto, la rigidez vendrá descrita por la ecuación 8.1 siendo K la rigidez, F la fuerza y x el desplazamiento.

$$K = \frac{F}{x} \quad (N/m) \quad (8.1)$$

Se tiene que la rigidez es de 1937 N/mm, 1204 N/mm y 2375 N/mm para el radiado radial I, radial II y 2 cruces respectivamente. En cambio, en este caso es más representativo anotar los valores de desplazamiento obtenidos. En ninguno de los casos se tiene un desplazamiento del aro superior al 1 mm.. Esto quiere decir que es prácticamente inapreciable el desplazamiento, para el peor modelo posible elegido. Además, hay que tener en cuenta que si se le aplicara 100 kilos a un neumático inflado a 8-9 bares que es lo normal para los tubulares, estos se desplazarían en mayor medida que el aro, lo que haría que el aro se desplazara menos. Por lo tanto parece ilógico continuar con este análisis para otro tipo de modelos de rueda debido a que los resultados obtenidos no van a poder ser relevantes posteriormente. Se aprecia que la rigidez lateral objetivo es 50 veces inferior a la frontal para el peor de los casos por lo tanto la decisión está justificada.

Los puntos de mayor desplazamiento se tienen las uniones del radio y el aro para todos los casos. En la figura 8.4 se muestra, para el Radial I, el máximo desplazamiento.

SIM_01_12SPK_sim1 : Solution 2 resultado
 Subcase - Static Loads 1, Paso estático 1
 Desplazamiento - Nodal, Magnitud
 Min : 0.000, Máx : 0.367, Unidades = mm
 Deformación : Desplazamiento - Nodal Magnitud

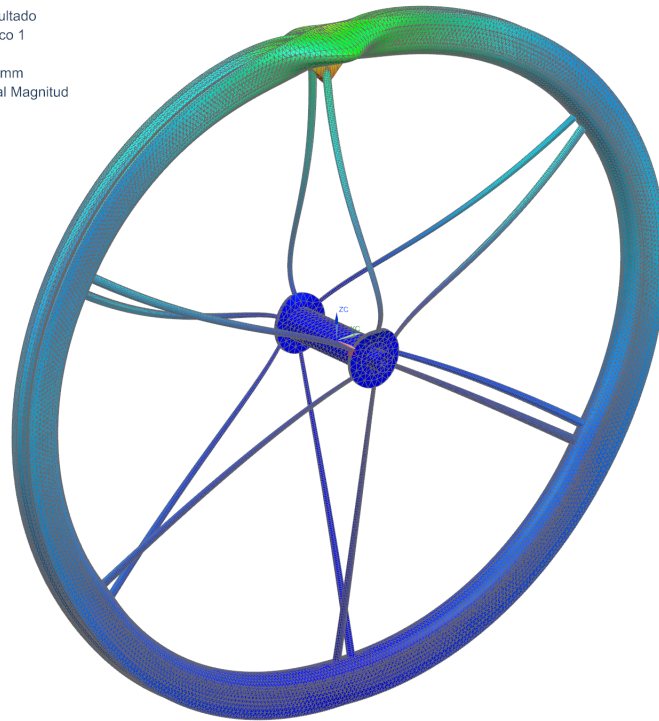
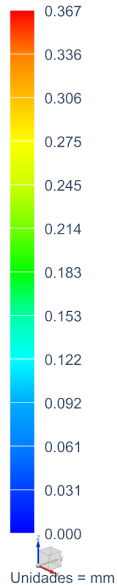


Figura 8.4: Deformación máxima situada para estudio de rigidez frontal (Fuente: Propia)

La tensión máxima que sufre la rueda se sitúa en la unión del radio y el aro y su valor máximo se obtiene para el caso de 2 cruces con un valor de 123 MPa, lo cual es la mitad del límite elástico del material de ensayo.

8.4 Rigidez lateral según la Cantidad y Tipo de Radiado

Uno de los estudios más relevantes que se van a realizar es ver como afecta a la rigidez lateral la cantidad y tipo de radiado. Se utilizará los casos 1 y 2 descritos en la figura 8.2 para un radio genérico con forma elíptica variable entre la parte superior y la inferior. En la parte superior del radio, la del aro, se tiene una elipse con un radio mayor de 4 y un lado menor de 2 mm. En cambio, en la parte inferior, se tiene un lado mayor de 2 y uno menor de 0.8 mm. Se ha elegido esta geometría por puro azar y además como el estudio se realiza con el mismo tipo de radio siempre no va a afectar a las conclusiones que se puedan obtener. Para el buje se utiliza la configuración 5 de los modelos diseñados. Por otro lado, los parámetros que se modificarán son el número de radios y el tipo de radiado y se elige 12, 16 y 20 radios con configuración radial I, II y 2 cruces aplicando diferentes fuerzas de 100, 150, 200 y 250 Newtons. Cabe recordar que el radial I es la configuración con la unión de los radios al aro muy próxima entre radios y radial II con los radios equiespaciados. En la figura 8.5 se muestra la posición exacta de las fuerzas ya que se sitúan sobre un nodo de la malla.



Figura 8.5: Posición de aplicación de las fuerzas sobre los nodos de la malla que definen la rueda. (Caso II (Izq.) y Caso I (Drc.)) (Fuente: Propia)

Una vez realizados los cálculos tan solo queda anotar los desplazamientos máximos, que se sitúan en todos los casos, en el punto de aplicación de la fuerza para cada caso de estudio; y los valores de la tensión máxima registrada en la rueda que ocurren siempre en la unión del radio opuesto al que se aplica la fuerza y el buje. Estos datos se

muestran en las tablas 8.2, 8.3 y 8.4 para el caso I y en las tablas 8.5, 8.6 y 8.7 para el caso II según el tipo de radiado.

CASO I y RADIAL I				
	Fuerza (N)	12 RADIOS	16 RADIOS	20 RADIOS
Desplazamiento Max. (mm)	100	0.541	0.441	0.365
	150	0.812	0.661	0.547
	200	1.082	0.881	0.912
	250	1.353	1.102	0.912
Tensión Max. (MPa)	100	54.14	39.5	34.58
	150	81.21	59.26	51.87
	200	108.28	79	69.16
	250	135.35	98.75	86.45

Tabla 8.2: Deformación y tensión máxima para la configuración radial I y caso I

CASO I y RADIAL II				
	Fuerza (N)	12 RADIOS	16 RADIOS	20 RADIOS
Desplazamiento Max. (mm)	100	0.644	0.481	0.402
	150	0.966	0.722	0.602
	200	1.288	0.962	0.803
	250	1.609	1.203	1.004
Tensión Max. (MPa)	100	48.06	36.4	35.13
	150	72.09	54.6	52.7
	200	96.13	72.8	70.36
	250	120.16	91.02	87.83

Tabla 8.3: Deformación y tensión máxima para la configuración radial II y caso I

CASO I y 2 CRUCES				
	Fuerza (N)	12 RADIOS	16 RADIOS	20 RADIOS
Desplazamiento Max. (mm)	100	0.769	0.542	0.471
	150	0.1.154	0.812	0.707
	200	1.538	1.084	0.943
	250	1.923	1.355	1.178
Tensión Max. (MPa)	100	75.21	57.77	50.38
	150	112.82	86.65	75.57
	200	150.43	115.54	100.73
	250	188.04	144.42	125.94

Tabla 8.4: Deformación y tensión máxima para la configuración 2 cruces y caso I

CASO II y RADIAL I				
	Fuerza (N)	12 RADIOS	16 RADIOS	20 RADIOS
Desplazamiento Max. (mm)	100	0.575	0.452	0.366
	150	0.862	0.678	0.549
	200	1.149	0.905	0.731
	250	1.436	1.131	0.914
Tensión Max. (MPa)	100	41.58	34.6	32.39
	150	62.39	51.91	48.58
	200	83.19	69.21	64.77
	250	103.99	86.51	80.97

Tabla 8.5: Deformación y tensión máxima para la configuración radial I y caso II

CASO II y RADIAL II				
	Fuerza (N)	12 RADIOS	16 RADIOS	20 RADIOS
Desplazamiento Max. (mm)	100	0.635	0.488	0.409
	150	0.953	0.732	0.614
	200	1.27	0.977	0.818
	250	1.588	1.221	1.023
Tensión Max. (MPa)	100	44.52	36.5	34.26
	150	66.78	54.75	51.4
	200	89.04	73	68.53
	250	111.3	91.25	85.66

Tabla 8.6: Deformación y tensión máxima para la configuración radial II y caso II

CASO II y 2 CRUCES				
	Fuerza (N)	12 RADIOS	16 RADIOS	20 RADIOS
Desplazamiento Max. (mm)	100	0.788	0.549	0.473
	150	1.182	0.823	0.71
	200	1.557	1.098	0.946
	250	1.971	1.372	1.183
Tensión Max. (MPa)	100	69.08	63.43	59.11
	150	103.61	95.13	88.67
	200	138.15	126.84	118.24
	250	172.69	158.54	147.78

Tabla 8.7: Deformación y tensión máxima para la configuración 2 cruces y caso II

Lo primero que hay que decir es que en ningún momento se supera el límite elástico del material que es de 241 MPa por lo tanto la rueda ni tendrá una deformación permanente después del ensayo ni romperá evidentemente. En las figuras 8.6 y 8.7 se

aprecian los puntos de mayor desplazamiento y tensión sobre la rueda.

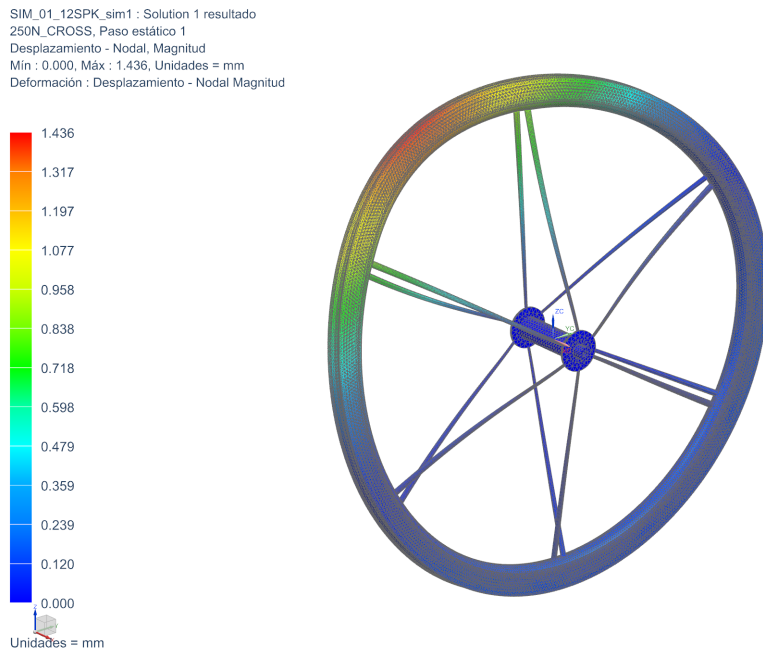


Figura 8.6: Deformación máxima situada en el punto de aplicación de la fuerza, en este momento para el caso II (Fuente: Propia)

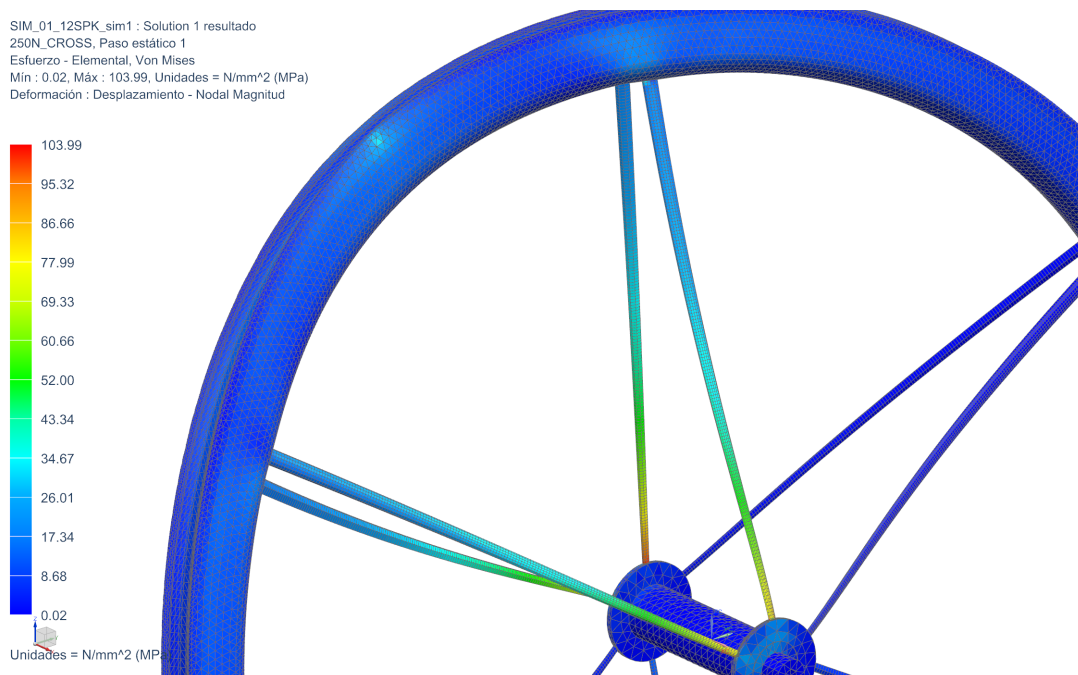


Figura 8.7: Tensión máxima situada en el punto de de unión del radio y el buje, en este momento para el caso II (Fuente: Propia)

8.4.1 Resultados de Tipo de Radiado

Caso I

Se puede apreciar que el radiado con el que se obtiene una deformación menor, y por tanto una mayor rigidez, es el tipo radial I donde en la unión radio aro hay dos radios muy próximos. Esto podría parecer lógico cuando se aplica la fuerza cerca de dicha unión pero luego hay un espacio muy grande sin radios, y en el caso II esta deformación para el radial I debería aumentar pero no lo hace, sino que también es el tipo de radiado que muestra una deformación menor. Por lo tanto, el tipo de radiado que genera una mayor rigidez lateral es el radial I. Este tipo de radiado es como el de Corima el cual obtiene los mejores valores de rigidez lateral, por lo tanto esta configuración un tanto inusual a la hora de diseñar una rueda es más óptima que el resto. Por el contrario se ve que la peor de las 3 opciones sería el caso de 2 cruces, esto puede ser debido a que el radio en este caso tiene una longitud mayor y eso hace que la deformación sea mayor. Además, en el caso I para la configuración radial I y radial II los radios se encuentran en la proyección de la fuerza aplicada en cambio los radios en la configuración 2 cruces tiene los radios inclinados y esto puede hacer que no pueda resistir con tanta eficacia la fuerza. La figura 8.8 muestra las deformaciones según la fuerza aplicada para todos los casos y configuraciones y se muestra que la tendencia es lineal siempre donde lo que varía es el punto inicial y la pendiente, que es la rigidez.

DEFORMACIÓN PARA EL CASO I Y TODAS LAS CONFIGURACIONES POSIBLES

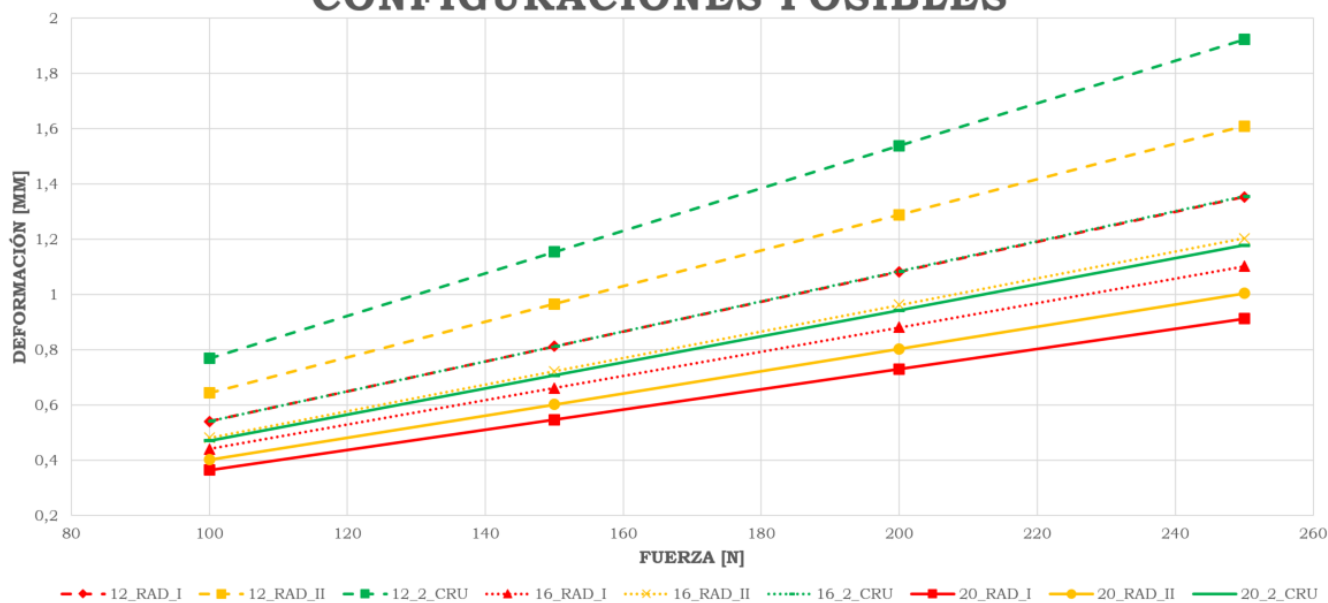


Figura 8.8: Deformación para el caso I y todas las configuraciones (Fuente: Propia)

Se aprecia como el radiado radial I, en color rojo, obtiene siempre deformaciones más reducidas seguido del radial II, en amarillo, y por último el radiado 2 cruces en verde. Entre el radiado I y II la diferencia no es muy significativa pero si que lo es con la configuración 2 cruces donde la pendiente es mayor y por tanto menor la rigidez.

La tensión máxima la genera en este caso la configuración de 2 cruces y esto es debido al mismo motivo por el cual genera la máxima deformación, y es que los radios son más largos y tiene una inclinación con respecto a la proyección de la fuerza. En cambio, entre la configuración radial I y radial II se tiene que la radial II genera tensiones inferiores, lo cual es positivo pues la rueda sufre menos. En este caso el motivo es la configuración más distribuida de las fuerzas sobre la rueda. En cualquier para ambas configuraciones, la tensión máxima que obtienen es la mitad del límite elástico del material, por lo tanto el margen de seguridad es de 2, lo cual deja mucho margen de maniobra. La figura 8.9 muestra las tensiones máximas según la fuerza aplicada para todos los casos y configuraciones.

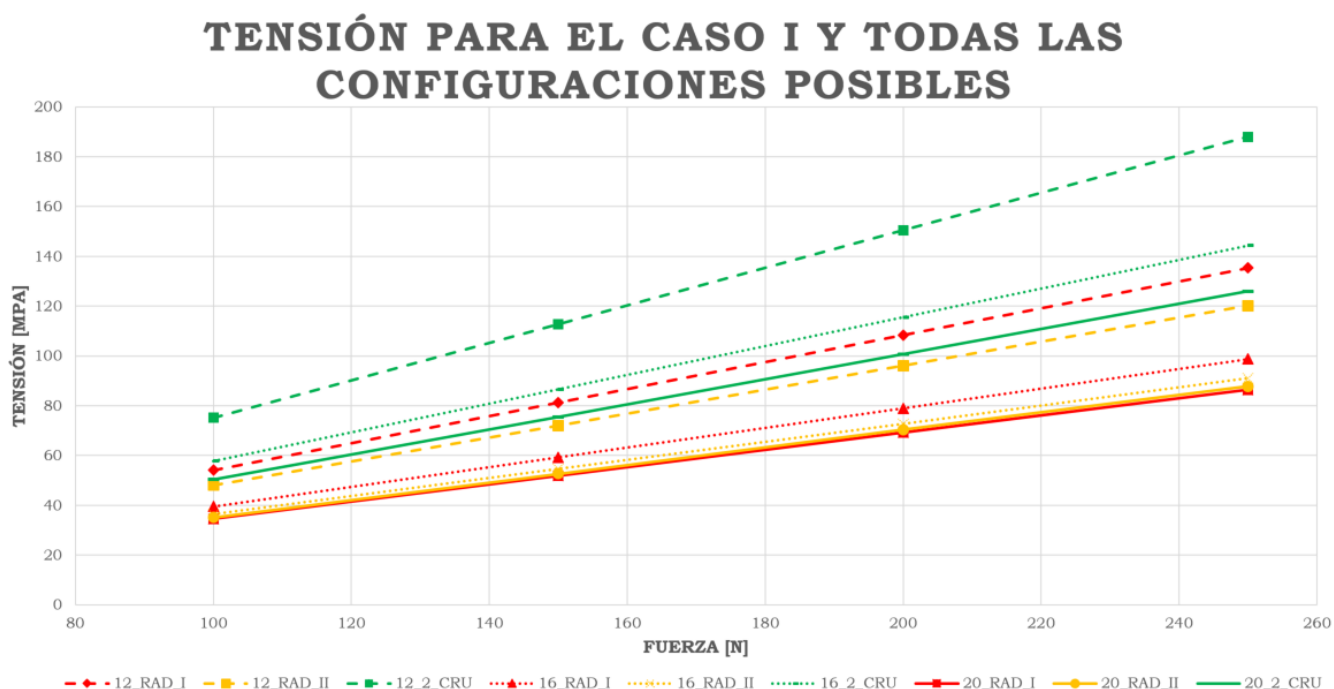


Figura 8.9: Tensión para el caso I y todas las configuraciones (Fuente: Propia)

Se aprecia como existe un salto muy elevado entre las configuración de 2 cruces y el resto por los motivos antes citados.

Caso II

Los resultados de deformación se muestran en la figura 8.10.

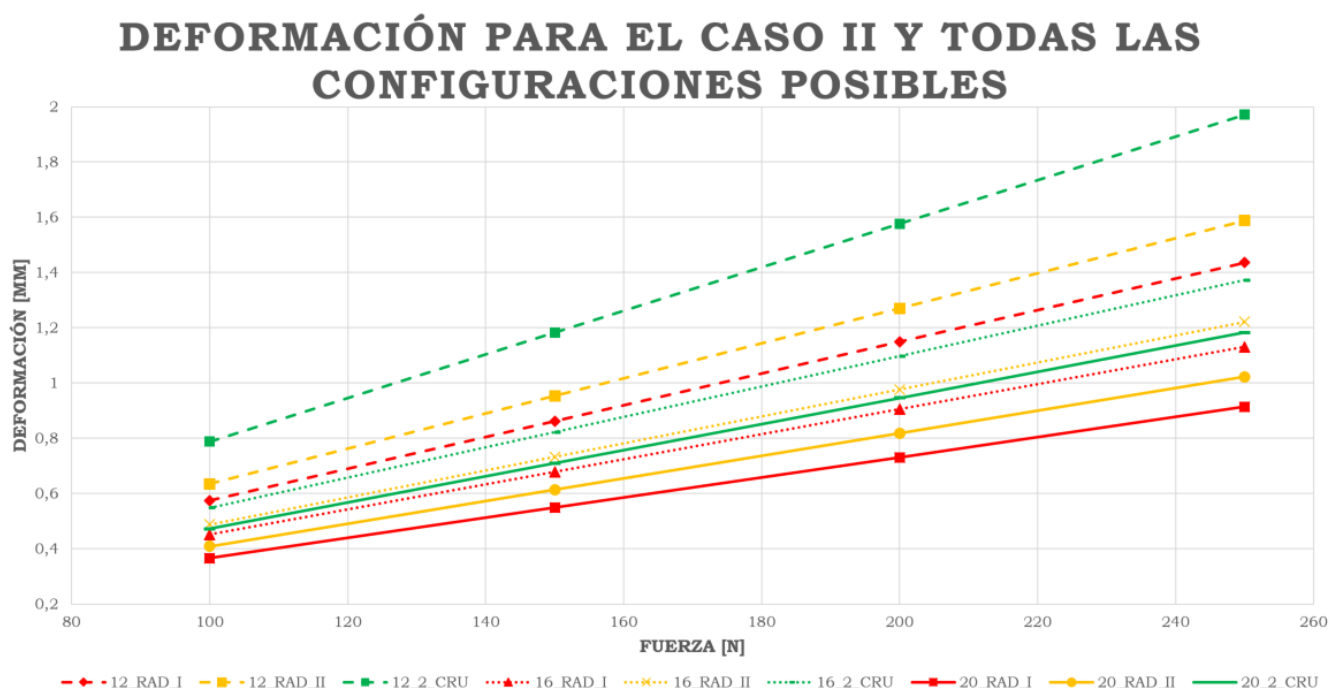


Figura 8.10: Deformación para el caso II y todas las configuraciones (Fuente: Propia)

La tendencia es la misma que en el caso anterior, siendo la configuración radial I la que mayor rigidez presenta y ahora con un poco más de diferencia a la configuración radial II esto, a priori, no parece coherente debido a que la distancia entre el punto de aplicación y los radios es muy elevada. Por lo tanto, una posible causa de este efecto es que la distribución de tensiones del aro a los radios sea más efectiva en esta configuración que en la anterior. En cambio, se hace más evidente la escasa rigidez que proporciona la configuración de 2 cruces, pues ahora las diferencias son mayores.

Si ahora se muestra la tensión máxima, figura 8.11, se muestra una configuración completamente diferente. Se aprecia como, independientemente del número de radios, las configuraciones quedan agrupadas, sobre todo para la configuración 2 cruces que tiene las tensiones más altas. En cambio, estas tensiones son siempre inferiores que para el caso I. Lo que ocurre con las configuraciones radial I y radial II es que ahora la primera de ellas obtiene valores inferiores de tensiones máximas, lo cual es positivo. La diferencia es escasa pero evidencia la ventaja de esta configuración. Cabe citar que, como se ha nombrado anteriormente, la tensión máxima se sitúa en la unión del buje y el radio y en el caso II esta tensión máxima aparece en los dos radios más próximos al punto de aplicación de la carga.

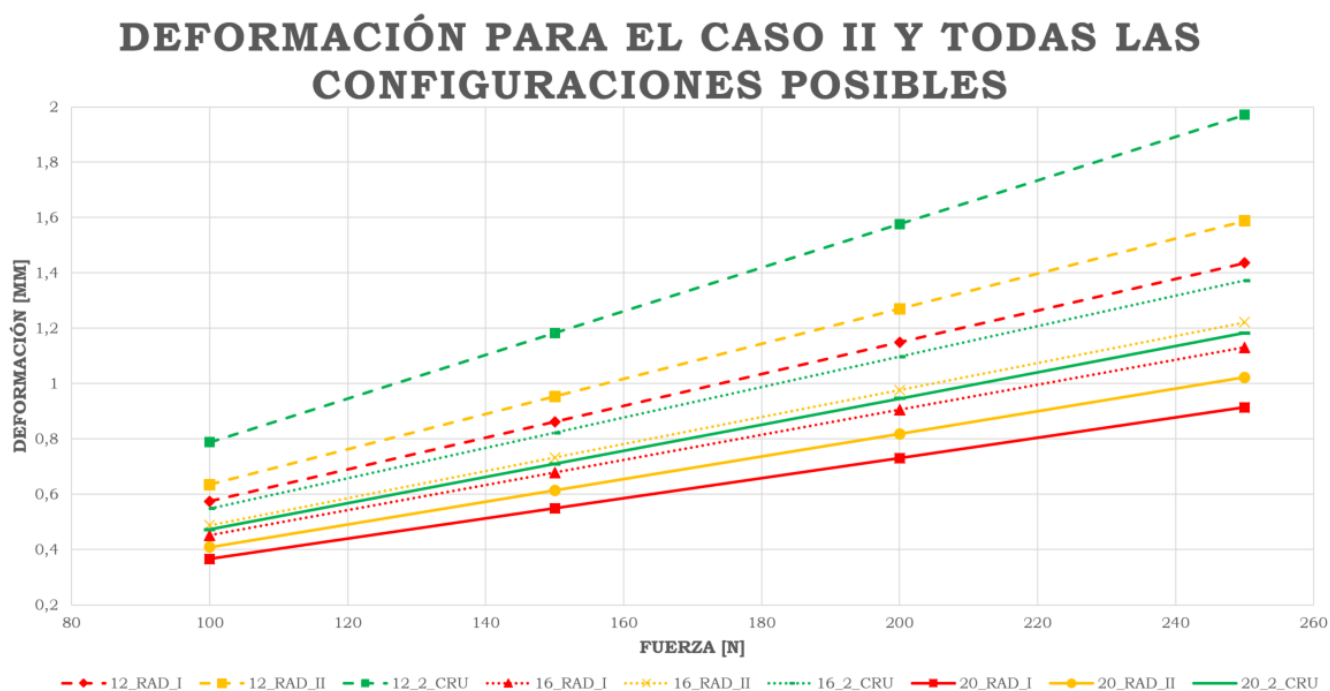


Figura 8.11: Tensión para el caso II y todas las configuraciones (Fuente: Propia)

Se puede concluir que:

- La deformación máxima aparece en el punto de aplicación de la carga.
- La tensión máxima siempre aparece en la unión del radio/s, más próximos al punto de aplicación de la carga, con el buje. Si la carga se aplica sobre la parte derecha del aro, el radio más afectado será de la parte izquierda.
- El tipo de radiado radial I obtiene los mayores datos de rigidez lateral para cualquier caso de estudio.
- Las tensiones producidas sobre la rueda son muy parejas para la configuración radial I y radial II ya que la primera tiene valores superiores en el caso I y viceversa. Aún así estos valores están lejos de los límites elásticos del material.
- La configuración 2 cruces obtiene valores de rigidez muy bajos y genera unas tensiones muy elevadas, aunque dentro del régimen elástico, sobre la rueda.
- Por lo tanto, el tipo de radiado idóneo sería el radial I.

8.4.2 Resultados de Número de Radios

Las conclusiones que se pueden obtener sobre el número de radios son independientes del caso I y II debido a que la tendencia es la misma para ambos. En este estudio se obtienen conclusiones evidentes y es que al aumentar el número de radios aumenta la rigidez pero también lo hace la tensión máxima que debe soportar el aro.

Con respecto a la deformación existe un salto muy elevado cuando se pasa de tener 16 a 20 radios en comparación al paso de 12 a 16 siendo la diferencia la misma. Si se analiza que incremento es superior por poner 12 o 16 radios, si la rigidez lateral o el peso se tiene que un aumento de 4 radios es un aumento en el peso del 3.5% en cambio un aumento de rigidez lateral del 18.5%. Estos valores disminuyen con el aumento de los radios, si se pasa de de 16 a 20 radios se tiene un aumento de peso del 3.4% y de la rigidez del 17.2%. Por lo tanto, cuando el número de radios es menor el aumento tanto de rigidez y de peso afecta más.

Para la tensión, al igual que la deformación, aumentar el número de radios es beneficioso debido a que las tensiones máximas se ven reducidas. Aunque en este caso las diferencias son menos significativas sobre todo cuando el número de radios es mayor ya que para 12 y 16 radios las tensiones máximas son parecidas para la configuración radial I y radial II.

Por lo tanto, se puede concluir:

- La variación del número de radios tiene una influencia mayor sobre la rigidez y la tensión que el tipo de radiado siempre y cuando se comparen las configuraciones radial I y II.
- El aumento de la rigidez es más evidente con un número de radios menor aunque la diferencia no es muy elevada.
- Afecta menos aumentar de peso que el aumento de rigidez, por este motivo es necesario fijar un peso y rigidez objetivo debido a que tampoco es necesario una rigidez muy elevada debido a que también aumenta el peso.

8.5 Rigidez Torsional

En los dos anteriores estudios se ha visto que el peor tipo de radiado es el de 2 cruces pero hay muchas ruedas que lo llevan por lo tanto será por algún motivo. Se realiza un estudio de lo que pasaría en el caso hipotético de que el buje de la rueda estuviese girando pero la llanta no. Es decir, si se frenase por completo el aro pero no el buje. Esto se caracteriza considerando que el aro esta fijo mientras que el buje tiene un momento torsor como podría ser el que realiza la transmisión sobre la rueda trasera. Para obtener el torsor aplicado se hace uso de un archivo de un ciclista profesional durante una competición, (véase ref. [32]), y se aprecia una potencia media de 221 watios con una cadencia de 70 rpm. Aplicando las ecuaciones entre la potencia y el torsor queda:

$$P = T \text{ Cadencia} \quad (8.2)$$

$$T = \frac{P}{\text{Cadencia}} = \frac{221}{70 \text{rpm} \cdot 9.5492 \frac{\text{rad/s}}{\text{rpm}}} \approx 30 \text{ (N m)} \quad (8.3)$$

Este rápido estudio se realiza para una rueda con el modelo 2 para el aro, el modelo 5 para el buje y con un número de radios de 20 y con forma ovalada de 2 mm. de radio mayor y 1 mm. de radio menor. Este estudio se realiza únicamente para los 3 tipos de radiados: radial I, radial II y 2 cruces. Los resultados se pueden ver en la tabla 8.8 los valores de la deformación máxima y de la tensión máxima.

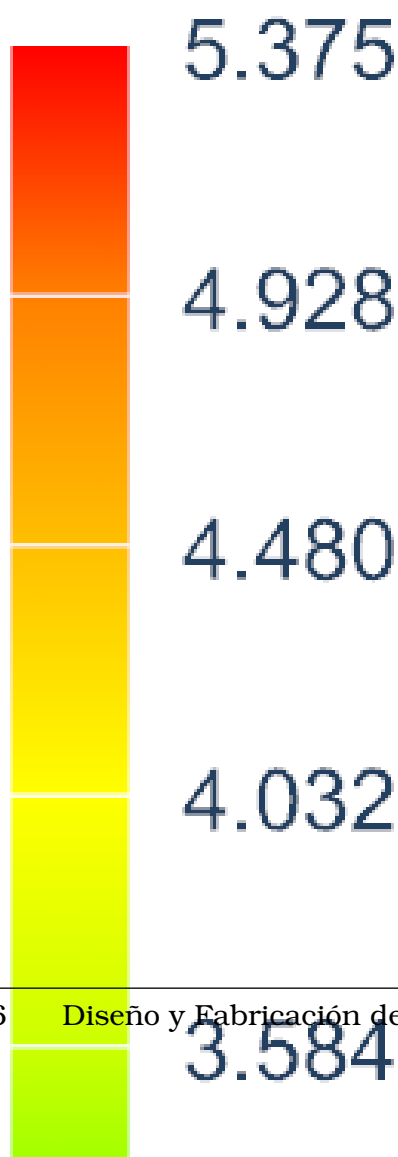
ESTUDIO RIGIDEZ TORSIÓN

	RADIAL I	RADIAL II	2 CRUCES
Deformación (mm).	5.36	5.37	0.07
Tensión (MPa)	599	598	32.44

Tabla 8.8: Deformación y tensión máxima el estudio de rigidez torsional

Los desplazamiento máximos se tienen no en la unión entre el radio y el buje pero si en una zona muy próxima. Este punto es siempre el mismo para todos los modelos. La tensión máxima si que se encuentra en la unión de buje y radio. En la figura 8.12 se puede ver la deformación de la rueda para el caso radial I.

SIM_01_20SPK_sim1 : Solution 2 res
Subcase - Static Loads 1, Paso estát
Desplazamiento - Nodal, Magnitud
Mín : 0.000, Máx : 5.375, Unidades =
Deformación : Desplazamiento - Noda



Si se aplicase el torsor proporcional a la potencia media generada por un ciclista para los radiados I y II la rueda se rompería debido a que la tensión de Von Misses supera, en más del doble, el límite de rotura del material. En cambio, para el radiado de 2 cruces la rueda prácticamente ni se ve afectada por el torsor aplicado.

La diferencia entre el radiado I y II es inapreciable y con ello se puede decir que es indiferente donde se realice la unión entre el aro y el radio. En cambio, si que afecta y mucho que los radios se hallan entrelazado o no. Esto es debido a que los radios en el caso de 2 cruces son capaces de oponerse al momento torsor que implicaría que el buje girase y el aro no. En cambio, para los casos radiales los radios están perpendiculares a como actúan los pares de fuerzas y la resistencia que proporcionan es muy reducida. Esto hace que en las ruedas traseras, por el torsor generado por la transmisión, sea necesario utilizar como poco un radiado a 2 cruces. En la rueda delantera se necesita usar un radiado a dos cruces cuando se tiene un sistema de frenado de discos anclados al buje de la rueda.

8.6 Estudio de Rigidez lateral según el tipo de aro

El siguiente estudio que se va a realizar se va a ver la influencia del aro sobre la rigidez lateral, tanto el desplazamiento como la tensión. Para ello todas las ruedas irán equipadas con 16 radios cilíndricos con 3 mm. de diámetro y con el buje modelo 5, que es el que tiene las dimensiones más reducidas. Por lo tanto se realizarán 8 ensayos con los diferentes modelos de aros diseñados, en la tabla 6.1 se muestran sus geometrías. Las condiciones del ensayo serán las del caso I y caso II únicamente, el ensayo frontal no se realiza porque ya se ha visto que carece de trascendencia. De la misma manera se aplicarán fuerzas de 100, 150, 200 y 250 N. en cada caso.

8.6.1 Caso I

En la tabla 8.9 se muestran los valores de la deformación y la rigidez para el caso I.

CASO I								
	Aro_1	Aro_2	Aro_3	Aro_4	Aro_5	Aro_6	Aro_7	Aro_8
Desplazamiento Max. (mm)	0.578	0.556	0.531	0.516	0.607	0.613	0.525	0.508
	0.867	0.834	0.796	0.774	0.91	0.92	0.788	0.763
	1.156	1.112	1.062	1.032	1.213	1.227	1.05	1.017
	1.445	1.39	1.327	1.29	1.516	1.534	1.313	1.271
Tensión Max. (MPa)	27.93	27.08	26.61	24.95	35	31.4	29.51	45.75
	41.9	40.92	39.91	37.41	52.49	47.1	44.27	68.61
	55.87	54.16	53.22	49.89	69.99	62.8	59.03	91.48
	69.83	67.7	66.57	62.36	87.49	78.5	73.79	114.34

Tabla 8.9: Deformación y tensión máxima según el tipo de aro para el caso I

En este caso, como en los anteriores, se muestra que las tensiones máximas que recibe la rueda son inferiores al límite elástico del material. Es más, en este caso la tensión máxima se registra para el modelo 8 al aplicarle una fuerza de 250 N. y es de 114 MPa, lo cual proporciona un margen de seguridad de 2.5 y eso es en el mejor de los casos.

En punto de máxima deformación se vuelve a situar en la zona de aplicación de la carga y el de máxima tensión ocurre por igual en la unión del aro y el radio y el radio y el buje. En este caso, si la fuerza se aplica sobre el lateral derecho del aro, el radio que más sufre no está en el lateral adverso sino que se encuentra en el mismo lateral donde se aplica la fuerza, de manera contraria a lo que pasaba en el estudio de cantidad y número de radios.

Deformación

En la figura 8.13 se muestra la deformación para el caso I. En general el rango de deformaciones es inferior y sus límites en este estudio que en el anterior sobre cantidad y tipo de radiado por lo que la primera conclusión es que afecta en menor medida el tipo

de aro a la cantidad y tipo de radiado.

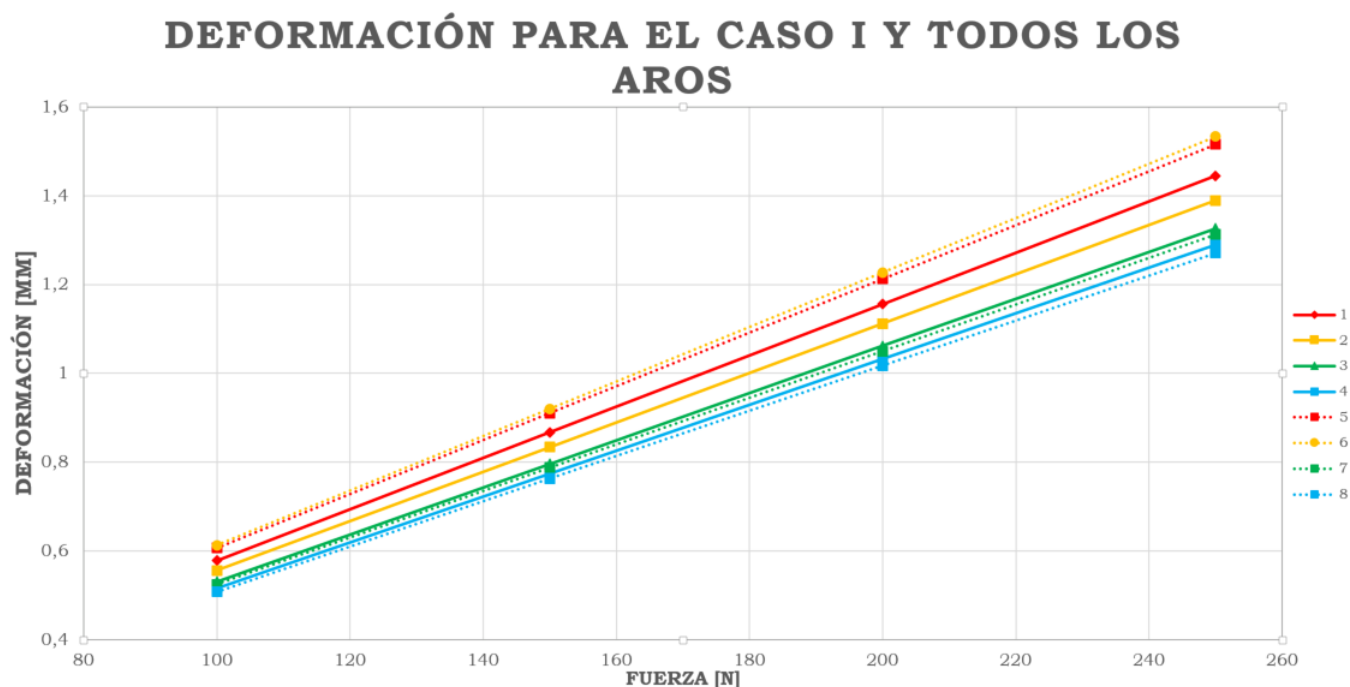


Figura 8.13: Deformación máxima para todos los modelos de aro y el caso I (Fuente: Propia)

Dentro de este estudio se aprecia como el aro que presenta una mayor rigidez, es decir una menor deformación, es el aro 8. Este modelo tiene una perfil de 52 y un ancho de 23, es decir el aro más grande diseñado. Para los modelos 3, 4, 7 y 8 se muestra una tendencia bien diferenciada, se aprecia como la variación de la longitud del aro afecta más que el ancho ya que los modelos se agrupan entre ellos según la longitud del aro. Es decir, la deformación del modelo 4 y 8 es muy similar, es inferior la del modelo 8 que tiene un ancho inferior y lo mismo ocurre con el modelo 3 y 7, que ambos tienen un perfil de 44 mm.

El siguiente modelo en deformación es el 2, con un perfil de 36 mm. y un ancho de 25 mm y ahora su homologado de 23 mm. no sigue la tendencia anterior ya que su deformación es muy superior. Lo mismo ocurre con el modelo 1 y 5 aunque en menor medida. Es decir, salvo el modelo 3 y 5 donde existe un salto muy elevado entre los mismos, los modelos de igual longitud de perfil presentan valores de deformación similares. Para un perfil pequeño, menor a 36mm., un ancho superior hace que la rigidez sea mayor y para un perfil mayor, superior a 36 mm., ocurre lo contrario. Por lo tanto, no existe una tendencia evidente con lo que ocurre entre en el ancho y el largo del perfil. Al igual que ocurría con la aerodinámica existe una relación entre el ancho y el largo del aro que optimiza la rigidez lateral.

Si se analizan entre modelos se aprecia que la rigidez que proporcionan los modelos con un perfil de 44 y 52 mm. es muy similar, en cambio existe un salto muy elevado cuando se reduce el perfil a 36 mm., modelo 2. Por lo tanto sería razonable decir que

para el caso I el mejor modelo es el modelo 7 debido a que posee un menor ancho que el modelo 3 y presenta una rigidez mayor y si se aumenta el ancho o el largo del perfil la ganancia es muy pequeña.

Tensión

En la figura 8.14 se muestra la tensión máxima para el caso I. En este caso, frente al estudio de cantidad y tipo de radiado la variación del rango de la tensión es el mismo, pero los límites son inferiores.

TENSIÓN PARA EL CASO I Y TODOS LOS AROS

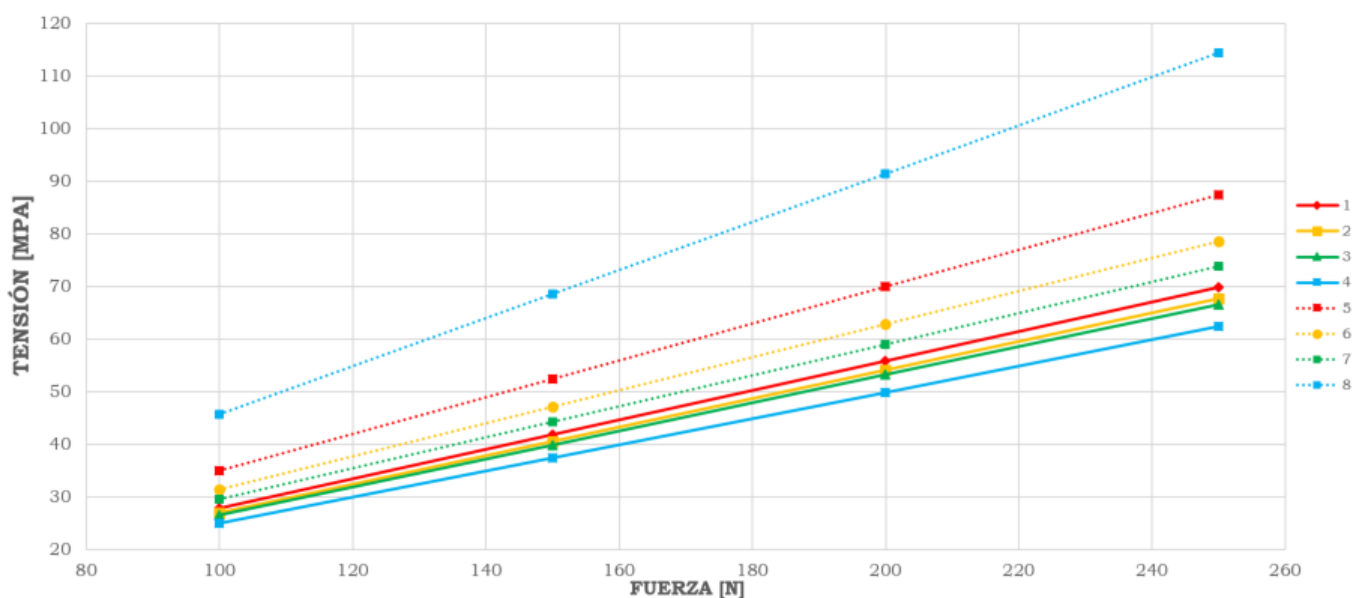


Figura 8.14: Tensión máxima para todos los modelos de aro y el caso I (Fuente: Propia)

La tendencia que sigue la tensión máxima sobre la rueda es la siguiente, un aro más ancho reduce en gran medida la tensión que percibe la rueda. En cambio, no conforme más perfil tenga el aro, mayor será la variación de tensión. En el modelo 4 y 8 se recoge la mayor variación de todos los modelos en cambio, la menor se tiene en el modelo 2, que no es el que tiene el perfil más corto. La tendencia ideal sería que el patrón se reprodujese, es decir, el orden de los modelos con una tensión máxima inferior debería de ser 4, 3, 2, 1 y luego 8, 7, 6 y 5. En cambio no es así.

