



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

Diseño y reestyling de discos de pesas olímpicas para halterofilia y fitness

MEMORIA PRESENTADA POR:

Ana Medina Costa

GRADO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Tutores:

Dr. Octavio ángel Fenollar Gimeno

Dr. Néstor Montañés Muñoz

Convocatoria de defensa: Julio 2019

RESUMEN

El presente Trabajo Final de Grado consiste en el diseño, cálculo y mejora de un disco para halterofilia y fitness más resistente a impactos. Se han definido los criterios de diseño y los cálculos de cada uno de los elementos que lo componen, el inserto metálico y el disco de caucho. Se ha llevado a cabo el estudio de los materiales a utilizar para su optimización en términos de resistencia, especialmente a impacto. Para ello se ha desarrollado una simulación en el software de elementos finitos que ofrece el software SolidWorks. Con todos los estudios realizados se muestra una comparativa de los resultados obtenidos en todos los ensayos, así como del precio de cada material y otras condiciones. Finalmente se ha justificado el material escogido y sus procesos de fabricación, concluyendo con un estudio económico del diseño final y los diversos factores del entorno.

PALABRAS CLAVE

“halterofilia” ; “fitness” ; “simulación” ; “pesas” ; “discos”

SUMMARY

The present Final Degree Project aims to the design, calculation and improvement of a weightlifting and fitness disk with high impact strength. Design and calculations criteria for both metal insert and disc elements have been defined. A deep study of the materials has been carried out in order to figure out their use in terms of resistance, especially on impact behavior. To achieve this, diverse simulations using Finite Element Method within the commercial software “Solid Works©” have been conducted. After carrying out several experimental tests, a comparison of the test results was undertaken, including the final cost for each material as well as other interesting conditions. Finally, one material from all above materials has been chosen including the best fitting manufacturing process, justified by an economic study concerning the final design and important environmental factors.

KEY WORDS

“weightlifting” ; “fitness” ; “simulation” ; “weight” ; “plates”

RESUM

El present Treball Final de Grau consisteix en el disseny, càlcul i millora d'un disc per a halterofília i fitness més resistent a impactes. S'han definit els criteris de disseny i els càlculs de cada un dels elements que ho componen, l'inserit metàl·lic i el disc de cautxú. S'ha dut a terme l'estudi dels materials a utilitzar per a la seua optimització en termes de resistència, especialment a impacte. Per a això s'ha desenvolupat una simulació en el programa d'elements finits que ofereix el software SolidWorks. Amb tots els estudis realitzats es mostra una comparativa dels resultats obtinguts en tots els assajos, així com del preu de cada material i altres condicions. Finalment s'ha justificat el material triat i els seus processos de fabricació, conclouent amb un estudi econòmic del disseny final i els diversos factors de l'entorn.

PARAULES CLAU

“halterofília” ; “fitness” ; “simulació” ; “peses” ; “discs”

ÍNDICE

Resumen.....	2
Summary	2
Resum.....	3
Abreviaturas	12
1. Objetivo general.....	13
2. Objetivos específicos.....	13
3. Motivación/justificación.....	14
4. Normativa.....	14
5. Estudio de mercado	15
5.1 Oferta.....	15
5.2 Demanda	17
5.3 Nichos de mercado.....	18
6. Estado del arte	20
6.1 Introducción	20
6.2 Halterofilia	20
6.2.1 Historia.....	20
6.2.2 Levantamientos	21
7. Material.....	24
7.1 Discos.....	24
7.1.2 Diferencias entre discos de competición y entrenamiento.....	27
7.2 Barra olímpica.....	32
7.3 Collarines	34
7.4 Normas de carga.....	34
8. Antecedentes	35
8.1 Materiales.....	38
8.1.2 Caucho vulcanizado	38
8.1.3 Caucho sbr.....	41
9. Problemática	43