En este caso las conclusiones no son evidentes y se puede decir que la solución de compromiso sería elegir entre los modelos de perfil 44 mm. y 52 mm., que son los idóneos para la deformación, el que menor salto entre variaciones de aro tenga. En este caso sería elegir el de perfil 44mm., ahora bien, con un ancho de 23 mm. se tiene una tensión muy superior al del aro de 25 mm. Como en el caso de la deformación la variación es pequeña se tiene que la mejor solución sería utilizar el modelo 2 porque la diferencia con su homologado en deformación es pequeña y en cambio reduce en gran medida la tensión.

8.6.2 Caso II

Para el caso II de estudio se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 8.10.

CASO II								
	Aro_1	Aro_2	Aro_3	Aro_4	Aro_5	Aro_6	Aro_7	Aro_8
Desplazamiento Max. (mm)	0.598	0.6	0.532	0.516	0.616	0.617	0.544	0.498
	0.897	0.9	0.798	0.77	0.924	0.925	0.816	0.748
	1.196	1.2	1.06	1.03	1.232	1.234	1.088	0.997
	1.495	1.5	1.33	1.29	1.54	1.542	1.36	1.246
Tensión Max. (MPa)	24.16	26.92	24.3	23.33	33.82	26.92	25.5	37.59
	36.25	40.37	36.45	34.99	50.74	40.38	38.25	56.38
	48.33	53.83	48.6	46.65	67.65	53.84	51.04	75.17
	60.41	67.29	60.75	58.31	84.56	67.3	63.8	93.97

Tabla 8.10: Deformación y tensión máxima según el tipo de aro para el caso II

La deformación máxima, del mismo modo que para el caso I, se localiza en la zona de aplicación de la fuerza. En cambio se obtiene que la tensión máxima se encuentra en la unión de los radios con el buje en el lateral de la rueda donde se aplica la fuerza. Esta tensión siempre aparece tanto en el radio situada a la izquierda como a la derecha de la fuerza aplicada.

Los valores son muy similares al caso anterior donde la rueda tenía un margen de seguridad sobre su límite elástico en el peor de los casos superior a 2. Si bien es cierto que mientras el rango de valores de deformación son muy similares el rango de tensiones máximas se ve reducido de 120 MPa a 100 Mpa.

Deformación

En la figura 8.15 se muestra la deformación máxima para el caso II.

Se aprecia como la tendencia que se había citado para el caso I se hace más evidente ahora. Se muestra un gran salto entre los modelos 1, 2 y 3 y 4 con sus respectivos homólogos con un ancho inferior. Entre los modelos 1, 2, 5 y 7 se hallan las deformaciones más grandes pero la diferencia entre ellos es muy pequeña. Si bien citar que para aros más estrechos la deformación es superior siempre. En cambio, si se analiza lo que ocurre con los modelos 3, 4, 7 y 8 esta tendencia no es válida ya que la deformación se agrupa por la longitud del perfil y no por el ancho y entre el mismo perfil para un modelo y otro la tendencia es inversa. Para el modelo 3 y 7 se tiene una deformación menor conforme más ancho sea el aro y para el modelo 4 y 8 la deformación es inferior conforme más estrecho sea. Aún así, el volumen del aro 3 es muy inferior al del aro 8 donde en el primero se tiene un perfil de 44 y un ancho de 25 y en el segundo un ancho de 23 mm. y un perfil de 52 mm. Por lo tanto no vale la pena esa diferencia de deformación, y por tanto de rigidez, ya que el aumento de peso es muy notorio.

Se puede citar que en este caso el perfil más idóneo es el modelo 3.

DEFORMACIÓN PARA EL CASO II Y TODOS LOS AROS

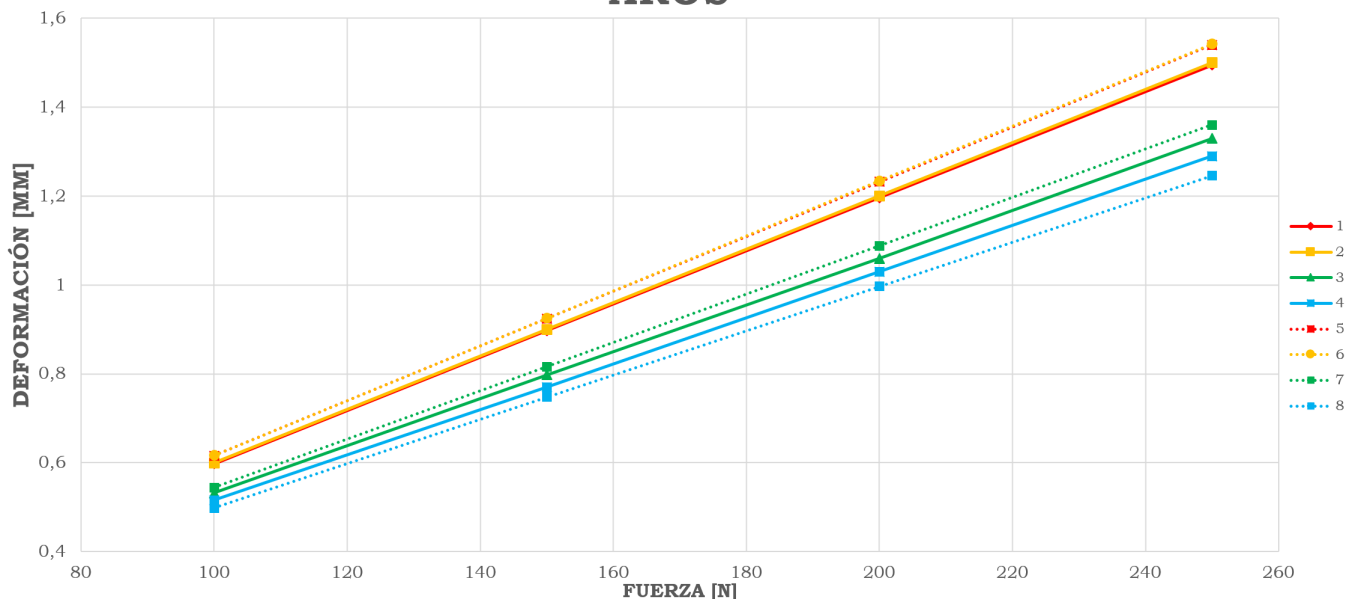


Figura 8.15: Deformación máxima para todos los modelos de aro y el caso II (Fuente: Propia)

Tensión

En la figura 8.16 se muestra la tensión máxima para el caso II.

TENSIÓN PARA EL CASO II Y TODOS LOS AROS

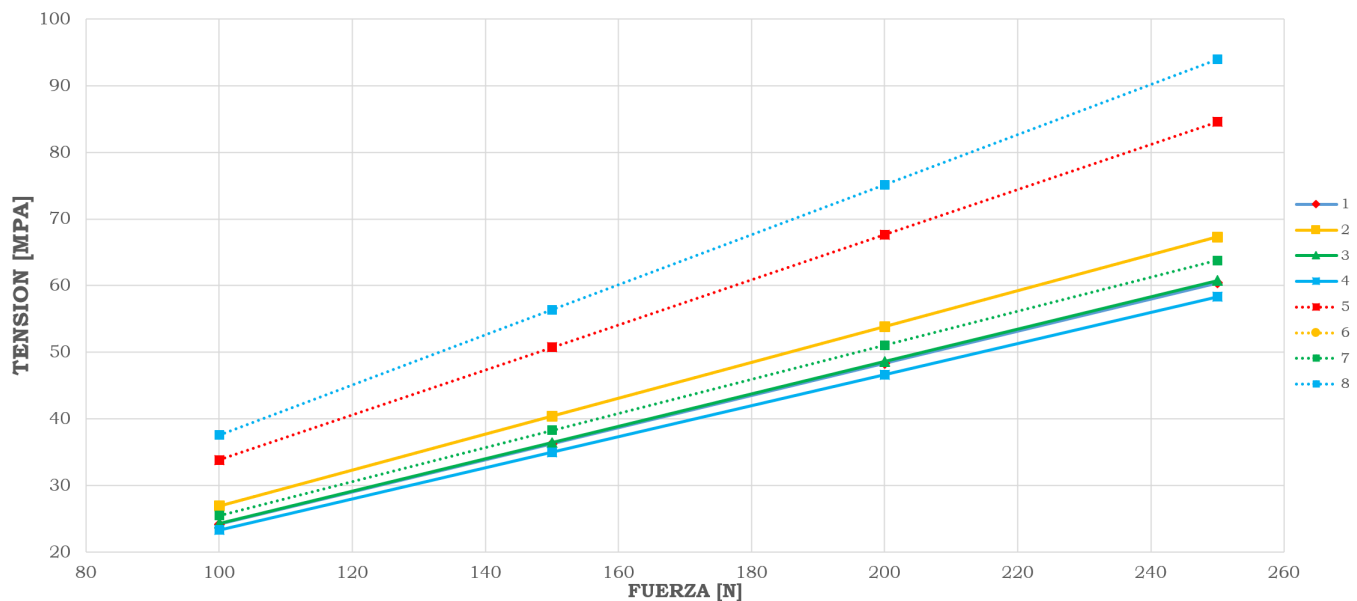


Figura 8.16: Tensión máxima para todos los modelos de aro y el caso II (Fuente: Propia)

Para este caso la tendencia es exactamente igual al caso anterior. Se aprecia que un ancho superior reduce notablemente la tensión a la que se ve sometida la rueda debido a que la tensión puede distribuirse con mayor facilidad. Esto es debido a que la fuerza esta aplicada en la normal del aro, y por tanto, conforme más ancho sea mejor menor tensión debe soportar la rueda. Existe una gran diferencia entre la misma longitud de perfil cuando se modifica el ancho del mismo, más evidente conforme el perfil sea inferior, como ocurre con el modelo de aro 1. Como se muestra en la tabla 8.10 los modelos con un ancho de 25 mm. obtienen unos valores de tensión muy similares, debido a esto aparecen solapados en la figura 8.11.

Como es lógico, cuando se comienza a aumentar la longitud del perfil los cambios para un ancho de 25mm. son inapreciables. Por ejemplo, la tensión máxima para el modelo 1 es de 60 Mpa mientras que para el modelo 4 es de 58 Mpa. La variación para un ancho de 23 mm. si es un poco más evidente aunque si se compara con otros estudios, es despreciable. El único dato positivo es que para un ancho de 23 mm. el modelo que menor tensión presenta es el 7, que es uno de los modelos que mejores resultados esta obteniendo.

Por lo tanto para la tensión, sería valido utilizar tanto el modelo 3 como el 7 ya que la tensión a la que se le somete es muy similar y son los que presentan una mejor relación entre la rigidez que genera su aro y el peso de los mismos.

8.7 Estudio de Rigidez Lateral según el tipo de radio

En este estudio se va a estudiar como afecta el diámetro y la forma del radio a la rigidez lateral. Para ello se utilizará una rueda compuesta con el modelo 2 del aro y con el modelo 5 del buje como viene siendo habitual y con un 16 radios. Este estudio tan solo se realizará para la configuración del caso I, (véase figura 8.2) debido a que en todos los estudios realizados esta siendo indiferentes el punto de aplicación de la fuerza. Si bien cabe que era necesario realizar este estudio para el tipo de radiado para el resto de estudios se parece necesario debido a que las conclusiones del caso I y II siguen la misma tendencia. Los diferentes modelos de radios quedaron definidos en la tabla 6.2.

En la tabla 8.11 se muestran los resultados de todos los modelos de radio para el caso I.

ESTUDIO PARA DIFERENTES RADIOS							
	Radio_1	Radio_2	Radio_3	Radio_4	Radio_5	Radio_6	Radio_7
Desplazamiento Max. (mm)	0.556	0.381	0.287	0.236	0.593	0.509	0.356
	0.834	0.572	0.43	0.354	0.89	0.764	0.533
	1.112	0.763	0.574	0.472	1.187	10.19	0.711
	1.39	0.953	0.717	0.59	1.483	1.278	0.889
Tensión Max. (MPa)	27.08	18.15	16.53	14.13	31.41	27.41	28.94
	40.62	27.22	24.79	21.1	47.11	41.12	43.42
	54.16	36.2	33.05	28.26	62.81	54.83	57.89
	64.7	45.37	41.31	35.33	78.51	68.54	72.36

Tabla 8.11: Deformación y tensión máxima según el tipo de radio para el caso I

Como viene siendo habitual el desplazamiento máximo se encuentra en la zona de aplicación de la fuerza para todos los casos de estudio. La tensión máxima se encuentra en la unión del buje y el radio del lateral opuesto al que se realiza la fuerza. Por lo tanto, se continua con la misma tendencia de los puntos que más solicitados se encuentran de la rueda.

Para la deformación los valores de desplazamiento máximo y mínimo son similares al resto de estudios. En cambio, la tensión máxima tiene un valor máximo inferior al resto de casos, que se encuentra por debajo de 80 MPa, lo que se traduce en un factor de seguridad superior a 3.

Deformación

En la figura 8.17 se muestra la deformación máxima para el estudio según el tipo de radio para el caso I.

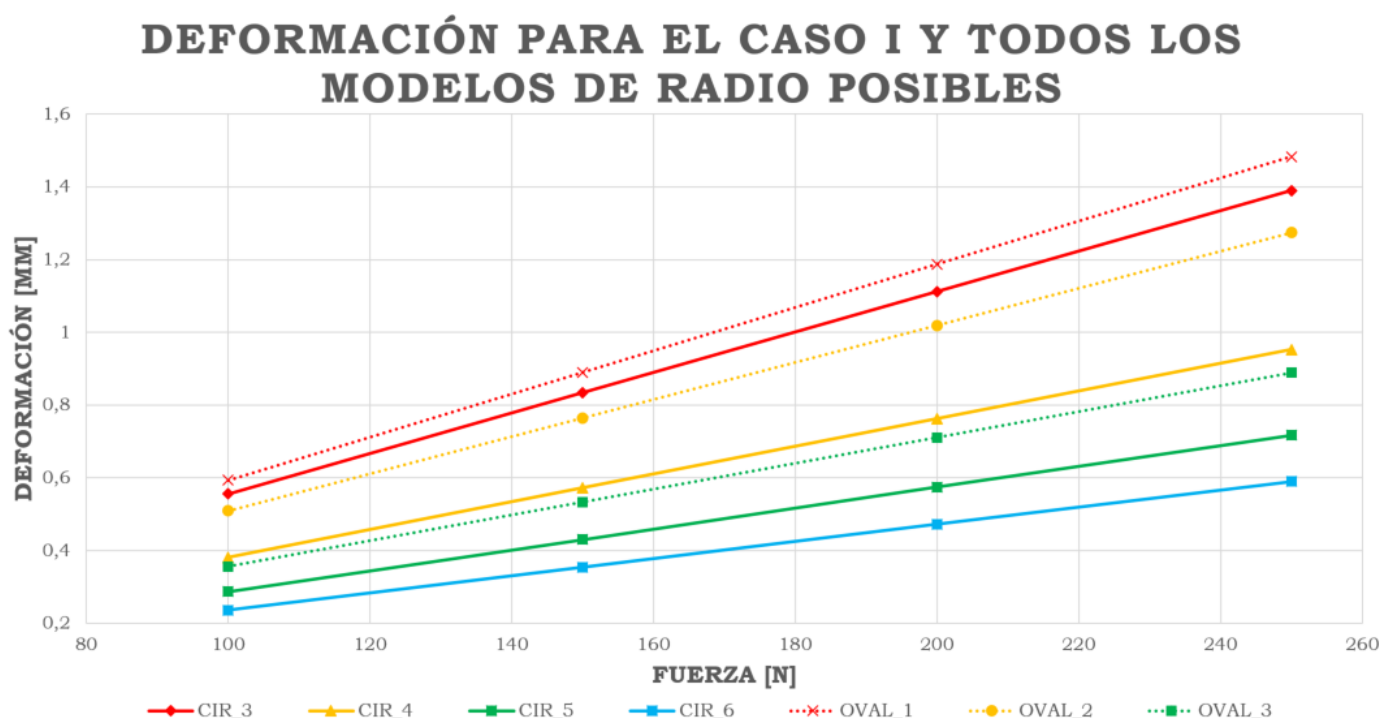


Figura 8.17: Deformación máxima para todos los modelos de radio y el caso I (Fuente: Propia)

El gráfico no muestra una tendencia clara ya que no se aprecia una diferencia significativa ni ningún patrón entre los diferentes modelos salvo que del radio circular de 3 mm. de diámetro al de 4 mm. aparece una variación más elevada que para los siguientes modelos con un diámetro superior. Se aprecia que el orden de deformación es el mismo orden que el del volumen que tienen los diferentes modelos, por este motivo en la tabla 8.12 se muestra la relación entre la rigidez y el volumen que ocupan.

RELACIÓN VOLUMEN - RIGIDEZ

	Radio_1	Radio_2	Radio_3	Radio_4	Radio_5	Radio_6	Radio_7
$\frac{Rigidez (N/mm)}{Volumen (mm^3)}$	0.0754	0.13	0.208	0.302	0.067	0.0868	0.146

Tabla 8.12: Relación de rigidez-volumen según el tipo de radio para el caso I

En ella se muestra que el aumento de la rigidez es siempre superior al aumento producido por el volumen debido a que si se vuelven ordenar dichos valores, coinciden con los del volumen. Por lo tanto habrá que realizar un compromiso entre el peso deseado y la rigidez requerida. Es este caso, al ser más importante la rigidez que el peso, el dimensionamiento del radio será un factor para obtener la rigidez deseada.

Tensión

En la figura 8.18 se muestra la tensión máxima para el estudio según el tipo de aro para el caso I.

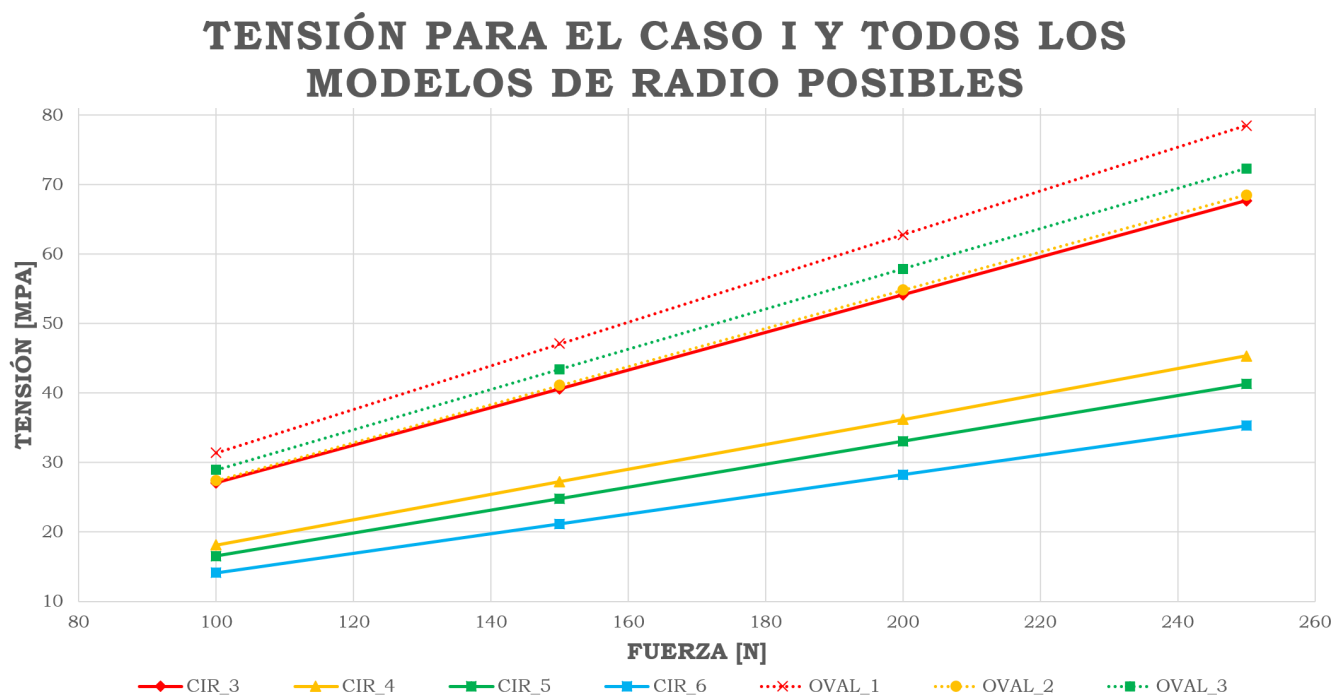


Figura 8.18: Tensión máxima para todos los modelos de radio y el caso I (Fuente: Propia)

Se aprecia que los radios con forma ovalada tienen una tensión superior a los radios con forma circular independientemente del peso que tengan los mismos. Esto es debido a que, aunque tengan forma ovalada, este tipo de radios son más similares a una placa plana que a un círculo. Por lo tanto cuando reciben una fuerza sobre su longitud minoritaria, como es el caso, la rueda recibe solicitaciones más grandes. Es por esto que desde el apartado estructural tener esta forma de radios no es idónea debido a que proporcionan la misma rigidez que los circulares pero más tensiones.

Si se analizan los radios circulares se tiene que conforme mayor sea el radio, a menor tensión está sometido, lo cual es lógico. Si la fuerza es la misma pero el componente tiene más material, mejor se podrán repartir las tensiones. Ahora bien, se aprecia que de un radio circular de 3 mm. de diámetro a uno de 4 mm. existe un salto en la tensión percibida por la rueda muy elevada. En cambio, cuando se pasa de 4 mm. a 5 mm. o 6 mm. esta variación es menor notable. De un modo contrario ocurriría con la rigidez, ya que de un radio de 3 mm. a 4 mm. había un salto muy grande de rigidez y no tanto entre 3 y 4 mm. Esto puede ser debido a que llega un momento en que el radio se está sobredimensionando ya que aumentar su tamaño no genera un aumento de la rigidez tanto como el peso.

En este estudio se puede obtener que estructuralmente la forma idónea para un radio es circular. Además existe una dimensión óptima para la cual el ratio rigidez peso será máximo. Por lo tanto, sería lógico pensar que el radio se puede dejar como un

parámetro libre ya que se ha visto que en muchas ocasiones existe un modelo o un tipo de radiado idóneo en cambio en este caso se muestra que las variaciones entre los diferentes modelos hacen variar en exceso la rigidez. Por lo tanto, se decide que el radio será circular, también por ventajas en la fabricación como luego se analizará, pero su dimensión quedará supeditada a conseguir la rigidez objetivo.

8.7.1 Número de radios equivalente

Para comprobar el hecho de que lo que más influye a la hora de la rigidez lateral con los radios es el peso de los mismos sobre la rueda se ha creado un modelo de rueda con los mismos componentes que en el anterior estudio pero con 12 radios. Los radios tienen una forma circular de 4.62 mm. y el peso de la rueda es igual al de una con 16 radios circulares de 4 mm. Si se realizan los cálculos se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 8.13.

RADIO EQUIVALENTE		
	16 RADIOS Y 4 mm.	12 RADIOS Y 4.62 mm.
Desplazamiento Max. (mm)	0.644	0.481
	0.812	0.661
	1.082	0.881
	1.353	1.102
Tensión Max. (MPa)	54.14	39.5
	81.21	59.26
	108.28	79
	135.35	98.75
Volumen (cm^3)	390.582	403.448

Tabla 8.13: Deformación y tensión máxima para una rueda del mismo peso pero diferente número de radios.

Por lo tanto, queda comprobado que la rigidez que proporcionan los radios es directamente proporcional al peso de los mismos.

8.8 Estudio de Rigidez Lateral según el tipo de buje

El último ensayo sobre los componentes de la rueda que se va a realizar es sobre el buje. En el buje se han definido 3 parámetros que se pueden modificar, como son el espesor del cilindro principal y el espesor y el ancho del cilindro secundario. Estos valores se pueden ver en la tabla 6.3. Se utiliza una configuración de aro con el modelo 3, un radiado radial I con 16 radios en forma circular con un diámetro de 3 mm. Como en el caso del tipo de radios, tan solo se va a realizar los cálculos para el caso I para obtener la rigidez lateral porque, como se esta viendo, realizar los dos casos no genera una información más valiosa y si ralentiza mucho el proceso de diseño. En la tabla 8.14 se pueden mostrar los resultados de este estudio.

ESTUDIO PARA DIFERENTES MODELOS DE BUJE									
	Buje_1	Buje_2	Buje_3	Buje_4	Buje_5	Buje_6	Buje_7	Buje_8	Buje_8
Desplazamiento Max. (mm)	0.561	0.58	0.562	0.574	0.566	0.581	0.588	0.571	0.572
	0.842	0.87	0.843	0.861	0.849	0.871	0.882	0.857	0.858
	1.123	1.159	1.124	1.147	1.132	1.162	1.176	1.142	1.144
	1.403	1.449	1.405	1.434	1.415	1.452	1.47	1.428	1.43
Tensión Max. (MPa)	30.26	30.85	26.27	29.08	24.74	24.96	24.75	29.91	30.13
	45.26	46.42	39.4	43.62	37.14	37.44	37.13	43.36	45.2
	60.52	61.7	52.54	58.16	49.52	49.92	49.5	57.82	60.27
	75.65	77.13	65.67	72.7	61.9	62.4	61.88	72.27	75.34

Tabla 8.14: Deformación y tensión máxima para diferentes modelos de buje para el caso I

Se aprecia una gran similitud entre los valores de deformación para todos los casos del estudio. Aún así tanto las variaciones en la deformación como en la tensión son similares para los estudios anterior. Se aprecia que la tensión máxima tiene un valor de 80 Mpa, lo cual indica un coeficiente de seguridad sobre el límite elástico de 3.

La deformación máxima se encuentra, como siempre, en el punto de aplicación de la fuerza. Para la tensión, se encuentra en la unión del radio y el buje en los dos laterales de la rueda.

Deformación

En la figura 8.19 se muestra la deformación máxima para el estudio según el tipo de buje para el caso I.

DEFORMACIÓN PARA TODOS LOS MODELOS DE BUJES

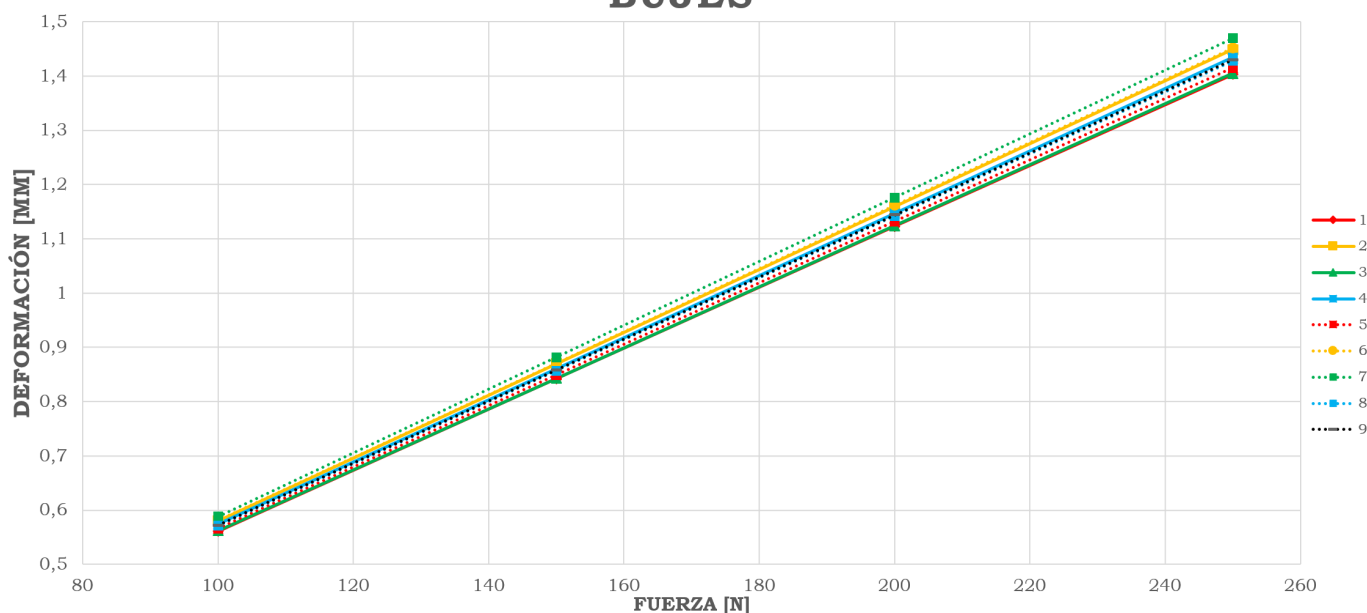


Figura 8.19: Deformación máxima para todos los modelos de buje y el caso I (Fuente: Propia)

Aunque parece que no se puede obtener nada en claro de los resultados debido a que todos los modelos se solapan, si se puede obtener una conclusión y además muy obvia. El buje no afecta a la rigidez lateral de la rueda. Los modelos de buje abarcan un gran rango de espesores de los dos cilindros que componen el buje. Por lo tanto, en el buje se debe apostar por un componente lo más fino posible con el objetivo de ahorrar peso. Este hecho es algo desconocido para una gran cantidad de usuarios pero buscando información sobre el peso total de bujes del mercado se obtiene la misma conclusión a la que se ha llegado aquí. El conjunto de la parte de transmisión del buje que son la tapa, el eje y los rodamientos oscila entre los 50 y 70 gr. y los bujes más ligeros del mercado no llegan a los 100 gr. por lo tanto la parte externa del buje únicamente tiene una función de tapar el resto de componentes para que no esten en contacto con el aire y puedan coger particular de polvo que generen fricción y aceleren el proceso de desgaste.

Tensión

En la figura 8.20 se muestra la tensión máxima para el estudio según el tipo de buje para el caso I.

TENSIÓN PARA TODOS LOS MODELOS DE BUJES

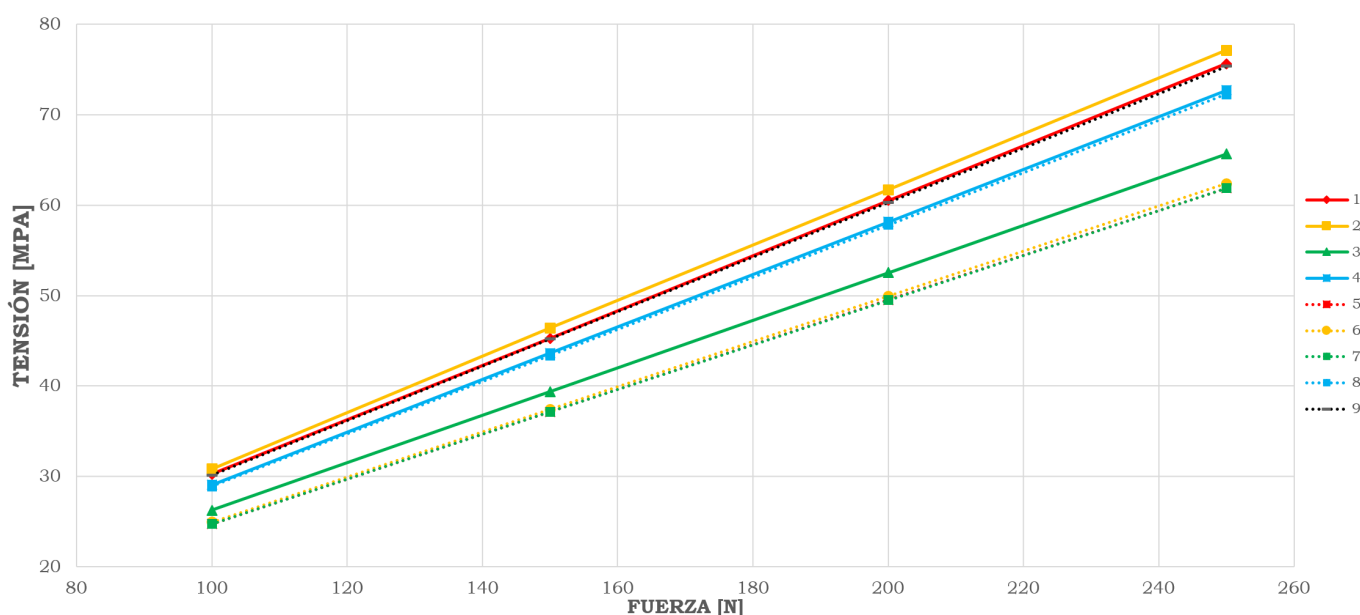


Figura 8.20: Tensión máxima para todos los modelos de buje y el caso I (Fuente: Propia)

Con respecto a la tensión, en la línea de los últimos estudios, los valores máximos no son tan altos como los que se generaban en los estudios del aro o el tipo de radiado. En cambio, en todos los estudios se aprecia como el punto de máxima tensión es la unión del buje y el radio por lo tanto es una zona apropiada para que se produzcan roturas. Los valores de tensión no son muy altos pero son muchos ciclos de fuerzas los que sufren las ruedas y puede ser que la rueda falle por fatiga, por lo tanto será importante tener un tensión lo más reducida posible en este punto. El cilindro principal con un espesor de 4 mm., modelo 3, es el que genera una tensión menor. En cambio, si se sigue reduciendo o aumentando este espesor la tensión aumenta. Por lo tanto existe un espesor óptimo que reduce la tensión a la que se somete la rueda.

Sobre el espesor del cilindro secundario, se aprecia que al aumentar el diámetro la tensión aumenta, esto puede ser debido a que la zona de unión se encuentra más alejada del centro de gravedad que cuando el diámetro es menor. En este grupo de modelos hay que analizar los modelos 3, 5, 6 y 7 que corresponden a diámetros de 60, 50, 40 y 30 mm. Se aprecia como la variación más grande se registra del modelo 5 al 3 para posteriormente no variar en cuanto a penas del modelo 6 al 7. Elegir el modelo 7, con un diámetro muy reducido, además significa reducir el peso por lo tanto es positivo. Por último, reducir el ancho del cilindro secundario favorece a reducir las tensiones en la unión del radio y buje. Por lo tanto, una vez definido el diámetro del radio, se utilizará un ancho del diámetro secundario muy similar para poder reducir las tensiones.

8.9 Conclusión de los estudios

A continuación se exponen una breve lista de conclusiones globales a todos los estudios estructurales con el fin de sintetizar todo el trabajo realizado.

- La rigidez frontal de una rueda es excesivamente elevada independientemente del tipo de radiado y modelo que se utilice. No es un parámetro relevante de la rueda.
- Existe una relación directa entre el aumento de la longitud del perfil y la rigidez lateral.
- No existe una tendencia uniforme entre la rigidez lateral y el ancho del aro debido a que los resultados varían según donde se aplique la fuerza. Aún así afecta más la longitud del perfil que el ancho del aro en la rigidez lateral de la rueda.
- Un aro más ancho reduce las tensiones que recibe la rueda. La longitud del perfil, para un aro ancho, afecta poco sobre las tensiones.
- Los estudios realizados no muestran un aro en concreto superior al resto, por lo tanto, se utilizará el estudio aerodinámico para definir el modelo del aro.
- La configuración radial I presenta, en general, los mejores valores de rigidez y tensiones de los 3 radiados estudiados. La configuración radial presenta una ventaja significativa tanto en deformación como en tensión sobre la 2 cruces. La configuración de 2 cruces es necesaria cuando la rueda se somete a un torsor. Pero en la rueda que se está diseñado esto no ocurre.
- El número de radios afecta idóneo para un radio dado sería de 16 debido a que el salto entre 12 y 16 es más elevado que de 16 a 20 en la deformación.
- Como posteriormente se verá, la variación del tamaño del radio afecta en mayor medida sobre la rigidez por lo tanto se elegirá una configuración de 12 radios y se dimensionará el radio para obtener la rigidez objetivo.
- La variación producida por el radio en la rigidez lateral es proporcional al peso que representa independientemente de la forma del radio.
- Un radio con forma cilíndrica presenta menores tensiones que uno con forma ovalada siendo la deformación la misma.
- Las dimensiones de espesores del buje no influyen sobre la rigidez lateral de la rueda. Por lo tanto se fabricará un buje con las dimensiones mínima posibles para obtener en la fabricación.

GEOMETRÍA PRELIMINAR

Con las conclusiones de los ensayos aerodinámicos y estructurales se va a definir una geometría con el objetivo de modificarla lo menor posible durante el análisis de fibra de carbono. Es decir, se estudiará la geometría que se elija en este apartado para ver si es válida los parámetros de diseño objetivo, y si no es así, modificarla.

9.1 Aro

Con respecto al aro, como se citó, se le otorgará un mayor peso al análisis aerodinámico para decidir su elección.

En este caso se encuentra el modelo 3 y 7, que comparten la misma longitud de perfil, 44 mm. que son los modelos que menor drag generan en todos los casos de estudio. El modelo 3 genera 3 centésimas menos de drag y en cambio, el modelo 3 pesa 283 gr. frente a los 216 gr. que pesa el modelo 7. En cambio, cualquier otro modelo, sobre todo con un perfil inferior la variación de drag si es notable. Si se analiza los casos estructurales, es cierto que el modelo 7 recibe más tensión que el 3 aunque la diferencia es mínima y la rigidez que proporcionan los mismos es la prácticamente idéntica. Por estos motivos el aro que se elige es el modelo 7. Cabe decir que lo que se elige es la forma exterior, el espesor interno y demás se realizará en el análisis de fibra de carbono.

9.2 Buje

Con respecto al buje, la elección es muy sencilla. Los resultados mostraron como el buje no afecta a la rigidez lateral por lo que se elige el buje con las dimensiones más reducidas con el objetivo de reducir el peso de la rueda. En concreto este es el modelo 5.

9.3 Radio

9.3.1 Radiado

Después de los estudios, se demostró que el mejor tipo de radiado es el radial I, donde los radios se unen al aro uno muy cerca del otro, dejando una separación muy

grande entre radios debido a que generaban mejores valores de rigidez lateral y reducían las tensiones a las que se les sometía a la rueda.

9.3.2 Número y tipo de Radio.

Este apartado no arrojó una conclusión clara sobre que modelo era superior. Para esto se va a realizar un test aerodinámico para ver la influencia del número de radios en una rueda de la misma rigidez lateral.

9.3.3 Drag Generado por dos Tipos de Ruedas con la misma Rigidez Lateral

En una rueda en movimiento cada unión del radio con el resto de los componentes es un punto con muchas posibilidades de que el flujo se desprenda y originar vórtices. Por lo tanto, se quiere analizar que ocurre cuando una rueda tiene más radios.

Para que el estudio sea más relevante se va a hacer uso de una de las conclusiones del estudio estructural 8.7.1. En el se demostró que una rueda de 12 radios con un diámetro de radio de 4.62 mm. tenía la misma rigidez lateral que una rueda de 16 radios y con un radio de 4 mm.. Además estas ruedas pesaban lo mismo.

El estudio aerodinámico es idéntico al realizado para los aros. En el se utilizan los mismos parámetros para mallas las ruedas debido a que se diseña la rueda como un único objeto donde el tamaño del elemento de malla es de 3.7 mm. para ambas ruedas. Los resultados se muestran en la tabla 9.1.

DRAG PARA RUEDAS CON MISMA RIGIDEZ LATERAL		
	16 RADIOS Y 4 mm.	12 RADIOS Y 4.62 mm.
Drag Caso I (N)	2.93	2.79
Drag Caso II (N)	4.37	4.15
Drag Caso III (N)	3.84	3.66
Drag Caso IV (N)	4.36	4.16
Drag Promedio (N)	3.87	3.68

Tabla 9.1: Drag para dos modelos de ruedas con el mismo aro y rigidez lateral.

Los resultados muestran, que en promedio y para dos los casos, la rueda con 12 radios genera 2 décimas menos de drag que la rueda con 16 radios aunque tengan un diámetro inferior. Por lo tanto, se eligen una configuración de 12 radios con un radio circular y el diámetro será el necesario para obtener la rigidez lateral requerida de 70 N/mm.

Otra de las conclusiones que se puede obtener de este análisis es que, el aro genera un drag que representa más del 65% del drag generado por la rueda. Por lo tanto, el haber realizado un análisis aerodinámico del aro ha sido un acierto debido a que se ha ahorrado mucho tiempo de calculo y el estudio se ha centrado en el componente que mayor afecta a la resistencia.

ANÁLISIS DE LA RUEDA CON FIBRA DE CARBONO

Una vez realizados los estudios parámetros para obtener que elementos influyen en mayor medida a la rigidez lateral es necesario realizar un análisis con el tipo de material que se va a fabricar la rueda. No se detallarán numerosos detalles teóricos de la fibra de carbono aunque sí un ligero resumen del motivo de su uso.

Los materiales compuestos, como es la fibra de carbono, es la unión de dos materiales distintos que mediante un proceso se unen para crear uno nuevo con unas características mecánicas de la unión de ambos. En concreto la fibra de carbono es la unión de un gran cantidad de filamentos de carbono unidos mediante una resina, normalmente epoxi. Este es el caso más común de fibra de carbono aunque pueden existir numerosas variantes. Tras la unión de estos dos materiales se crea uno nuevo que es entre 3 y 5 veces más ligero que el acero y también unas 6 veces más resistente a la fatiga teniendo unas propiedades mecánicas en el sentido de la fibra similares a las del acero, véase ref. [40]. Ese último apartado es uno de sus grandes inconvenientes, y es que en la dirección de la fibra es un material con unas grandes propiedades mecánicas, pero en las otras 3 direcciones ya no. Es decir, es un material anisotrópico. Por lo tanto, la utilización del material compuesto es ventajosa solo si la fibra está en la dirección que actúa la fuerza sino la fuerza recaerá prácticamente sobre la resina, haciendo que el material sea mucho más débil. Para aliviar este fenómeno se encuentran las fibras bidireccionales, es decir son telas donde la fibra de carbono está entrelazada de tal manera que haya fibras en dos direcciones perpendiculares. El uso de estas segundas fibras ha sido muy elevado porque se tenía la creencia de que favorecían a las propiedades mecánicas de la pieza pues otorgaba una mayor versatilidad en las orientaciones de la fibra. En cambio, conforme se ha ido estudiando con mayor detalle los materiales anisotrópicos y se han podido calcular mejor sus propiedades se ha ido dejando de lado la fibra bidireccional cuando se busca una pieza donde prime el peso, como puede ser el sector aeronáutico o poco está ocurriendo ahora con el sector del ciclismo. Como empresas como Scott o Reynolds utilizan en la gran mayoría de los casos fibras unidireccionales, véase ref. [41].

Sobre la orientación de las fibras existe un problema asociado y es conocer que y como actúan las fuerzas sobre la pieza que se va a fabricar. Durante este proyecto se han analizado varios casos de fuerzas localizadas que sirven para caracterizar diferentes ruedas. En cambio, existen fuerzas conocidas que no son fácilmente representables como son las irregularidades del terreno, un impacto, etc. En estos casos, como se detallará más adelante, es conveniente el uso de una orientación bastante habitual.

10.1 Material Disponible

En el laboratorio se dispone de 2 tipos de fibra de carbono diferentes, una unidireccional y otro bidireccional, en adelante FC I y II de la empresa *Gurit*. Estas dos tipos de fibras son del tipo preimpregnadas o 'prepeg'. Los prepegs son fibras impregnadas con una resina catalizadora que activa el proceso de curación cuando recibe cierta cantidad de calor, que depende del tipo de prepreg y de las propiedades que se deseen del mismo. Esta fibra sin curar se utiliza por diferentes motivos pero el principal es debido a la homogeneidad de sus propiedades mecánicas. La primera técnica de fabricación de la fibra de carbono era la impregnación de la resina sobre la fibra. Las propiedades que adquiere la fibra después de la fabricación dependen mucho de como ha sido la distribución de la resina a lo largo de fibra y es un proceso difícilmente controlable. En este proceso puede haber zonas del laminado que la cantidad de resina sea muy alta o insuficiente, o que no se consiga una distribución uniforme entre placas de fibra. Eso hace que la técnica de impregnación, que no deja de ser válida, sea mucho más impredecible, y para la obtención de piezas con un volumen de producción bajo con una calidad muy elevada es mucho mejor el uso de laminas preimpregnadas. Por este motivo en la actualidad el mayoritario el uso de fibras prepreg, como es el caso de este proyecto.

F.C. I. SparPreg Unidireccional

La FC I es una fibra de carbono unidireccional preimpregnada para piezas de gran espesor ya que tiene una compactación por lámina de 0.6 mm. en el mejor de los casos. En cambio, por su alto gramaje de fibra, es una de las más resistentes que se encuentran en el mercado. En la referencia [44] se muestran todas sus propiedades.

F.C. II ST 95

La FC II es una fibra de carbono bidireccional de tipo sagra con un entrelazado 2 a 2, que quiere decir que cada conjunto de hilos se va entrelazando uno sobre otro de tal manera que queda un entramado como el de la figura 10.1, que es el más común. Su compactación genera una lámina de 1 mm. de espesor. En la referencia [45] se pueden ver todas sus propiedades y recomendaciones de fabricación.

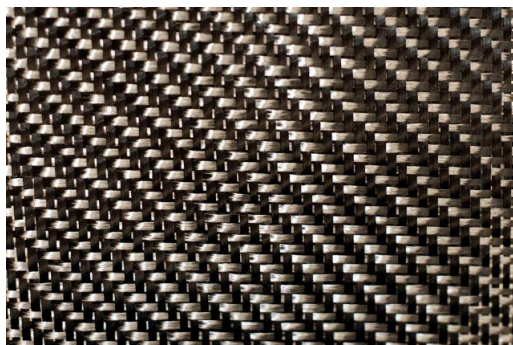


Figura 10.1: Mallado. Malla del buje. (Fuente: ACP Composite)

10.1.1 Introducir los materiales en el Software

10.2 Idealización de la Rueda

El primer paso cuando se desea hacer un ensayo en materiales compuestos es idealizar la pieza que se quiere analizar debido a que todavía existen muchas restricciones en el cálculo de ensayos con materiales compuestos en los softwares. Es necesario evitar ciertas geometrías que a posteriori durante el mallado y la laminación puedan ser motivo de conflictos. Además se usará algunas de las propiedades del material compuesto que ayudan a aliviar los cálculos.

La primera medida que hay que tener en cuenta cuando se trabaja con material compuesto es que, a no ser que su espesor sea muy elevado, es un material que trabaja en el plano. Es decir en la dirección del espesor las fibras carecen prácticamente de propiedades mecánicas debido a que el espesor de una lámina de fibra de carbono no suele superar el 1 mm. de grosor. El límite entre poder considerar el material como bidimensional o tridimensional es confuso aunque en el caso de la rueda de bicicleta es raro encontrar espesores superiores a las 5 mm. por lo que se puede suponer dicha hipótesis. Con lo cual, dentro del software esto obliga a realizar un mallado superficial, es decir, en 2D.

Ahora bien, al tener una pieza con diferentes componentes y cada uno de ellos tendrá o un material o una orientación diferentes hay que hacer que las mallas se acoplen unas a otras en las zonas de unión. Esta unión se realiza en los nodos de las mallas generadas y al tener que realizar una malla 2D es necesario que se realicen en secciones donde se unan los componentes necesarios. En este aspecto influye mucho la sección que se elige del componente, para eso es necesario utilizar los planos medios de la superficie. Para llevar esto a cabo se ha de generar una pieza idealizada de la rueda., esto se realiza en el software de NX durante el proceso de simulación. La ventaja de idealizar la geometría en este software es que todas las modificaciones se realizan sobre un cad dependiente de la pieza maestra, que por tanto, no hay que modificar. Es decir, todas las operaciones que se realicen no afectaran al archivo de la pieza maestra. En cambio, si se modifica una dimensión de algún componente si que se verá modificado en la pieza idealizada.

Otra de las ventajas de la idealización es poder eliminar algunas partes de la geometría que tengan una gran cantidad de detalles y estos no afecten en gran medida a las propiedades mecánicas de la pieza. Por ejemplo, si la pieza tiene redondeos en todos sus bordes, los que sean muy reducidos afectarán al tamaño de la malla, que deberá ser menor, pero no se obtendrán un resultado mejor. Además, al eliminar los redondeos, que ayudan a reducir la concentración de tensiones, se realiza un ensayo en unas condiciones peores a las de la realidad, por lo que se gana en margen de seguridad. Otro de los ejemplos es eliminar bordes de las caras, cuando estos estén muy concentrados y sean excesivos, ya que en el caso de que estén en la unión con otros componentes el acoplamiento de malla se vuelve muy complicado.

A continuación se explican por que proceso de idealización se les somete a los diferentes componentes de la pieza rueda.

10.2.1 Idealización del buje

El buje se divide en el tubo y la pared del mismo y el tratamiento a cada componente es diferente.

Idealización del tubo del buje

En el caso del tubo del buje no hay que realizar ninguna idealización debido a que el diámetro interior del mismo esta limitado a 26 mm. ya que es el diámetro de los rodamientos que irán alojados en la rueda. La única simplificación, a modo de visualización, es editarlo y fijarlo como una superficie para que así no tenga grosor y sea indiferente cual de las dos caras seleccionar.

Es necesario conocer que el laminado deberá ser hacia el exterior del mismo para que sea coherente con la realidad. Es algo que se comentará más adelante.

Idealización de la pared del buje

La pared del buje es el componente más complicado, no por su geometría ya que es sencilla, sino porque a esta pieza se le unen por una parte el tubo del buje y por otra los radios de la rueda.

Los radios se han diseñado de tal manera que el centro de su sección entre en contacto con la cara superior de la pared del buje en la mitad de su espesor. Eso es una ventaja debido a que el plano medio a que el plano medio de la pared superior deberá coincidir con ese punto de contacto con los radios. Por lo tanto, la primera idealización es obtener el una superficie que sea el plano medio del anillo de la pared del buje y colocar una restricción nueva que sea que el centro de la sección del radio debe situarse en el borde de dicha superficie. Esta hecho tiene que ver también con como irá drapeada el anillo debido a que se colocaran capas de de fibra anulares sobre otras capas que hagan de tubo de la pared del buje.

Sobre la nueva superficie que se ha creado, como el modelo del que proviene esta en 3D, es necesario expandir la lámina hasta que entre en contacto con el tubo del buje. Esta acción es necesaria para que ambos componentes estén unidos y con ello se pueda acoplar la malla. Esto en la realidad no será así debido a que el tubo del buje tendrá un espesor y con ello un diámetro exterior y por lo tanto, el tubo que va unido al anillo de la pared del tubo, que también tendrá un espesor; tendrá un diámetro a partir del cual se podrá laminar el anillo de la pared del buje. Aún así, esta variación en el diámetro de las capas del anillo del buje no será superior a 3-4 mm. y como se ha visto en los estudios paramétricos, no existe diferencias entre el tamaño de los componentes del buje. Como muestra la figura 10.2, una vez extendido la superficie, se elimina el borde inicial del anillo de la pared del buje pues no genera ninguna información y hará que la malla tenga que coincidir con dicho borde.

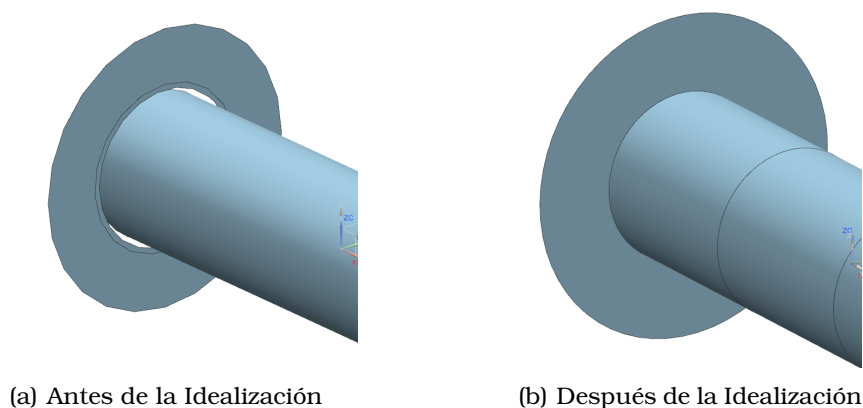


Figura 10.2: Idealización. Detalle del proceso de idealización del buje (Fuente: Propia)

Con respecto al tubo de la pared del buje la solución es muy sencilla, como se conoce su longitud, lo que se hace es que el tubo del buje se divide en 3 secciones, 2 para los extremos de la pared del buje y la restante como tubo del buje únicamente. Durante la laminación se le dará a las partes externas las capas y orientaciones deseadas que formarán parte de la pared del buje. En cambio, será necesario que las 3 secciones tengan las mismas capas referentes al tubo del buje. Esta acción se traduce en asumir que el tubo de la pared del buje y el tubo del buje son el mismo componente por lo que están adheridos entre capas por la resina en lugar si se realizará la pared del buje como una pieza y el tubo por otra y luego se pegasen. Esta suposición hace que la pieza simulada sea menos resistente que la real debido a que las propiedades de resistencia a cizalladura, que es como se deslaminarían dichas capas, de la resina epoxi siempre es superior a la de un pegamento estructural para fibra de carbono.

10.2.2 Idealización del Aro

Para el aro se ha citado que se utilizará el modelo 7 de los que se mostraron en los estudios anteriores. Para poder trabajar con una mayor libertad a la hora de colocar refuerzos sobre el aro se utilizará la superficie externa del mismo y modificando el espesor u otros refuerzos hacia el interior del mismo.

Lo que si que se realiza es una operación para eliminar las caras, sobre todo en la garganta garantizando siempre que los bordes que quedan definan bien los límites del aro. Esto se hace porque en la zona de acoplamiento, al tener muchos bordes, en ocasiones se ha visto como el programa no podía generar una malla en el radio y en el aro capaz de garantizar el acoplamiento entre ellas. En la figura 10.3 se puede apreciar el antes y el después de este proceso.

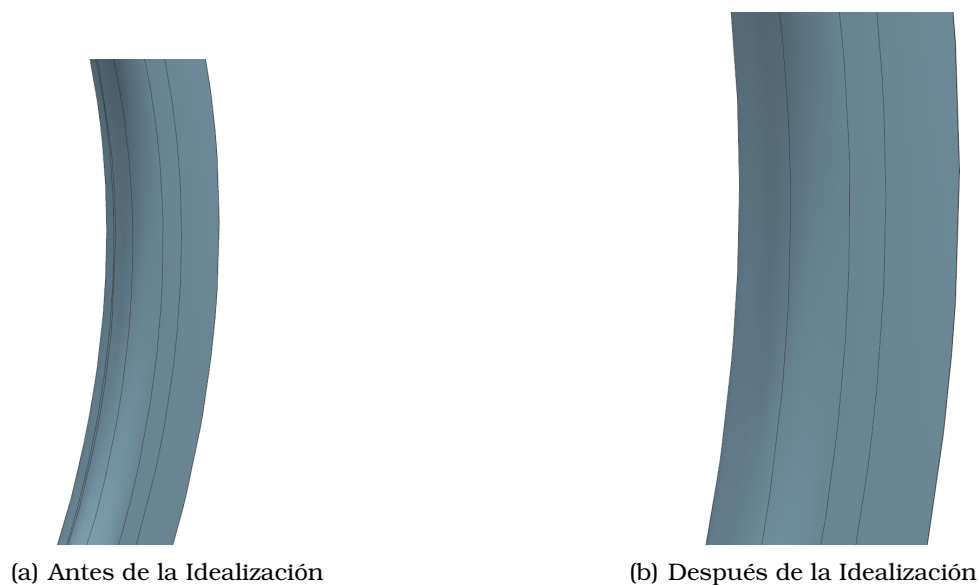


Figura 10.3: Idealización. Detalle del proceso de idealización del aro. (Fuente: Propia)

10.2.3 Idealización de los Radios

La idealización de los radios tiene más que ver sobre las propiedades de mecánicas de la fibra de carbono y la función estructural del radio sobre la rueda. El radio esta diseñado para transmitir las fuerzas que recibe la rueda, ya sea desde el terreno o desde la propia rueda. Por lo tanto, como es lógico, solo es efectivo cuando trabaja a tracción. A tracción no ya que aunque sea de metal o fibra de carbono la resistencia a compresión es muy reducida ya que el radio tendería a pandearse. Por tanto se puede idealizar el aro como un elemento unidimensional en el cual únicamente transmite la fuerza.

Esto lleva a dos conclusiones, la primera es que se deberá de fabricar con la fibra de carbono I, que es unidireccional y colocar las fibras en la dirección longitudinal del cilindro. La segunda conclusión viene referida al hecho de que el radio solo transmite fuerzas principalmente en la dirección longitudinal. Otro de los problemas que se tiene es que el software no puede laminar el radio de tal manera que se consiga un cilindro macizo de fibra de carbono con una malla en 2D, la solución es hacer un tubo con un diámetro lo más reducido posible y después realizar el laminado hacia el exterior creando un tubo y no un cilindro. El diámetro más pequeño en el cual el software fue capaz de laminar era de 0.2 mm. de diámetro, y por lo tanto, la aproximación a un tubo era bastante buena ya que el diámetro del radio será de entorno a 3-4 mm.. Otra solución era realizar una malla en 3D del cilindro de fibra de carbono, aunque aumentase el tiempo de cálculo debido a que se calculas los esfuerzos en las 3 dimensiones, cosa que no ocurre en la fibra de carbono con los espesores que se esta trabajando, pero el problema es que no se conseguía realizar el acoplamiento de malla entre el radio y el aro y el buje. Por esto motivo se decide hacer una malla 2D de un cilindro de diámetro 0.2 mm..

10.3 Ensayo I

Una vez idealizada la rueda, se puede proceder a realizar el análisis de la misma. En este estudio, y en el resto, se busca calcular la rigidez lateral de la rueda en base a diferentes dimensionados de la rueda y ver que no existe ningún peligro de deslaminación en la rueda. Para esto se tendrá la configuración para ensayos estructurales, tanto el caso I como el II. Como recordatorio esta configuración era colocar los bordes del tubo del buje fijos y aplicar una fuerza en la parte superior de un lateral del aro. En el caso I en la zona donde se encuentran los radios y en el caso II en el punto medio donde se unen los radios al aro. Se realizaran para fuerzas de 150 y 250 Newtons. A continuación se detallarán los diferentes pasos seguidos para realizar el primer análisis.

10.3.1 Mallado

En este apartado solo se hablará del tipo y tamaño de la malla. El material compuesto se define dentro de la malla de la pieza, pero en el siguiente apartado se hablará de la laminación.

Mallado del Buje

Para mallar el buje se utilizará el mismo tipo de malla, una malla de elementos en forma de cuadrilátero con 4 nodos, uno en cada esquina. Se utiliza esta malla y no una con elementos tridimensionales porque se adapta mejor a la forma de la superficie y genera una calidad de malla superior. Esto es válido tanto para la pared del buje como para el tubo. Al ser una superficie sin cambios de geometría acusados. Para la convergencia de malla se comenzará con un tamaño del elemento de 1 mm. En la figura 10.4 se puede ver la forma que adquiere la malla del buje.

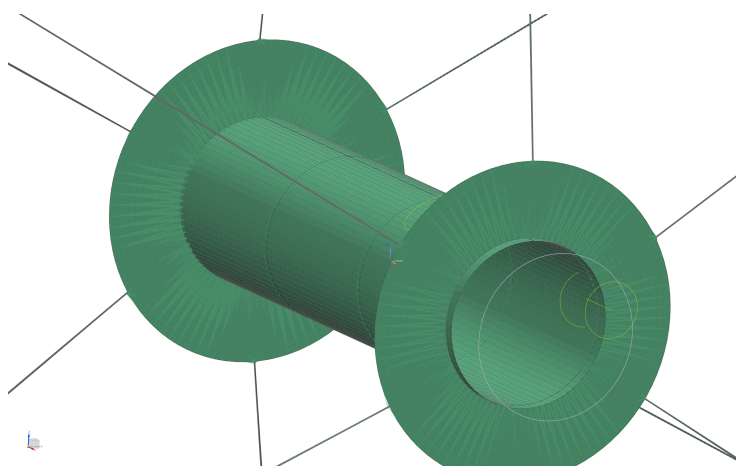


Figura 10.4: Mallado. Malla del buje. (Fuente: Propia)

Mallado del Radio

La malla del radio es la más compleja de todas porque al tener un diámetro de 0.2 mm. y una longitud de 270 milímetros es muy complicado realizar dicha malla. Se utiliza una malla con elementos triangulares con un tamaño de malla inicial de 0.3 mm. Del mismo modo que en el caso anterior, una malla con elementos cuadriláteros hubiera sido mejor pero para tener una calidad de malla aceptable sería necesario utilizar 8 nodos por elemento y no 4. El problema es que ese tipo de malla no es válida cuando se realizan ensayos con materiales compuestos porque el software no es capaz de obtener una solución. Por lo tanto, se utiliza el otro tipo de malla.

Mallado del Aro

Para mallar el aro es obligatorio utilizar elementos triangulares debido a que con elementos cuadriláteros hay caras, de la parte de la garganta, que no consiguen mallar debido a los cambios de geometría. El tamaño del elemento inicialmente es de 3.8 mm. Se toma este valor debido a que era el valor más alto con el que los acoplamientos entre las mallas del aro y del radio se hacían efectos. Con valores superiores a este, el acoplamiento de malla no era válido. Además, como se verá más adelante los tiempos de cálculo no son elevados en el caso de los ensayos estructurales como se ha citado en posteriores ocasiones.

10.3.2 Laminado

Una de las partes más importantes de este estudio es el laminado de las diferentes partes de la rueda. Para poder conocer los aspectos relacionados con la laminación es necesario conocer el tipo de fuerzas que le llegan a la rueda. No se busca diseñar y fabricar una rueda para este estudio, pero si es el único que se puede realizar para comprobar valores. A continuación se hablará del laminado de cada componente.

Laminado del Radio

Es el único componente que se conoce, no que tipo de fuerzas recibe, pero si como las va a transmitir por la forma que tiene. Un radio tiene como función, transmitir fuerzas, no soportarlas. Además, lo lógico es que estas fuerzas se transmitan de un extremo a otro por lo que la orientación de las fibras deberá ir en concordancia a dicha afirmación. Lo que significa que el radio se laminará con fibras unidireccionales con una orientación en la dirección longitudinal del mismo. En la figura 10.5 se puede ver como queda la orientación de la fibra en la malla del radio.

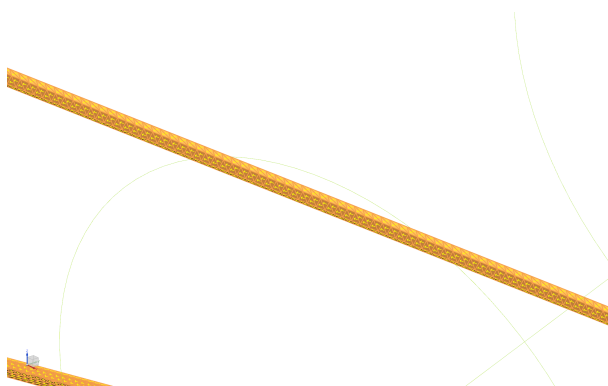


Figura 10.5: Laminado. Orientación de las fibras en el radio. (Fuente: Propia)

Queda por citar que el material utilizado será la FC I pues es la única unidireccional. Para este primer ensayo se laminará el radio con 4 capas unidireccionales una encima de otra. Lo cuál genera un radio de 4.8 mm. de diámetro pues es espesor de cada capa es de 0.6 mm.

Laminado del Aro

Por ejemplo, al aro le llegan una gran cantidad de fuerzas, que pueden aparecer en casi todas las direcciones. Por ejemplo, para que la rueda no se deforme y adquiera la forma de un ovalo será necesario colocar las fibras del aro en dirección tangencial al mismo.

En cambio, cuando la rueda sufra un impacto por culpa del terreno, la fuerza se transmite en dirección radial, por lo tanto será necesario otra lámina en dicha dirección.

Por último, estas fuerzas pueden llegar al mismo tiempo de manera oblicua y por tanto ser una combinación de de tangencial y radial. Además, puede ser que una fuerza tangencial este actuando en un lateral de la rueda y no en otro y por tanto cree una torsión. Es por este motivo que la gran mayoría de los fabricantes utilizan fibras con

una orientación oblicua, la habitual es de $+45$ y -45 según el eje radial del aro. Estas 3 configuraciones se ve en la figura 10.6.

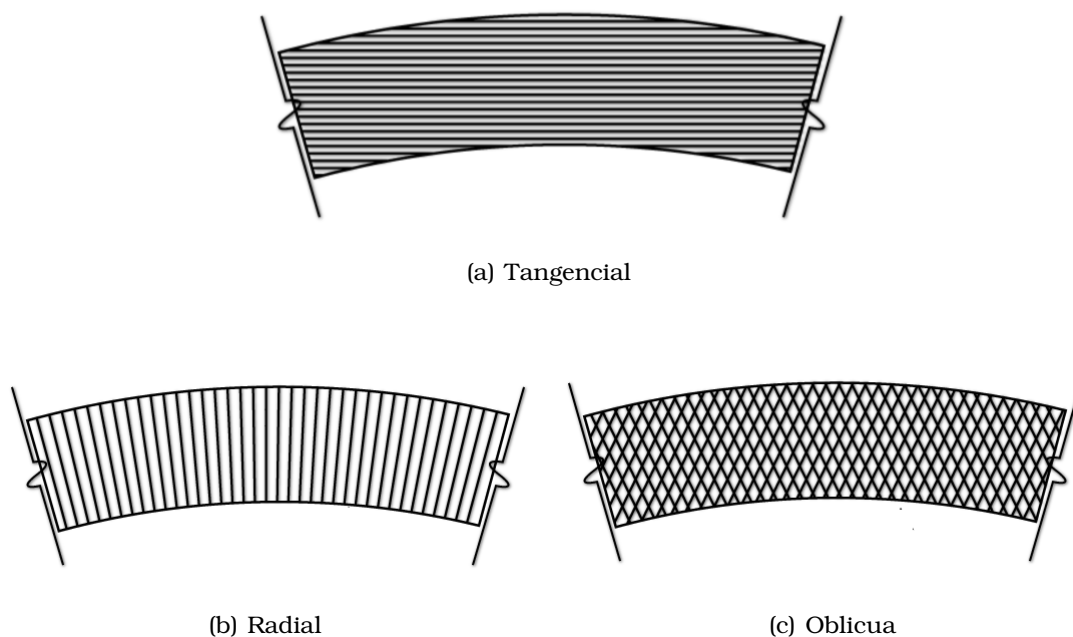


Figura 10.6: Laminado. Tipos de orientación de las fibras en el aro. (Fuente: Propia)

Según la referencia [41] donde se habla de que configuración es más importante según el tipo de disciplina, en la modalidad de carretera se habla de que estas configuraciones deben tener un peso equitativo en la rueda.

Para este primer ensayo se utilizará un espesor constante del aro, es decir, se colocarán únicamente 3 capas de fibra. Eso quiere decir que para las dos primeras se utilizará la FC I debido a que es unidireccional y se puede orientar como se quiera. La última capa será de FC II ya que es tejido bidireccional. Desde el exterior, la primera tendrá orientación tangencial, la segunda radial y la tercera será el tejido bidireccional colocado en configuración $\pm 45^\circ$. Se utiliza la FC II debido a que laminar, en la realidad, con una orientación oblicua es complicado por lo que laminar 2 capas oblicuas y que entre si deben estar a 90° es muy complejo.

Por lo tanto el aro tendrá un espesor de 2.2 mm constante. Estos espesor son especificaciones del fabricante, es decir, si se fabrica bajo las mejores condiciones, y si se fabrica siguiendo el método de vacío. En el caso de los aros de bicicleta estos se realizan por compresión, algo que se detallará en el apartado correspondiente. Esto solo modificará el espesor del aro pues las laminas estarán orientadas de igual manera.

Laminación del Buje

Se ha visto que las dimensiones del buje no afectan a la rigidez lateral pero en cambio si lo hacen con otras muchas propiedades de la rueda. No es algo muy divulgado pero todos los bujes de carbono del mercado están fabricados con tejidos bidireccionales y no existen muchas información de este motivo. Se puede ver que la gran mayoría de fuerzas transmitidas por la bicicleta llegan a la rueda por el buje y estas son radiales, longitudinales y de torsión y además, por la configuración básica de la rueda, todos los esfuerzos tienden a transmitirse o al buje o desde el buje. Por lo tanto, es una zona crítica porque si se coloca un espesor reducido en dichas partes puede ser que aparezcan grietas o se rompan debido a las vibraciones que sufre la rueda, por ejemplo. Así pues, tras lo citado anteriormente y recomendaciones de las empresas del sector se hará un tubo del buje con 1 mm. de espesor. El espesor del tubo de la pared del buje será también de 1 mm. La orientación de los dos tubos será longitudinal y tangencial al tubo, como muestran las líneas rojas en la figura 10.7. Por lo tanto se utilizará la FC II ya que el drapeado es mucho más cómodo y sencillo.

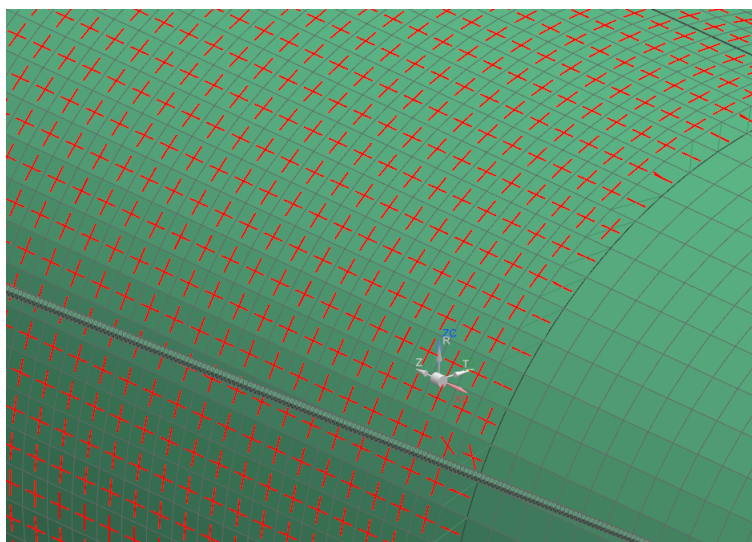


Figura 10.7: Laminado. Orientación de las fibras en el tubo del buje. (Fuente: Propia)

Por último, el espesor del anillo de la pared del buje será de 6 mm. Este valor depende del radio, que tiene 4.8 mm. de diámetro por lo que parece lógico dejar 1 mm. a cada lado como medida de precaución. Se utilizará la FC II porque así se cubre un abanico superior de orientación de la fibra con un espesor total más reducido que con la FC I. Como se colocan 6 capas, se tienen 12 posibles orientaciones diferentes ya que las capas son bidireccionales. Eso significa que se puede colocar cada capa desfasada de la anterior 15° , ya que solo hay que tener en cuenta la mitad de una circunferencia.. Lo cual quiere decir que se cubre la orientación 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° y por lo tanto también la 90° , 105° , 120° , 135° , 150° y 165° . En la figura 10.8 se puede ver la orientación del material con mayor claridad.

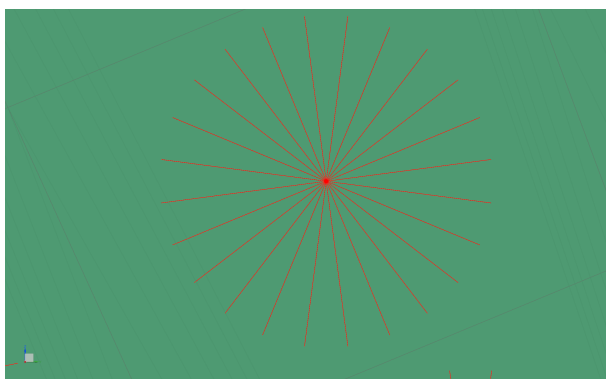


Figura 10.8: Laminado. Orientación de las fibras en la pared del buje. (Fuente: Propia)

10.3.3 Convergencia de malla

El proceso de convergencia de malla será muy sencillo aunque no será el excesivamente eficaz. Después de realizar el estudio se remallará todos los componentes de la rueda con un factor de 0.9 respecto al tamaño inicial. Este proceso se realizará en dos ocasiones y por lo tanto se tendrán 3 casos con los que comparar la convergencia de malla. Como es habitual el parámetro elegido para comprobar la convergencia de malla será la máxima de deformación para una fuerza según la configuración I de 150 Newtons. Una vez realizado los cálculos se muestra la deformación máxima en función del número de nodos de cada simulación, esto queda reflejado en la figura 10.9.

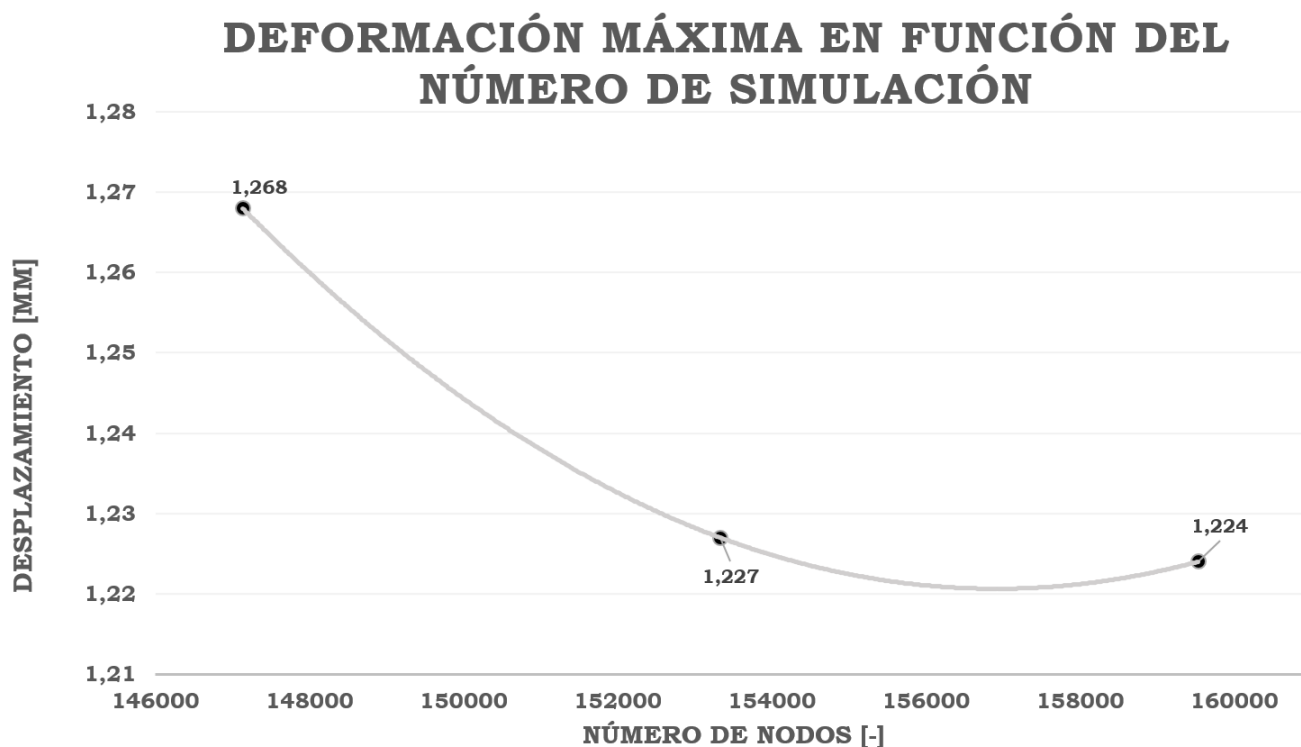


Figura 10.9: Convergencia de Malla. Deformación máxima en función del número de nodos. (Fuente: Propia)

Por lo tanto, en el caso 2, es en el que la malla converge. Los tamaños de los elementos de malla quedan recogidos en la tabla 10.1.

CONVERGENCIA DE MALLA			
Componente	Caso I (mm)	Caso II (mm)	Caso III (mm)
Aro	3.8	3.42	3.078
Radio	0.3	2.7	2.43
Tubo del Buje	1	0.9	0.81
Pared del Buje	1	0.9	0.81

Tabla 10.1: Convergencia de Malla. Valores de los tamaños de malla de cada componente.

10.3.4 Preparación de los resultados

El material compuesto no se trabaja como un material isótropo y por tanto los resultados que se obtienen también son diferentes. En el caso del material compuesto se puede trabajar con dos parámetros que indican si la pieza se ha roto o no tras el ensayo. El primero es el índice de fallo, que es valor escalar que indica en que pliegue puede fallar la pieza. Si el valor absoluto está por debajo de 1, la pieza no corre riesgo de fallo. Este índice depende del tipo de teoría de fallo que se elija. En materiales compuestos la más habitual es la teoría de Tsai-Wu, que se muestra en la ecuación 10.2.

Teoría de Fallo de Tsai-Wu

$$F = F_1\sigma_1 + F_{11}\sigma_1^2 + F_2\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\tau_{12}^2 < 1 \quad (10.1)$$

$$(10.2)$$

Donde las variables se definen de acuerdo a la nomenclatura utilizada por el manual de NX, [52], que quedan reflejadas en la siguiente lista.

$$F = \text{Fallo} \quad (10.3)$$

$$F_1 = \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C} \quad (10.4)$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_T X_C} \quad (10.5)$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C} \quad (10.6)$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_T Y_C} \quad (10.7)$$

$$F_{66} = \frac{1}{S^2} \quad (10.8)$$

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{X_T X_C Y_T Y_C}} \quad (10.9)$$

$$\sigma_1 = \text{Esfuerzo en el plano en la dirección 1} \quad (10.10)$$

$$\sigma_2 = \text{Esfuerzo en el plano en la dirección 2} \quad (10.11)$$

$$\tau_{12} = \text{Esfuerzo en el plano transversal a los anteriores} \quad (10.12)$$

Donde las variable "X" define a la tracción "T" o compresión "C" en la dirección 1. En cambio, la variables "Y" lo hace en la dirección 2. Por último la variable "S" es la tensión de corte permitida en el plano 12.

10.3.5 Resultados

Una vez realizado los cálculos se puede proceder a analizar los resultados, los de la deformación se recogen en la tabla 10.2. El valor que más se deforma siempre es el punto donde se localiza la fuerza ya sea para el caso I o II.

DEFORMACIÓN PARA EL ENSAYO I

	CASO I		CASO II	
	150 (N)	250 (N)	150 (N)	250 (N)
Deformación (mm)	1.576	2.627	1.582	2.731

Tabla 10.2: Resultados. Deformación para el caso I

La tabla anterior muestra una rigidez, muy similar para ambos casos de estudio de entorno a 95 N/mm, es decir, por encima del valor objetivo. Esto quiere decir que sobra material a priori. En la tabla 10.3 se muestra los índices de fallo más altos debido a que en total la rueda tiene 89 pliegues y no vale la pena ver el total de los mismos.

ÍNDICE DE FALLO PARA EL ENSAYO I

Núm. Pliegue	Componente	Caso	Fallo del Pliegue		Fallo de la unión	
			Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
34	Radio 1 (Capa Externa)	250 (N) Caso I	0.0533	-0.0125	4.25	0
34	Radio 1(Capa Externa)	250 (N) Caso II	0.0425	-0.023	5.21	0
32	Radio 1 (Capa Interna)	250 (N) Caso II	0.0946	-0.0185	6.23	0
26	Aro (Capa Radial)	250 (N) Caso II	0.167	-0.022	5.381	0
36	Radio 12 (Capa Externa)	250 (N) Caso I	0.12	-0.015	0.092	0
36	Radio 12 (Capa Externa)	250 (N) Caso II	0.000499	-0.000563	0	0

Tabla 10.3: Resultados. Índices de fallo para el ensayo I

Lo primero que hay que citar es que todos los pliegues que salen en la tabla tienen que ver con el aro y con los radios más próximos a donde se sitúa la fuerza, el radio 1 es el radio situado en el lateral donde se aplica la fuerza y el 12 en el lateral opuesto. Según la condición de Tsui-Wu el índice de fallo de pliegue en valor absoluto es inferior

a 1 por lo tanto la pieza no fallará por rotura de alguno de sus pliegues porque no se supera los valores de tensión máxima. Por otro lado los índices de fallo de la unión, es decir, de la interlaminación de las capas, también se encuentran por debajo de 100 por lo que no hay riesgo de que ningún pliegue se deslamine durante este ensayo.

Lo que se ha visto en este primer análisis es que la rueda a priori esta sobre dimensionada debido a que la rigidez lateral que genera es superior a la objetivo. Además los índices de fallo son muy reducidos, lo que quiere decir que el coeficiente de seguridad es alto.

10.4 Ensayo II

La única modificación que sufrirá la rueda en este ensayo es el tipo de laminación del aro y del buje. El resto de parámetros de malla y del buje se mantendrán idénticos al ensayo I.

10.4.1 Laminado

Laminado del Aro

En el ensayo I se ha supuesto que el espesor en el aro es constante pero esto en la realidad no es cierto ya que en las esquinas de la garganta y en la parte inferior el aro está reforzado con un extra de material. Haciendo uso de las referencias [46], [47], [48], [49] y [50] se aprecia como la parte inferior del aro de carbono se suele reforzar con unas 3-4 capas y la garganta con 2-3 capas. En la parte inferior del aro este refuerzo viene condicionado por el hecho de que en este punto se ha de unir el radio al aro y es un punto crítico de rotura de las ruedas por lo tanto es una zona que cabe reforzar. En el caso de la fabricación se realizará un agujero de la medida del radio de 3 mm. donde se introducirá el radio y se pegará con adhesivo estructural. Por lo tanto, como poco esta zona debe de tener un espesor superior a 3 mm.. En el ensayo I se tiene un espesor de 2.2 mm. por lo que se colocan 4 capas más de FC II, a cada cuál más pequeña para dejar una superficie final prácticamente plana, donde el espesor final sea de 6.6 mm. con el objetivo de dejar material una vez retirado el material para incluir el radio. Con respecto a la garganta, es necesario reforzar esta zona porque sobre la parte superior del lateral del aro es donde apoya la zapata que frena la rueda, y con ello la bici, y es una zona que se llegan a alcanzar temperaturas de 200 °C, véase [28]. Por este motivo se colocaran 2 capas adicionales de FC II. La geometría de estas capas es arbitraria y se muestra en la figura 10.10 donde el color naranja rosa indica la lámina con orientación tangencial, la amarilla con orientación radial, la naranja es la bidireccional y la verde los refuerzos.

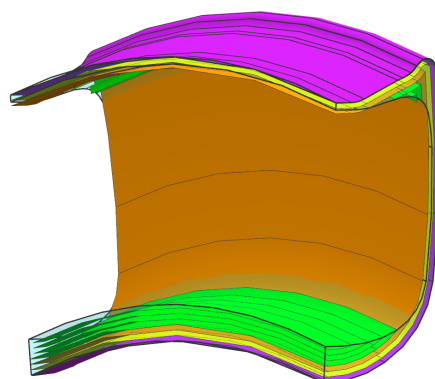


Figura 10.10: Laminado. Laminado del aro para el ensayo II. (Fuente: Propia)

Laminado del Radio

El radio, como se citó en el apartado de ensayos estructurales, se dimensionará con el objetivo de otorgar a la rueda de la rigidez lateral objetivo. Para esto se hará como si se solucionase un problema a la inversa. Se probará con un diámetro de radio hasta tener el resultado deseado. La primera prueba se realizará con una capa menos en el radio, es decir, 3 capas. Esto genera un radio de un diámetro de 3.6 mm de diámetro.

10.4.2 Resultados

De manera análoga al anterior resultado se muestra la deformación que sufre la rueda, en este caso en la tabla 10.4.

DEFORMACIÓN PARA EL ENSAYO II				
	CASO I		CASO II	
	150 (N)	250 (N)	150 (N)	250 (N)
Deformación (mm)	2.035	3.4	2.12	3.56

Tabla 10.4: Resultados. Deformación para el caso II

Se aprecia como los valores de la deformación son superiores, como era de esperar. Ahora se obtiene un rigidez lateral de 74,24 N/mm, es decir, el valor se sitúa por encima del valor objetivo. En este caso se tiene un cierto margen de seguridad que se puede considerar como un margen permisible a la hora de fabricar la rueda ya que de la fabricación dependerá las propiedades mecánicas finales de la rueda.

Se muestra en la figura 10.5 los índices de fallo de la rueda para el ensayo II.

ÍNDICE DE FALLO PARA EL ENSAYO II						
Núm. Pliegue	Componente	Caso	Fallo del Pliegue		Fallo de la unión	
			Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
34	Radio 1 (Capa Externa)	250 (N) Caso I	0.0653	-0.0455	7.12	0
34	Radio 1(Capa Externa)	250 (N) Caso II	0.0982	-0.0561	9.21	0
32	Radio 1 (Capa Interna)	250 (N) Caso II	0.172	-0.0321	10.86	0
26	Aro (Capa Radial)	250 (N) Caso II	0.412	-0.0098	2.341	0
36	Radio 12 (Capa Externa)	250 (N) Caso I	0.482	-0.00011	0.092	0
36	Radio 12 (Capa Externa)	250 (N) Caso II	0.000451	-0.000091	0	0

Tabla 10.5: Resultados. Índices de fallo para el ensayo II

Los índices de fallo siguen mostrando que la rueda no va a romperse por el ensayo ni se va a deslaminar en ninguna zona de la rueda. Se aprecia como los pliegues que más sufren son análogos en ambos ensayos porque en la parte del aro sufre la capa más interna mientras que en los radios adyacentes a la zona de aplicación de la fuerza la capa que más tensiones recibe es la más externa. En cambio, los valores son más altos que en el caso anterior. La decisión, con los materiales disponibles, es de sobre dimensionar la rueda y utilizar un radio fabricado con 3 capas, y un diámetro de 3.6 mm.

A continuación, se muestra un resumen de la laminación final de cada componente.

- **Aro.** 1 Capa con FC I en sentido tangencial. 1 Capa con FC I en sentido radial. 1 Capa con FC II con orientación $\pm 45^\circ$ según el eje radial. 4 Refuerzos con FC II en la zona inferior del aro con un ancho de 20, 15, 10 y 5 mm. respectivamente. 3 Refuerzos con FC II en la zona de la garganta con un ancho de 5, 3 y 2 mm. respectivamente.
- **Radio.** 4 Capas con FC I en la dirección longitudinal del radio.
- **Pared del buje.** 6 Capas con FC II con una orientación de 15° entre cada una de ellas.
- **Tubo de la pared del buje.** 1 Capa de FC II en la dirección longitudinal del tubo.
- **Tubo del buje.** 1 Capa de FC II en la dirección longitudinal del tubo.

Por último, para un mayor detalle de las cotas de los componentes, en el Anexo [?] se muestran los planos de todos los componentes.

FABRICACIÓN

Una vez definida la geometría ya se ha llegado a la mitad del objetivo de este proyecto. A continuación se narrará todo el proceso utilizado para poder obtener un proceso de fabricación de las piezas de las que se componen la rueda. Se comenzará explicando cuales son las restricciones del proceso de fabricación y de que herramientas se disponen. Posteriormente se explicará el proceso de investigación hasta encontrar el método de fabricación de cada componente y como se ha obtenido.

11.1 Restricciones de Fabricación

A continuación se explicarán de que herramientas se disponen en el taller para hacer uso de las mismas.

Horno

La fibra de carbono preimpregnada se almacena en una congelador industrial para que no se inicie el proceso de polimerización. Para llevar acabo este proceso es necesario someter a la pieza a una temperatura dada durante un tiempo especificado por el fabricante. Para eso hace falta un horno en el cual se pueda regular la temperatura del mismo. Para este caso se dispone de un horno de 1.5 de largo, 80 cm. de alto y 1 de ancho. La pieza más grande que se dispone es el aro donde su longitud mayor es de 622 mm., considerando el exceso de material del molde sería un cuadrado de 80x80 cm. como mucho y con no más de 8 cm. de alto. Por lo tanto, se podría fabricar las ruedas en el horno.

Además, como este horno se diseño con el objetivo de poder fabricar en él piezas de material compuesto, la temperatura se puede regular manualmente y tiene un techo de servicio superior a los 150°. Las recomendaciones del fabricante es que durante la fase de calentamiento la temperatura no suba más de 2-3 $\frac{^{\circ}}{\text{min}}$, lo cual aunque manualmente, se puede realizar.

El horno dispone de dos tomas de vacío, método que se utilizará en dos de los componentes. Para el aro se utilizará aire comprimido para fabricar la pieza, y en el laboratorio se dispone de una toma de aire que se puede utilizar.

En principio, el horno del que se dispone no genera ninguna restricción sobre la fabricación de la rueda.

Impresora 3D

Para poder realizar diferentes piezas para los moldes, como será el caso del buje, se utilizará una máquina de impresión 3D de la marca Zortrax M200, véase ref. [33] y en la figura 11.1.

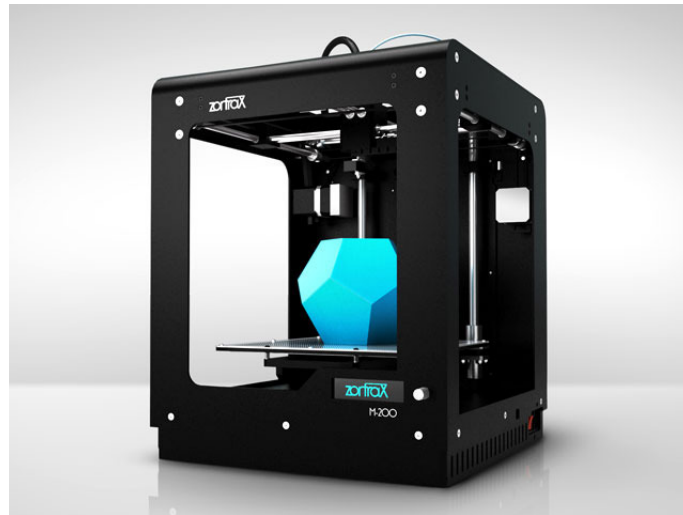


Figura 11.1: Impresora 3D marca Zortrax M 200 (Fuente: Impresora3dprinter.com)

Esta máquina de última generación en impresión 3D dispone de un software donde únicamente existen pocos parámetros para modificar. Como son:

- **Material.** Se pueden elegir 4 tipos diferentes de material para utilizar. En este caso se utilizará un plástico denominado ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno). Es uno de los plásticos más comunes para este tipo de máquinas por ser de los más económicos. Además uno de los mayores inconvenientes de la impresión 3D es el acabado superficial que se obtiene. Pues bien, este material permite ser lijado y pulido con acetona para dejar una buena superficie. Una vez definido el material, la maquina ya configura la temperatura de la plataforma (a 100°) para que no se despegue durante el proceso.
- **Espesor de las capas.** Se pueden elegir entre diferentes espesores entre capas para poder tener una superficie final mejor, cuanto menor sea el espesor elegido. Este será un parámetro con el que se investigará.
- **Relleno.** Se pueden elegir 3 tipos de rellenos: lleno, sólido, medio y ligero según la densidad que se desea que tenga la pieza. Evidentemente conforme más densidad mejores propiedades tendrá la pieza pero el tiempo de fabricación y el material usado será mayor.
- **Soportes.** Uno de los mayores inconvenientes cuando se fabrica una pieza en 3D es el hecho de que no tenga ningún elemento que se halla de fabricar en vacío. Para ello el programa procesa la pieza y es capaz de generar soportes adicionales para que el material se queda en la posición indicada si la pieza tiene cierta curvatura o elementos en el aire.

Fresadora CNC de 3 ejes

Para la fabricación de moldes se dispone de una maquina de control número o CNC de 3 ejes, es decir, dispone de movimientos en el eje X, Y y Z de la herramienta. El tocho, o el material utilizado para generar la pieza se ancla en una bancada y la herramienta es la que se mueve sobre sus 3 ejes para obtener la pieza final. La maquina en cuestión es de la empresa CNC Barcenas y el modelo SW 1325, como se puede apreciar en la figura 11.2.



Figura 11.2: Fresadora de Control Numérico de la empresa Barcenas modelo SW 1325 (Fuente: cncbarcenas.com)

Sus dimensiones útiles son de 1,3 x 2,5 x 0.2 metros, y como en el caso del horno, no suponen ninguna de restricción sobre la fabricación. A la máquina es necesario introducirle un archivo según la norma ISO para mecanizado con las operaciones de la herramienta. Esto se realizará con el módulo de fabricación en el software de NX 9.0. Durante el proceso de fabricación se podrá modificar tanto la velocidad de giro de la herramienta como la de la herramienta sobre sus ejes. Estos dos parámetros modifican la calidad con la que se obtiene la pieza final, es decir, no solo vale que las operaciones de mecanizado sean las correctas sino también los parámetros de corte. Estos se ven influenciados por la geometría de la pieza, el material que se utilice como tocho y la herramienta que se disponga.

La herramienta de la que se dispone es una herramienta de bola con un diámetro de 6 mm. y si que tendrá algunas limitaciones de para el proceso de fabricación que se comentarán en el apartado de 11.6.1.

El material para mecanizar que se dispone es placa mecanizable de alta densidad. Estas placas están diseñadas de un material llamado poliuterano con el objetivo de poder reducir los tiempos de mecanizado ya que tiene una resistencia al desgaste muy baja y generan una viruta muy fácil de romper, lo que hace que la herramienta pueda moverse y girar más rápido. La alta densidad ofrece unas propiedades mecánicas muy buenas, no tanto como el acero o el aluminio, pero en el caso de este proyecto es necesario una densidad alta para que el molde sea capaz de soportar temperaturas de hasta 120°. Es decir, no se va a fabricar ningún componente de la rueda en dicho material, sino que se utilizará para fabricar los moldes, que evidentemente, deberán introducirse al horno.

11.2 Fabricación en Material Compuesto

En este apartado se darán unas nociones básicas de como fabricar cualquier pieza de material compuesto con el objetivo de poder comprender con mayor facilidad el proceso de fabricación de los diferentes componentes de la rueda. Para poder trabajar en el laboratorio es siempre obligatorio utilizar el material adecuado, por lo que los usuarios que manipulen la fibra de carbono deberán estar provistos con una bata de laboratorio, unas gafas y guantes debido a que la resina epoxi que posee la fibra es tóxica. Por ejemplo, si se queda algún resto de fibra sobre un corte que tenga el usuario este tiene muchas posibilidades de infectarse. El proceso de fabricación se compone de lo siguiente:

Preparación del molde.

El molde no deja de ser la pieza de la cual la fibra reproducirá su apariencia. Por lo tanto un molde puede ser simplemente una plancha, si se desea hacer una lámina de fibra de carbono, un tubo si se desea hacer un tubo de fibra de carbono, por ejemplo. Una vez obtenido el molde se pueden utilizar diferentes materiales para poder facilitar el desmoldeo posterior de la pieza.

- **Teflón.** Se dispone de teflón en formato prensado el cual se pega sobre el molde. Este hace que la resina no se adhiera al molde y se pueda desmoldear con mayor facilidad. En la figura 11.3 se aprecia el que se utiliza.



Figura 11.3: Teflón utilizado para facilitar el desmoldeo (Fuente: tudiras.com)

- **Desmoldeante Específico.** El teflón es un desmoldeante, pero no ha sido diseñado para ser utilizado en la fabricación de piezas de fibra de carbono, aunque como se ha podido comprobar es una muy buena solución en muchos casos. Como desmoldeantes específicos se tienen disponibles dos tipos:
 - Cera Desmoldeante *Paste Wiz* (véase ref. [35]). Es una cera que ha de aplicarse sobre la superficie del molde 3 veces en intervalos de 10 minutos de separación según las normas del fabricante. Por ser un material, como el teflón, económico; se utilizará en repetidas ocasiones durante el proyecto. En la figura 11.4 se muestra una imagen de la cera citada.



Figura 11.4: Cera Desmoldeante Paste Wiz (Fuente: jamat.net)

- Gel Desmoldeante *Multishield* (véase ref. [?]). Este gel desmoldeante específico para fibra de carbono y requiere seguir unas pautas de utilización muy paudadas. Se ha de impregnar la superficie del molde 3 veces con un tiempo de 15 minutos entre cada acción. Si no se realiza siguiendo este proceso el fabricante no garantiza un buen desmoldeo.

El uso es el siguiente, el primer componente es un limpiador de la superficie que elimina restos de otros desmoldeantes usados con anterioridad o impurezas que se encuentren en la superficie. Posteriormente se utiliza un sellador, *Sealer GP*, que crea una capa en la superficie del molde para poder alargar su vida útil. Por último se utiliza *Multishield* que es desmoldeante propiamente citado.

Corte de la Fibra de Carbono.

Una vez conocida la geometría de la pieza y la laminación de la misma se saca del congelador la fibra de carbono, que esta en un tubo, para que su temperatura aumente y sea más maleable para poder cortarla con más facilidad. Este proceso no dura más de 5 minutos, además tampoco es bueno que la fibra de carbono que no se vaya a utilizar este un largo tiempo fuera del congelador. Una vez la fibra esta lista para cortarse, al llevar un film protector entre láminas, se puede marcar con un rotulador la geometría que se va a cortar, ya sea una cuadrado, una sección del aro, etc. Cuando la fibra es unidireccional es más sencillo cortar en el sentido de las fibras debido a que solo se encuentra haciendo resistencia la resina. En cambio, hay que tener especial cuidado cuando se corta en contra de las fibras pues estas tienen una gran resistencia y si no se realiza un buen corte las fibras se pueden deshilar con facilidad.

Elementos para absorber la fibra excedente de la fibra preimpregnada

A continuación se enumeran los posibles elementos que se pueden utilizar a la hora de fabricar una pieza de fibra de carbono. Se citarán por orden de posición a partir de tener el molde con la fibra listo.

- **Malla de Guiado I.** En el laboratorio se disponen de diferentes capas de plástico con pequeños orificios con el objetivo de guiar el flujo de resina constante. En la figura 11.5 se puede ver una de las que se utilizan. Es necesario que las dimensiones de esta sean superiores a las de la pieza de fibra de carbono. Esto es debido a que el frente de avance de la resina irá hacia la toma de vacío y si la malla de guiada está en el límite de la fibra de carbono habrá una zona de resina que no podrá absorberse con facilidad que será la más próxima a la toma de vacío.



Figura 11.5: Malla de Guiado I (Fuente: Propia)

Esta malla es la recomendada para fabricar piezas de material compuesto pero es una capa de plástico donde los agujeros que dispone son muy pequeños y están muy separados. Los resultados que se obtienen con la misma hacen que más que favorecer la absorción de la resina sea un inconveniente su instalación. Cabe citar que hasta después de numerosas pruebas no se llega a esta conclusión.

- **Malla de Guiado II.** Esta malla de guiado es más un tejido con hilos entrelazados, en la figura 11.6 se puede apreciar con mallos detalle esta malla. Su instalación es un poco más delicada que la anterior debido a que no se adhiere con facilidad a la superficie de la pieza sin curar, en cambio, absorbe mucho mejor la resina que la malla anterior.

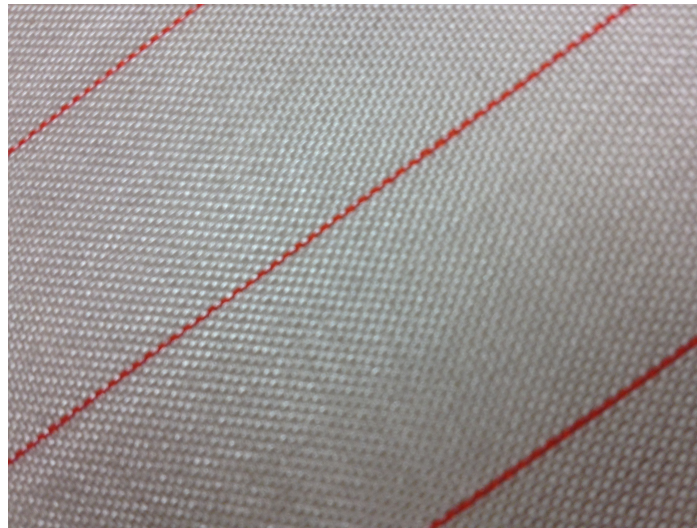


Figura 11.6: Malla de Guiado II (Fuente: Propia)

- **Manta de Absorción.** Es un elemento con un alto nivel de poder almacenar fluidos, como es la resina que tiene en exceso la fibra preimpregnada. En el proyecto se utiliza una manta con una densidad de 136 g/m^2 . Es muy útil cuando la cantidad de fibra es considerable ya que el exceso de fibra también lo será y las dos mallas anteriores, aunque absorben, sirven más para guiar de manera correcta el frente de avance de la resina. En la figura 11.7 se puede apreciar este elemento.



Figura 11.7: Manta Absorción (Fuente: Propia)

Otros elementos para realizar el vacío

- **Bolsa de Vacío.** Este elemento sirve para envolver todos los componentes al cuál se le han de realizar el vacío como son la pieza, el molde, y los elementos de absorción. Existen diferentes tipos de bolsas, las habituales son las que se ven en la figura 11.8 las cuales son láminas, y otras destinadas a fabricar tubos que tienen una sección rectangular de diferentes tamaños para introducir elementos como cilindros.

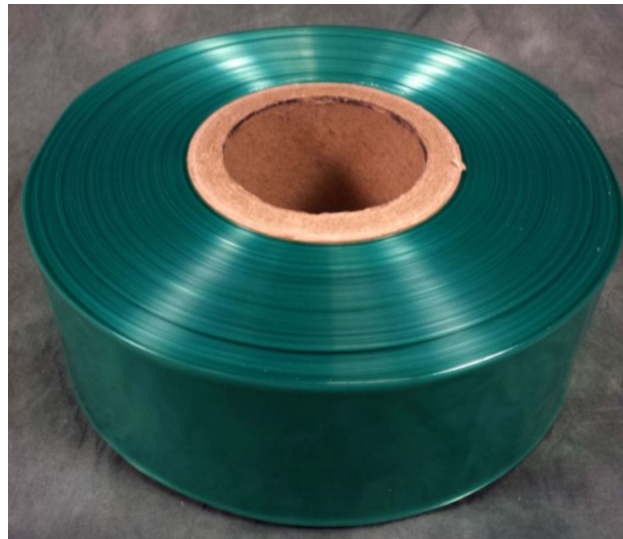


Figura 11.8: Bolsa de Vacío (Fuente: Propia)

- **Masilla de Cierre.** Para poder cerrar la bolsa y que no exista ninguna fuga en la bolsa de vacío es necesario utilizar una cinta adhesiva de doble cara. Existen diferentes variantes en función de la resistencia térmica, desde 140°C hasta 250°C. Después de algunas pruebas con una masilla que soporta hasta 250°C era más fácil que tuviese poros que una con una menor resistencia ya que con el calor la masilla tiende a fluir y a sellar los poros. Por lo tanto como la temperatura máxima de curado de la fibra era de 120°C, la masilla de 140°C, véase figura 11.9, era ideal porque conforme aumentaba la temperatura la calidad del vacío aumentaba.



Figura 11.9: Masilla de Cierre para bolsa de vacío (Fuente: Propia)

- **Toma de Vacío.** El último elemento que hay que instalar en cualquier proceso de fabricación de fibra de carbono por vacío es la toma destinada a tal fin. Esta toma, como se aprecia en la figura 11.10, son dos componentes roscados. Uno va dentro de la bolsa de vacío y otro fuera en el cual se conecta el tubo que irá a la bomba de vacío.



Figura 11.10: Toma de Vacío (Fuente: Propia)

11.3 Ejemplo de Fabricación con Material Preimpregnado realizando Vacío

A continuación se detallará de forma breve cual es el proceso para poder fabricar una pieza en material compuesto. Se explicará como se realiza una de las piezas más sencillas, una plancha de fibra de carbono de 30x30 cm..

- **Molde.** Para realizar una placa el molde puede ser simplemente una plancha de metacrilato o de aluminio que sea capaz de soportar la temperatura de curado. Tendrá que tener una superficie lo más perfecta posible pues la plancha reproducirá dicha superficie. Evidentemente tendrá unas medidas como poco superiores a las de la plancha de carbono que se desea fabricar debido a que es conveniente instalar otros elementos.
- **Preparación del Molde.** En primer lugar se recortará una lámina de teflón de 33x33 cm. para tener un cierto margen. Con la ayuda de un rodillo se quitan todas las burbujas de aire que se hayan podido dejar. Como el teflón estará en contacto con un lado de la fibra, es importante dejar la superficie lo mejor posible porque cualquier arruga o pliegue se quedará posteriormente en la placa de carbono.
- **Desmoldeante.** Una plancha de carbono se desmoldea con relativa facilidad, así que usando cera desmoldeante debe ser suficiente para poder desmoldearlo. Siguiendo las instrucciones se ha de dar 3 capas de cera cada 10 minutos.
- **Fibra de Carbono.** Se saca la fibra de carbono del horno y se deja descongelar durante 5 minutos. Posteriormente se mide y se marca con un rotulador sobre el film la medida necesaria, 30 x 30 cm. y se corta con la ayuda de un cutter y una lámina de aluminio recta.
- **Colocación de la Fibra.** Se quita uno de los films y se instala la fibra sobre el teflón. Al igual que el teflón es necesario pasar un rodillo para quitar las burbujas de aire que hayan. Posteriormente se realizarán ciclos de vacío para quitar las burbujas pero es mejor si se realiza un par de pasadas con el rodillo para quitar dichas burbujas. Una vez ya se ha pasado el rodillo varias veces, se quita el film de la parte superior. Hay que tener en cuenta que la toma de vacío, que tiene un diámetro de 6 cm. deberá estar en el molde y dejar una separación entre la toma, la fibra y los elementos de absorción. Lo habitual es colocar la toma en una esquina y marcar la posición en la que irá sobre el molde porque una vez colocada la fibra no es recomendable retirarla y cambiarla de posición.
- **Malla de Guiado I.** Se mide y se corta una lámina de la malla de guiado I con unas dimensiones de 31x31 cm.. Después de colocarse, se vuelve a pasar el rodillo.
- **Malla de Guiado II.** Se realiza la misma operación que en el paso anterior pero ahora las dimensiones serán de 32x32 cm. y con este tipo de malla no se puede pasar el rodillo porque al no ser plástico y no estar en contacto con la resina, no se queda adherida y con las pasadas del rodillo lo que se hace es mover la malla.
- **Manta de Absorción.** Sobre la malla de guiado II se coloca la manta de absorción con una dimensión de 33x33 cm. Siempre se va dejando un margen a cada elemento por el hecho de que la resina fluye siempre hacia la toma de vacío.

- **Bolsa de Vacío.** Se recorta una bolsa de vacío que tenga unas dimensiones superiores al molde.
- **Cierre de la bolsa** Se coloca sobre un lado de la bolsa la masilla con cuidado de que no queda ninguna fuga. En este momento se pone la bolsa sobre el molde y se coloca la toma de vacío en el lugar deseado pero sin instalar. Entonces se marca sobre la bolsa de vacío por donde pasará la rosca de la toma de vacío. Se hace un pequeño agujero y se pasa la toma de vacío y se aprieta. Después de esto tan solo queda quitar el film protector del otro lado de la masilla y cerrar la bolsa de vacío.
- **Comprobación de Vacío.** Antes de introducir todo en el horno, se instala el tubo en la toma de vacío y se comprueba que no hayan ninguna fuga. Si las hubiese y se localizan, se puede poner un poco de masilla para intentar sellarlas. Después de comprobar que se realiza el vacío, no es recomendable seguir con el proceso si la presión no es inferior a -0.98 bares. Por último se realizan ciclos de vacío de alrededor de 2-3 minutos para retirar todos los poros que puedan haber entre los elementos.
- **Curado.** Una vez este todo listo solo queda introducir la pieza en el horno e ir aumentando la temperatura, normalmente no es recomendable que este aumento sea superior a 2-3 °/min hasta llegar a la temperatura de curado recomendada por el fabricante y dejarla el tiempo necesario. Para el material que se utiliza la temperatura mínima para curado es de 85° y se necesita un tiempo de 10 horas en el horno, en cambio la temperatura máxima son 120° y un tiempo de curado de tan solo 45 minutos.
- **Desmoldeo.** Una vez el proceso se ha acabado, y como los materiales empleados tienen diferentes coeficientes de dilatación, es recomendable apagar el horno e ir dejando que se enfríe lentamente. El fabricante de la fibra recomienda que el desmoldeo se realice cuando la pieza se encuentre a una temperatura inferior a los 60°. Una vez la pieza esta a esta temperatura, se rompe la bolsa de vacío y se retiran todos los componentes de absorción. Es fácil ver los residuos de resina y es recomendable retirar estos componentes con cuidado porque si está muy adherido a fibra se puede romper la pieza. Para retirar la fibra del molde se utiliza una paleta que se introduce con cuidado por las esquinas hasta poder despejar la plancha de fibra de carbono.

11.4 Fabricación de los Radios

Una vez definidas todas las dimensiones del radio es necesario fabricarlos. Además de las dimensiones se conoce el material del cual se va a fabricar y la orientación del mismo. Queda por tanto conocer como fabricarlo. Para ayudar al proceso de fabricación se va a realizar un radio de sección constante, es decir, no varía a lo largo de su envergadura.

La primera opción será obtener un molde del radio con las dimensiones e introducir dentro la fibra de carbono. Surge un problema y es que el radio tiene un diámetro de 4.6 mm. y en cambio se dispone de una herramienta para mecanizar de 6 mm. Como el diámetro de la herramienta es superior al del molde, la herramienta no podrá realizar ninguna operación porque quitará más material del deseado. Por lo tanto se tienen que utilizar otra opción.

El método se obtiene observando un vídeo de Youtube sobre las ruedas Corima MCC (véase ref. [34]), donde fabrican aros de la manera más sencilla posible, enrollando la fibra de carbono. En sus ruedas los radios tienen una sección variable a lo largo del radio con lo cual deberán usar un molde o algún otro método para obtener dicha geometría.

11.4.1 Laminado

Como se conoce el diámetro final del radio y el espesor de cada capa de fibra de carbono, sin curar es de 0.9 mm., se realiza con el software de NX como iría la laminación del radio aproximadamente, ya que se aproxima a una elipse. En la figura 11.11 se puede apreciar esta laminación.

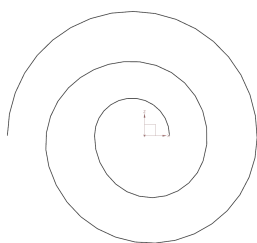


Figura 11.11: Laminación del radio (Fuente: Propia)

El proceso de laminación del radio sigue siempre el mismo proceso:

- **Medición.** La fibra de carbono preimpregnada lleva un film protector con el objetivo de que no se adhieran unas laminas sobre otras cuando están almacenadas. Una vez la fibra de carbono lleva 5 minutos fuera del congelador se puede colocar sobre una placa plana. Sobre el film se mide la longitud necesaria de fibra y con la ayuda de una lamina de metal recta y un cutter se corta la fibra. Cabe itar que en el caso de los radios es muy sencillo realizar el corte ya que este se realiza en la misma

dirección de las fibra, y por tanto, apenas se encuentra resistencia. En las figuras 11.12 y 11.13 se puede ver como se realiza este proceso.

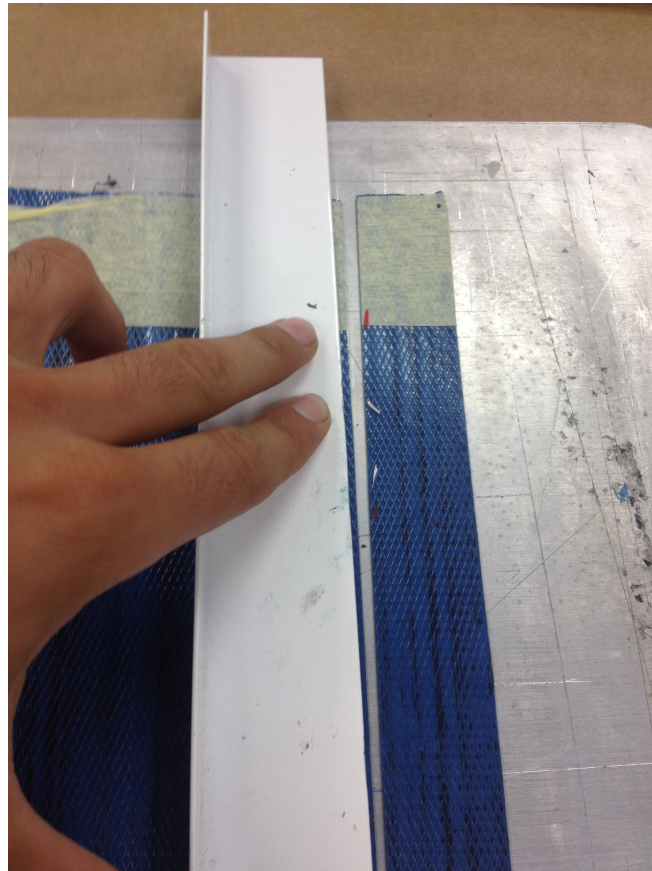


Figura 11.12: Corte con la ayuda de una placa metálica y un cutter (Fuente: Propia)



Figura 11.13: Placa de fibra de carbono para el radio sin laminar (Fuente: Propia)

Utilizando el software se obtiene una longitud del laminado de 24,45 mm. por eso se lleva a cabo un pequeño experimento. Como es habitual cuando se realice el

proceso de laminado a mano puede que queden pliegues y hagan que la dimensión final sea mayor o menor a la deseada. Por lo tanto, utilizando retales de una fibra de carbono idéntica a la que se usarán para realizar el radio se laminan diferentes radios de prueba con el objetivo de comprobar que longitud es necesaria realmente para obtener el diámetro necesario. En la tabla 11.1 se muestra la longitud del ancho de la lamina de carbono que se corta y luego el diámetro del radio sin curar y curado. Para realizar el curado solo se ha utilizado una bolsa de vacío, ningún elemento más.

CALCULO LONGITUD DE FIBRA NECESARIA

	RADIO I	RADIO II	RADIO III
Longitud de Fibra (mm).	24.45	25	26.85
Diámetro sin curar (mm)	4.2	4.3	4.6
Diámetro curado (mm)	4.19	4.28	4.57

Tabla 11.1: Experimento para obtener la longitud necesaria de fibra a cortar para el radio

La longitud del Radio I se obtiene, como se ha citado, con el software de NX. Para la del Radio II se hace de manera arbitraria. En cambio, para la del radio III, se realiza el siguiente planteamiento. Como es una longitud, deberá ser una evolución lineal por lo tanto se realiza una regla de 3 con las diferencias entre la longitud y el diámetro de los radios I y II y se obtiene que para obtener un radio de 4.6 mm de diámetro hay que aumentar la longitud en 2.4 mm respecto al radio I, lo que proporciona una longitud de 26.85 mm. que a la postre se comprueba que genera un radio de 4.6 mm.. En la ecuación 11.1 se puede ver la relación entre la longitud de la fibra de carbono en función del diámetro final deseado.

$$L = 5.821428571428571 D \quad (mm) \quad (11.1)$$

Otra de las conclusiones que se pueden obtener es que realizando el enrollado de la fibra se compacta de una manera sorprendente debido a que el diámetro antes del curado y después es prácticamente similar. Si que es cierto que al haber realizado el proceso de curado con tan solo la bolsa de vacío en los radios aparecen arrugas y pliegues y el diámetro se ha medido en los puntos donde no aparecen estos fenómenos.

- **Enrollado.** Se coloca la placa de fibra de carbono sin laminar sobre una superficie plana y se dobla uno de sus extremos de mayor longitud, posteriormente se va doblando sobre si mismo todo ese lado. Es un proceso completamente manual obteniendo resultados muy buenos ya que la pieza final, sin curar, obtiene un diámetro fijo a lo largo del lado de mayor longitud.

- **Preparación para el curado.** Este proceso ya se ha explicado con anterioridad ya que existen infinidad de elementos que se pueden usar, y de su elección dependerá la calidad del curado y por tanto de las propiedades mecánicas de la pieza.

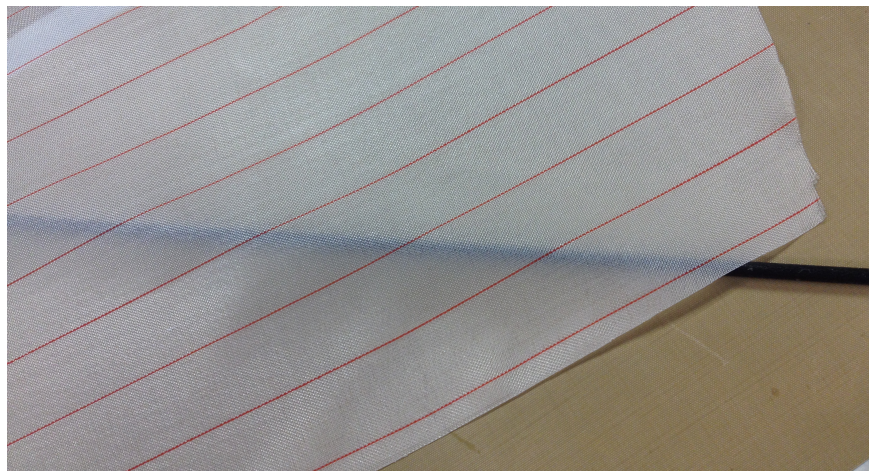
Se fabricarán los radios realizando vacío sobre una bolsa creada bajo dicho fin. Uno de los problemas es que si se lamina la fibra de carbono del enrollando la lámina sobre si misma se obtiene un cilindro, pero a temperatura ambiente ya se aprecia que cualquier fuerza que se le aplique al cilindro lo deforma, cosa lógica ya que tiene un exceso de resina que ha de retirarsele. Por tanto, existe el temor de que, una vez introducido en el horno, si la bolsa de vacío genera alguna arruga o con la temperatura el cilindro tienda a estirarse perdiendo diámetro, esto se apreció en el experimento realizado para calcular la longitud de fibra de había que cortar. Con esta concepción en la mente se realizan diferentes experimentos.

11.4.2 Experimento Radio 1

El primer experimento tiene como fin el conseguir que el radio durante el proceso de curado no se deforme. Para ello se utiliza un tubo de acero galvanizado donde se introducirá el radio, con lo cual la bolsa de vacío quedará por fuera del tubo. El tubo esta estandarizado tiene un diámetro interior de 52 mm. . La laminación será con el radio III del experimento anterior, véase tabla 11.1.

Preparación del Curado

Para el radio se utilizará la malla de guiado de resina para que la resina fluya con mayor facilidad. Para el enrollado se coloca la malla con una orientación de 60° con respecto al radio y se enrolla sobre este. En la figura 11.14 se puede apreciar este proceso.



(a) Antes



(b) Después

Figura 11.14: Experimento 1. Colocación de la malla para que la resina fluya. (Fuente: Propia)

Además de la malla de guiado se coloca una manta de absorción siguiendo el método anterior. El resultado se puede ver en la figura 11.15

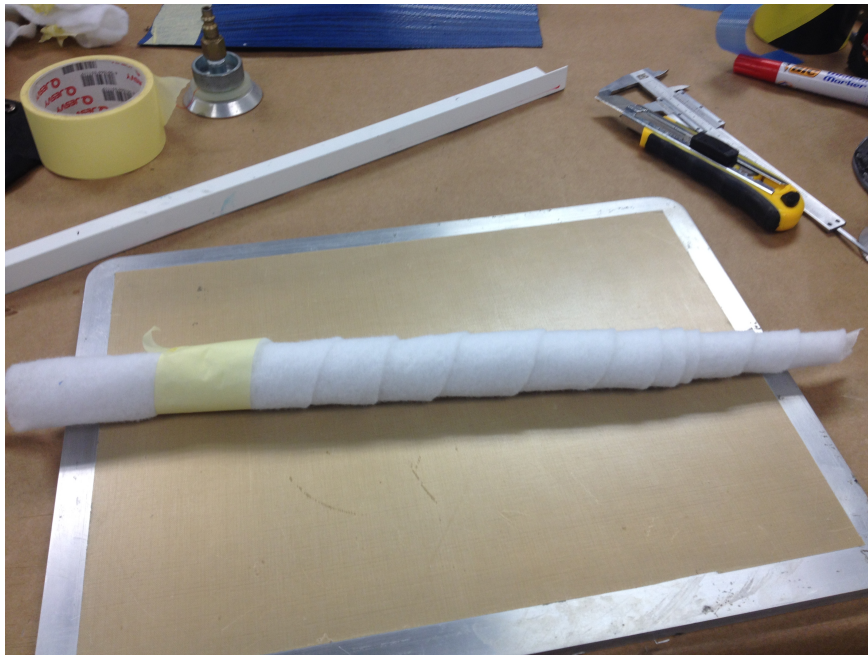


Figura 11.15: Experimento 1. Colocación de la manta de absorción. (Fuente: Propia)

Por último se coloca la toma de vacío en un extremo únicamente como se aprecia en la figura 11.27.



Figura 11.16: Experimento 1. Montaje (Fuente: Propia)

Curado

Se realiza el experimento a una temperatura de 110°C durante 1 hora y media habiendo subido la temperatura a un ritmo de 1°/min.

Resultado

Al retirar la manta de absorción y la de guiado no se aprecia ningún rastro de resina. Lo habitual es que la resina se adhiera a la malla de guiado y al radio con lo haya que ejercer fuerza para quitarla además de aparecer una especie de mancha. Esto se aprecia sobre todo en la figura 11.30 donde se aprecia la malla de guiado sin ningún resto de resina.



Figura 11.17: Experimento 1. Resultado de la manta de absorción. (Fuente: Propia)

Con respecto al radio, no hace falta realizar ninguna medición ya que se observa a simple vista que se ha deformado. Esto se aprecia en la figura 11.30.



Figura 11.18: Experimento 1. Resultado del radio. (Fuente: Propia)

Cabe destacar la gran resistencia que proporciona y la gran flexibilidad del mismo debido a que fijándolo por un extremo y colocando un peso de aproximadamente de 15 kilos en dirección perpendicular a su longitud menor, el radio se desplazaba cerca de 1.5 cm..

Se puede concluir que este método no es adecuado debido a varios hechos:

- El radio obtenido no posee la geometría deseada debido a que no presenta una forma recta.
- Los elementos instalados para la absorción de la resina, como con la malla de guiado y la manta de absorción, no presentan signos de resina. Esto hace pensar que la resina no ha fluido correctamente.

11.4.3 Experimento Radio 2

Como el experimento 1 no cumple con su objetivo, se intentará modificar un único parámetro con el objetivo si así se consigue que el radio no se deforme. En el anterior experimento se utiliza una toma de vacío en uno de los extremos de la bolsa. En este caso se utilizarán 2 tomas de vacío, una en cada extremo. Lo que se busca es que haya dos frentes de avance con la resina y no solo uno con el objetivo de que la presión adversa que reciba el radio sea igual en ambos sentidos.

El resto de los parámetros continúan como en el experimento 1.

El montaje del experimento se muestra en la figura 11.33 donde se aprecian las dos tomas de vacío.



Figura 11.19: Experimento 2. Montaje (Fuente: Propia)

Resultado

Al igual que en el experimento anterior, ni la malla ni la manta de absorción tienen restos de resina. Además, como se aprecia en la figura 11.20, el radio obtenido también se ha deformado en exceso. Aunque en este caso se observa que la deformación proviene del centro y es simétrica, algo que no ocurría en el experimento 1 donde la deformación se situaba más próxima al lugar donde se instala la bomba de vacío.



Figura 11.20: Experimento 2. Resultado del radio. (Fuente: Propia)

Por tanto, el uso de este tubo no sirve para conseguir que el radio no se deforme.

11.4.4 Experimento Radio 3

Como la utilización de un tubo de fibra de carbono en el cual entrase tanto el radio como la malla de guiado y la manta de absorción no sirve para conseguir que el radio durante el curado no se deforme lo que se cambia en este experimento es el tipo de tubo. En este caso se utiliza un tubo de aluminio con tan solo 10 mm. de diámetro interior. Como el radio tiene un diámetro de de 4.6 mm. solo queda un espacio disponible de 2.8 mm. y que tiene que estar destinado para los elementos de absorción.

Preparación del Curado

En este caso la preparación del curado tan solo se realiza utilizando únicamente la malla de guiado. Tan solo se utiliza una capa de la misma utilizando el mismo método que anteriormente para enrollarla ya que con este método es más fácil colocar la malla. En la figura 11.21 se muestra como queda el radio listo para introducir en el tubo.



Figura 11.21: Experimento 3. Colocación de la malla de guiado. (Fuente: Propia)

Tan solo se utiliza una toma de vacío en uno de los extremos.

Curado

El curado que se realiza es el mismo que en el experimento 1, es decir, con una rampa de $1^{\circ}/\text{min}$ se aumenta la temperatura hasta 110°C la cual se mantiene durante 1 hora y media.

Resultado

Como en los casos anteriores el radio obtenido también se encuentra deformado. Analizando este hecho se puede pensar que aparte de que el tubo no este cumpliendo su misión, puede ser que durante el proceso de colocación de la malla de guiado se este deformando el radio ya que sin curar y a temperatura ambiente se deforma con mucha facilidad.

Además, tampoco se encuentra ningún resto de resina sobre la malla de guiado. Esto puede ser debido a que en anteriores proyectos con este tipo de fibra de carbono

donde se han fabricado placas rectangulares de 30 x 30 cm., y no de 30 cm x 2.685 cm., donde se obtienen las mejores condiciones para que fluya la resina, tampoco se encuentran muchos restos de resina. Una de las posibles soluciones es que la cantidad de material es reducida y además aparece un único punto donde a priori debería salir la resina como son los extremos del radio.

11.4.5 Experimento Radio 4

El objetivo de este experimento es doble, poder solucionar el problema de la geometría tras el curado del radio y el hecho de que no se encuentre restos de resina en ninguno de los elementos de absorción.

Para solucionar el problema de la geometría se utilizará un tubo que se aproxime a lo máximo a la forma del radio. Lo idóneo sería un tubo con un diámetro interior idéntico al diámetro del radio pero no existen tubos estandarizados de esa dimensión. Por lo tanto, se utilizará un tubo de aluminio estandarizado con un diámetro interior de 5 mm., con lo cual se tiene un espacio libre de 2 mm. entre el radio y las paredes del tubo.

Para analizar lo que ocurre con los residuos de resina se realizan 2 experimentos. El primero es utilizar diferentes elementos de absorción de la resina y el segundo pesar antes y después del curado los radios. Por lo tanto, dentro de este experimento se tendrán 3 tipos de casos diferentes. Se han querido agrupar dentro del mismo experimento porque temporalmente se realizó el proceso al mismo tiempo.

Preparación del Curado

En este caso, en ninguno de los casos existe espacio suficiente para introducir desde un extremo a otro cualquier tipo de elemento de absorción de resina. Por lo tanto lo que se hace es introducir el radio y posteriormente se introducen los siguientes elementos de absorción.

- **Radio I.** Al primer caso se le colocan en los dos extremos unas pequeñas láminas de 50x3 mm. de malla de guiado en los dos extremos del tubo y que están en contacto con el radio. Para el peso se utiliza una balanza con una resolución de 0.001 gr.. En este caso se obtiene un peso del radio sin curar de 8.098 gr.
- **Radio II.** En el segundo caso, se instala en los mismos puntos del radio I unas láminas de la malla de guiado con la misma longitud pero ahora con una anchura de 20 mm. El peso en este caso es de 8.129 gr.
- **Radio III.** Por último, se instala del mismo modo que los dos anteriores, una lámina de manta de absorción con una longitud de 50 mm. y un ancho aproximado de 10 mm. El peso en este último caso es de 7.983 gr.

Se aprecia por tanto que el peso es muy similar en todos los casos.

En la figura 11.22 se muestra la preparación citada anteriormente.



Figura 11.22: Experimento 4. Montaje. (Fuente: Propia)

Cabe citar que, como en el experimento anterior, se colocan dos tomas de vacío, una en cada extremo de la bolsa.

Curado

El curado realizado sigue el mismo método que todos los experimentos anteriores.

Desmoldeo

En este experimento se cita el desmoldeo debido a que en el resto de casos ha sido muy sencillo. En este caso el radio estaba completamente adherido al tubo. La solución fue golpear con un marcador de acero y un martillo sobre uno de los extremos hasta conseguir obtener el radio. En el caso del radio II fue necesario realizar un corte en el tubo en la dirección longitudinal y posteriormente golpear hasta obtener el radio.

Aunque este hecho parece una complicación también da una buena conclusión y es que la resina si que fluye ya que había dejado el radio adherido al tubo en los 3 casos. En cambio, todos los elementos de absorción estaban intactos. Por lo tanto se puede decir que la resina fluye tan despacio y existe tan poca resina que fluir que no se evapora.

Una vez pesados los 3 radios se obtuvieron unos resultados de 6.012, 5.989 y 6.025 gr. lo cual reduce el peso del radio sin curar en unos 2 gr. de media que son de resina. Por lo tanto, la resina fluye el problema es que no se conoce el dato del exceso de resina que tiene la lámina por lo tanto no se puede conocer con exactitud cuál es la calidad exacta de la fabricación. Para ello habría que realizar un test para conocer las propiedades mecánicas y poder compararlas con los datos del fabricante.

Con respecto a la forma del radio, el radio presenta una geometría homogénea en toda su dirección longitudinal salvo en las zonas próximas a los extremos donde la sección deja de ser un círculo para ser una elipse, este se muestra en la figura 11.23.

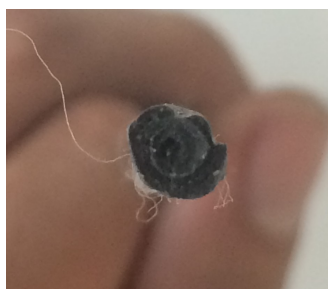


Figura 11.23: Experimento 4. Deformación de los extremos del radio. (Fuente: Propia)

Por lo tanto una de las soluciones es realizar el radio un par de centímetros más largo de lo necesario para posteriormente poder cortar los extremos.

Además, el aspecto de la superficie del radio es bastante rugoso con lo cuál sería necesario realizar una acción de pulido en la cual, aunque poco, se perdería material. Por lo tanto, se considera necesario realizar el radio de un diámetro superior al deseado, en lugar de 4.6 mm. se realiza de 4.7 mm.. Con la ecuación 11.1 se tiene que hay que cortar un ancho para poder enrollar la fibra de 27.35 mm.

11.4.6 Experimento Radio 5

Una vez realizados las anteriores indicaciones sobre el método para fabricar el radio, con el proceso de laminado y curado como en el experimento 5, se obtiene el radio que se aprecia en la figura 11.47 donde el radio es completamente recto.

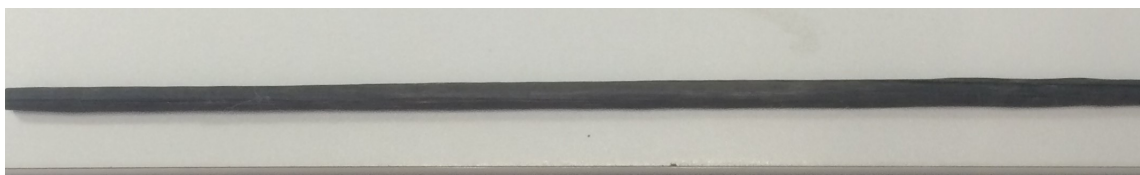


Figura 11.24: Experimento 5. Resultado del radio final. (Fuente: Propia)

En la figura 11.48 se muestra un detalle de la superficie del radio.



Figura 11.25: Experimento 5. Detalle de la superficie del radio final. (Fuente: Propia)

Después el radio es pasado en numerosas ocasiones por una lija de cinta con una lija con un coeficiente de fricción de 1200. Este coeficiente tan alto indica que es una lija con un grano muy fino, y que no es muy abrasiva por lo que deja la superficie más cercana a un pulido que ha un desbaste. El resultado se muestra en la figura 11.49 donde la parte izquierda es la zona pulida y a la parte derecha no se le ha realizado ninguna operación para mejorar la calidad de la superficie.



Figura 11.26: Experimento 5. Detalle de la superficie después de la etapa de mejora de la superficie. (Fuente: Propia)

11.5 Fabricación del Buje

El siguiente componente que se va a describir como se fabrica será el buje. El buje se dispone de dos componentes diferenciados. Uno es el cilindro principal y cilindro secundario como una especie de tapón. El primero es donde se sitúan los elementos de transmisión como son el eje y los rodamientos. El secundario es donde se unen los radios por un lado, y al buje principal por otro. Por lo tanto se analizarán el método de fabricación de cada uno.

Los dos componentes del molde, como se han citado en el apartado de simulación de fibra de carbono, se realizarán con el fibra de carbono II, es decir, con el tejido con las fibras entrelazadas a 0-90°.

11.5.1 Tubo principal

El tubo principal ha de tener unas dimensiones de 97,05 mm. de largo, 26 mm. de diámetro interior y 28 de exterior. Se laminará con un tejido de fibra de carbono dispuesto en dirección 0-90°.

Experimento 1

Una de las opciones que se tienen para obtener el molde es la siguiente, utilizar un tubo que se pueda adquirir en cualquier ferretería. El problema es que la medida de 26 mm. no es estándar y el tubo habría que fabricarlo y eso encarecerá muchos los costes. Por lo tanto, como el objetivo es obtener un método de fabricación, lo que se hace es utilizar un tubo de otra dimensión, aunque similar. La primera prueba se realiza con un tubo de aluminio estandarizado con un diámetro externo de 16 mm. Una de las cosas cosas que se conocen de anteriores experimentos en la dificultad que existe para desmoldear tubos de fibra de carbono. Por lo tanto en este experimento se fabricarán dos tubos de carbono con el mismo método y material lo único que variará será el tipo de desmoldeante a utilizar.

Este primer experimento se realizó antes de realizar los cálculos estructurales por lo que se utilizó la fibra de carbono I o Sparpreg Unidireccional debido a que de este material se tiene una mayor cantidad.

- **Preparación del Curado.** Sobre el tubo se pone una lamina de teflón para favorecer el desmoldeo. Para esta primera prueba solo se pondrá una capa de fibra de carbono. Como se tiene el diámetro exterior utilizando la ecuación 11.2 se obtiene la longitud de fibra que habrá que cortar.

$$L = 2\pi R = 10,04 \quad (cm) \quad (11.2)$$

En uno de los tubos se coloca cera desmoldeante siguiendo el protocolo del fabricante y en otro de los tubos el gel desmoldeante para poder desmoldear con facilidad los tubos.

Posteriormente se coloca la fibra y una lamina de malla de guiado I, seguida una capa de malla de guiado II y posteriormente la manta de absorción. El método para poner la fibra y el resto de elementos es sencillo, sobre una superficie plana se coloca la fibra y con el tubo se pasa por encima y la gracias a la resina se adhiere al tubo. Lo mismo ocurre con el resto de elementos. En el caso de malla de guiado II y la manta de absorción es útil colocar un poco de cinta de carroceros para que no se despegue y sea más fácil de manipular durante el proceso de colocarlo todo en la bolsa de vacío.

Se utiliza una única bolsa de vacío y una sola toma de vacío para realizar el experimento. El montaje se aprecia en la figura 11.27.

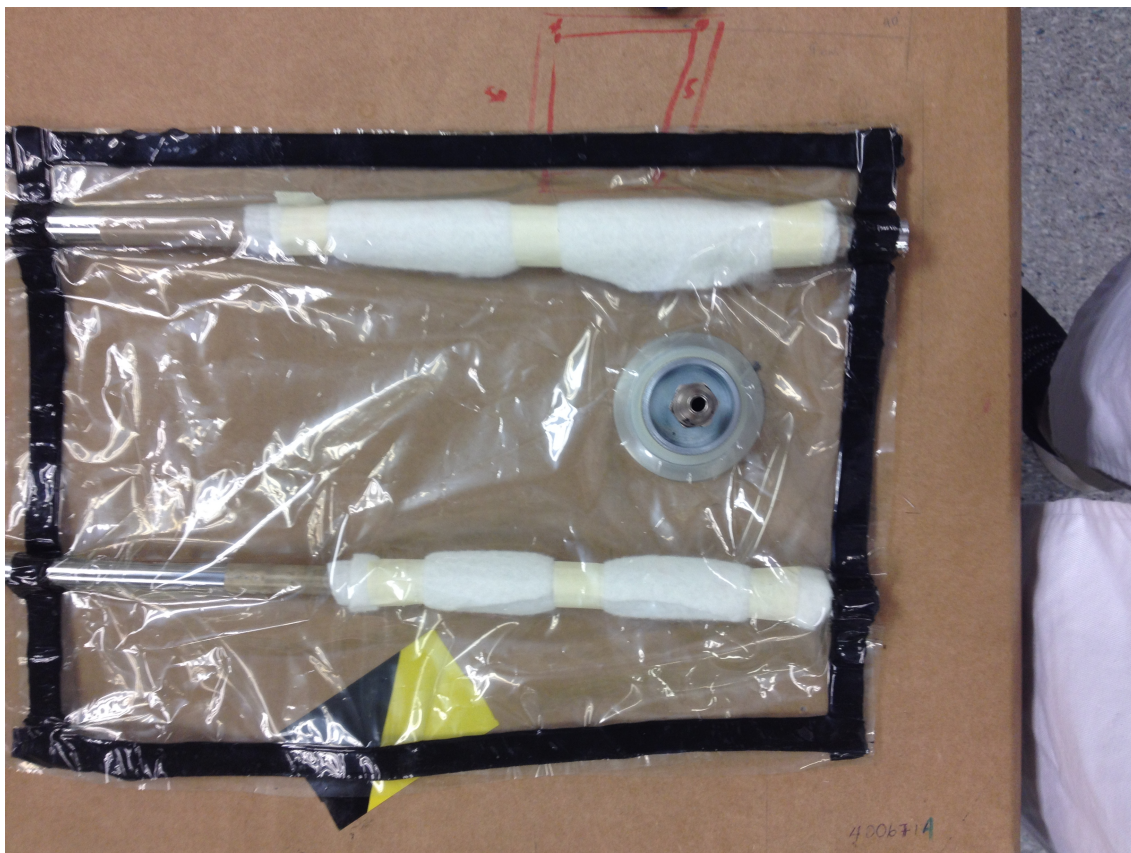


Figura 11.27: Experimento 1. Montaje (Fuente: Propia)

- **Curado.** Se hace una prueba con una temperatura de curado de 1 hora y media a 110°C sin haber realizado ninguna meseta y subiendo la temperatura del horno a un ritmo de 1°/min. En la figura 11.28 se puede apreciar como la masilla utilizada fluye rellenando los poros y pliegues de la bolsa de vacío.

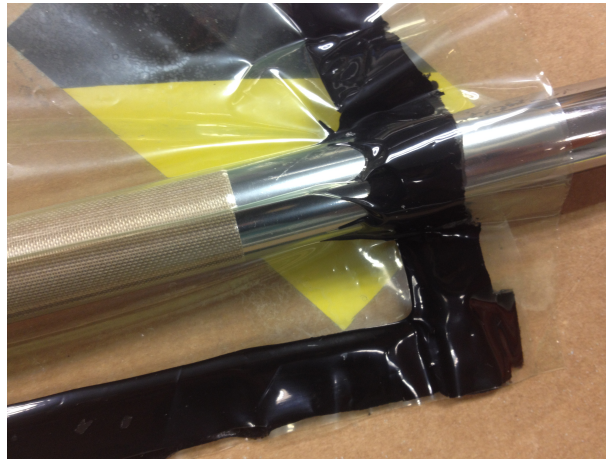


Figura 11.28: Experimento 1. Detalle de como fluye la masilla para tapar los poros (Fuente: Propia)

- **Desmoldeo.** Después del curado se dejan enfriar los tubos hasta que están a temperatura ambiente. Al retirar la bolsa de vacío se aprecia como existen restos de resina en todos los elementos de absorción y aunque en la figura 11.29 parece que haya un tubo con más restos que otro, al observar todo el tubo se aprecia que los tubos han evacuado la misma cantidad de resina, esto se aprecia mejor en la figura 11.30.



Figura 11.29: Experimento 1. Residuos de resina en ambos tubos (Fuente: Propia)



Figura 11.30: Experimento 1. Desglose de los elementos después del curado. (Fuente: Propia)

Al intentar el desmoldeo manualmente, es decir, estirando con la mano en un sentido del molde y en el otro del tubo de carbono en ninguno de los dos casos se consiguen separar. Lo que se hace es sujetar en una bancada al tubo de carbono y dar martillazos sobre el tubo de aluminio. Después de muchos golpes se consigue separar únicamente el tubo que se había untado con el gel desmoldeante. Aunque, el tubo de aluminio y el teflón quedan inservibles para otro uso.

- **Resultado.** En la figura 11.31 y 11.32 se puede ver como queda el tubo de fibra de carbono que se ha conseguido desmoldear. La calidad de la superficie no es muy buena debido a que esta lleno de pliegues. Esto es debido a que la colocación de la fibra no ha sido la correcta porque hay un exceso de fibra y cuando se realiza el vacío esta no puede adquirir la forma del tubo.



Figura 11.31: Experimento 1. Vista isométrica del Tubo de Carbono . (Fuente: Propia)



Figura 11.32: Experimento 1. Vista lateral del Tubo de Carbono. (Fuente: Propia)

Además, durante el desmoldeo como se fija el tubo de carbono, este queda marcado y la calidad de su superficie se ve desmejorada. Por lo tanto, este método, ni con desmoldeante de cera ni de gel; no es válido ya que no puede garantizar el desmoldeo y hay que mejorar la calidad de la colocación de la fibra para evitar la creación de pliegues.

Experimento 2

Como el primer experimento no ha sido nada bueno, en el segundo experimento se busca mejorar la calidad de la superficie exterior del tubo. Para eso se va a realizar el mismo proceso que anteriormente pero usando únicamente como desmoldeante gel. El molde será el mismo tubo que anteriormente donde se han retirado los dos extremos pues estaban dañados de recibir los golpes del martillo.

En el anterior experimento se utilizó la fibra de carbono SparPreg y en este caso se utilizarán tanto dicha fibra como el tejido de 0-90° para comprobar si el tipo de material influye en el desmoldeo o no.

- **Montaje.** Para mejorar la laminación sobre el molde lo que se realiza es estirar lo máximo posible antes de colocarla y no dejarla encima de una placa plana sino pegarla una pequeña parte al molde y luego enrollar el molde de tal manera que se adhiera la fibra.

En este caso el montaje, como se aprecia en la figura 11.33, se realiza sobre una bolsa de vacío anular destinada para la fabricación de tubos.



Figura 11.33: Experimento 2. Montaje. (Fuente: Propia)

- **Curado.** Como se ha citado el proceso de curado es idéntico al experimento 1.
- **Desmoldeo.** Los tubos presentan la misma cantidad de residuos que en caso anterior por lo tanto montaje realizado, aunque diferente, es válido. Sobre el desmoldeo se obtiene el mismo problema que en el experimento 1 ya sea para cualquiera de los dos materiales utilizados.

Lo que se hace es lo siguiente, se introducen los dos tubos con sus moldes en el congelador durante 10 horas debido a que la fibra y el aluminio tienen coeficientes de dilatación diferentes. Después del desmoldeo, aunque a golpes como en el experimento 1, es más sencillo. Era de esperar que el desmoldeo fuese igual de complicado debido a que no se había realizado nada al respecto.

Con respecto a la calidad de la superficie, se aprecia como en ambos tubos solo existe un único pliegue y el resto del tubo presenta una buena calidad. En la figura 11.89 se muestra el caso del tubo fabricado con la fibra unidireccional y en la figura 11.90 el tubo fabricado con la fibra en dirección 0-90°.



Figura 11.34: Experimento 2. Resultado del tubo de carbono fabricado con fibra unidireccional. (Fuente: Propia)



Figura 11.35: Experimento 2. Resultado del tubo de carbono fabricado con fibra 0-90°. (Fuente: Propia)

El hecho de que solo aparezca un pliegue es positivo debido a que el resto del tubo tiene un diámetro constante y tan solo es necesario ligar y pulir ese pliegue para obtener un tubo. Exista o no un pliegue el proceso de ligado y pulido es necesario porque la superficie que se obtiene colocando la malla de guiado I o II es bastante rugosa.

Desde el punto de vista estructural se aprecia que el tubo II, es decir, el fabricado con fibra en dirección 0-90° y no solo en dirección longitudinal presenta una rigidez al aplicar una fuerza en la dirección tangencial muy superior al tubo I.

Experimento 3

Una vez solucionado el problema de los pliegues aparecidos en la superficie el siguiente objetivo es poder solucionar el problema del desmoldeo. Una de las suposiciones que se tienen es que como el coeficiente de dilatación entre el aluminio y la fibra de carbono son diferentes durante el proceso de curado, la relación es de caso 10 a favor del aluminio; que se realiza a 110° , pueden aparecer tensiones internas generadas por la temperatura y el vacío. Si estas tensiones se mantienen después del proceso pueden hacer cuando la temperatura baje la fibra de carbono se contrajera en mayor medida que el aluminio y la pieza queda en tensión y el desmoldeo sea más complejo.

Para ello se realiza un tubo mediante impresión en 3D con un diámetro externo de la misma medida que tendrá el buje principal de la rueda, es decir, 26 mm.. El espesor del tubo será de 3 mm. y se puede mostrar este molde en las figuras 11.36 y 11.37 donde se aprecia con detalle la superficie del molde y se observa que no es del todo perfecta que cabría esperar. Pero este tipo de material, el ABS, se puede tratar con acetona para dejar la superficie pulida.



Figura 11.36: Experimento 3. Tubo realizado mediante impresión 3D. (Fuente: Propia)



Figura 11.37: Experimento 3. Detalle de la superficie del tubo realizado mediante impresión 3D. (Fuente: Propia)

- **Preparación del molde.** Lo primero que se hace es comprobar las medidas del molde, y se obtiene un valor en toda su longitud de 25.78 ± 0.1 mm., véase figura 11.38, con lo cual se obtendría un diámetro interno del tubo de carbono inferior al deseado que tiene que ser de 26 mm. y de 28 mm. externo. Primero se liga la superficie del molde y posteriormente se aplica una capa de acetona pero el resultado no es el esperado. Además faltan 2 centésimas de milímetro para conseguir la geometría deseada, entonces lo que se hace es que se pone una capa de teflón con el objetivo de dar un poco más de diámetro al molde y facilitar el desmoldeo. Con esta medida se consigue un diámetro de 25.98 ± 0.1 mm. por lo tanto es la medida requerida, como se aprecia en la figura 11.39.



Figura 11.38: Experimento 3. Diámetro externo del molde inicial. (Fuente: Propia)



Figura 11.39: Experimento 3. Diámetro externo del molde con una capa de teflón. (Fuente: Propia)

Laminado. La fibra de carbono que se usa en este experimento es la que se debe usar para fabricar el molde, la fibra de carbono II. Esta tiene una compactación de 1 mm. por capa por lo tanto como el diámetro exterior es de 2 mm. se pondrán dos capas lo más tensas posibles.

Como elementos de absorción se pondrá una capa de malla de guiado I y II y manta de absorción como muestran las figuras 11.40 y 11.41.



Figura 11.40: Experimento 3. Instalación de la malla de guiado I. (Fuente: Propia)

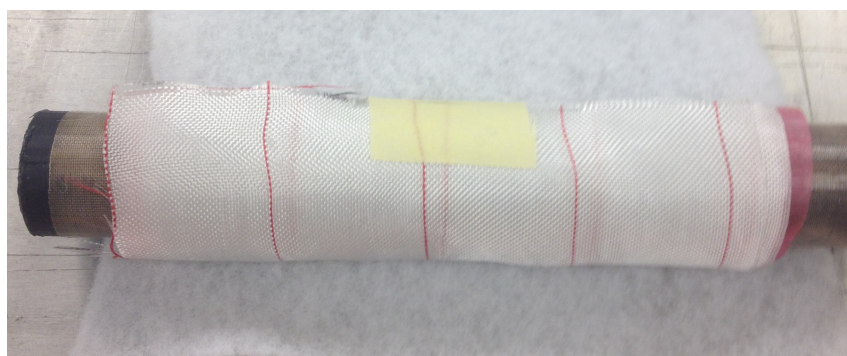


Figura 11.41: Experimento 3. Instalación de la manta de absorción sobre la malla de guiado II. (Fuente: Propia)

Preparación del Vacío. En este caso se realizará la bolsa de un método diferente. Con el objetivo de no realizar el vacío sobre una sola pared, que es la exterior, se introduce una bolsa en el interior del molde con el objetivo de crear un compartimento en el cual se haga presión sobre la parte externa e interna del molde. En las figuras 11.42 y 11.43



Figura 11.42: Experimento 3. Preparación de la bolsa de vacío. (Fuente: Propia)



Figura 11.43: Experimento 3. Bolsa de vacío con un compartimento que realiza el vacío sobre las dos caras del molde. (Fuente: Propia)

- **Curado.** El plástico ABS puede soportar una temperatura superior a los 180°C, pero como en anteriores proyectos a partir de 100°C y realizando vacío este material se deformaba, se va a realizar un curado a 85°C durante 10 horas con el objetivo de que la temperatura de curado sea la menor posible.
- **Desmoldeo.** Al sacar el molde de la bolsa de vacío se encuentra la manta de absorción y la malla de guiado II con numerosos restos de resina, como se puede apreciar en la figura 11.91. Además se muestra una gran cantidad de resina en los dos extremos del tubo de fibra de carbono y el teflón completamente impregnado de resina, como se muestra en la figura 11.45. Esto hace augurar un desmoldeo complicado, pero no; una vez retirado el exceso de resina en la unión del molde y el tubo los dos componentes se separan con la mano.

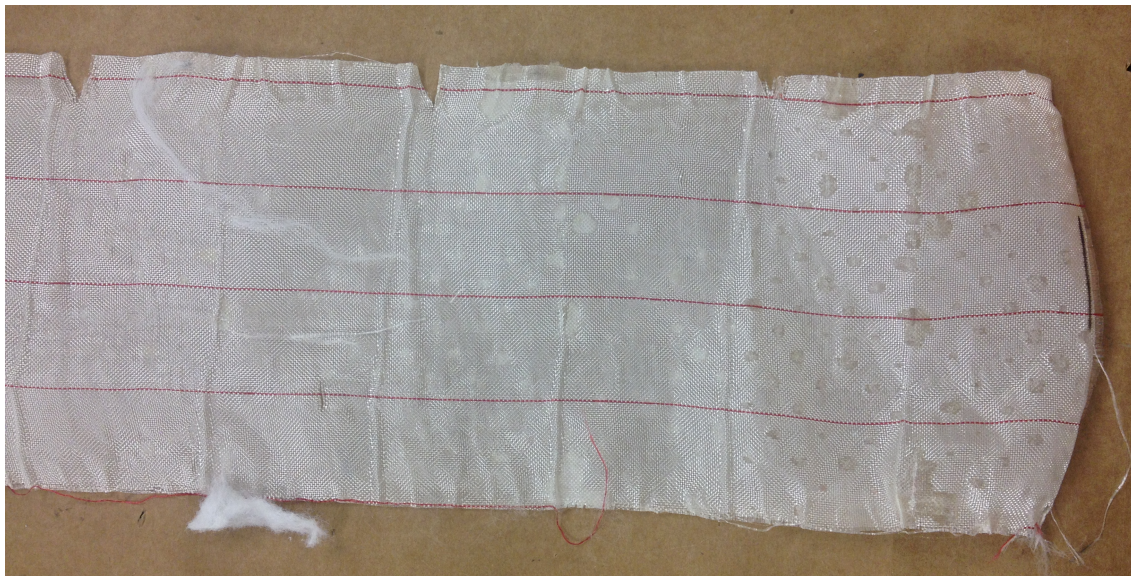


Figura 11.44: Experimento 3. Restos de resina en la malla de guiado II. (Fuente: Propia)



Figura 11.45: Experimento 3. Exceso de resina en la unión del tubo de carbono y el molde. (Fuente: Propia)

- **Resultado.** El desmoldeo ha sido muy sencillo pero el problema como ha quedado el molde, y por tanto el tubo tras el proceso. En la figura 11.92 se puede ver que la sección del molde ha dejado de ser circular. El tubo no se ve tan afectado pero aun así su sección no es circular. Por lo tanto, aunque el desmoldeo se haya conseguido solventar se tiene el problema de que la sección no es circular.



Figura 11.46: Experimento 3. Después del proceso de curado el molde deja de tener una sección circular. (Fuente: Propia)

Con respecto a la calidad de la superficie se obtiene un único pliegue como en el apartado anterior que se podría solventar ligando la superficie. En cambio, el resto de la superficie exterior tiene un diámetro de 28.02 ± 0.2 mm. una tolerancia aceptable considerando que uno de los mayores inconvenientes de fabricar piezas en fibra de carbono son las tolerancias.

Experimento 4

En el apartado anterior se ha visto como no era posible obtener la geometría deseada con un molde fabricado en plástico ABS pero en cambio el desmoldeo si que era posible y podía ser por dos posibilidades, o por usar plástico como material para el molde o por realizar el vacío sobre las dos caras del molde. En este experimento se van a olvidar de las anteriores suposiciones y se va a tomar un camino nuevo. Se va a utilizar un molde macizo, es decir, no va a ser un tubo sino que será un cilindro macizo. En el mercado no existe ningún material que tenga como diámetro exterior 26 mm. ni en cobre, aluminio, hierro. Solo existe un cilindro macizo con diámetro exterior de 26 mm. en latón pero todas las empresas que lo confeccionan lo venden en medidas de 5 metros de longitud y su precio es excesivo para hacer una prueba. Por lo tanto, se consigue una barra de aluminio rectificadas de 25 mm de diámetro y se le colocan 4 capas de teflón obteniendo un diámetro final de 25.98 ± 0.1 mm. Por lo tanto, se consigue el diámetro necesario y además con una gran cantidad de teflón que debería facilitar el desmoldeo, esta medida se aprecia en la figura 11.39.

- **Preparación del Molde.** Aparte de las ya citadas capas de teflón, se ponen 2 capas de fibra de carbono tipo II, y con una longitud de 11 cm. El buje principal tiene una longitud de 97 mm. y se hace más largo para después poder cortarlo a la medida necesario ya que al fabricar tubos en los extremos es muy complicado apilar las capas de forma perfecta.

A parte, se utiliza el desmoldeante tipo cera, y como elemento de absorción se ponen 1 capas de malla de guiado I y otras 2 de malla de guiado II y una capa de manta de absorción, como se aprecia en la figura 11.22. Por último la bolsa de vacío se coloca de forma convencional, es decir, para realizar el vacío sobre la superficie externa.

- **Curado.** El curado en este caso es el habitual, 1 hora y media a 110 °C habiendo subido a un ritmo de 1°/min.
- **Desmoldeo.** Al retirar la bolsa de vacío no se aprecia ningún residuo de resina en la malla de guiado II, tan solo en la I. Lo cual no parece lógico viendo anteriores experimentos. Eso si, aparecen en las uniones del molde y el tubo de carbono una gran cantidad de resina, como en el caso anterior. Una vez retirada esta resina el tubo sale prácticamente sin resistencia del molde.
- **Resultado.** En este caso el diámetro interior tiene la misma tolerancia que tenía el molde con las capas de teflón, que era de 25.98 ± 0.1 mm.. La superficie exterior tan solo tiene un pliegue en cambio lo que se aprecia una gran brillantez en el tubo, como si hubiera un exceso de resina. Uno de los motivos es que la malla de guiado I tuviera algún defecto y en lugar de favorecer a que fluya la resina la aislado. Esto puede ser a que los poros de la malla estuvieran cerrados por algún defecto de fabricación.

Cabe destacar que en anteriores experimentos el teflón queda rasgado e inservible para otros usos porque la superficie deja de ser lisa. En cambio, en este caso el desmoldeo es tan fácil que el teflón queda intacto y listo para otro uso.

Experimento 5

Este experimento es idéntico al anterior con la salvedad de que no se pone la malla de guiado I y tan solo se pone una capa de malla de guiado II en lugar de 2 con el objetivo de dejar que la resina fluya mejor. El resto del proceso es idéntico.

- **Desmoldeo.** Al quitar la bolsa de vacío se aprecia como la manta de absorción esta llena de pequeñas manchas de resina en su totalidad, por lo tanto parece que la resina a podido fluir sin problemas como se muestra en la figura 11.47.



Figura 11.47: Experimento 5. Restos de resina en la manta de absorción. (Fuente: Propia)

El problema viene al intentar quitar la malla de guiado II, es tal la cantidad de resina que contiene que esta completamente adherida al tubo de carbono. Para quitarla es necesario sostener el molde por un extremo y con unos alicates ir quitar poco a poco la malla. En las figuras 11.48 y 11.49 se pueden ver los trozos de la malla empapados completamente de resina.



Figura 11.48: Experimento 5. Restos de resina en la malla de guiado II. (Fuente: Propia)



Figura 11.49: Experimento 5. Restos de resina en la malla de guiado II. (Fuente: Propia)

Es más, el desmoldeo del tubo y el molde se obtiene al intentar la malla de guiado. El único inconveniente de utilizar la malla de guiado II sobre la fibra y no la I es que la superficie que adquiere la pieza es más rugosa y no es tan lisa debido al tipo de malla que esta en contacto con la fibra. Aún así esto es en parte irrelevante porque debido al pliegue que aparece en el tubo, es necesario ligarlo para quitarlo.

- **Resultado.** El problema de la rugosidad de la pieza y del pliegue se soluciona utilizando una cinta de lija idéntica a la que se usa para los radios. Después de varias pasadas el resultado de una parte del tubo se muestra en la figura 11.50. En el se ve como se ha eliminado el pliegue y el tubo adquiere un brillo similar al de una pieza pulida. A la izquierda se ve la pieza con una superficie rectificada y a la derecha sin realizar ninguna operación.



Figura 11.50: Experimento 5. Resultado del tubo después del lijado para eliminar las imperfecciones. (Fuente: Propia)

11.5.2 Pared del buje

En este apartado se explicará cual ha sido el método para realizar la pieza del buje que por una parte se une a los radios y por otra al tubo principal del buje. Como se explicó con anterioridad las dimensiones de esta pieza son las siguientes, aunque quedan reflejas en el plano correspondiente.

- **Diámetro Exterior.** 50 mm.
- **Diámetro Interior.** 28 mm.
- **Espesor del anillo exterior.** 7 mm.
- **Longitud total de la pieza.** 25 mm.

Este componente va a fabricarse con un método que todavía esta en vías de desarrollo en muchas empresas y puede facilitar mucho el proceso de investigación ya que reduce los costes y los tiempos. Se trata de utilizar un molde fabricado mediante una máquina de impresión 3D. Principalmente se reduce el coste debido a que el valor de una máquina de 3D frente a una maquina de control numérico es aproximadamente de 10 veces inferior. Además, el material que se utiliza en las máquinas de 3D, aún eligiendo el más caro no supera los 50 € con el cuál se pueden obtener en torno a 10 piezas de un tamaño medio como podría ser bloques de 20 x 20cm. En cambio, el

Otro aspecto importante es la rapidez debido a que las maquina de impresión 3D modernas tienes software muy desarrollados en el que según la pieza la máquina sabe que parámetros debe escoger para obtener una buena calidad. En cambio en las máquinas de control numérico es necesario un personal autorizado y que conozca bien los procesos de mecanizado para obtener una buena calidad de la pieza, lo cual requiere formación y tiempo. Para la realización de ensayos o diferentes pruebas la utilización de la fabricación por impresión para realizar los moldes puede ser un gran avance. En la fabricación del tubo principal del buje ya se utilizó una molde, que fue el tubo, fabricado en impresión 3D y el problema que se tubo fue que el molde se deformó durante el proceso de curado. Eso es lo que se investigará ahora, si existe algún método por el cual se consiga que no se deforme el molde.

Diseño del Molde

Lo primero, una vez se tiene la geometría final de la pieza que se desea fabricar es obtener el molde, para ello se usa el software de NX. En la figura 11.51 se muestra las piezas que compondrán el molde. La pieza negra es la pieza final, es decir la pared del buje. En rojo, en adelante molde externo, se encuentra una de las piezas del buje, faltaría su simétrica para poder cerrar el molde. Por último se tiene la pieza verde, a continuación molde interno, para poder obtener un tubo.

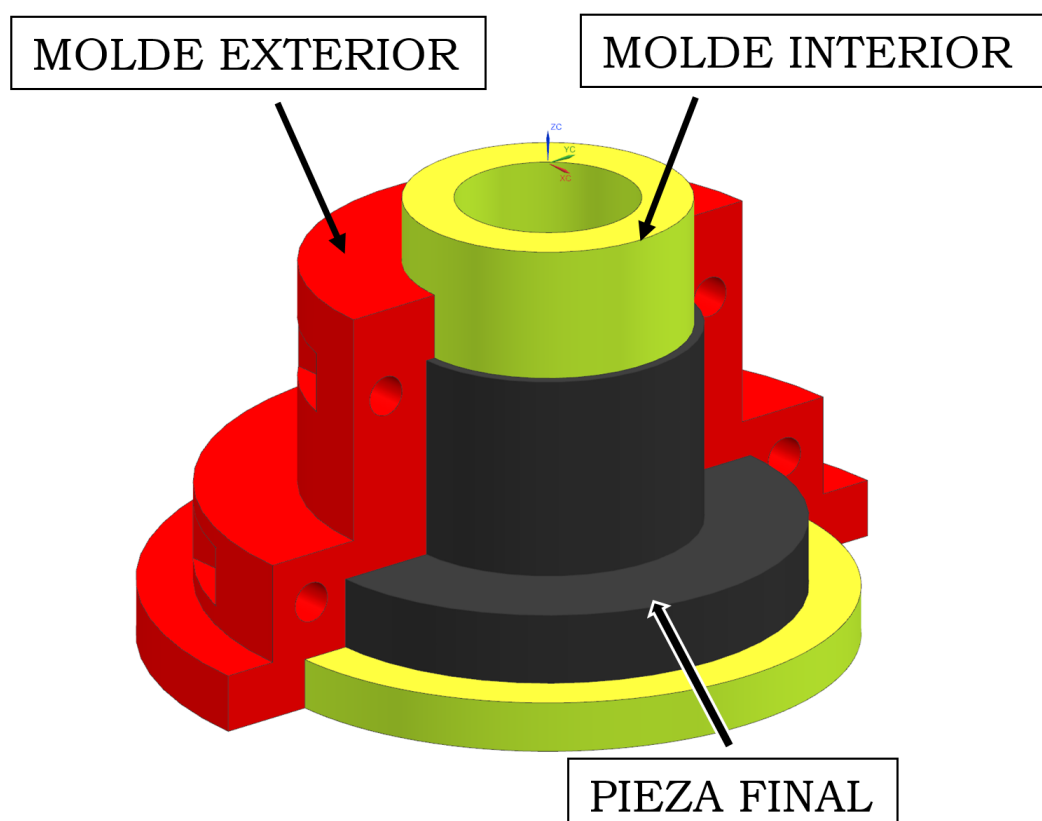


Figura 11.51: Diseño del Molde. Piezas que componen el molde. (Fuente: Propia)

Como curiosidades que hay que tener en cuenta en el proceso de diseño se pueden citar las siguientes:

- **Molde Externo.** Se realizan 4 agujeros de métrica 4 normalizados para poder unir las dos partes y poder cerrar el buje. Hay que tener en cuenta el espacio que se deja para alojar la cabeza del tornillo como la tuerca.

Existe otro punto interesante y es que para que la pieza quede totalmente fijada en la parte superior de la figura 11.51 se puede ver una rebaba en el molde exterior en la unión de esta pieza del molde con la interior y la pieza final. Para una mejor visualización de esta parte se puede observar la figura 11.52. Esto se hace para poder controlar la longitud final de la pieza. Con los 3 ángulos que existen en la parte inferior la pieza final queda fijada longitudinalmente pero sin esa rebaba puede ser complicado laminar con facilidad.

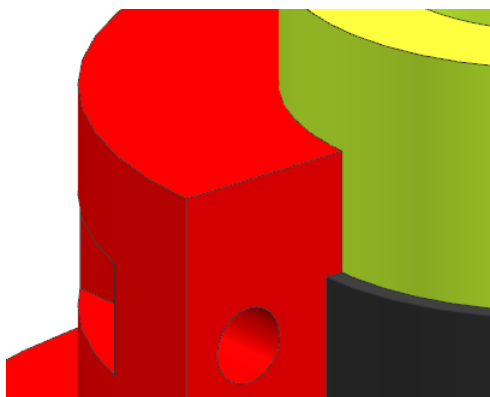


Figura 11.52: Diseño del Molde. Rebaba para poder conocer la longitud final de la pieza. (Fuente: Propia)

- **Molde Interno.** Lo único que cabe citar del molde interno que se ha diseñado pensando tanto en el curado como en el desmoldeo. En el curado se ha pensado porque se tiene la concepción de que al realizar el vacío tanto sobre el molde interno como por el externo es más complicado que el molde se deforme.

Por otro lado, para el desmoldeo se ha pensado que si el molde exterior queda adherido a la pieza final, lo cuál después de los anteriores experimentos es posible; una solución sería apoyar el molde exterior sobre un tubo y golpeando sobre la parte superior del molde hacia abajo, conseguir separar ambos moldes.

Fabricación del Molde

El software que utiliza la maquina de impresión 3D se denomina Z-Suite y esta desarrollado por la propia compañía. Después de introducir la pieza y fijar la localización donde se va a fabricar, se puede observar en la figura 11.53.

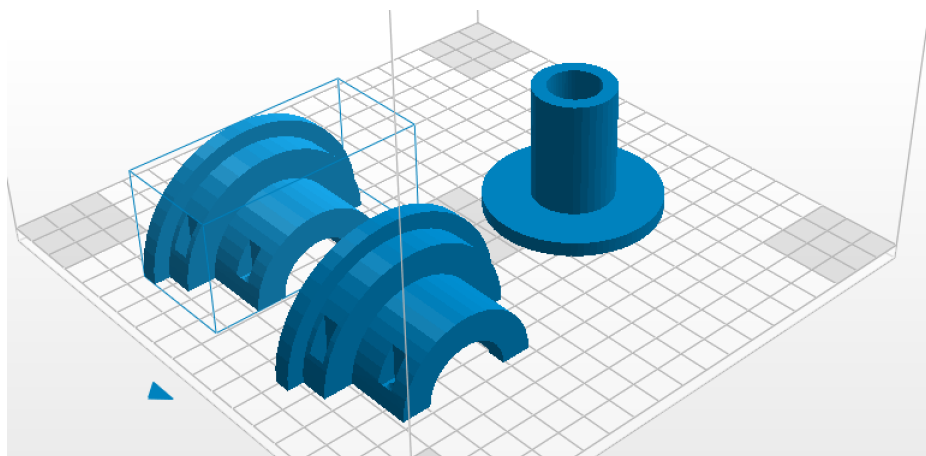


Figura 11.53: Fabricación del Molde. Colocación de las piezas en la bancada de la maquina. (Fuente: Propia)

Hay que introducir los parámetros que se definieron en el apartado 11.1 que son:

- Material. Plástico ABS
- Espesor de la lámina. Se deja el que aparece por defecto al elegir el material, que es de 0.19 mm.
- Velocidad. Normal
- Relleno. Se selecciona lleno, esto hace que aumente la cantidad de material pero aumentando la cantidad de material también es menos probable que la pieza se deforme.
- Soporte. Este apartado es una de las grandes ventajas ya que el software detecta que zonas de la pieza no tienen material por debajo y les añade un soporte para que al depositar el material este se quede en el sitio adecuado. Se fijan los soportes cuando el ángulo sea superior a 20° . Los soportes creados, del mismo modo que la base para que la pieza no se curve se pueden apreciar en la figura 11.54.

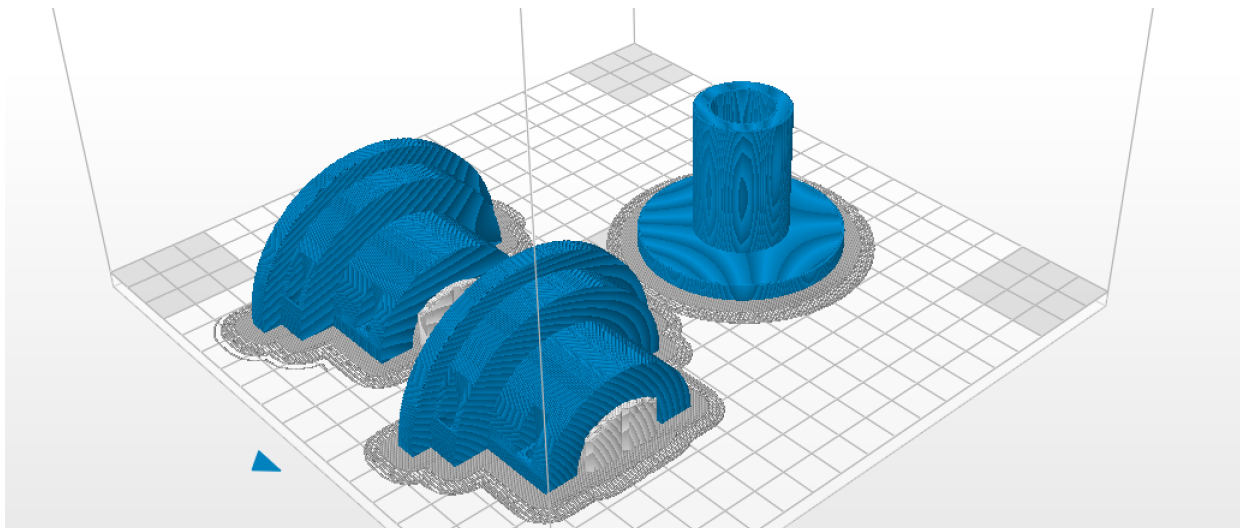


Figura 11.54: Fabricación del Molde. Pre-visualización de las piezas que se van a fabricar. (Fuente: Propia)

El software calcula que el proceso será de 8 horas y 23 minutos y utilizará 89 gr. de material. Para tenerlo en perspectiva un rollo de material ABS tiene un precio de 40 euros, y tiene 800 gr. de material. Por lo tanto con un rollo se podrían hacer hasta 9 moldes.

En la figura 11.55 muestra como iba el desarrollo de la fabricación.

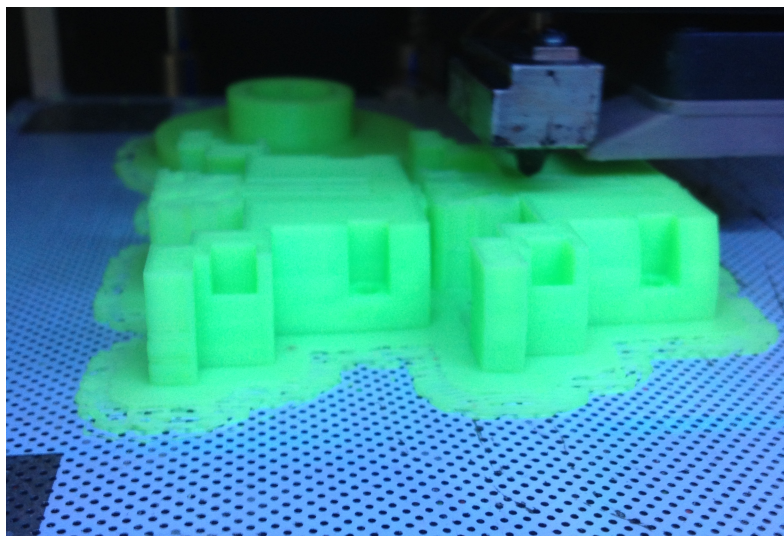


Figura 11.55: Fabricación del Molde. Durante el proceso de fabricación de los moldes. (Fuente: Propia)

Una vez finalizado el proceso de fabricación, haciendo uso de una paleta, se retiran los moldes y el resultado se puede ver en las figuras 11.56, 11.57 y 11.58. En estas figuras se puede observar la pequeña trama que crea el programa para tener una buena superficie de contacto cuando empieza la pieza. Uno de los mayores problemas que se tiene con estas maquinas es que sin esta malla hay muchas posibilidades de que se levante por los extremos y la pieza salga curvada. Es algo que posteriormente se analizará.

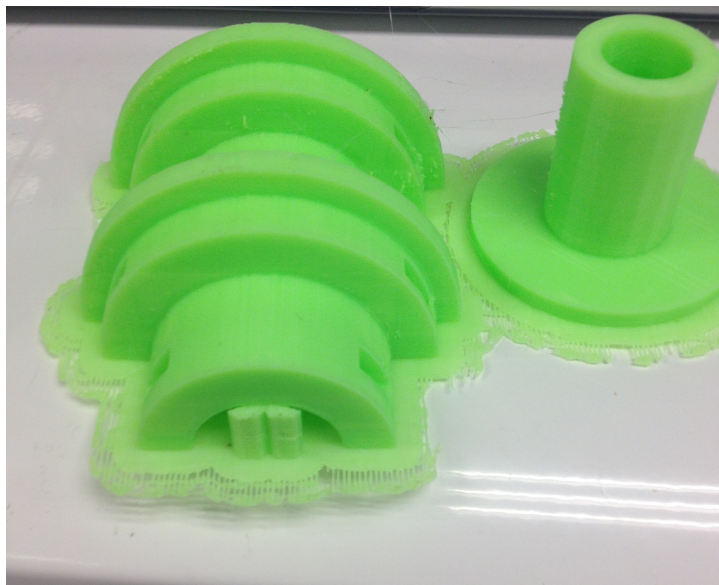


Figura 11.56: Fabricación del Molde. Vista isométrica del molde acabado. (Fuente: Propia)

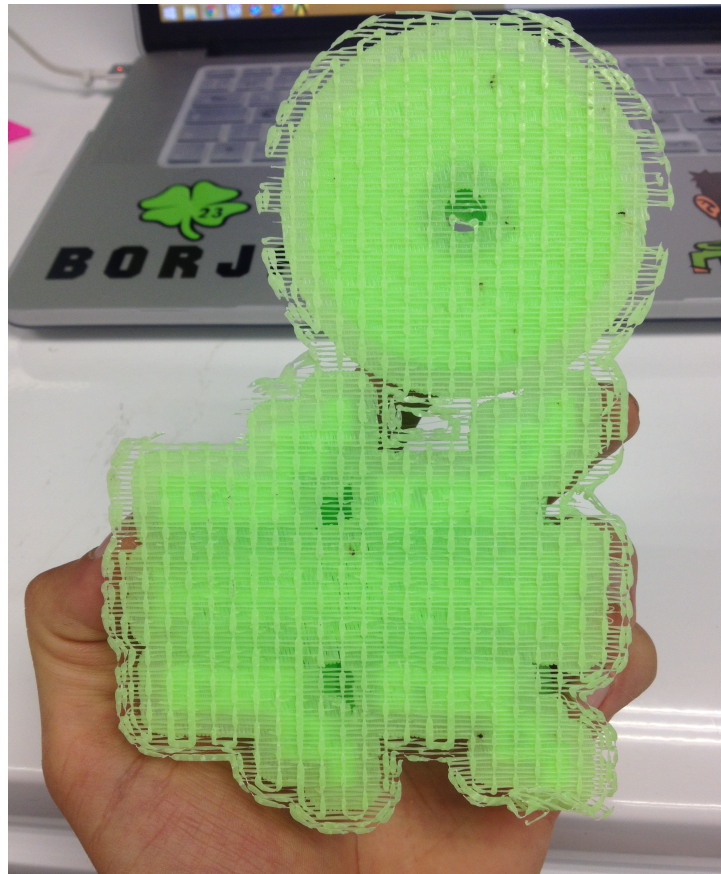


Figura 11.57: Fabricación del Molde. Vista trasera del molde acabado. (Fuente: Propia)

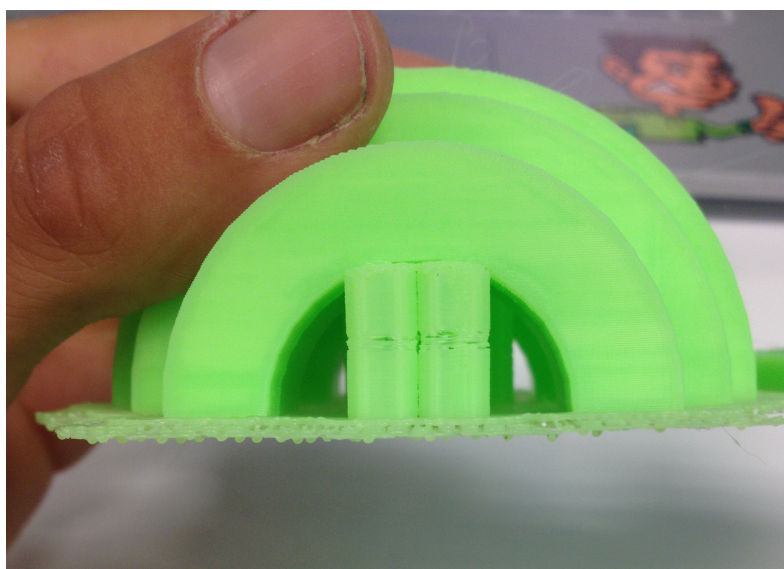


Figura 11.58: Fabricación del Molde. Detalle de los soportes creados para que el material se deposite adecuadamente. (Fuente: Propia)

Preparación del Molde

El molde ya está fabricado pero como muestras las figuras anteriores no está listo para usar todavía. A continuación se detallan los pasos seguidos para las dos partes del molde.

- **Molde Interior.** El molde interior, por su forma de colocación no ha hecho falta fabricar soportes por lo que solo hay que retirar el soporte de la parte inferior que se quita con la ayuda de una paleta. En la figura 11.59 se muestra como queda esta parte.

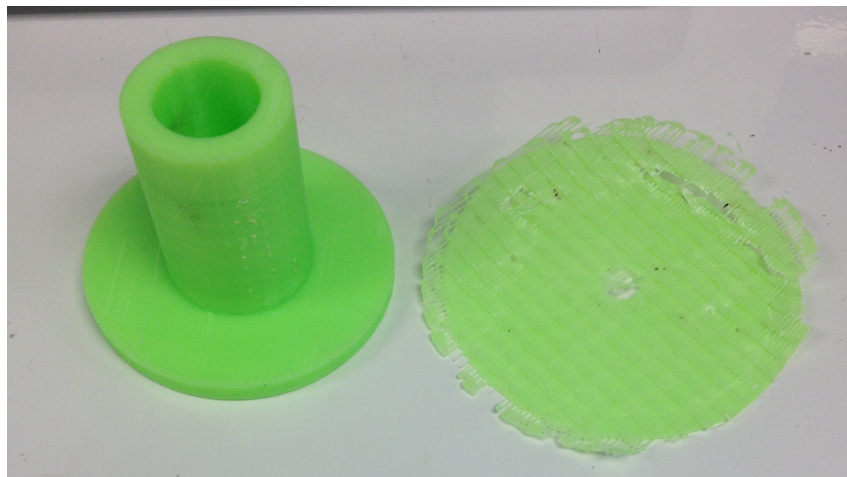


Figura 11.59: Preparación del Molde. Molde Interior habiendo retirado la malla inferior. (Fuente: Propia)

- **Molde Exterior.** En las dos piezas del molde exterior tienen tanto la malla en el suelo como los soportes. Retirar los soportes es un poco más complicado además de que estos se sitúan en la superficie del molde que tiene que generar la pieza por lo tanto hay que realizar dicha operación con delicadeza para dañar lo mínimo dicha superficie. En la figura 11.60 se aprecia el material que se ha de sustraer del molde.



Figura 11.60: Preparación del Molde. Sustracción del soporte inferior y los realizados para poder fabricar en condiciones la pieza. (Fuente: Propia)

En la figura 11.61 se muestra como queda el molde, se nota los puntos donde estaban situados los soportes y el superficie que genera la fabricación por impresión en 3D, hecho que habrá que solucionar.

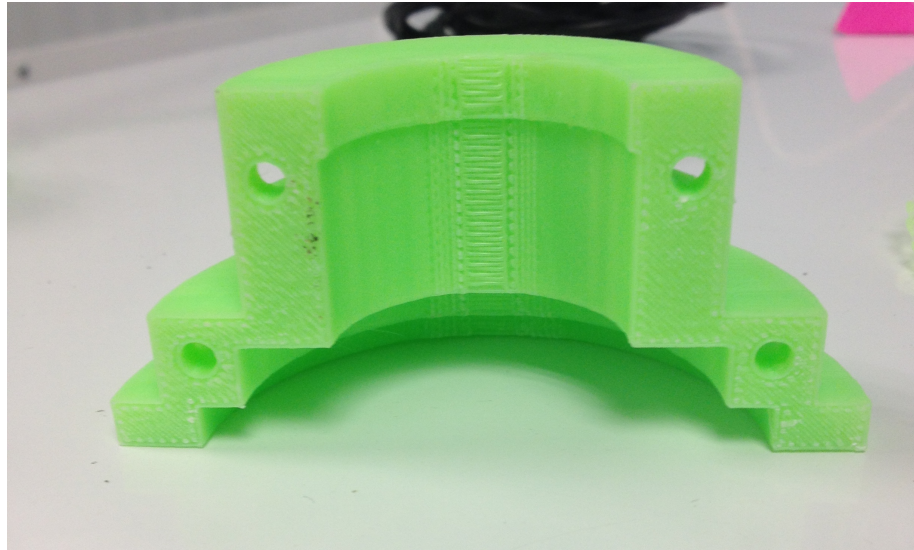


Figura 11.61: Preparación del Molde. Resultado molde exterior. (Fuente: Propia)

Ya se tienen los moldes, el siguiente paso es comprobar las tolerancias con las que se ha fabricado, para eso se colocan las partes del molde en el lugar destinado, como se muestra en la figura 11.62.

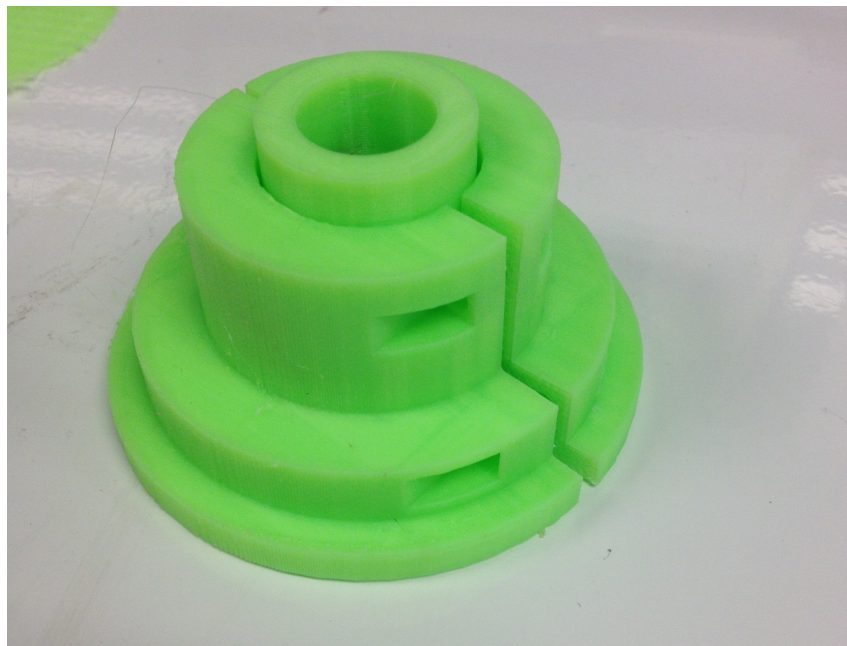


Figura 11.62: Preparación del Molde. Colocación de todas las partes del molde. (Fuente: Propia)

En el se aprecia como parece que no encajan las piezas a la perfección, esto se muestra con mayor detalle en las figuras 11.63 y 11.64.

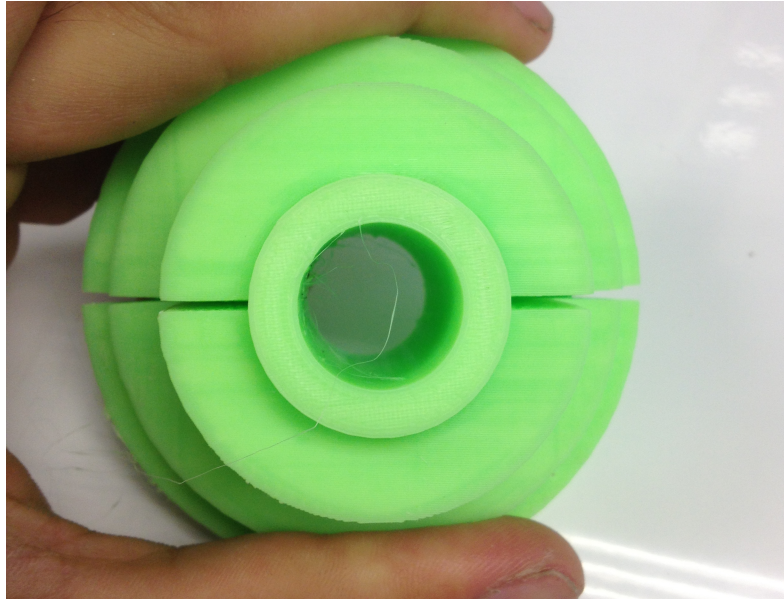


Figura 11.63: Preparación del Molde. Detalle superior de los problemas de ensamblaje del molde. (Fuente: Propia)

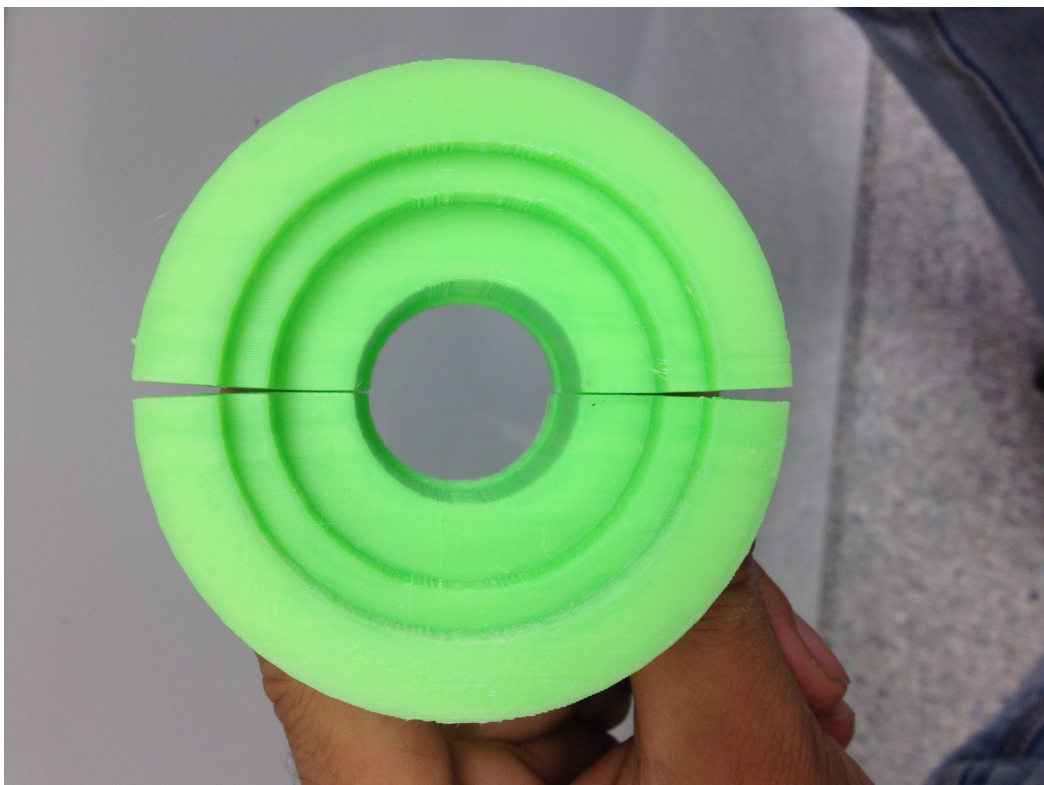


Figura 11.64: Preparación del Molde. Detalle inferior de los problemas de ensamblaje del molde. (Fuente: Propia)

Este problema es debido a que el material se deposita a una temperatura superior a los 100° y en debido al calor tiende a curvar la pieza. Aún así no es un problema grave debido a que solo afecta a la unión de las dos partes y se hace más notable hacia el exterior de la pieza. La unión de las dos partes del molde exterior con el molde interior no será un problema debido a que con los tornillos se hará que todo encaje correctamente.

Por último queda una tarea, que es dejar la superficie lo mejor posible. Para eso se hace uso de acetona y de ligas de agua con un gramaje de 1000, 1200, y 1800. Se van utilizando una lija tras otra para dejar una superficie lo más pulida posible. Esta faena se hace manualmente y se tarda en realizarse más de 5 horas.

Laminado

Una vez el molde esta preparado, el primer punto es colocar el desmoldeante. Se decide por poner delmoldeante de cera únicamente porque a priori debería de ser suficiente. En este molde no se puede poner teflón porque cada cada tiene un espesor aproximado de 0.25 mm. y eso modificaría en exceso las dimensiones de la pieza.

Sobre el laminado, será igual al que se ha descrito en el apartado de ensayo de fibra de carbono, donde la fibra que se utilizará es el tejido 0-90°. Primero se colocará 2 capas con la longitud total sobre el molde interior. Como cada capa tiene un espesor después del curado de 1 mm. se necesitarán 7 capas para poder tener el espesor deseado del anillo. Para poder cortar las láminas lo mejor posible lo que se hace es realizar un molde con la geometría, 2 círculos, uno de 50 mm y otro de 30 mm de diámetro; para poder marcar sobre la fibra y posteriormente recortarlos. Después de esto se ponen estas láminas sobre el molde interior donde ya están instaladas las capas anteriores que crearían por si solas un tubo. El resultado de este proceso se muestra en la figura 11.109.

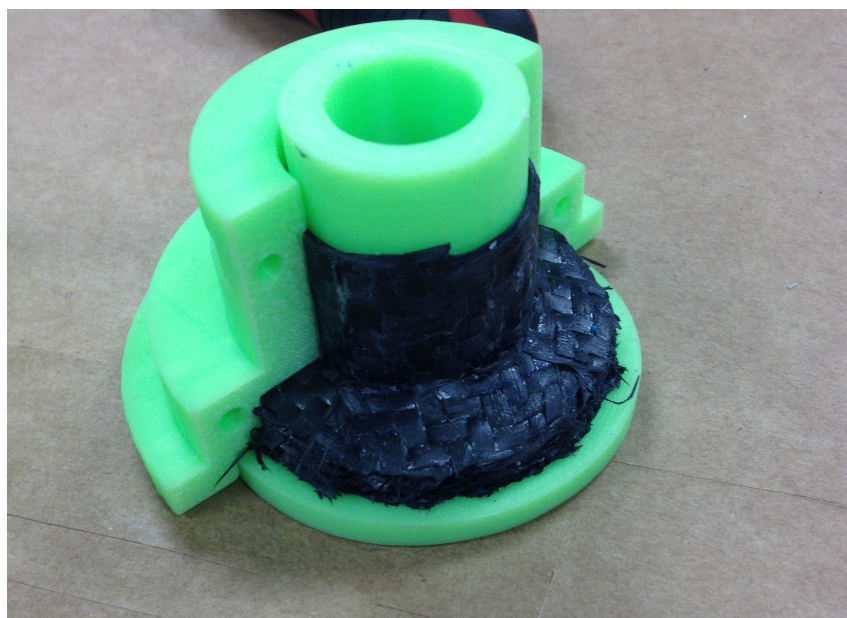


Figura 11.65: Laminado. Resultado del laminado sin curar. (Fuente: Propia)

Posteriormente se colocan los 4 tornillos y se aprietan uniendo las dos partes del molde exterior, como se aprecia en la figura 11.110. Durante este proceso se logra minimizar la separación existente entre las dos partes del molde en la unión con la fibra, que es la parte más crítica. En cambio, en la parte más alejada no se consigue unir bien la pieza, aunque a priori no debería repercutir sobre el acabado final de la pieza.

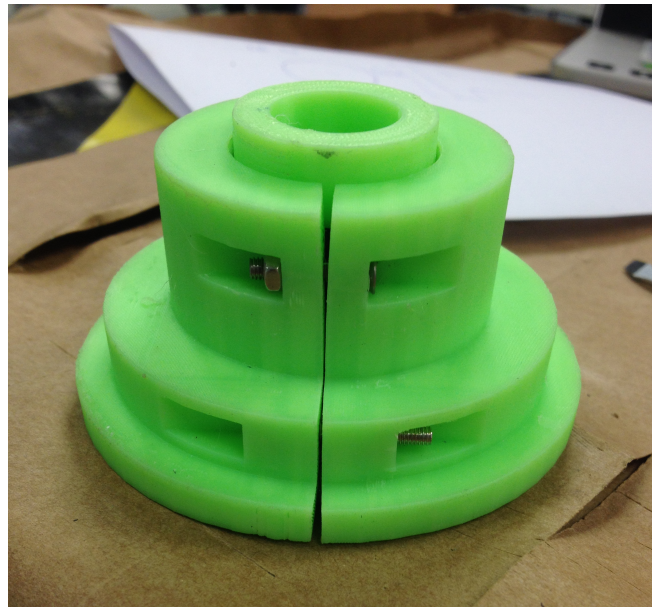


Figura 11.66: Laminado. Ensamble del molde con la laminación realizada. (Fuente: Propia)

Con respecto a los elementos de absorción se colocarán una malla de guiado II y manta de absorción sobre el molde exterior por si la resina fluye hacia el exterior. Sobre la bolsa de vacío se coloca de tal manera, como en la figura 11.42 y 11.43 del experimento 3 del tubo principal, que se genera un espacio donde el vacío se realiza tanto sobre el molde exterior como en el interior.

Sobre el curado se va a realizar un método diferente a todos los anteriores. En otros proyectos donde se busca una calidad de fabricación muy alta se realizan mesetas a una temperatura inferior a la del curado. En otros curados se puede ver como a partir de los 60°C la resina empieza a fluir debido a que aparecen las primeras manchas sobre la manta de absorción. Por lo tanto lo que se va a realizar en este caso es aumentar la temperatura a un ritmo de 1°/min. hasta los 60° que se mantendrán durante 1 hora. Acabada esa hora se aumentará la temperatura al mismo ritmo que antes hasta los 85°C donde se realizará un curado durante 10 horas.

Desmoldeo

Una vez finalizado el curado y sacado el molde de la bolsa de vacío, como se muestra en las figuras 11.67 y 11.68, se aprecian restos de resina en los puntos de unión del molde exterior.



Figura 11.67: Desmoldeo buje. Restos de resina sobre la malla de guiado II y la manta de absorción. (Fuente: Propia)

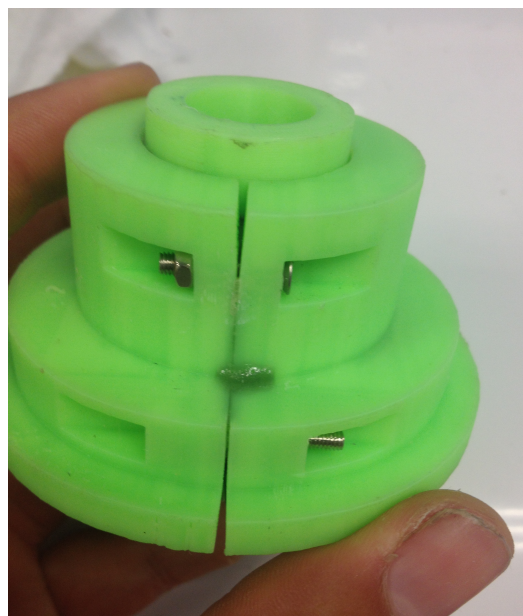


Figura 11.68: Desmoldeo buje. Restos de resina sobre el propio molde. (Fuente: Propia)

Se aprecia en este caso como la geometría del molde no se ha visto modificada como en el caso del tubo a simple vista como se aprecia en la parte inferior del molde interno en la figura 11.69.



Figura 11.69: Desmoldeo buje. Estado del molde después del curado. (Fuente: Propia)

Después de quitar los tornillos e intentar limpiar al máximo las dos uniones del molde exterior se aprecia como el molde no se va a separar con facilidad. Se hace uso del segundo método pensado para el desmoldeo y se apoya la parte inferior del molde externo sobre un tubo y se golpea en la parte superior del molde interno. Después de varios golpes una parte del molde exterior se deslaminada y se separa del molde, como se aprecia en la figura 11.70.

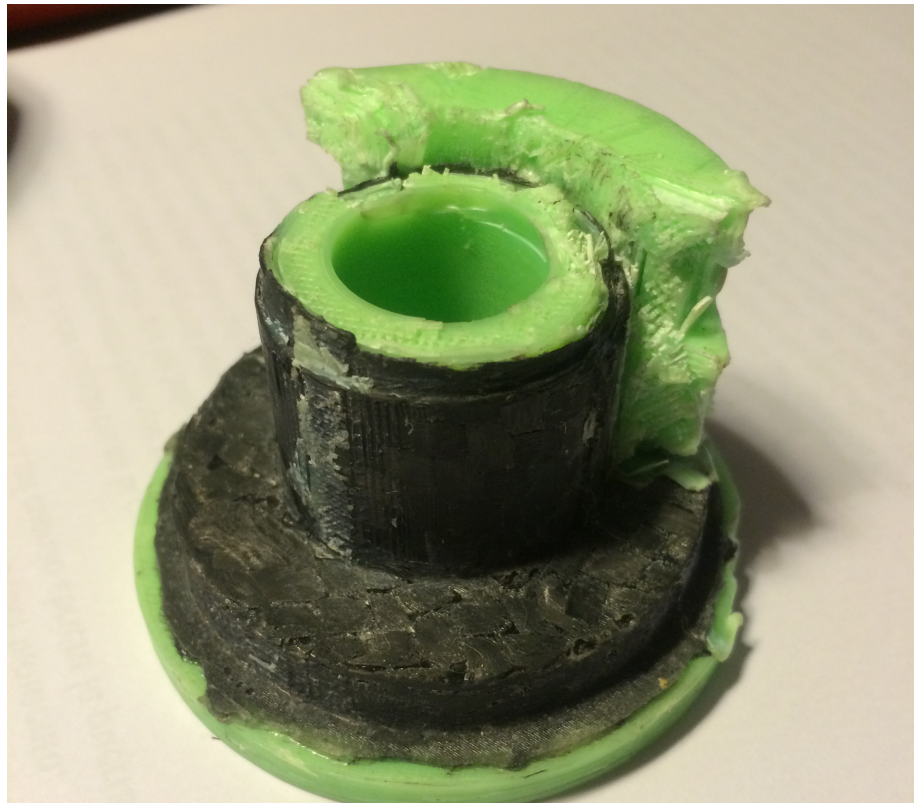


Figura 11.70: Desmoldeo buje. Estado del molde del buje después de la rotura de una parte del molde exterior. (Fuente: Propia)

En la figura 11.71 se aprecia con más detalle la cantidad de resina y fibra sobrante que habrá que eliminar la pieza.



Figura 11.71: Desmoldeo buje. Detalle del exceso de material acumulado. (Fuente: Propia)

Resultado

Una vez se consigue desmoldear la pieza por completo, quedando el molde inservible debido a que queda reducido a muchos trozos del mismo, la pieza pasa por un proceso de lijado para eliminar el exceso de material y dejar el mejor acabado superficial posible. En las figuras 11.72, 11.73 y 11.74 se puede ver con más detalle la pieza finalizada.



Figura 11.72: Resultado Pared del Buje. Pared del buje final. (Fuente: Propia)

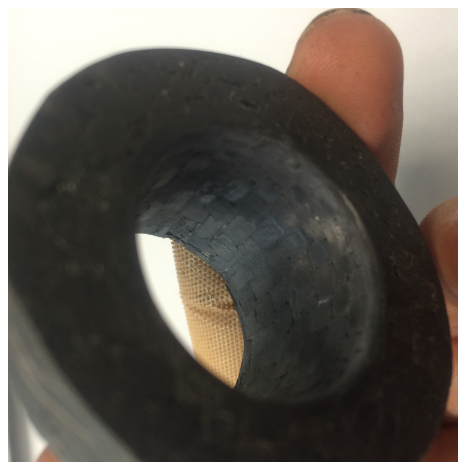


Figura 11.73: Resultado Pared del Buje. Detalle de la parte inferior. (Fuente: Propia)



Figura 11.74: Resultado Pared del Buje. Detalle del extremo de la pieza. (Fuente: Propia)

11.5.3 Ensamblaje

Por último, queda por comprobar si ambas piezas pueden ser ensambladas. Eso se comprueba si el diámetro externo del tubo es inferior al diámetro interno de la pared vertical. En este caso son idénticos, como muestran las figuras 11.75 y 11.76 por lo tanto las dos piezas quedarían encajadas a presión.



Figura 11.75: Ensamblaje. Diámetro exterior del tubo fabricado y rectificado. (Fuente: Propia)



Figura 11.76: Ensamblaje. Diámetro interior de la pared del buje. (Fuente: Propia)

Que ambas piezas tengan el mismo diámetro significa que las tolerancias de fabricación son muy buenas y que, durante el curado de la pared del buje el molde no se ha deformado nada.

11.6 Fabricación del Aro

Solo quedan por fabricar un único componente, el aro. En este componente se utilizarán 2 métodos de fabricación diferentes, la impresión 3D y el mecanizado. Lo primero es definir el método mediante el cual se realizará el curado y en este aspecto también será novedoso. En este caso no se realizará vacío durante el curado sino que se introducirá una bolsa en el aro con aire a presión. En la universidad se dispone de una presión de aire comprimido máxima de 6 bares, que es la que se utilizará. Se realiza este método debido a que evidentemente es mucho más efectivo realizar una presión de 6 bares sobre una superficie que no una de -1. Este método es el más utilizado en la fabricación de aros de ruedas de bicicleta de carbono, como se puede ver en las referencias [34], [37], [38] y [39].

El molde se ha de fabricar en 3 piezas debido a que se tiene una fresadora de 3 ejes únicamente y eso hace que no se pueda inclinar la herramienta o el tocho y poder realizar operaciones inclinadas. Lo más sencillo es realizar dos moldes de la parte externa del aro y otro molde que reproduzca toda la zona de la garganta. Para ver mejor estos puntos se muestra en la figura 11.77 donde se aprecia como a partir del punto de corte existe una zona de la parte exterior del aro que genera una sombra sobre la garganta. Esa zona de sombra no se podría mecanizar como una única pieza.

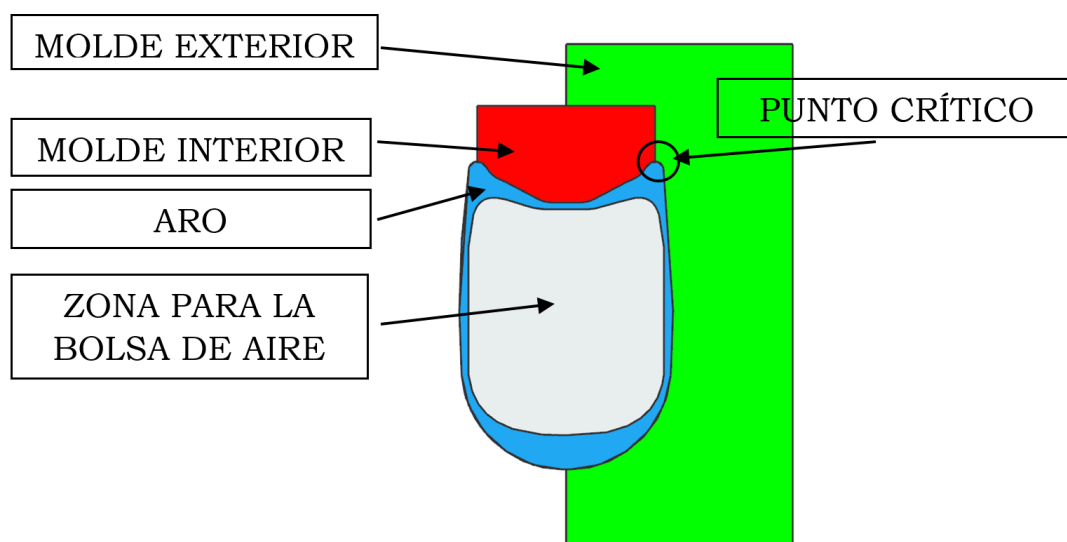


Figura 11.77: Punto crítico donde se genera la sombra y obliga a realizar un mínimo de 3 piezas para realizar el molde. (Fuente: Propia)

Por este hecho, y siguiendo la notación de la figura anterior se procede a describir la fabricación del molde interior y el exterior. Hay que tener en cuenta se busca obtener un método de fabricación, no el aro en sí. Por lo tanto, tan solo se fabricará una parte de este componente. La parte superior del aro tiene una longitud de 109.21 mm., es decir 20 °, en lugar de 2132.11 mm. que tendría de longitud el aro entero.

11.6.1 Molde Exterior

Diseño del Molde Exterior

De las referencias citadas se puede apreciar, aunque con variantes, que el método es introducir una bolsa dentro del aire e inflarla con aire. Una de las soluciones es utilizar el agujero que se ha de hacer para introducir la válvula, que es de métrica 4.5, para introducir la bolsa de por la que introducirá el aire a presión. Este hecho habrá que tenerlo en cuenta cuando se realice el diseño del molde pues habrá una zona que vaya agujereada. Las dimensiones externas de este molde no tienen ninguna restricción salvo la que proporciona el material que se tiene para mecanizar. En este caso se tiene una placa mecanizable de gran dureza con un tamaño de 1500x500x100 mm. por lo tanto el único valor más restrictivo será el espesor. Se tiene que el ancho de una parte del molde exterior no podrá ser superior a 50 mm. Se define un bloque de 180 x 100 x 50 mm. donde se sustraer el aro y el molde interior diseñado para la garganta. Este molde se puede ver en la figura 11.78.

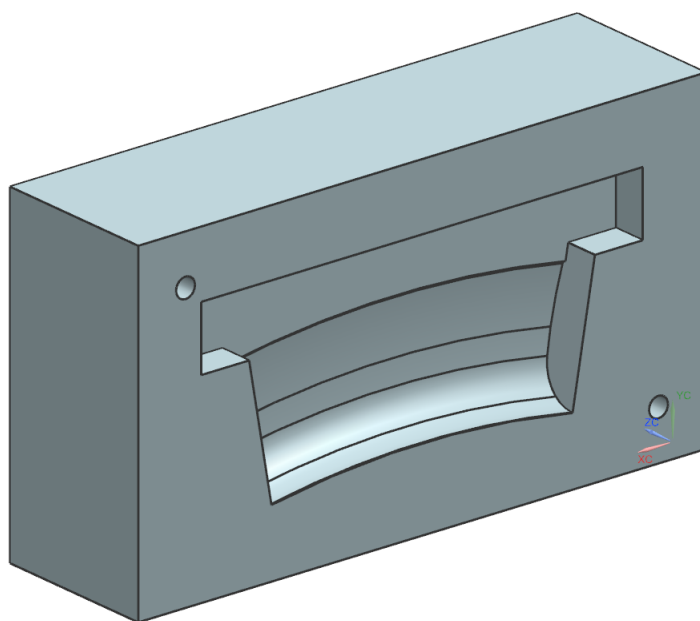


Figura 11.78: Molde Exterior. Diseño del molde exterior. (Fuente: Propia)

Otro hecho que cabe citar es que para que las dos partes del molde exterior quede alineada en el momento del montaje se realizan dos agujeros de 10 mm. de profundidad de diámetro 6 mm, que es el de la herramienta, para luego instalar unos pasadores que dejen fijadas ambas partes y los dejen unidos. Lo único que se ha de tener en cuenta es que en la otra parte del molde hay que hacerlos de manera antisimétrica. Para poder ver bien este hecho, que ha sido siempre un punto de equivocación, se tiene la figura 11.79.

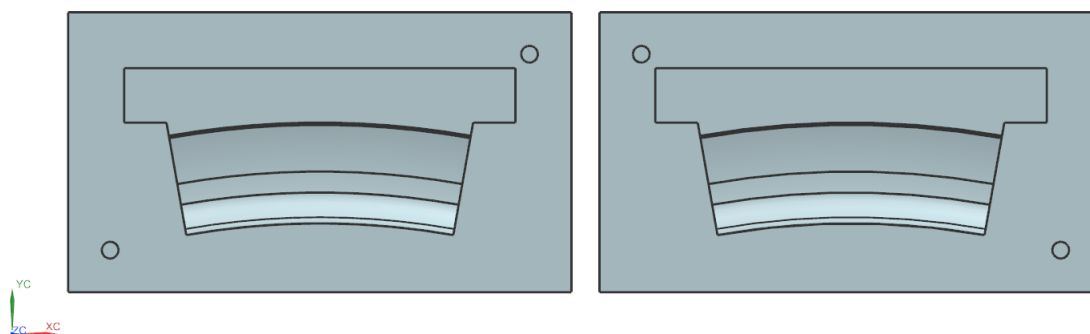


Figura 11.79: Molde Exterior. Detalle de los puntos donde se realizan los agujeros para alinear las dos partes. (Fuente: Propia)

Lo único que falta en el molde es el agujero por donde se introducirá la bolsa. Este agujero no se ha realizado porque con la herramienta tiene un diámetro superior al que hay que realizar y por tanto no puede realizar la operación. Además que sería una operación de desbaste y no un agujero porque el agujero estaría colocado de manera perpendicular al eje de longitudinal de la herramienta y no en paralelo. Con lo cual, lo que se va a realizar es, una vez fabricados los moldes, se unirán con los pasadores y se realizará el agujero con un taladro de pie. Esto se explicará con más detalle en el apartado de preparación del molde.

Fabricación del Molde Exterior

Para la fabricación del molde exterior se utilizará la maquina de control numérico antes citada. A esta instalación se le introduce un archivo normalizado con las acciones que debe realizar y eso hay que realizarlo o manualmente o con la ayuda de un software. Se utilizará el modulo de fabricación de NX Siemens para tal objetivo. La teoría sobre el mecanizado y sus operaciones es muy extensa y podría ocupar todo un proyecto por lo tanto se desarrollará solo el caso que se esta estudiando. A continuación se explican los pasos que hay que seguir para poder realizar las operaciones.

- **Sistema de Referencia.** Existen diferentes sistemas de referencia, el de la pieza y el de la herramienta. En el modulo de diseño se ha de elegir en que punto asignar el sistema de referencia de la pieza. Es habitual hacerlo en una esquina y en la parte superior del tocho que se va a mecanizar. Además, es recomendado colocar el eje Z en posición vertical. NX es capaz de trabajar con varios sistemas de referencia, uno de diseño y otro de fabricación, por lo que, para evitar confusiones; lo idóneo es situar tanto el de la pieza, el de fabricación y el de la herramienta en el mismo punto. En la figura 11.80 se puede ver donde irían situados los sistemas de referencia.

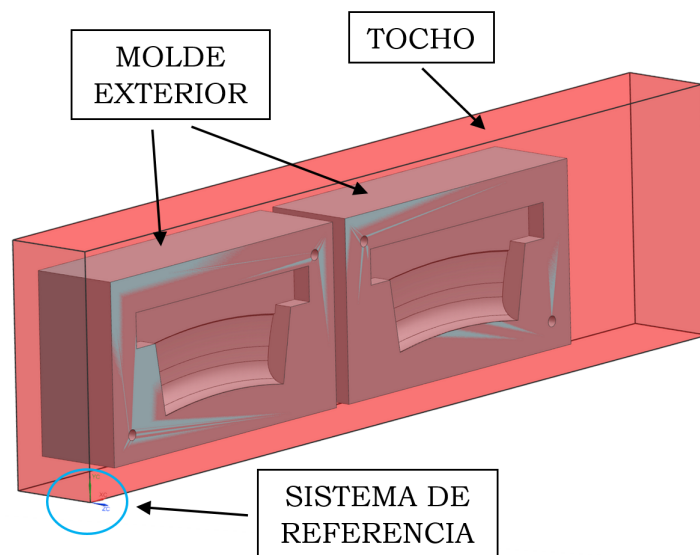


Figura 11.80: Molde Exterior. Detalle del sistema de referencia. (Fuente: Propia)

En este caso el sistema de referencia se coloca en una esquina del tocho que se va a mecanizar. No es necesario dibujar el tocho, en la figura 11.80 aparece en color rojizo, pero si ayuda bastante a la hora de poder visualizar las operaciones. El sistema de referencia de la pieza se define en el modulo de diseño pero el de fabricación y el de la herramienta se hace en el modulo de fabricación en el apartado de "Vista de Geometría" y "Vista de Máquina de Herramienta" respectivamente.

- **Definir Pieza.** El siguiente paso es definir la pieza que se desea mecanizar. En la figura 11.80 se muestra cual es el tocho y las partes del molde exterior. No es necesario pero si conveniente definir cual es el tocho ya que así el programa cuando calcule la trayectoria de la herramienta conocerá los límites del tocho. Si además, el sistema de amarre del tocho es complejo o puede entrar en conflicto con la trayectoria de la herramienta es bueno indicarle su geometría y el lugar donde esta situado.
- **Definir la Herramienta.** Tan solo se utilizará una herramienta que es de tipo bola específica para utilizar en la fresadora. Tiene un diámetro de 6 mm., una longitud de 20 mm. y una longitud de la acanaladura de 10 mm.. Esta última medida se refiere a la longitud de las muescas que tiene la herramienta para retirar material.
- **Definir las Operaciones.** Este es el punto más laborioso del proceso ya que se tienen que definir las operaciones que se van a realizar para que el programa pueda obtener la trayectoria y acciones necesarias. Para realizar este apartado es necesario conocer los parámetros y las distintas operaciones que han de realizarse, pero principalmente es necesario un fresado de cavidad, *Cavity Mill*, y un contorno fijo o *Fixed Contour*. Como para realizar los moldes se hacen algunas pruebas donde se modifican los parámetros, se detallaran las operaciones realizadas en cada experimento realizado.

Lo único común en todos los experimentos es que tan solo se define la superficie que define el aro como área de corte. Esto ayuda al programa a confeccionar las trayectorias. En la figura 11.81 se pueden ver dichas zonas en un color naranja.

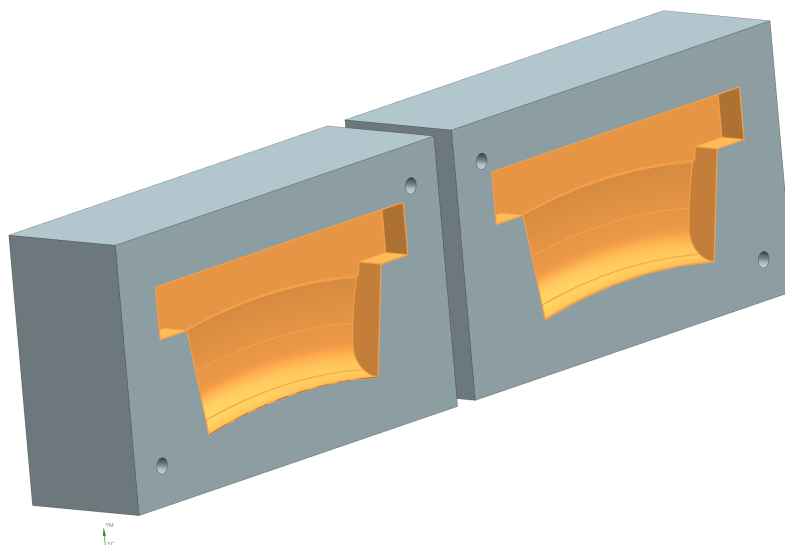


Figura 11.81: Molde Exterior. Zonas disponibles para ser desbastadas. (Fuente: Propia)

Otro aspecto relevante, es que la geometría no es excesivamente compleja, así como la cantidad de material a eliminar, por lo tanto es necesario realizar una operación de semi-acabado y otra de acabado que corresponden a *Cavity Mill* y *Fixed Contour* respectivamente.

A continuación se describirán las pruebas o experimentos realizados hasta poder obtener el molde exterior.

Experimento 1.

Tan solo se realizará una operación de semi-acabado y otra de acabado. A continuación se introducen los parámetros para la operación de Semi-Acabado

- **Patrón de Corte.** Seguir la pieza. Esta operación crea un patrón de corte a partir de la geometría de la pieza creando offsets. Con esta operación el programa analiza toda la geometría de la pieza y consigue garantizar que la herramienta pase por toda la geometría de la pieza y evita realizar una operación de limpieza. Es una operación idónea para cuando dentro de la cavidad existe una zona que no hay que cortar, lo que se define como isla. Aún así es una de las operaciones más comunes y conviene utilizarla.
- **Pasada.** Es un parámetro que permite especificar la distancia entre las pasadas de corte. Se utiliza de % de la cara plana de la herramienta pues es el más utilizado y lo que hace es fijar una distancia fija entre las pasadas según un porcentaje del diámetro de la herramienta. Se pone un porcentaje del 50%, es decir, 3 mm..
- **Profundidad por Corte.** Se elige una profundidad por corte constante porque es

un parámetro de control. Si se desea una pieza con un acabado muy bueno esta profundidad deberá ser muy pequeña. En este experimento se utiliza la de 1 mm..

- **Parámetros de Corte.** Existen muchas variables en los parámetros de corte por lo que para este primer experimento se utilizan los valores por defecto de NX.

Al realizar la simulación el resultado se muestra en la figura 11.82.

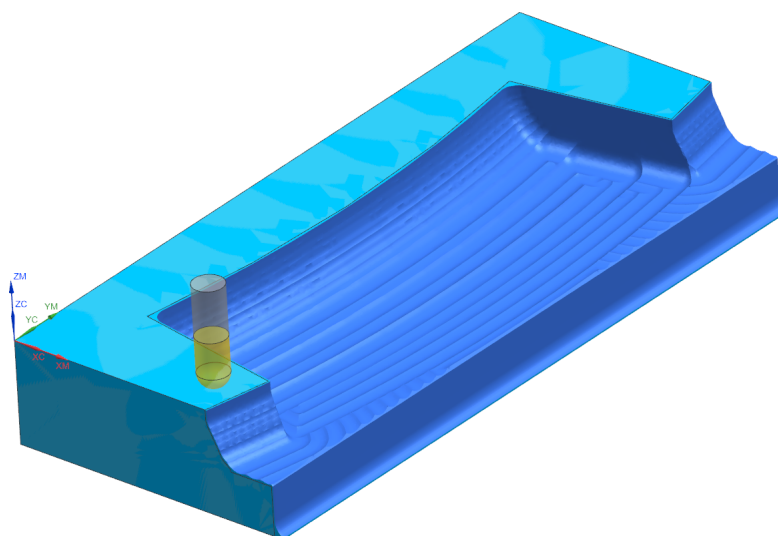


Figura 11.82: Experimento 1. Resultado de la simulación de la operación de semi-acabado. (Fuente: Propia)

En el se aprecian esta operación sirve más para quitar material que para definir la pieza con una buena calidad. Aún así se comienzan a ver que en las esquinas la herramienta, por su tamaño, no consigue eliminar el material.

Para la operación de acabado es necesario indicar cual sera el método de guía utilizado. Se utilizará siempre el fresado de área en el cual a partir de la superficie de corte seleccionada se generan los puntos de guía de la herramienta.

- **Patrón de Corte.** Se elige un patrón de corte un Zig-Zag en las zonas sin pendiente. Este tipo de corte genera una trayectoria de pasadas paralelas que corte en direcciones opuestas. Es decir, la herramienta puede cortar durante el movimiento de ir y venir ya que la trayectoria hace que no se levante la herramienta. En las zonas con pendiente, se hace una pasada de Zig de nivel con los niveles de corte optimizados.

El resultado de la simulación se muestra en la figura 11.83.

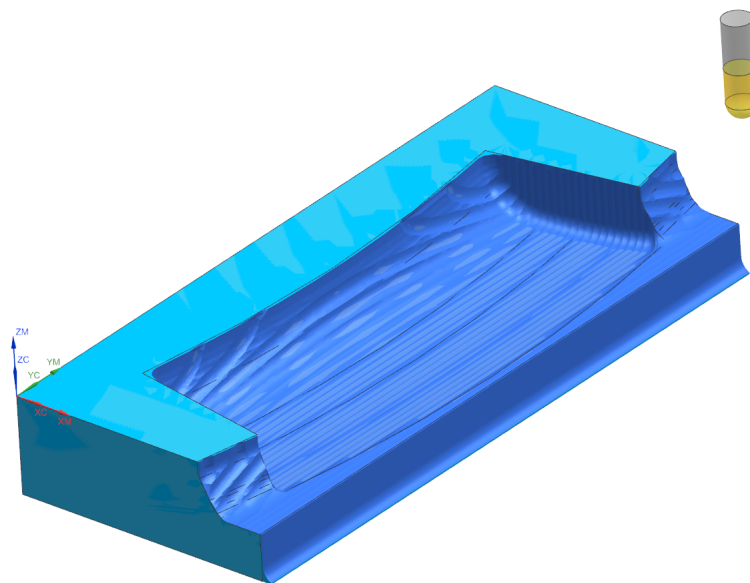


Figura 11.83: Experimento 1. Resultado de la simulación de la operación de acabado. (Fuente: Propia)

En este resultado ya se muestra un mejor acabado de la superficie, aunque por el tamaño de la herramienta y que sea de tipo bola y solo disponer de 3 ejes y no poder inclinar la herramienta o el tocho lo que ocurre es que las paredes inclinadas tienen un exceso de material que habrá que retirar posteriormente.

Como esta era una primera prueba no se realizaron las operaciones de los agujeros donde se situaran los tetones para alinear las dos partes. Solo queda por definir 2 parámetros, la velocidad de corte y la velocidad de la herramienta. La primera define lo rápido que se mueve la herramienta sobre el espacio y la segunda lo rápido que gira el eje de la herramienta. Estos parámetros dependen mucho del tipo de material a utilizar y la calidad de maquina CNC. El material que se utiliza como tocho es específico para mecanizar por lo que permite una velocidad de la herramienta muy alta, lo que hace que elimine una mayor cantidad de material sin que la broca se caliente en exceso. La velocidad de corte depende de la herramienta ya que si tiene un diámetro muy pequeño o es muy larga puede romperse con facilidad ante la resistencia de tocho y además depende de la calidad de los motores paso a paso que mueven el cabezal de la herramienta sobre el espacio. Para esta primera prueba se ponen ambos parámetros al 50% de la capacidad de la maquina CNC que exactamente es .

Una vez postprocesado las operaciones se introducen en la maquina CNC. Por otro lado se instala el tocho en la mesa de la máquina y se amarra para que no se mueva durante el proceso. En este caso no es problemático su amarre debido a que el tocho tiene una longitud de 1.5 metros y su amarre se sitúa lejos de la zona de corte por lo que no puede interferir con las trayectorias de la herramienta. Una vez realizado este proceso quedan por definir 2 parámetros

- **Home de la Máquina.** La máquina tiene su origen de coordenadas situado pero permite crear uno nuevo en el lugar que el usuario quiera para no tener que mover

manualmente la herramienta. Esto es muy útil porque como se van a realizar varios experimentos y la máquina tiene una zona de trabajo muy amplia, reduce el tiempo de preparación.

- **Z cero.** Es necesario introducir cual es el zero de la herramienta. Lo habitual es situar el cabezal de la bronca, se pueden realizar desplazamientos de 0.1 mm. con el control de la máquina, a ras del tocho y luego darle 0.5 mm. aproximadamente. Esto hace que la máquina crea que la pieza esta situada 0.5 mm. por debajo de la superficie del tocho y así es como realizar una pasada de alineamiento antes de comenzar con el desbaste por si el tocho no estuviera alineado o la superficie tuviera algún defecto.

El resultado de este proceso se muestra en la figura 11.84. Se aprecia como la calidad del mecanizado no es buena debido a que las últimas pasadas han quedado muy desiguales y la superficie esta llena de crestas, esto se muestra con mayor calidad en la figura 11.85.

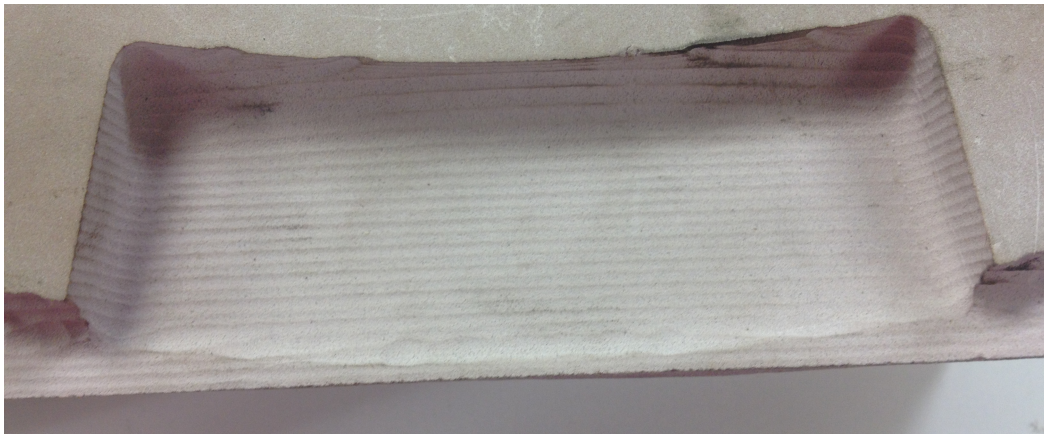


Figura 11.84: Experimento 1. Resultado del mecanizado. (Fuente: Propia)



Figura 11.85: Experimento 1. Detalle de la cantidad de crestas dejadas durante la operación. (Fuente: Propia)

Por lo tanto hay que variar ciertos parámetros para realizar un mejor mecanizado. Es evidente que no se tendrá un mecanizado suficientemente bueno para que posteriormente no haya que perfeccionar la superficie pero la calidad de este experimento es muy baja. Una de las posibles soluciones para mejorar la calidad de la superficie del mecanizado es variar las velocidades de la herramienta y el corte pero en este caso como la superficie, debido a las operaciones, es muy mala; no vale la pena intentarlo.

Experimento 2

En este experimento se realizarán 3 operaciones, un *Cavity Mill* para hacer un semi-acabado y un *Cavity Mill* y *Fixed Contour* como acabado. Siguiendo el modelo del experimento 1, se desarrolla que parámetros de corte se han elegido. Se comenzará por la operación de semi-acabado.

- **Patrón de Corte.** En este caso se utilizará seguir la periferia, que genera unas pasadas concéntricas sobre el contorno de la pieza de corte. La ventaja de este patrón es que cuando las pasadas se solapan, se genera una sola que posteriormente será un offset se la siguiente. Es decir, va adaptando las pasadas para evitar las realizar trayectorias en vacío donde no se corta material.
- **Pasada.** Será idéntica al experimento 1.
- **Profundidad de Corte.** En este caso la profundidad de cada corte será de 2 mm. con el objetivo de reducir el tiempo de mecanizado.
- **Parámetros de Corte.** Uno de los parámetros que se activan en este punto es la de la limpieza de las paredes para intentar que la herramienta deje lo mejor posible las paredes verticales que tiene la pieza. El resto de parámetros se dejan por defecto.

El resultado de esta operación se aprecia en la figura 11.86 donde muestra como la calidad de la superficie es inferior a su homóloga del experimento 1 pero en cambio las paredes verticales tienen un mejor acabado.

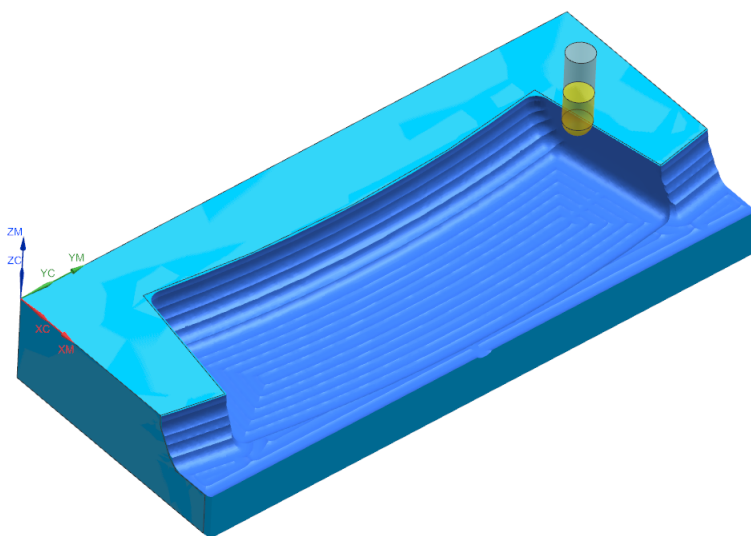


Figura 11.86: Experimento 2. Resultado de la simulación de la operación de semi-acabado. (Fuente: Propia)

A continuación se muestran los parámetros de corte para la operación de *Cavity Mill* pero con el método de acabado de la pieza.

- **Patrón de Corte.** Se selecciona el tipo perfil debido a que genera un número específico de pasadas para acabar de mecanizar las paredes de la pieza.
- **Pasada.** Se hace con un porcentaje del diámetro de la herramienta del 20%, es decir, de 1.2 mm.
- **Profundidad de Corte.** Se utiliza una profundidad de corte de 1 mm.
- **Parámetros de Corte.** Se dejan según el punto anterior, es decir, obligando a que la trayectoria limpie las paredes.

El resultado de la simulación se muestra en la figura 11.87 donde se aprecia como las paredes verticales e inclinadas presentan un aspecto más similar al de la pieza final.

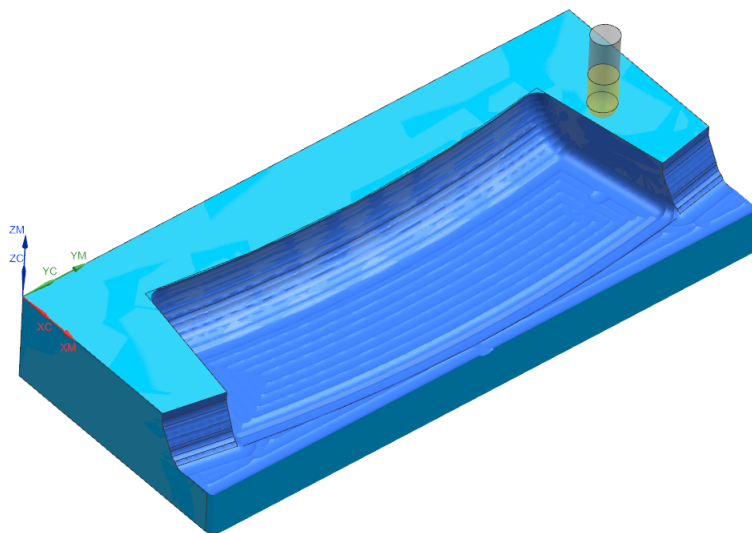


Figura 11.87: Experimento 2. Resultado de la simulación de la primera operación de acabado. (Fuente: Propia)

Por último, queda por definir la última operación que es la de acabado de Contorno Fijo.

- **Patrón de Corte.** Se elige un patrón de corte de seguir la periferia, que se ha explicado con anterioridad. Se fija un valor de distancia máxima entre pasadas de 0.5 mm. para poder tener una calidad de acabado mayor.

El resultado de la simulación de esta operación, y por tanto, del conjunto de este experimento se muestra en la figura 11.88.

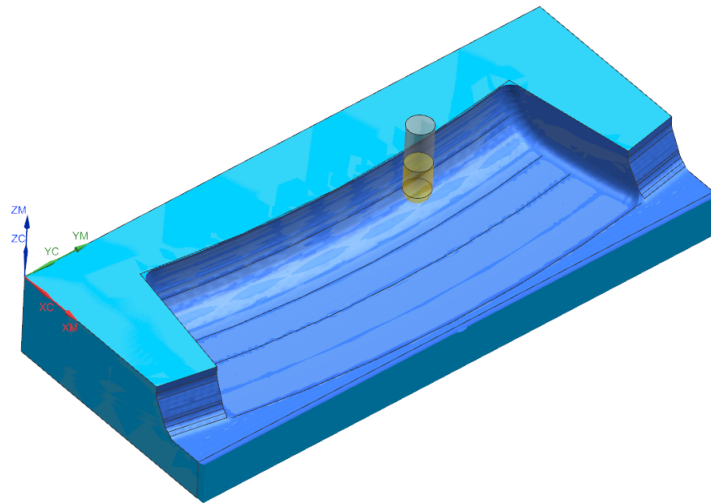


Figura 11.88: Experimento 2. Resultado de la simulación de mecanizado del experimento 2. (Fuente: Propia)

En este caso si se muestra como la pieza visualizada es muy similar a la pieza final que se desea obtener. El único problema siguen siendo las paredes verticales e inclinadas. Este hecho no es el más importante debido a que en el caso de fabricar todo el aro no existirán las paredes verticales que en este caso delimitan la longitud del aro. Si aparecerán las paredes inclinadas que tienen que ver con la garganta aunque en este caso no afecta a la pieza final debido a que están fuera. Ese problema se estudiará a la hora de realizar el molde interior.

Una vez obtenido el código, se emplea el mismo procedimiento que en el experimento anterior para colocar el tocho y configurar la máquina de CNC. Se fija las velocidades de la máquina al 50%. El resultado del mecanizado se muestra en las figuras 11.89 y 11.90.



Figura 11.89: Experimento 2. Resultado global del mecanizado. (Fuente: Propia)



Figura 11.90: Experimento 2. Resultado en detalle de la superficie del mecanizado. (Fuente: Propia)

Se aprecia una gran mejoría respecto al experimento anterior debido a que la pieza final posee más detalles en su geometría que la anterior. Aún así se aprecia como la superficie que deja el mecanizado es muy rugosa y con numerosas crestas muy evidenciadas.

Experimento 3

Una de las posibles soluciones antes los problemas anteriores es aumentar la velocidad tanto de corte como de la herramienta debido a que estos parámetros no solo influyen en el tiempo de mecanizado sino también en la calidad del mismo. Dejando todos los parámetros como en el experimento 2 se realiza el experimento 3 pero con un velocidad al 80% de la máxima posible por la máquina. El resultado se muestra en las figura 11.91 y con más detalle sobre la superficie en la figura 11.45.

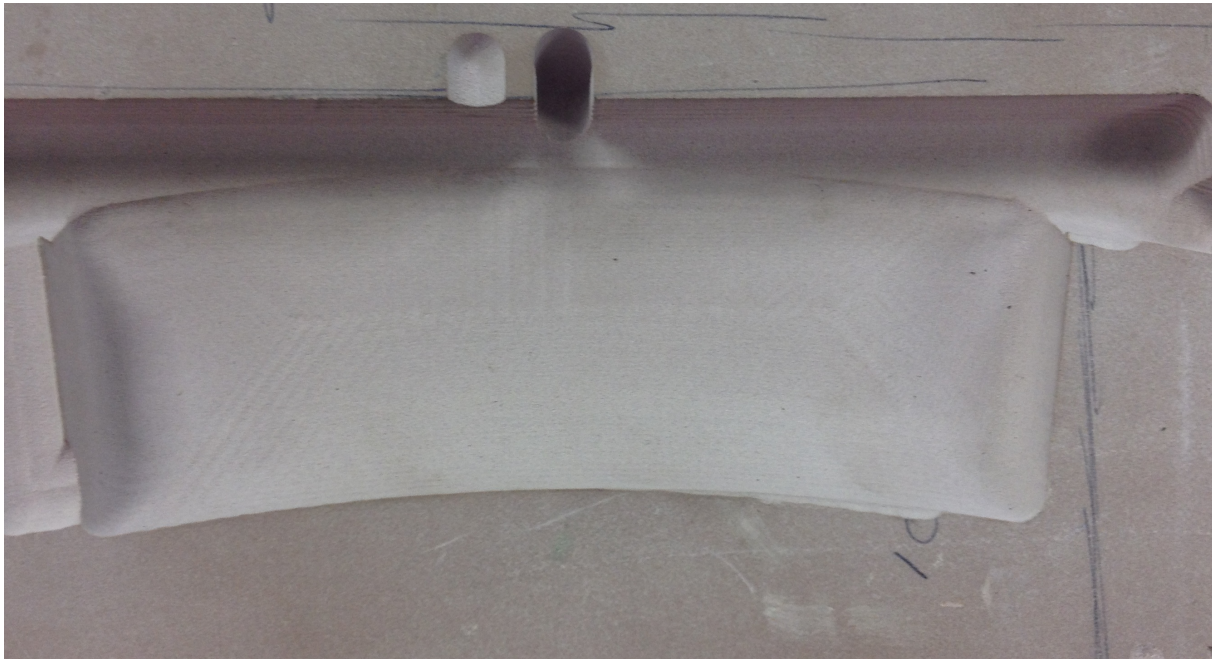


Figura 11.91: Experimento 3. Resultado global del mecanizado. (Fuente: Propia)



Figura 11.92: Experimento 3. Resultado en detalle de la superficie del mecanizado. (Fuente: Propia)

Ahora se aprecia una calidad del mecanizado elevada tan solo variando la velocidad de corte y de la herramienta. Todavía existen zonas que no aparecen con detalle como es

la curva que se realiza en la garganta del aro y en la parte inferior del aro. El problema es debido a que el tamaño de la herramienta es muy elevado y una pasada quitaría más material del que debería y es preferible solucionarlo posteriormente con una liga a mano. Por tanto se considera que los parámetros de este experimento son válidos para realizar el molde exterior.

Experimento 4

Definidos todos los parámetros tan solo queda fabricar los que serían los moldes definitivos. Tan solo queda realizar la operación para realizar el agujero donde irán situados los tetones para que queden alineadas ambas partes del molde exterior. Esta operación se denomina punteado y tan solo hay que definir el punto donde está situado el agujero y su profundidad que son de 10 mm. Para ahorrar tiempo colocan las dos partes del molde dentro del mismo tocho para obtener los dos moldes al mismo tiempo. En la figura 11.93 se muestra la máquina CNC durante el proceso de mecanizado. También se puede ver el punto donde se amarra el tocho a la bancada.



Figura 11.93: Experimento 4. Durante el momento de mecanizado. (Fuente: Propia)

En figura 11.94 se muestra una de las partes del molde exterior ya mecanizada. En ella se aprecia como la calidad del mecanizado no ha sido tan alta como en el experimento 3 aunque las zonas más conflictivas como son las paredes verticales e inclinadas sí obtuvieron un resultado como en el experimento anterior.

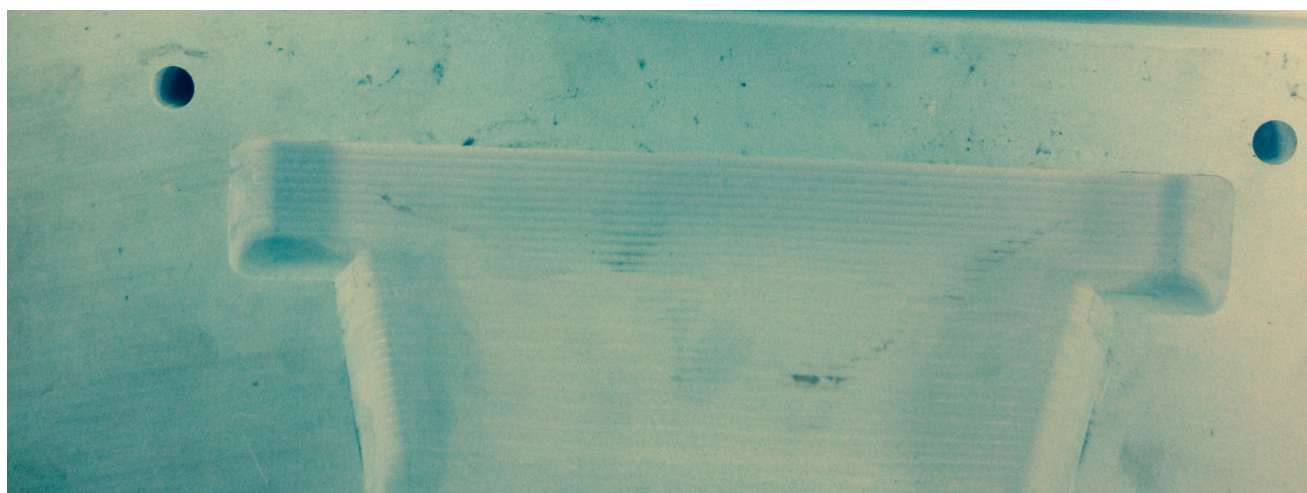


Figura 11.94: Experimento 4. Molde exterior mecanizado. (Fuente: Propia)

Preparación del Molde Exterior

Del tocho que se ha mecanizado se han obtenido las dos partes del molde juntas por lo que habrá que separarlas. Lo que se ha realizado durante el proceso de mecanizado es una pasada en el límite de cada parte. Por lo tanto, con la ayuda de una sierra eléctrica se fija el tocho obtenido por sus laterales de tal manera que la proyección de la sierra sea la línea de simetría entre las dos partes. En la figura 11.95 se muestra dicho proceso.

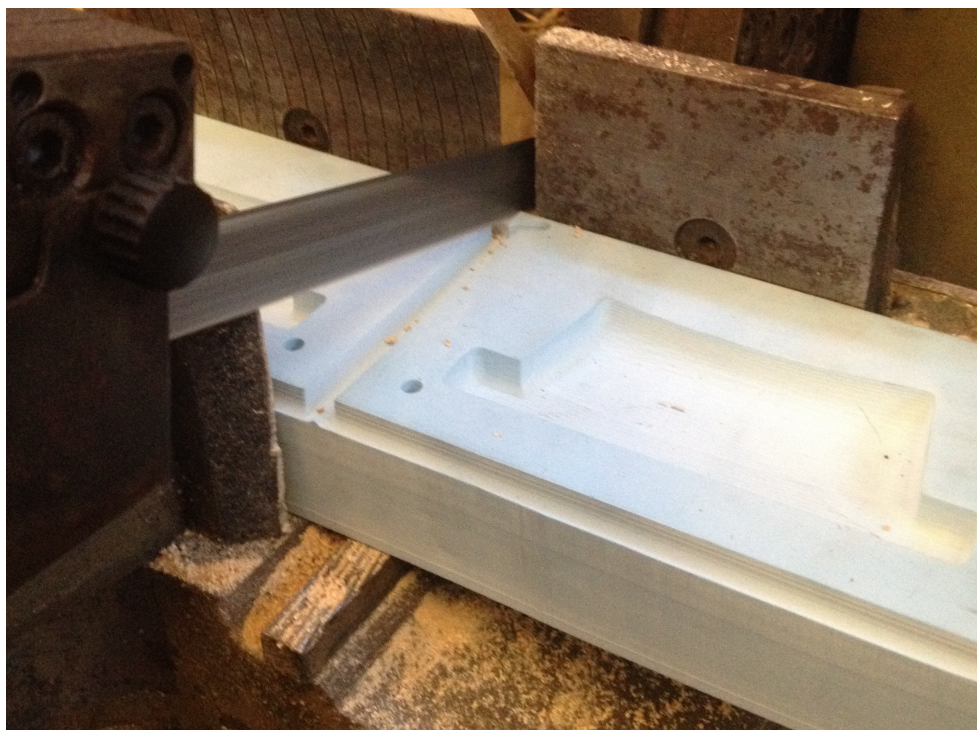


Figura 11.95: Preparación del Molde. Corte del tocho donde están las dos partes del molde. (Fuente: Propia)

La siguiente etapa es la fabricación de los tetones. Como se han realizado agujeros en cada parte de 10 mm. de profundidad con un diámetro de 6 mm. es necesario obtener una vara de 6 mm. de diámetro. Después, con la ayuda de un pie de rey, se marca sobre la vara 20 mm. y se corta con la sierra eléctrica. Una vez se tienen los tetones se pueden unir los dos moldes con la certeza de que estos están alineados. Como dentro del molde, a parte de la fibra de carbono, irá una bolsa con aire a presión es conveniente poder fijar las dos partes del molde. Para eso, con el molde ensamblado se marcan dos puntos en las esquinas donde no están situados los tetones y se realiza un agujero pasante de métrica 6 mm.. En la figura 11.96 se muestra esta etapa.



Figura 11.96: Preparación del Molde. Realización de los agujeros para poder dejar fijados las dos partes. (Fuente: Propia)

Una vez realizados los tornillos tan solo es necesario obtener una varilla roscada de diámetro 6 mm. para unir las dos partes del molde.

Para realizar el agujero por donde se introducirá la bolsa de aire a presión se realiza el siguiente proceso. Con un pie de rey se mide la longitud del hueco dejado para el molde interior pues sus extremos están alineados con el eje de simetría del molde. Después se marca el centro del molde con la mitad de dicha longitud. Se vuelve a ensamblar el molde y se realiza un agujero de métrica 4.5 mm., que es la medida de la válvula de los neumáticos, y que se utilizará para introducir la bolsa.

El siguiente paso es el más costoso y delicado que es arreglar la superficie del molde. Para ello se utiliza el mismo proceso que en el molde de la pared del buje. Se utiliza una serie de lijas de agua para pulir poco a poco la superficie. Después de pasar las lijas por la superficie donde queda apoyado el molde interior, en la figura 11.97 se puede ver la diferencia con el resto del molde que ha sido mecanizado.



Figura 11.97: Preparación del Molde. Diferencia entre la parte lijada del molde y la que no lo ha sido. (Fuente: Propia)

Una vez lijado todas las paredes del molde, con la ayuda de una Dremel y un disco especial para pulir, véase figura 11.98, se repasa toda la superficie del molde para dejarla con un acabado excelente. Esto se puede apreciar en la figura 11.99.



Figura 11.98: Preparación del Molde. Disco especial para pulido. (Fuente: Propia)



Figura 11.99: Preparación del Molde. Molde después del pulido. (Fuente: Propia)

Por lo tanto, el molde exterior esta ya listo a la espera de fabricar el molde interior y ver que todo ensamble correctamente.

11.6.2 Molde Interior

Diseño del Molde Interior

El molde interior, mostrado en la figura 11.100, tiene una superficie que es prácticamente la de la garganta del aro. Por otro lado, se ha diseñado una especie de repisa para que el molde interior quede alojado dentro del exterior sin necesidad de introducir ningún elemento de sujeción o alineamiento.

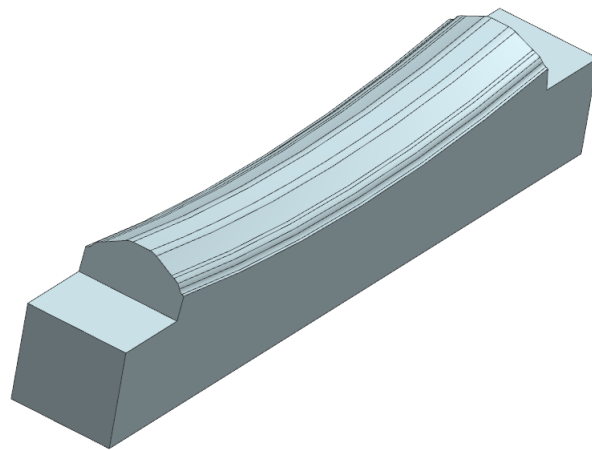


Figura 11.100: Molde Interior. Diseño del molde interior. (Fuente: Propia)

Fabricación del Molde Interior

A continuación se detallarán las pruebas que se realizaron para obtener el molde interior.

Experimento 1

En un primer momento se diseñó el molde interior para ser fabricado con una máquina de impresión en 3D pero a continuación se demostrará el porqué. Es problema es que la herramienta tiene un largo de 20 mm. mientras que el molde interior tiene un alto 28 mm. por lo tanto sería dependería del ángulo del cabezal de la herramienta para ver si este entraría en contacto con el tocho que se encuentra en los alrededores. Con los parámetros del experimento 4 del molde exterior se realizan las operaciones primero sobre el área de corte de la figura 11.101 que corresponden a la garganta y luego sobre la superficie de la figura 11.102 que corresponde a la zona diseñada para que ensamble sobre el molde exterior.

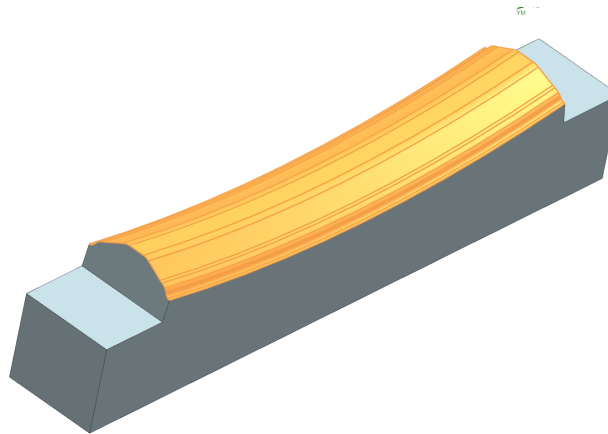


Figura 11.101: Experimento 1. Área de corte I del molde interior. (Fuente: Propia)

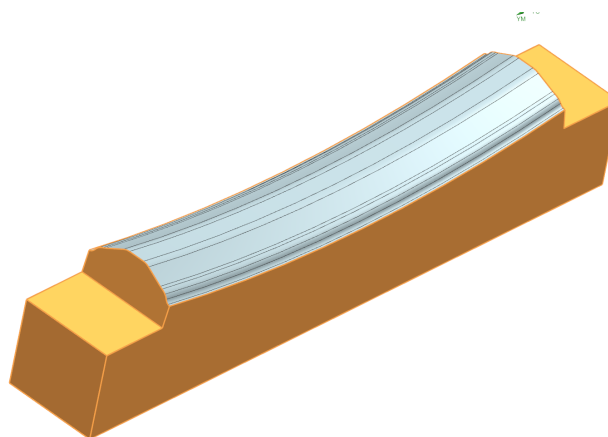


Figura 11.102: Experimento 1. Área de corte II del molde interior. (Fuente: Propia)

La simulación del mecanizado después de todas las operaciones e muestra sobra la

figura 11.103 y se ve que la zona de la garganta, que es la que ha de reproducir la fibra, tiene a priori una buena calidad de mecanizado.

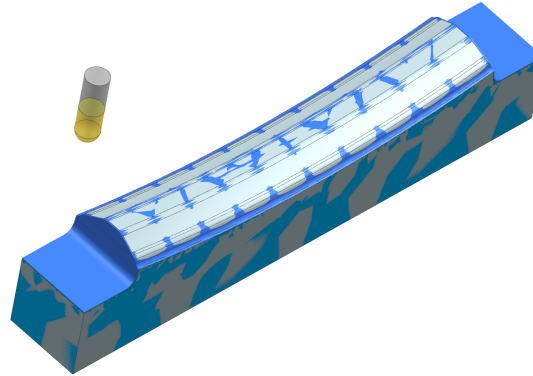


Figura 11.103: Experimento 1. Simulación del mecanizado del molde interior. (Fuente: Propia)

Los pasos siguientes son los ya citados anteriormente antes del proceso de mecanizado. En la figura 11.104 se muestra el tocho después de que se tuviera que detener la máquina debido a que el cabezal de la herramienta está tocando el resto del tocho.



Figura 11.104: Experimento 1. Estado del tocho después de que el cabezal golpee los límites del tocho. (Fuente: Propia)

La solución reside en cortar el tocho a la medida más próxima a la pieza final y modificar el modo en el que se ancla el tocho a la bancada de la máquina. El problema es que no se disponía de la instrumentación necesaria para realizarlo. Por lo tanto, debido a las restricciones el molde interior no se podía realizar mecanizado.

Experimento 2

La solución una vez analizado que no se podía realizar mediante mecanizado era rápida. Visto que el molde de la pared del buje se había realizado mediante impresión 3D, se utilizará el mismo método para el molde interior del aro. Los parámetros que hay que introducir en el software de la impresora son los mismos que su homólogo con la salvedad de que en este caso no es necesario soportes adicionales. A continuación se vuelven a enumerar.

- Material. Plástico ABS
- Espesor de la lámina. Se deja el que aparece por defecto al elegir el material, que es de 0.19 mm.
- Velocidad. Normal.
- Relleno. Lleno.
- Soporte. No es necesario.

Seleccionada dicha configuración, el software calcula que será necesario un tiempo de 4 horas y 18 minutos y utilizará 54 gramos de material. Por lo que con un rollo de material, se podrían hacer hasta 18 moldes. En la figura 11.105 se muestra el resultado de la impresión.

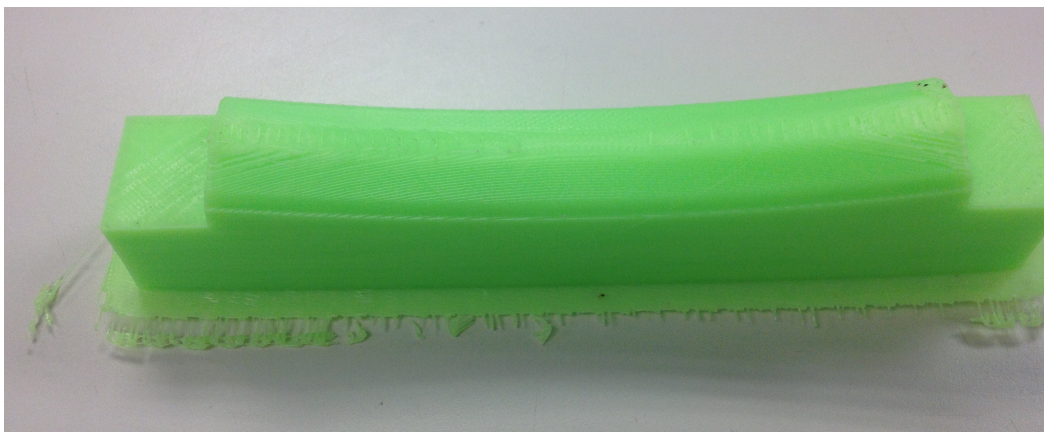


Figura 11.105: Experimento 2. Resultado del molde interior mediante impresión 3D. (Fuente: Propia)

Uno de los fenómenos sobre la impresión en 3D que ya se ha comentado es que debido al calor la base de la pieza tiende a levantarse. En este caso ha ocurrido eso, aunque no es crítico pues lo único que va a ocurrir es que en la parte superior del molde exterior quedará una pequeña holgura. Esto se aprecia bien en la figura 11.106.

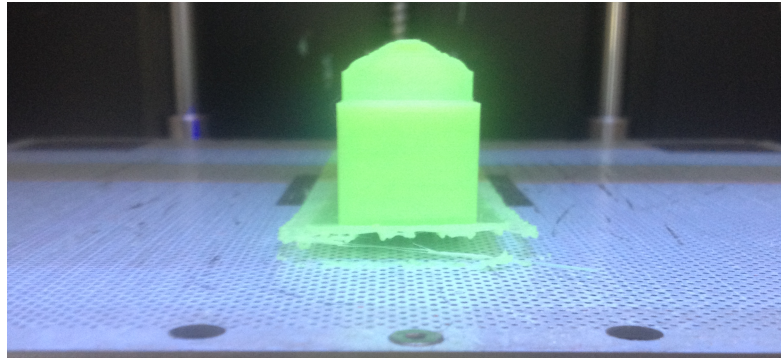


Figura 11.106: Experimento 2. La base se ha levantado y deformado debido al calor durante el proceso de impresión. (Fuente: Propia)

Preparación del Molde Interior

La superficie que esta en contacto con la fibra de carbono, figura 11.107, se aprecia como es muy rugosa y algo irregular debido a la calidad de la impresión. Como en ocasiones anteriores se utilizan lijas de diferentes gramajes empapadas de acetona para poder dejar una superficie con un aspecto pulido.

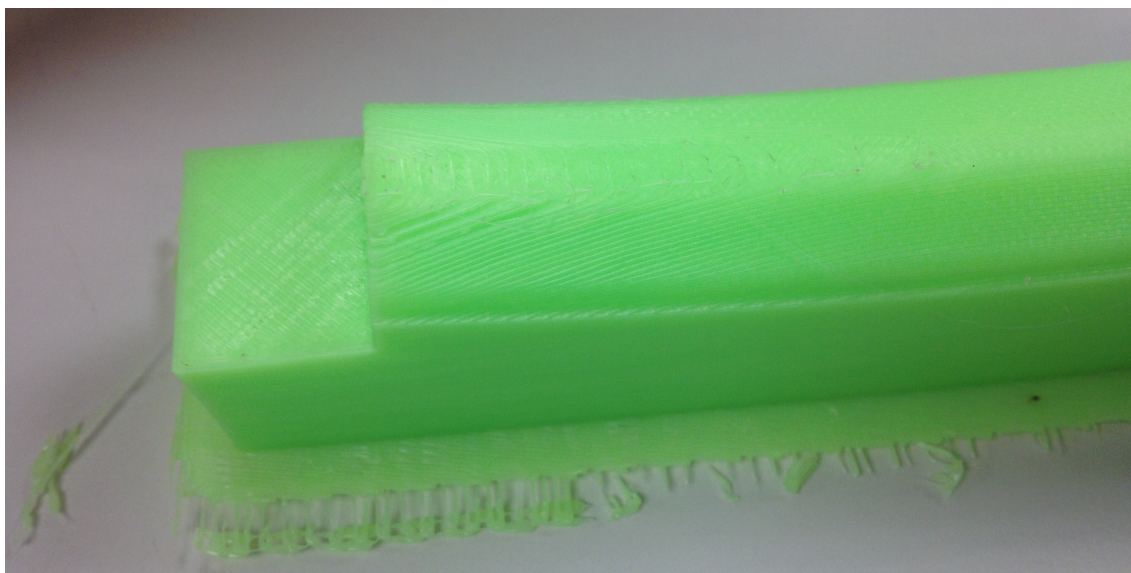


Figura 11.107: Experimento 2. Calidad de la superficie después del proceso de impresión 3D. (Fuente: Propia)

11.6.3 Ensamblaje de los Moldes del Aro

Queda por tanto ver si los dos moldes se unen a la perfección. Existe un problema y que en las paredes verticales del molde exterior que corresponden al molde interior existe un exceso de material debido a la forma circular de la herramienta de mecanizado. Esto se solucionaría con una herramienta plana, pero como no se tiene, lo que se hace es limar estas zonas del molde interior respetando la mayor parte de la pared para que haya una buena unión entre los dos moldes. El resultado después de este proceso se muestra en la figura 11.108.

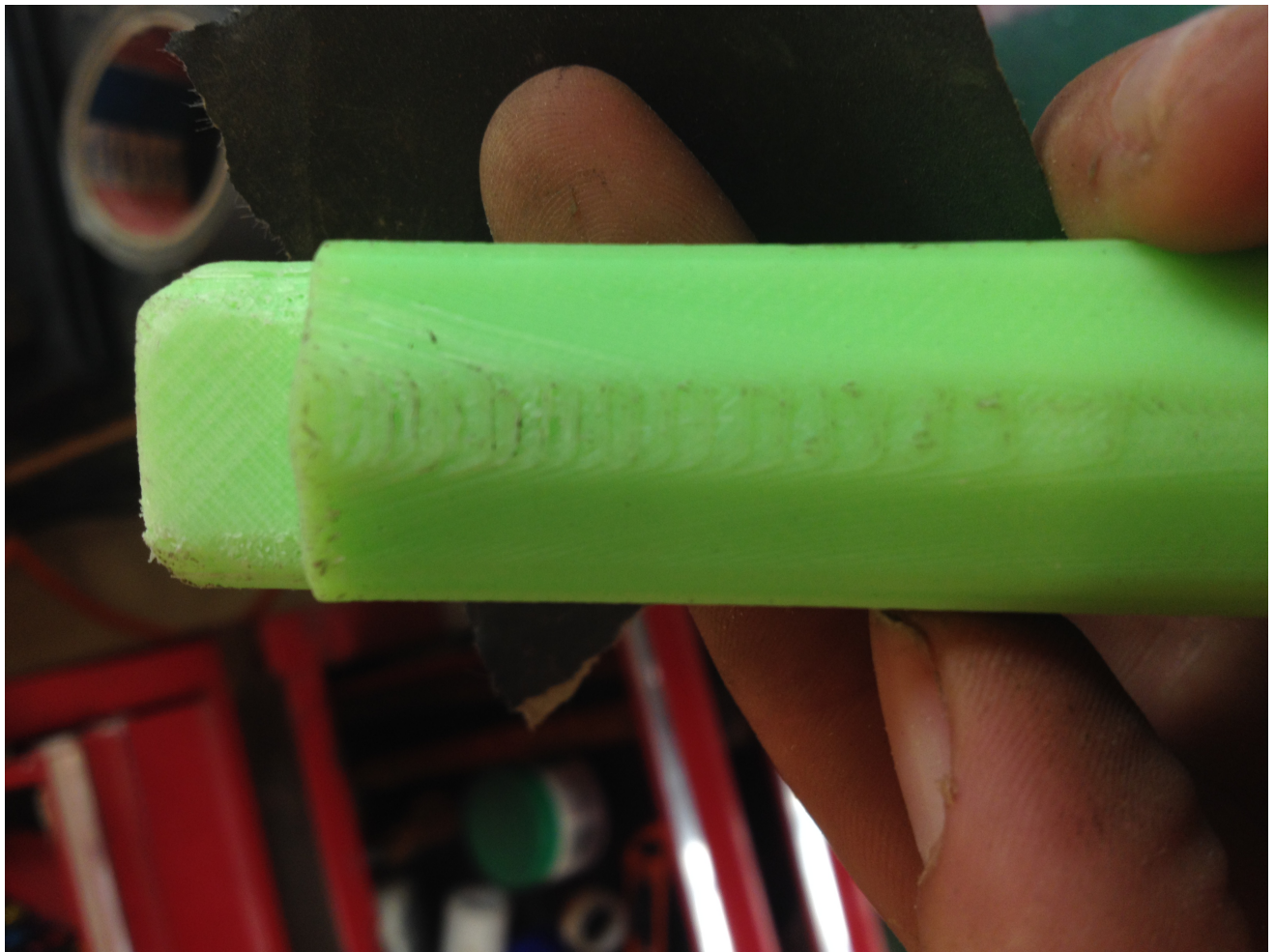


Figura 11.108: Ensamblaje. Proceso de retirada de material del molde interior para que pueda ser instalado. (Fuente: Propia)

11.6.4 Laminado

Para la realización del laminado hay que seguir las capas en el orden y con la longitud que se ha definido en el apartado de ensayo de fibra de carbono. En la figura 11.109 se vuelve a mostrar como hay que laminar el aro de la rueda. En color verde se muestra las capas de refuerzo con fibra de carbono II, en naranja las capas con la fibra en dirección $\pm 45^\circ$, en amarillo la capa con las fibras en dirección radial con la fibra de carbono I y en rosa las capa con orientación circular con la misma fibra de carbono que la capa anterior.

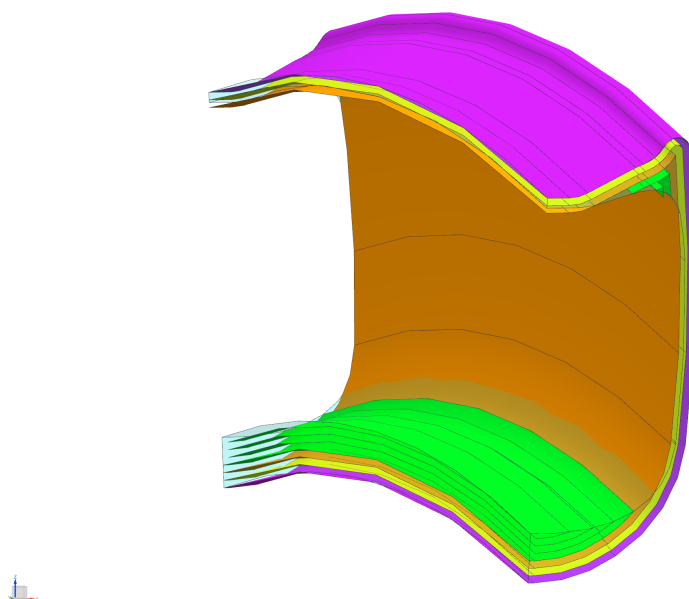


Figura 11.109: Laminado. Configuración del laminado del aro. (Fuente: Propia)

Lo primero es impregnar con desmoldeante el molde del aro. Como el desmoldeo siempre ha sido un problema a lo largo de este proyecto, se utilizará el desmoldeante tipo gel debido a que es diseñado para la fabricación de piezas de material compuesto. Se instala siguiendo las instrucciones del fabricante que ya se han citado a lo largo del proyecto.

Con la ayuda del software NX se obtiene las medidas de las láminas que hay que instalar. Con lo que se inserta dicha geometría sobre una cartulina, ya que tiene una manejabilidad similar a la de la fibra de carbono. Lo primero que se realiza es instalar las láminas de cartulina que se han obtenido. En la figura 11.110 se puede ver este método.

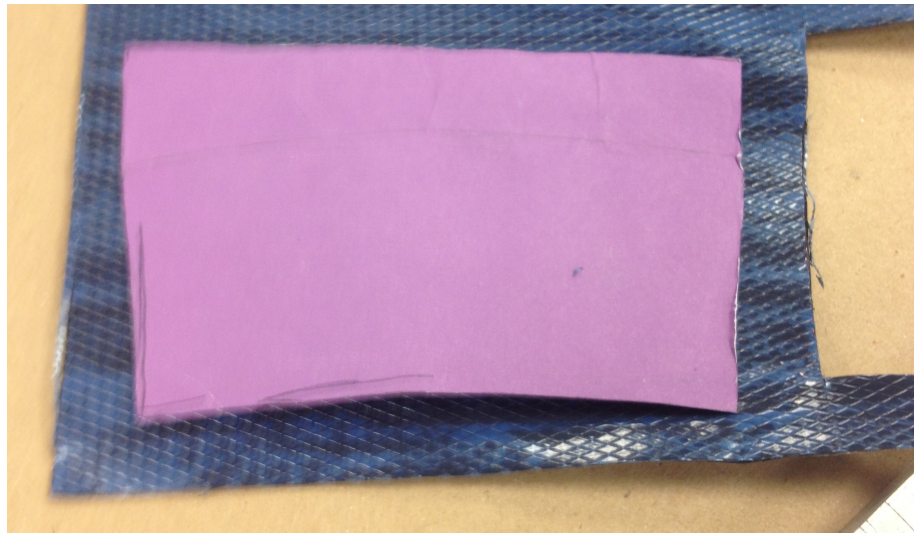


Figura 11.110: Laminado. Método para comprobar una correcta laminación. (Fuente: Propia)

Posteriormente estas láminas servirán como pieza maestra para cortar la fibra de carbono. En la figura 11.111 se aprecia como se van colocando estas las láminas de fibra de carbono. La zona de unión de las láminas se realiza en la parte superior e inferior del aro. Por seguridad se deja como solape cerca de 1 cm. entre cada capa.

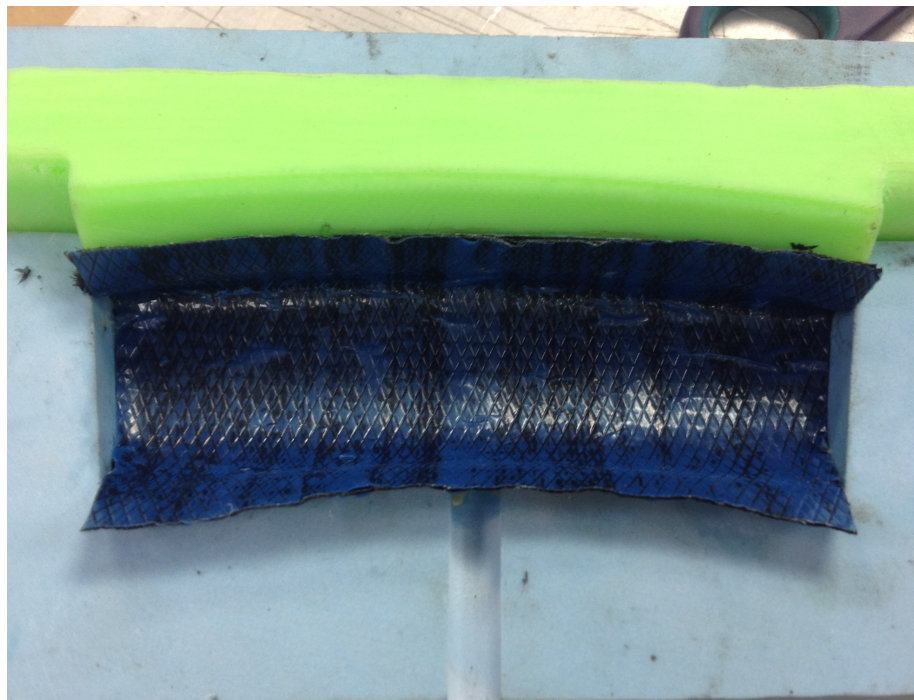


Figura 11.111: Laminado. Colocación de las láminas. (Fuente: Propia)

Una vez colocadas todas las láminas el resultado del laminado se muestra en la figura 11.112.



Figura 11.112: Laminado. Resultado una vez finalizado el proceso de laminación. (Fuente: Propia)

11.6.5 Bolsa de Aire

Antes de introducir la pieza en el horno queda un paso, que es introducir la bolsa por donde se introducirá el aire a presión. Para ello se realizarán diversas pruebas para ver si existen pérdidas.

Experimento 1.

El primer experimento consiste en fabricar un embudo de cobre para introducir dentro del molde. Sobre el tubo se coloca la bolsa de vacío para tubos, que se ha utilizado con anterioridad, y se deja dentro del aro. El componente tiene un tubo de 3 mm. de diámetro y un segundo de 10 mm.. En la figura 11.113 se muestra como se fabricó.

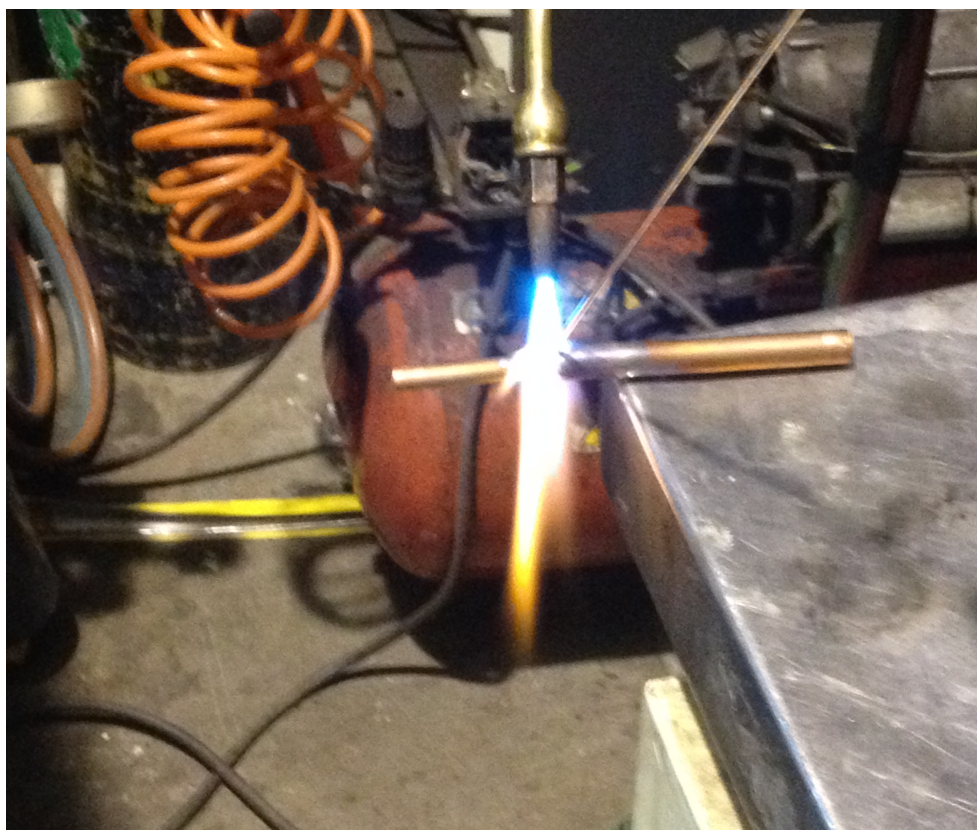


Figura 11.113: Bolsa de Aire. Embudo para poder introducir el aire dentro de la bolsa. (Fuente: Propia)

Este componente se fabrica con el objetivo de poder conectar un extremo del tubo al compresor mediante un conector y otro extremo del tubo, que se encontraría dentro del molde, a la bolsa de vacío. En la figura 11.114 se muestra como quedaría el molde laminado con este componente. Dentro del aro se encontraría la bolsa de vacío y un extremo estaría sellado con masilla para vacío y el otro, fuera del molde, con una brida metálica sobre el tubo.



Figura 11.114: Bolsa de Aire. Configuración del experimento 1. (Fuente: Propia)

Cuando se conecta al compresor se detectan pérdidas en la zona de unión del tubo a la bolsa fuera del molde. Esto es debido a que la brida metálica había perforado la bolsa.

Se propuso instalar una brida metálica pero con una superficie de goma, es decir, la bolsa estaría en contacto con goma, no con metal. Aún así, con una bolsa nueva, continuaron las pérdidas.

Después de esto lo que se hace es colocar un tubo de teflón, que soporta temperaturas superiores a 150° que son mayores a las del curado, en el cual la bolsa estaría por debajo y la brida por encima. Por lo tanto el orden desde dentro hacia fuera sería, el tubo de cobre, la bolsa de vacío, el tubo y la brida. Con esta configuración la bolsa ya no se perforaba pero existían fugas en dicha zona. Se hace un agujero a la fibra de carbono y se enrolla bolsa de vacío para tubos, que se usó con anterioridad, sobre un tubo de cobre con un diámetro de 3 mm. que quedará en el interior del aro y saldrá fuera del molde.

Experimento 2

Por tanto, se desechó la idea del tubo de cobre. Este experimento tiene como fin eliminar las fugas que aparecen en la bolsa de aire, tanto en la zona de conexión al tubo como en el extremo que se queda dentro del aro.

En la conexión de la bolsa con el tubo de aire que va al compresor, no tenga se utiliza un tubo de aluminio de 4 mm. de diámetro y una espiga, se introduce en su interior la bolsa. La espiga hará que el aire no pueda salir hacia el exterior debido a que se le da la vuelta a la bolsa y se introduce el tubo de teflón por encima de la bolsa y por el resto de componentes. En la figura 11.115 se puede ver el tubo que se introduce dentro del aro, la espiga y la bolsa.



Figura 11.115: Bolsa de Aire. Colocación de la bolsa en la parte externa del molde. (Fuente: Propia)

Sobre la zona de la espiga se coloca una brida metálica y sobre el tubo de aluminio otra. En este momento desaparecen las fugas en dicho punto.

En el extremo de la bolsa, se decide cerrarlo doblándola sobre sí misma y luego con una cinta adhesiva que soporta más de 100°C sin fundirse. El proceso es sencillo pero después de probar con diferentes soluciones parece el más indicado porque se puede realizar muy cerca del extremo optimizando al máximo el espacio disponible dentro del aro. En la figura 11.116 se puede ver el resultado de dicha operación.



Figura 11.116: Bolsa de Aire. Colocación de la bolsa en la parte externa del molde. (Fuente: Propia)

El extremo se introduce dentro del aro para que en la zona final se encuentre una bolsa que pueda comprimir bien los extremos.

Después se cierra el molde y no se perciben fugas de ningún tipo hasta 6 bares, que es la presión máxima disponible.

11.6.6 Fabricación I

Curado

Con todo listo se cierra el molde con los dos elementos de sujeción diseñados y se introduce en el horno. El curado se realizará a 90° durante 6 horas subiendo la temperatura a un ritmo de $1^{\circ}/\text{min}$. El aire se fija a una presión de 4 bares.

Durante el proceso de curado, aproximadamente cuando llevaba 2 horas, se aprecia como el molde se ha abierto por las dos esquinas que no tienen elementos de sujeción, sino que tiene los tetones para alinear los moldes. En la figura 11.117 se muestra el molde abierto. Una de las cosas que se deberían haber realizado era prever la fuerza que iba a generar la presión del aire sobre el molde. Con la ayuda del software de NX se tiene una superficie interna del aro de 0.09388 m^2 con una presión de 4 bares se traduce en una fuerza de 3758 Newtons sobre el molde. Esta fuerza hace que, evidentemente, el molde se abra.



Figura 11.117: Fabricación I. Molde abierto debido a la excesiva presión. (Fuente: Propia)

Resultado

El resultado del desmoldeo, que se realiza con una facilidad muy elevada ya que el proceso de curado no se finaliza, se muestra en la figura 11.118. Durante el desmoldeo se deslaminan la capa externa del aro.

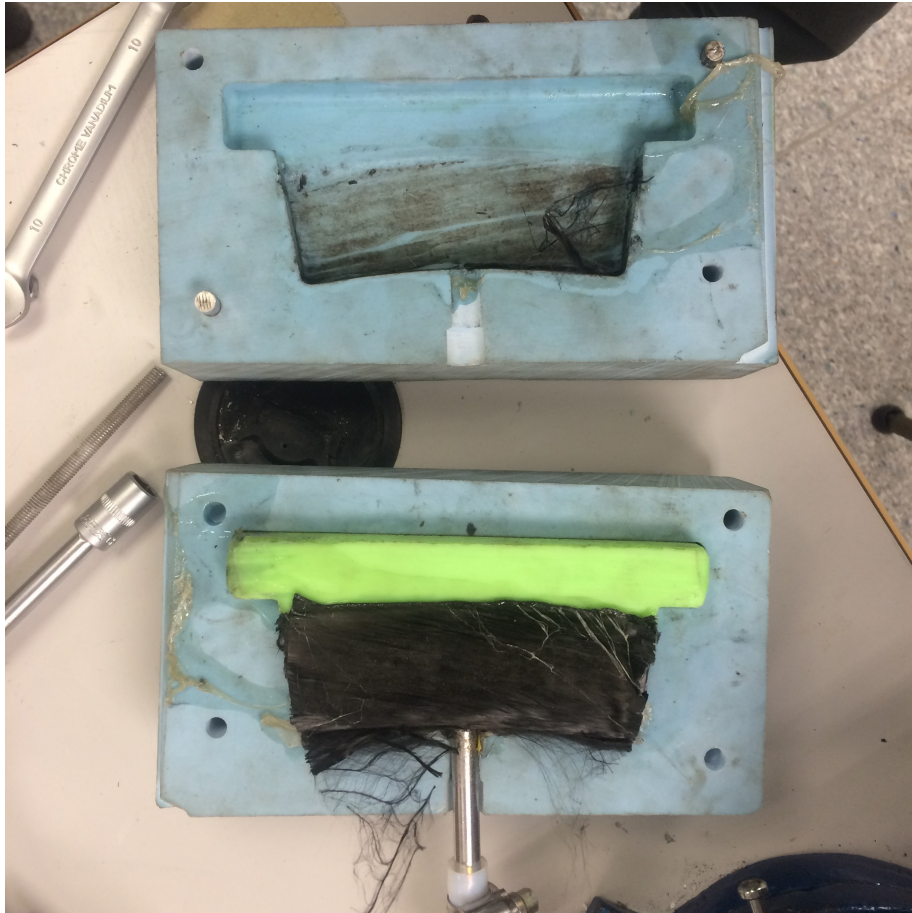


Figura 11.118: Fabricación I. Resultado del la primera fabricación del aro. (Fuente: Propia)

Otra de las cosas que parecen interesantes comentar es la cantidad de resina que ha sido evacuada del molde. Como este se abrió dejó fluir la resina fuera del molde habiendo un gran resto en el horno de resina. Como se ha citado con anterioridad esta resina tiene un exceso de resina muy elevado para su almacenamiento.

11.6.7 Fabricación II

Aunque el molde se ha deformado un poco se intentará realizar otro experimento con el fin de obtener la pieza. Para solucionar el problema del molde se realizan dos agujeros más para introducir dos varillas en las esquinas donde están situados los tetones que alinean las dos partes. En este caso las varillas serán de métrica 8. Así pues, se tienen las 4 esquinas del molde sujetas.

Curado

El curado de este experimento el es mismo que el anterior con la salvedad de que ahora la presión del aire será de 3 bares y no de 4 como anteriormente. En la figura 11.119 se aprecia el montaje del aro en el horno.

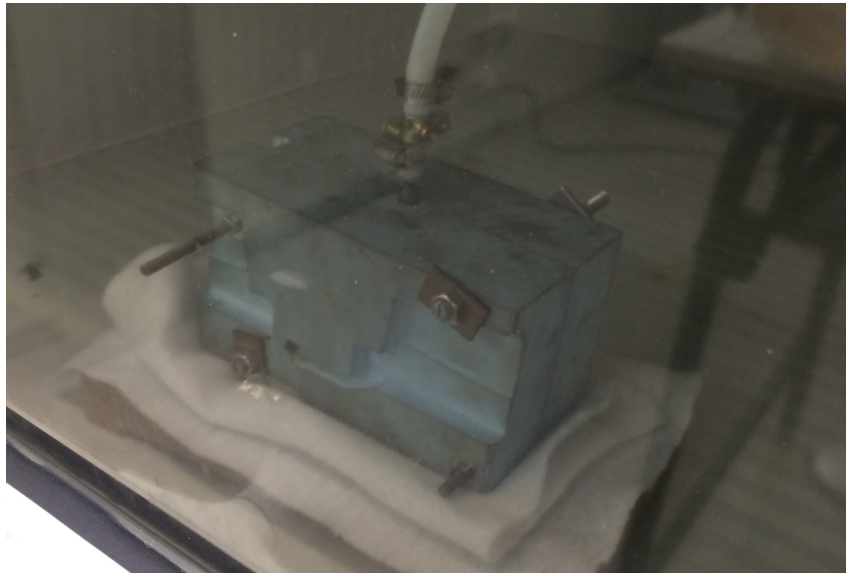


Figura 11.119: Fabricación I. Colocación de la bolsa en la parte externa del molde. (Fuente: Propia)

En este caso en ningún momento del curado el molde se aprecia que se deforme.

Desmoldeo

En el anterior experimento se ve como hay una gran cantidad de resina excedente, que debido a que se abre el molde, puede salir del mismo. En este caso como el molde no se abre el molde, tras quitar los elementos de fijación, el molde no se separa. En la figura 11.120 se muestra el exceso de resina en la zona donde se instala el tubo para introducir el aire.

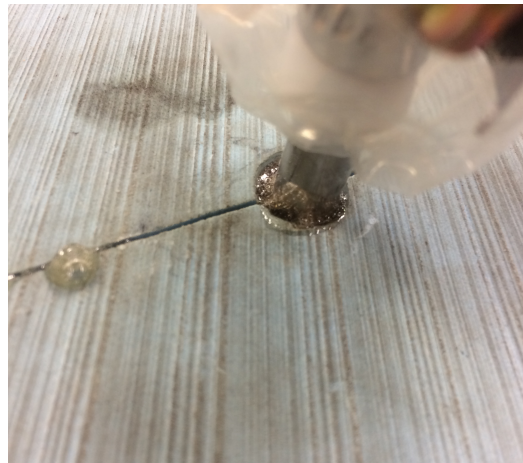


Figura 11.120: Fabricación II. Exceso de resina en la conexión del tubo y el molde. (Fuente: Propia)

Durante el proceso, que se tiene que hacer introduciendo a martillazos un puntero de acero en la zona de unión de ambas partes, una parte del molde se parte como se aprecia en la figura 11.121. Una vez ocurre esto la pieza sale sin problemas evidentemente. Eso si, el molde queda inservible.

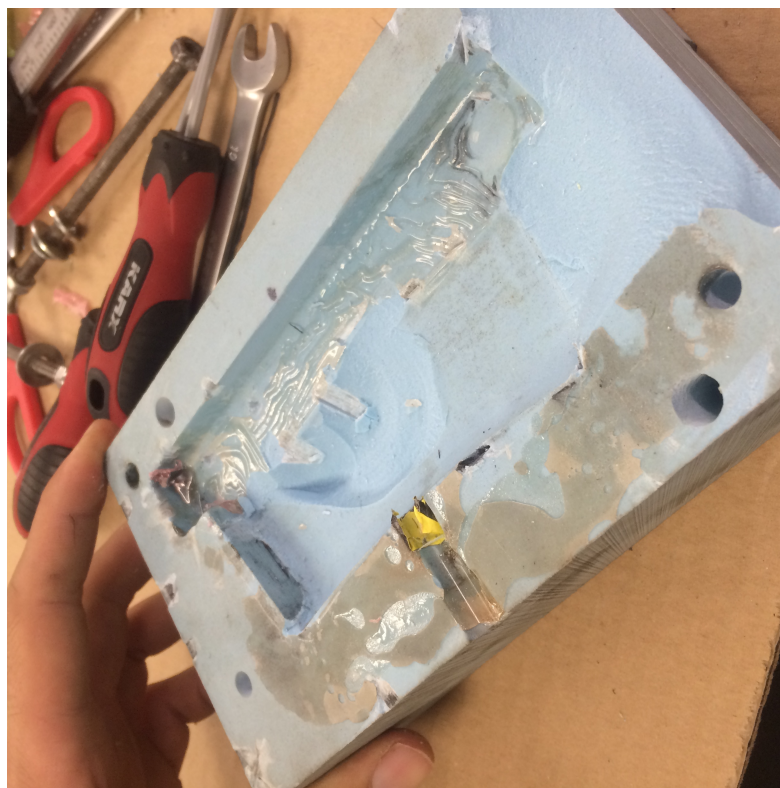


Figura 11.121: Fabricación II. Estado del molde tras el desmoldeo. (Fuente: Propia)

Resultado

El resultado de la parte de aro que se fabrica se muestra en las figuras 11.122, 11.123, 11.124 y 11.125. En los extremos aparece un exceso de fibra y resina que será necesario eliminar lijando.



Figura 11.122: Fabricación II. Resultado del aro tras el curado [Vista Isométrica]. (Fuente: Propia)

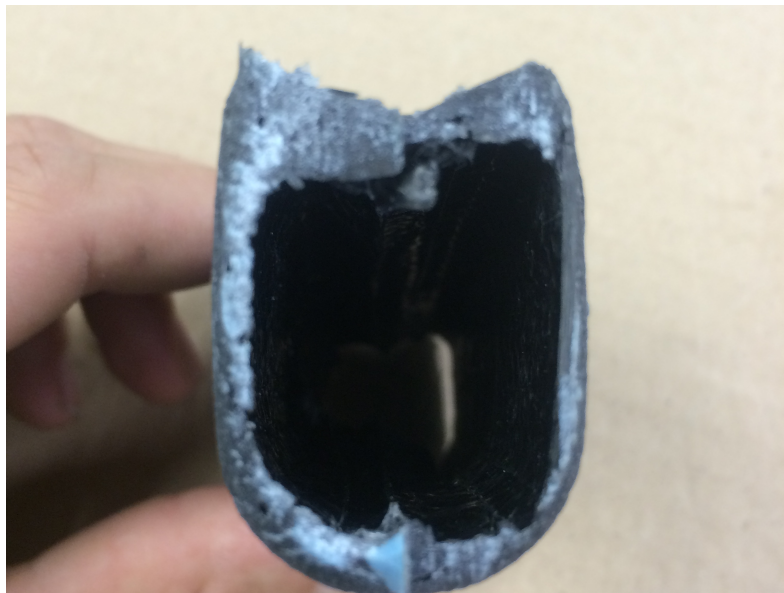


Figura 11.123: Fabricación II. Resultado del aro tras el curado [Extremo I]. (Fuente: Propia)

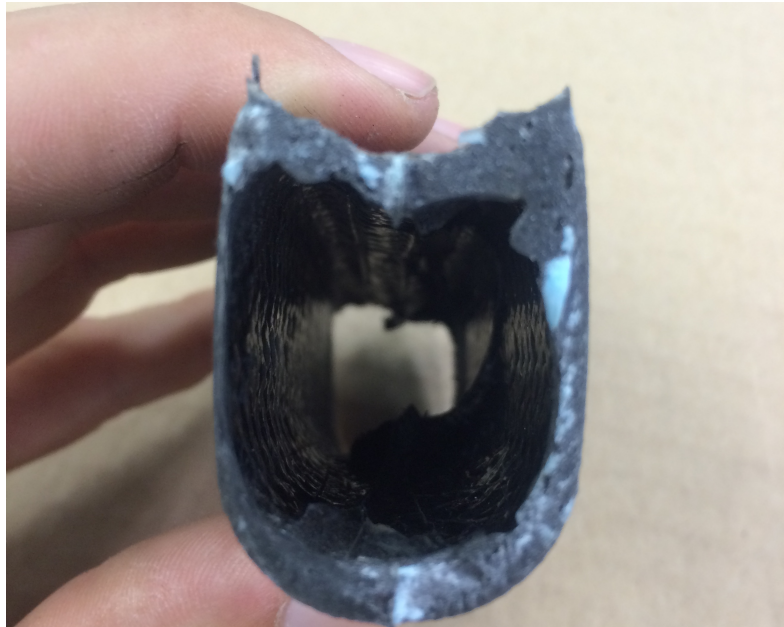


Figura 11.124: Fabricación II. Resultado del aro tras el curado [Vista Extremo II]. (Fuente: Propia)

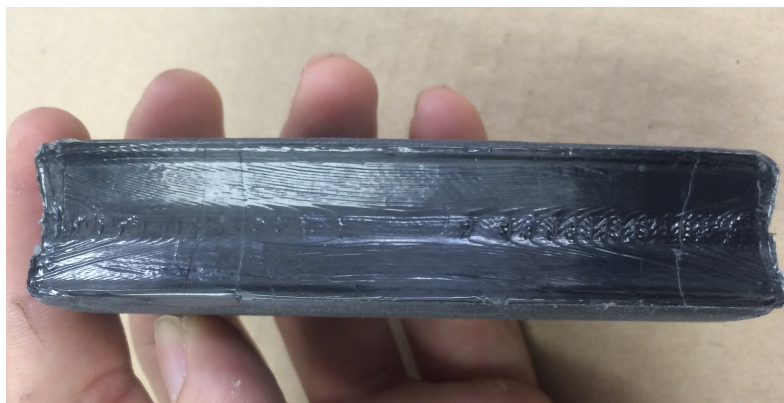


Figura 11.125: Fabricación II. Resultado del aro tras el curado [Vista Superior]. (Fuente: Propia)

Aparece también un exceso de resina en los bordes de la garganta y en la parte inferior del aro. Estas zonas también habrá que lijar. Por último la superficie externa aparece un poco rugosa, más de la que en un principio tenía el molde. Es por esto que será necesario pasar una lija, con un índice de rugosidad muy bajo, para tener un acabado pulido del aro. Después de este proceso, el resultado del aro final se muestra en la figura 11.126.



Figura 11.126: Fabricación II. Resultado final del aro. (Fuente: Propia)

Una de las grandes motivaciones para utilizar aire comprimido y no realizar vacío durante el curado era para conseguir una mayor compactación del material. En la industria se utilizan hasta 14 bares de presión, y se obtiene un espesor en la pared vertical del aro no superior a 1 mm. Aunque en este caso tiene mucho que ver el material utilizado. En este caso, la información del material que se dispone muestra, que por vacío, la FC I tiene un espesor de 0.6 mm. por lámina y la FC II de 1 mm. por lámina. En el aro significaría un espesor de 2.2 mm. Al realizarlo por compresión y no por vacío se tiene un espesor de 1.41 mm., como muestra la figura 11.127.



Figura 11.127: Fabricación II. Espesor de la pared vertical del aro. (Fuente: Propia)

Por lo tanto el uso de esta técnica genera piezas con espesores más reducidos, lo cuál es una gran ventaja para zonas donde se necesite colocar más capas y no se quiera aumentar el espesor.

Parte III
EPÍLOGO

Apartado 12

PRESUPUESTO

Como en cualquier proceso de fabricación será necesario conocer los costes globales, no solo del producto final, sino también del proceso de investigación. En el siguiente apartado se citará un presupuesto aproximado de la parte de experimentación y luego el coste de cada uno de los componentes. Hay que tener en cuenta que también se han usado bienes e inmuebles que habría que disponer de ellos o de empresas que realizan su función, con lo cual conllevaría un coste. Este punto es bastante confuso debido a que muchas de las instalaciones usadas, a parte de las que se citaran como de la Universidad Politécnica de Valencia, pertenecen a una empresa privada y el coste de su maquinaria no es fácil de concretar debido a que se ha usado durante muchos años y todo ello tiene una devaluación.

Este apartado se distribuirá según los bienes utilizados, los materiales empleados durante el proyecto que han repercutido directamente sobre la Universidad y los que de una manera u otra se han utilizado para realizar experimentos.

12.1 Bienes e Inmuebles

La tabla 12.1 se muestra la maquinaria en la universidad y el coste aproximado de la misma.

MAQUINARIA			
	PRECIO (€)	IVA 21 % (€)	COSTE (€)
HORNO	3000	798	3798
BOMBA DE VACÍO	88.48	23.52	112
COMPRESOR	78.96	20.98	99.95
MÁQUINA CNC BARCENAS SW 1325	17380	4620	22000
IMPRESORA 3D ZORTRAX M200	1748.08	464.68	2212.77
TALADRO DE PIE	259.48	68.97	328.46
SIERRA DE CINTA	106.14	28.21	134.36
SIERRA DE CINTA PARA TUBOS	308.21	81.87	389.9
DREMEL	70.24	18.67	88.92
SOLDADOR DE COBRE	23.69	6.29	29.99
LIJADORA DE PIE	185.74	49.37	235.12
TOTAL	23250.86	6180.60	29431.47

Tabla 12.1: Presupuesto. Coste de la maquinaria empleada durante el proyecto

Los precios de la fresadora CNC, la impresora 3D, el compresor y la bomba de vacío si que son los reales del mercado si hubiera que comprarlos nuevos. Sobre el horno es un precio estimado ya que es de fabricación propia de la universidad y consultando a las personas responsables su valor nuevo se estima en ese precio. Este precio es coherente debido a que la empresa que ha cedido la maquinaria necesaria para realizar las otras tareas durante el proyecto, ServiForn Levante S.L.; se dedica a la reparación de maquinaria de panadería. Un horno con las mismas dimensiones del que se ha utilizado se estima en un precio de 7000 €aproximadamente por lo que el precio suministrado por los responsables del horno de la UPV es coherente.

Además habría que tener en cuenta los consumibles como son las brocas para el taladro y la fresadora, las lijas y sierras, etc. Este material se puede estimar en total con un coste no superior a los 100 €. Otra cosa que habría que tener en cuenta son todas las herramientas como pueden ser martillos, llaves inglesas, etc. En este proyecto con un maletín de herramienta valorado en 200 €hubiera sido suficiente.

12.2 Materiales utilizados durante el proyecto

De manera aproximada, ya que aunque se conozca el valor de cada material, ha sido imposible recopilar durante cada experimento la cantidad de material desechable con exactitud. Por ejemplo, cuando se corta la manta de absorción no se hace con la regla y el lápiz, por lo tanto, tras hacer tantos experimentos es imposible conseguir un dato exacto. Aún así el valor que se recoge en la tabla 12.2 es bastante fiel a la realidad.

MATERIALES			
	PRECIO (€)	CANTIDAD (-)	COSTE (€)
F.C. Unidireccional I (m^2)	93.86	5	469.38
F.C. Bidireccional II (m^2)	106.03	2	212.05
PLACA MECANIZABLE (m^2)	900	0.5	450
ROLLO ABS ZORTRAX (Rollo 800 gr.)	34.89	1	44.17
CERA DESMOLDEANTE (UNIDAD)	13.98	1	17.7
SURFACE CLEANER (Garrafa 3.75 litros)	66.02	0.5 (l.)	33.01
SEALER GP (Garrafa 3.75 litros)	204.51	0.5	102.258
GEL DESMOLDEANTE (Garrafa 3.75 litros)	140.96	0.5	70.48
BOLSA DE VACÍO CIRCULAR (m)	2.686	10	7.14
BOLSA DE VACÍO (m)	1.07	20	5.67
MANTA ABSORCIÓN (m)	4.74	20	25.2
MALLA GUIADO I (m)	6.95	5	9.24
MALLA GUIADO II (m)	11.94	8	25.40
MASILLA PARA VACÍO AMARILLA (ROLLO)	9.796	4	10.42
MASILLA PARA VACÍO NEGRA (ROLLO)	4.35	7	8.85
TOTAL			1428.29
		IVA (21 %)	299.29
		COSTE TOTAL	1728.23

Tabla 12.2: Presupuesto. Materiales empleados durante el proyecto

Excepto la fibra de carbono, que el proveedor es Gurit, y la placa mecanizable, el resto de componentes son de la empresa Resinas Castro S.L. y todos sus precios se pueden comprobar en su página web, véase ref. [43].

12.3 Coste del personal

Durante este proyecto han intervenido varias personas durante el proceso de diseño y fabricación. En la tabla 12.3 se muestra el global de las horas dedicadas por cada, su formación y los honorarios habituales para cada persona según su acreditación académica.

MATERIALES				
PERSONA	ESTATUS	PRECIO (€/ h.)	UNIDAD (h.)	COSTE (€)
Juan Antonio García Manrique	Director Académico	65	150	9750
Rene Hoto	Doctorado	65	100	6000
Jose Castiblanco Quintero	Ingeniero Superior	40	20	800
Reineiry Emilio García Giron	Ingeniero Superior	40	60	2400
Carlos Madramany Soto	Técnico Superior	36	20	720
Borja Madramany Núñez	Graduado	1200	25	30000
TOTAL			49670	
		IVA (21%)	10430.7	
		COSTE TOTAL	60100.7	

Tabla 12.3: Presupuesto. Coste del Personal

12.4 Coste Unitario de la Rueda

A continuación, se hace un estudio económico de lo que costaría realizar una rueda. Se hace una aproximación a que un molde, de una alta calidad realizado en aluminio, puede tener una vida útil de 500 usos. En la tabla 12.4 se muestra el coste de obtener todos los moldes, el cual incluye el precio del tocho y el mecanizado del mismo.

MATERIALES			
	Tocho	Mecanizado	PRECIO (€)
ARO	1500	500	1500
BUJE	100	100	200
RADIO	400	250	1500
TOTAL			3200
		IVA (21 %)	672
		COSTE TOTAL	3872

Tabla 12.4: Presupuesto. Coste de los moldes

Estos precios, aunque aproximados, han sido consultados conociendo el valor de los bloques de aluminio en el mercado y después de conocer los precios de diferentes mecanizados, se ha estimado lo que podría suponer realizarlo. El radio tiene un precio tan elevado porque hay que realizar 12 unidades. Ahora bien, como se estima que tienen una vida útil de 100 usos, el coste total sería de 38.72 € cada vez que se fabrique una rueda.

En la tabla 12.5 se muestra el coste para realizar una rueda. No se ha tenido en cuenta el coste de las instalaciones ni la maquinaria porque ya se ha citado con anterioridad.

MATERIALES			
CONCEPTO	PRECIO (€)	CANTIDAD	COSTE (€)
F.C. I Unidireccional (m^2)	93.86	3	281.67
F.C. II Bidireccional (m^2)	134.21	2	212.05
Material Desechable	70	1	70
Operario (h.)	25	5	125
Molde (uso)	38.72	1	38.72
TOTAL			727.44
		IVA (21 %)	152.76
		COSTE TOTAL	880.20

Tabla 12.5: Presupuesto. Coste unitario de la rueda

Una de las ruedas de las que más se ha hablado durante este proyecto tiene un precio de venta al público tarifado por Corima en 1545.27 €. Evidentemente se hablan de conceptos diferentes cuando se habla de coste de fabricación y corte de venta al público aunque los valores guardan cierta coherencia. Es habitual que el precio de venta al público sea aproximadamente el doble del coste de fabricación. Aunque es evidente que luego quedarían los gastos de almacenaje, distribución, marketing, etc. Pero también hay que tener en cuenta que una empresa no tiene los mismos precios de materiales que tiene un particular o una universidad, como es el caso.

CONCLUSIÓN

Una vez finalizado el trabajo queda por decir se se han cumplido o no los objetivos del mismo y que conclusiones se pueden obtener el proyecto.

13.1 Objetivos

Entre los objetivos figuraba que la rueda debería tener un peso no superior a 800 gr. y una rigidez lateral de 70 N/mm. Sobre la rigidez lateral, es válida, dentro de los ensayos numéricos pero no se tienen valores analíticos con los que comparar la veracidad de esta afirmación.

Con respecto al peso, lo que se ha realizado es pesar todos los componentes con una báscula digital con una presión de ± 0.1 gramos. Los resultados de cada componente, y la cantidad de los mismos se muestran en la tabla 13.1. Cabe citar que del aro se ha fabricado una porción con un ángulo desde el centro del aro de 25° , por lo tanto, una 15° parte del aro.

PESO DE LA RUEDA			
	PESO UNITARIO (gr)	CANTIDAD (-)	PESO TOTAL DEL COMPONENTE (gr)
ARO	37.76	15	615.6
RADIO	5.6	12	67.2
TUBO DEL BUJE	16.592	1	16.592
PARED DEL BUJE	17,17	2	34.34
ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN	50	1	50
TOTAL			734,532

Tabla 13.1: Objetivo. Peso de la rueda

Así pues, el objetivo del peso se ha podido cumplir aunque se considera que el material utilizado no es el adecuado. Por ejemplo, dentro de la empresa Gurit la gran mayoría de materiales tienen la mitad de densidad de los que se han utilizado para este proyecto. Se cree que modificando este aspecto la rueda podría un peso de la rueda muy competitivo con las mismas propiedades de rigidez, que son muy elevadas. Hay que tener en cuenta que con este material, la rueda pesa casi el doble que ruedas de alta gama, lo que resulta es lastre muy importante.

13.2 Contexto General

Al comienzo del proyecto se habló de que uno de los principales objetivos era el poder agrupar la etapa de diseño y fabricación dentro un trabajo y con un tiempo de, aproximadamente, 1 año y medio en el cual también se ha tenido que realizar estudios universitarios. Esta tarea ha sido sin duda la más complicada y en un primer momento, cuando se realizó la planificación del trabajo con los tiempos y recursos que se utilizaría en cada apartado, esta planificación resultó errónea. En cambio, conforme el trabajo avanzaba el autor estaba más abierto a asimilar los cambios y problemas que iban surgiendo y poder adoptar la posición más correcta para llegar a una solución dentro del tiempo estimado. Esta sin duda ha sido una de las grandes enseñanzas de este trabajo y por el cual se realizó. Por lo tanto, aunque sin estar listo para poder realizar el desarrollo completo de un producto, ahora si que se tiene la certeza de poder entrar en la coordinación del proceso de creación de un producto.

Analizando el conjunto global del trabajo si que se cree que se ha conseguido el objetivo de agrupar las etapas de diseño y fabricación de un producto y consiguiendo un equilibrio entre las mismas sin tener ninguna noción del proceso.

TRABAJO FUTURO

Una vez acabado este proyecto y analizando que se han cumplido los objetivos marcados se puede decir que esta acabado, pero no es así. Este proyecto se puede considerar como la antesala de muchos otros proyectos menores o de la misma escala.

En el apartado de diseño, con la geometría existente se puede analizar con precisión que ocurre en el sector de la aerodinámica. Analizando las zonas más conflictivas como son las uniones de los diferentes componentes. Incluso se puede realizar un estudio aerodinámico de la rueda en movimiento para poder conocer con mayor exactitud como afecta eso a la turbulencia, y por tanto, a la aerodinámica. En el apartado estructural se puede optimizar la laminación de la rueda, intentando crear nuevas capas o modificando parte de la geometría. Además se podría analizar que ocurría utilizando una gama de materiales más alta a la actual. También sería interesante conocer como se comporta la rueda antes otras fuerzas, o a fatiga o incluso hacer un análisis de vibraciones de la simulando las irregularidades del terreno.

En el apartado de diseño se puede seguir investigando en otro métodos de fabricación también validos como puede ser utilizar un molde cerrado para hacer tubos e introducir aire a presión para conseguir una mejor compactación. Además se pueden mejorar los conceptos de moldes ya existentes y seguir investigando sobre la fabricación de moldes en 3D ya sea o con otros parámetros de fabricación o con otro tipo de materiales.

Una de las cosas que podrían cerrar el círculo de este proceso es realizar la fabricación completa de la rueda, es decir, poder obtener un rueda completa en fibra de carbono. Esto llevaría el estudio de como agujerear y unir los diferentes componentes entre sí con una precisión muy alta porque una vez soldados ya no se pueden desunir. Esto es muy importante porque, las ruedas de fibra de carbono, solo se pueden alinear una vez, no como las convencionales, y si no quedan perfectamente simétricas y con los la rueda quedará descentrada para siempre.

Una vez fabricada la rueda se podrían realizar ensayos para conocer si las propiedades mecánicas reales coinciden con las simuladas. Esto sería realmente sencillo pues la UPV dispone de una máquina de ensayos para flexión, que se podría adaptar para mejor la rigidez lateral de la rueda.

De manera individual, en la fecha en la se finaliza este trabajo, se encuentra seleccionado en la segunda fase de admisión para poder presentarlo en la primera edición del *Cyclitech*, véase ref. [51], donde las empresas referentes en el mundo del ciclismo expondrán sus trabajos de innovación con fibra de carbono.

Bibliografía

- [1] LILY KUO. *"Bicycles are outselling cars in Europe and that might not be just a blip"* en Quartz.
« <http://qz.com/139825/bicycles-are-outselling-cars-in-europe-and-that-might-not-be-just-a-blip/> » [Consulta: 13 Octubre 2014]
- [2] CTC . *"CTC Cycling Statistics"* en CTC. The National Cycling Charity.
« <http://www.ctc.org.uk/resources/ctc-cycling-statistics> » [Consulta: 13 Octubre 2014]
- [3] SUBDIRECCIÓN GENERAL DE ESTADÍSTICA Y ESTUDIOS . *"ANUARIO DE ESTADÍSTICAS DEPORTIVAS 2014 "* en Ministerio de Cultura, Educación y Deporte.
- [4] JAMES HUANG. *"Shimano Dura-Ace Di2 electronic: first ride"* en BikeRadar.
« <http://www.bikeradar.com/news/article/shimano-dura-ace-di2-electronic-first-ride-18283/> » [Consulta: 20 Octubre 2014]
- [5] ANÓNIMO. *"El secreto peor guardado de Sram, grupo electrónico inalámbrico"* en top5bicis.
« <http://www.top5bicis.com/2015/04/SRAM-Wireless.html> » [Consulta: 3 Junio 2015]
- [6] BILL FEIEREISEN. *"Bicycle Racing on the Computer? Modeling and Simulation for a Small Business "* en la Universidad de México. Diciembre 9, 2011.
« http://www.enterprisetech.com/2011/12/09/bicycle_racing_on_the_computer_modeling_and_simulation_for_a_small_business/ » [Consulta: 3 Junio 2015]
- [7] ANÓNIMO. *"History of Scott "* en Scott
« <http://www.scott-sports.com/us/en/company/history/> » [Consulta: 29 Julio 2015]
- [8] WIREDCHOP. *"CYCLING'S A DRAG, BUT IT DOESN'T HAVE TO BE"* en Engineering Sport
« <http://engineeringsport.co.uk/2013/07/11/cyclings-a-drag-but-it-doesnt-have-to-be/> » [Consulta: 29 Julio 2015]
- [9] JINNY NG. *"Finite Element Analysis of a Bicycle Wheel: The Effects of the Number of Spokes on the Radial Stiffness"* en Rensselaer Polytechnic Institute, Hartford, Connecticut. Agosto 2012.

- [10] UCI (1). *"CLARIFICATION GUIDE OF THE UCI TECHNICAL REGULATION"* Artículo nº 1.3.018. Suiza: UCI.
- [11] SIRRIS *"Repport Crash test UCI"* en Liega a Enero de 2007.
- [12] DT SWISS *"DT Swiss Spoke Tension Chart"*, Bienne: Dt Swiss
- [13] BRANDT, JOSH. *"The Bicycle Wheel"* 3º Edición. Palo Alto (California). Avocet.
- [14] C.J. BURGOYNE & R. DILMAGHANIAN (Agosto de 1993). *"Bicycle Wheel as Prestressed Structure"* en Journal of Biomechanical Engineering. Universidad de California.
- [15] M.L. HULL (Agosto de 1999). *"Quantification of Stuctural Loading During Off-Road Cycling"* en Journal of Biomechanical Engineering. Universidad de California.
- [16] ROUES ARTISANALES.COM (Octubre 2008). *"Stiffness test"*
«<http://www.rouesartisanales.com/article-23159755.html>» [Consulta: 20 Junio 2014]
- [17] PAUL LEW. *"WORLDS APART: THE WIND TUNNEL AND THE REAL WORLD"* en ?Reynolds Cycling, LLC
« <http://www.reynoldscycling.com/reynolds/news/Worlds-Apart-the-Wind-Tunnel-and-the-Real-World> » [Consulta: 27 Septiembre 2014]
- [18] ROUES ARTISANALES.COM (Diciembre 2001). *"Full carbon wheels Great wheel test 2011"*
«<http://www.rouesartisanales.com/article-53429272.html>» [Consulta: 20 Junio 2014]
- [19] SAM COLLINS (Octubre 2006). *"Rough around the edges"*
en Racecar Engineering.
- [20] ALEJANDRO MARTINEZ (Julio 2010). *"Resistencia a la Rodadura: pruebas de laboratorio"*
«<http://www.amtriathlon.com/2009/07/resistencia-la-rodadura-pruebas-de.html>» [Consulta: 13 Septiembre 2014]
- [21] ZIPP (Junio 2007). *"Revolutionary Speed"*
en Triathletemag.com
- [22] ANÓNIMO (Julio 2011). *"Various aero wheels from 2011: Wind Resistence"*
«http://www.tour-magazin.de/services/qtr/epaper_4_2011/page104.html» [Consulta: 24 Marzo 2015]
- [23] HARDER, PAUL & ROESSINGH, JORDAN (Septiembre 2011). *"Aerodynamic Development of the Bontrager Aeolus D3 Tubular Wheel Line"*
- [24] PAUL LEW (Marzo 2012). *"The Aerodynamic Wheel Concept of Dispersive Effect Termination and Its Validation in the A2 Wind Tunel"*
en Sandy, Utah.

- [25] ANÓNIMO. *"Dt Swiss Adaptor For 240S Radial Front Hub Black"* en Hollandbikeshop
«<http://en.hollandbikeshop.com/branded-bicycle-parts/dt-swiss-bicycle-parts/dt-swiss-hub-parts/dt-swiss-end-socket/dt-swiss-adaptor-for-240s-radial-front-hub-black/> » [Consulta: 12 Julio 2015]
- [26] ANÓNIMO. *"DT Swiss Ceramic Front Axle Hollow For 190 Center Lock Hub"* en Hollandbikeshop
«<http://en.hollandbikeshop.com/branded-bicycle-parts/dt-swiss-bicycle-parts/dt-swiss-hub-parts/dt-swiss-axle/dt-swiss-ceramic-front-axle-hollow-for-190-center-lock-hub/> » [Consulta: 12 Julio 2015]
- [27] ANÓNIMO. *"Rodamientos para bicicleta / Bike Bearings SKF 61803-2RS"* en Ebay
«http://www.ebay.es/itm/like/260978834150?limghlpsr=true&hlpht=true&ul_noapp=true&hlpv=2&chn=ps&lpid=115&opst̄true&vip̄h̄x̄1̄ » [Consulta: 12 Julio 2015]
- [28] JAMES HUANG. (Diciembre 2010) *"Zipp 404 Carbon Clincher"* en cyclingnews.
« <http://www.cyclingnews.com/features/product-review-zipp-404-carbon-clincher/> » [Consulta: 27 Octubre 2014]
- [29] MATT ALLYN. (Agosto 2012) *"Zipp Launches 202 Firecrest"* en Bicycling.
« <http://www.bicycling.com/bikes-gear/previews/zipp-launches-202-firecrest> » [Consulta: 27 Octubre 2014]
- [30] ROUES ARTISANALES.COM (Noviembre 2008). *"Great wheel test 2008"*
«<http://www.rouesartisanales.com/article-15505311.html>» [Consulta: 20 Junio 2014]
- [31] J.K MOORE (2008). *"Aerodynamic of High Performance Bicycle Wheels"* en Universidad de Canterbury (Inglaterra).
- [32] SRM (27 Agosto 2014). *"VUELTA A ESPAÑA STAGE 18"*
«<http://www.srm.de/news/road-cycling/vuelta-a-espana-stage-18/>» [Consulta: 17 Junio 2015]
- [33] ZORTRAX (10 Julio 2013). *"Zortrax M200"*
«<https://zortrax.com/printers/zortrax-m200/>» [Consulta: 17 Junio 2015]
- [34] CORIMA (24 Octubre 2013). *"Carbon Wheels, Inside CORIMA ! - Au Coeur de CORIMA !"*
«https://www.youtube.com/watch?v=pVYu421oELg&list=PLwGn1t8_M78ndWup52hfoADzw9zoPGeZH&index=13» [Consulta: 22 Junio 2015]
- [35] RESINAS CASTRO . *"Cera Desmoldeante Paste Wiz"*
«http://www.resinascastro.com/fotos/070320185523_GhIc.pdf» [Consulta: 27 Julio 2015]
- [36] PRO LITE (1 Noviembre de 2013). *"Pro Lite Wheel Building Teaser"*
«https://www.youtube.com/watch?v=UrNrg9wi4m8&list=PLwGn1t8_M78ndWup52hfoADzw9zoPGeZH&index=11» [Consulta: 10 Julio 2015]

- [37] SCOTT (19 Marzo de 2013). *"Scott Advert Offers a Detailed View of the Carbon Fiber Manufacturing Process "*
«https://www.youtube.com/watch?v=LJ46J3NQIVg&list=PLwGn1t8_M78ndWup52hfoADzw9zoPGeZH&index=12» [Consulta: 10 Julio 2015]
- [38] EASTON (15 Julio de 2012). *"Easton Cycling: BIRTH OF A CARBON WHEEL "*
«https://www.youtube.com/watch?v=ZxTWSTo2_4Q&list=PLwGn1t8_M78ndWup52hfoADzw9zoPGeZH&index=7» [Consulta: 10 Julio 2015]
- [39] MAD FIBER (11 Agosto de 2012). *"How Mad Fiber carbon wheels are made "*
«https://www.youtube.com/watch?v=bSZF8OJGqbM&list=PLwGn1t8_M78ndWup52hfoADzw9zoPGeZH&index=10» [Consulta: 10 Julio 2015]
- [40] WIKIPEDIA (23 Septiembre 2013). *"Fibra de Carbono "*
«https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_carbono» [Consulta: 13 Septiembre 2014]
- [41] PAUL LEW *"Understanding Wheel Dynamics: The Influence of Fiber Angles on Performance Characteristics "*
«<http://www.reynoldscycling.com/reynolds/news/Understanding-Wheel-Dynamics-The-Influence-of-Fiber-Angles-on-Performance-Characteristics>» [Consulta: 2 Marzo 2015]
- [42] DIMITRIJE MILOVICH (2 Julio 2012). *"How much lighter is carbon fiber than steel and aluminium?"*
«<https://www.quora.com/How-much-lighter-is-carbon-fiber-than-steel-and-aluminium>» [Consulta: 23 Mayo 2015]
- [43] RESINAS CASTRO
«<https://www.resinascastro.com>» [Consulta: 13 Agosto 2015]
- [44] GURIT. *"http://www.gurit.com/files/documents/sparpregv16pdf.pdf"*
«<http://www.gurit.com/files/documents/st-95v0pdf.pdf>» [Consulta: 11 Mayo 2015]
- [45] GURIT. *"ST 95 Structural Sprint General Datasheet"*
«<http://www.gurit.com/files/documents/st-95v0pdf.pdf>» [Consulta: 11 Mayo 2015]
- [46] MERCAT, J.P. & SAILLET, B. *"Rim or rim portion made of composite material."*, num. US 13/181,186, 19 Enero 2012.
- [47] HUNG LIN, S. *"Composite material wheel rim structure ."*, num. US 13/602,441, 27 Diciembre 2012.
- [48] HUNG LIN, S. *"Composite rim and manufacture method thereof ."*, num. US 13/602,441, 27 Diciembre 2012.
- [49] ORDING, A. & POERTNER, J. R. *"Composite bicycle rim with seamless braking surface."*, num. US 10/306,750, 31 Enero 2006.
- [50] MEGGIOLAN, M. & SACCARDO, P. *"Rim for a bicycle wheel and bicycle wheel comprising such a rim."*, num. US 12/268,012, 11 Marzo 2014.
- [51] JEC COMPOSITE *"CYCLITECH"*
«<http://www.jeccomposites.com/events/composites-agenda/cyclitech>» [Consulta: 23 Agosto 2015]

- [52] NX SIEMENS *"Composite Laminate Advanced Simulation"*
USC Corp., 2012.

Anexos

.1 Planos

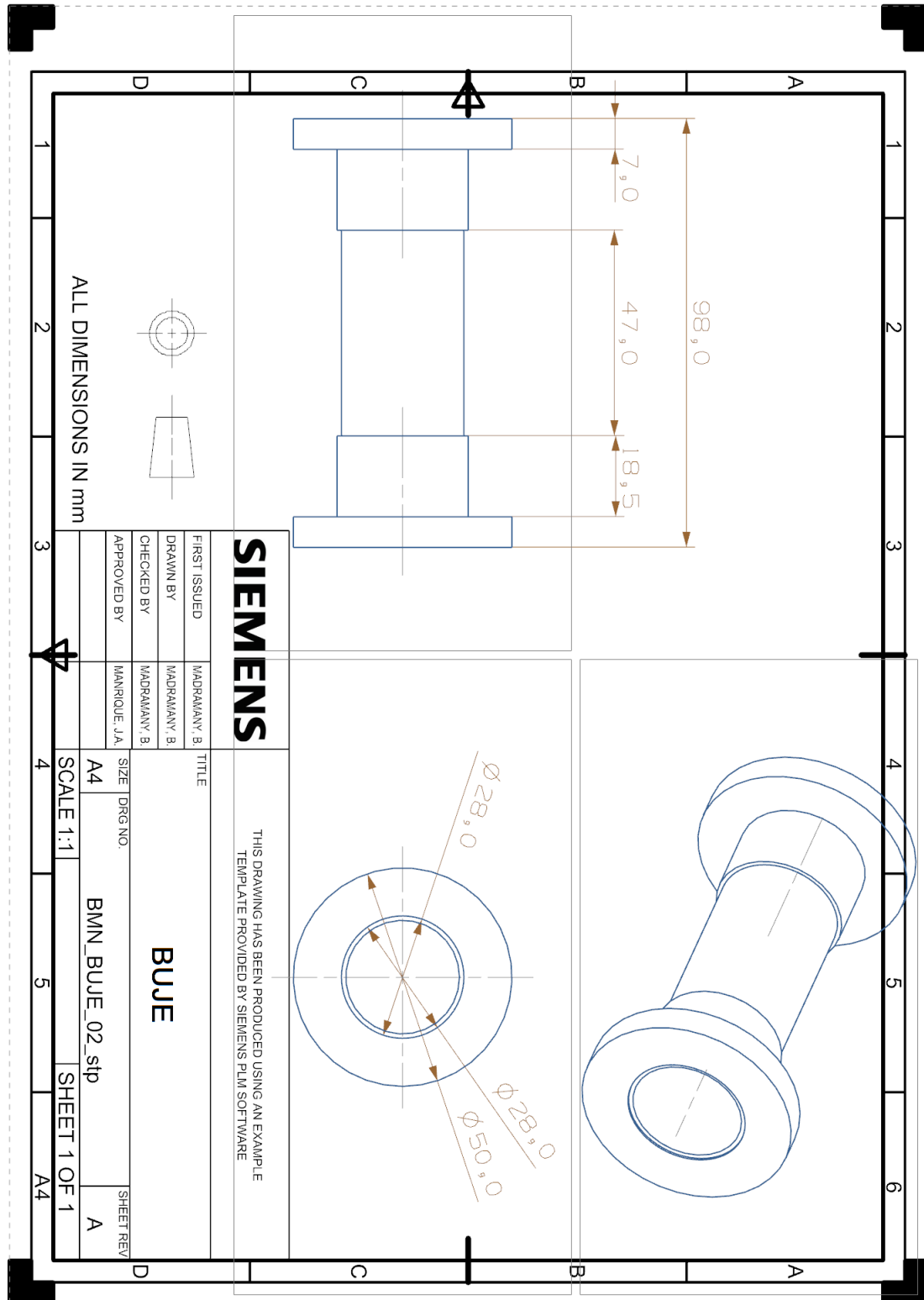


Figura 1: Planos. Buje. (Fuente: Propia)

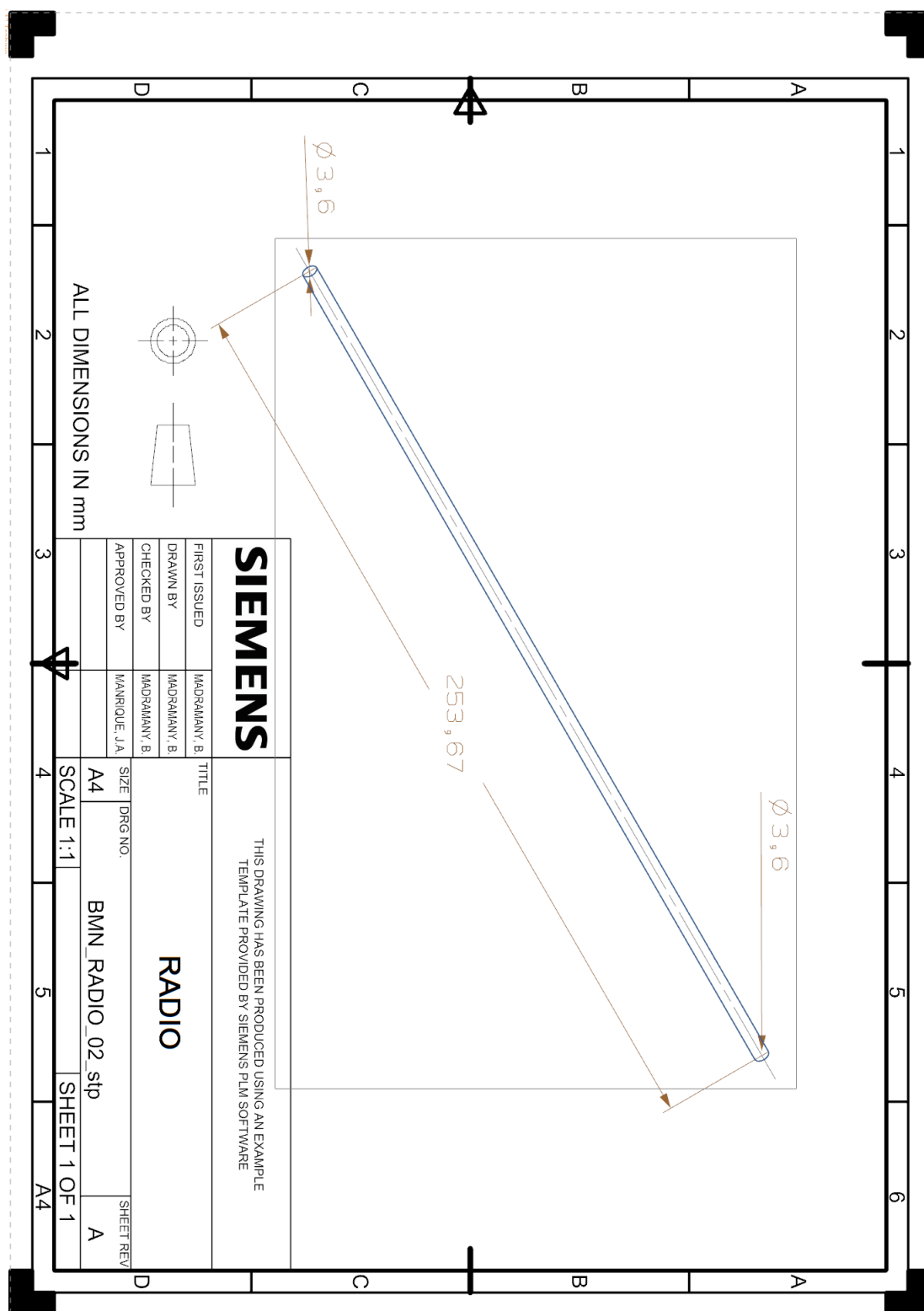


Figura 2: Planos. Radio. (Fuente: Propia)

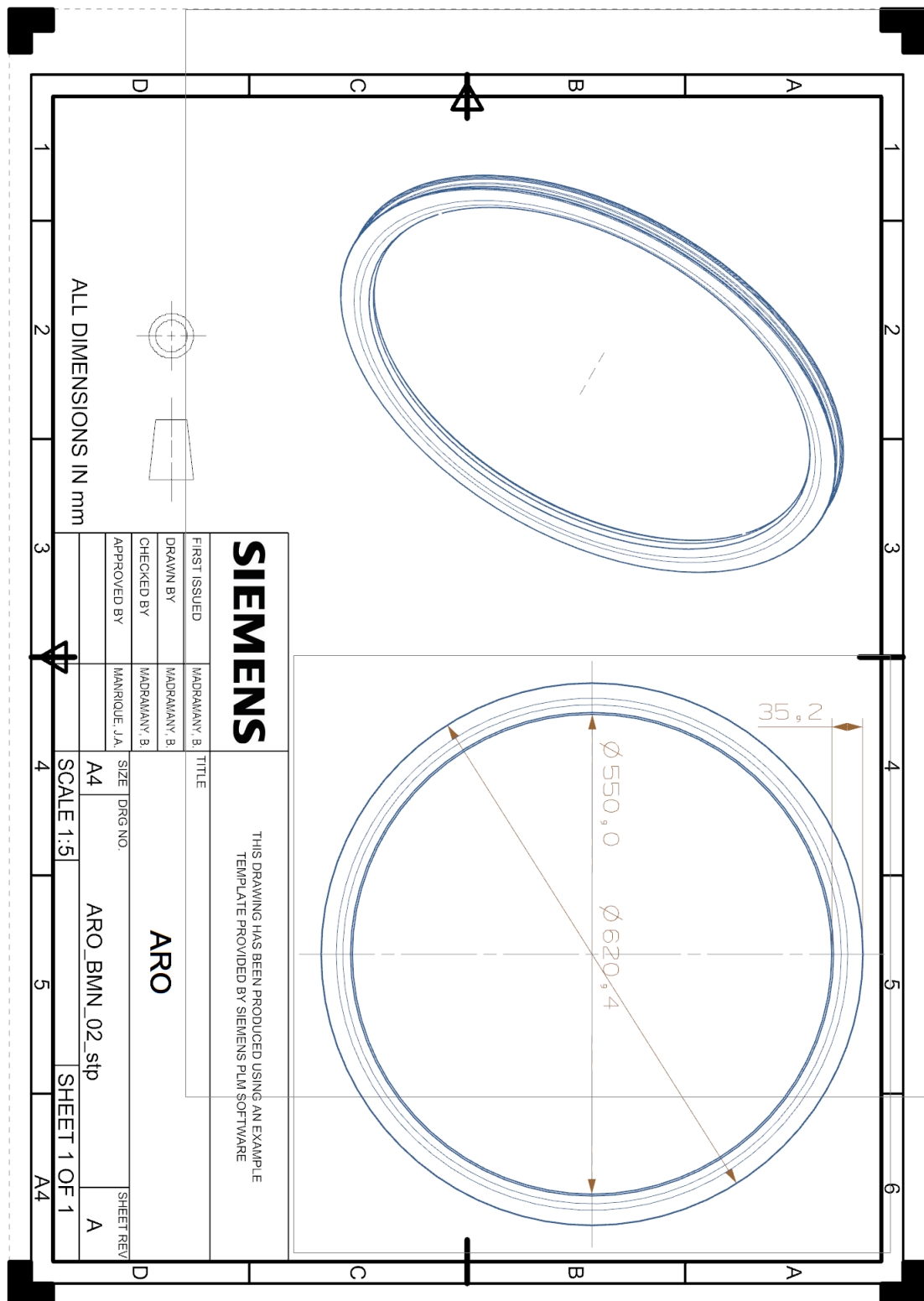


Figura 3: Planos. Aro. (Fuente: Propia)