10. Desarrollo del proyecto.....	46
10.1 Diseño barra	46
10.2 Diseño collarín	48
10.3 Diseño disco.....	49
11. Presentación de opciones para el material del disco.....	51
11.1 Ensayos laboratorio y caracterización	59
12. Estudio y definición de estados tensionales.....	77
12.1 Simulación mediante fem.....	79
12.1.1 Aplicación de los materiales	80
12.1.2 Justificación de la elección de los estudios.....	81
13. Diseño final	101
14. Estudio y definición de condiciones de contorno.	111
15. Fabricación	113
16. Estudio económico	119
17. Bibliografía.....	122

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración I - Mapa de España con los centros registrados en Crossfit.....	18
Ilustración II - Mapa mundial con los centros registrados en Crossfit.....	19
Ilustración III - Movimientos de la arrancada paso a paso.....	22
Ilustración IV - Movimientos de la cargada paso a paso.....	22
Ilustración V - Movimientos del Jerk paso a paso.....	23
Ilustración VI - Discos de competición de 10, 15, 20 y 25 kg de la marca Powerkan.	27
Ilustración VII - Discos de entrenamiento de 25, 20, 15, 10 y 5 kg de las marcas Powerkan (1), SingularWod (2) y Hatlex (3).	28
Ilustración VIII - Discos de competición de la marca SingularWod.....	29
Ilustración IX - Discos de entrenamiento de la marca SingularWod negros y a color.	29
Ilustración X - Diferentes espesores de los tipos de discos.....	30
Ilustración XI - Partes principales de una barra olímpica.....	32
Ilustración XII - Collarines para barra olímpica.....	34
Ilustración XIII - Mujeres en la antigua Roma practicando halterofilia.....	35
Ilustración XIV - “Halteras” utilizadas en los juegos de la Antigua Grecia.....	36
Ilustración XV - Frederick Winters en los Juegos Olímpicos de San Luis (1904).	36
Ilustración XVI - Frederick Winters en los Juegos Olímpicos de San Luis (1904).	37
Ilustración XVII - Gráfica comparativa esfuerzo (psi, Mpa) y deformación (%) del caucho natural y caucho natural vulcanizado.....	38
Ilustración XVIII - Disco Hatlex de 10kg desgastado por el núcleo.....	44
Ilustración XIX - Disco Capital Sports de 2,5kg con fractura radial.....	45
Ilustración XX - Fabricantes y modelos de las barras testadas.....	46
Ilustración XXI - Prototipo barra realizado con SolidWorks 2018.....	48
Ilustración XXII - Prototipo collarín realizado con SolidWorks 2018.....	49
Ilustración XXIII - Prototipo disco realizado con SolidWorks 2018.....	50
Ilustración XXIV - Báscula.....	59
Ilustración XXV - Moldes de probetas.....	60
Ilustración XXVI - Recipiente metálico.....	60

Ilustración XXVII - Horno TCN 115 Plus parte exterior.....	61
Ilustración XXVIII - Horno TCN 115 Plus parte interior.....	61
Ilustración XXIX - Máquina ensayo a tracción Ibertest	62
Ilustración XXX - Aceite de linaza epoxidado TRAQUISA.....	63
Ilustración XXXI - Colorante negro	63
Ilustración XXXII - Yeso en polvo	64
Ilustración XXXIII - Partículas metálicas	64
Ilustración XXXIV - Ilustración XXXV - Varilla agitadora vidrio	64
Ilustración XXXV - Fibras de basalto.....	65
Ilustración XXXVI - Fibras de coco	65
Ilustración XXXVII - PVC en polvo	65
Ilustración XXXVIII - Mezclado de la matriz.....	66
Ilustración XXXIX - Mezcla homogénea de la matriz.....	66
Ilustración XL - Báscula con las partículas metálicas.....	67
Ilustración XLI - Mezcla de los materiales con la matriz.	68
Ilustración XLII - Mezcla de los materiales con la matriz II.	68
Ilustración XLIII - Molde de las probetas de plastisol con partículas metálicas.....	69
Ilustración XLIV - Molde de las probetas de plastisol con partículas metálicas II.....	69
Ilustración XLV - Probetas de plastisol + 30% partículas metálicas	70
Ilustración XLVI - Probetas de plastisol + 30% de fibras de basalto.....	71
Ilustración XLVII - Probetas de plastisol + 15% partículas metálicas +15% de fibras de basalto.....	72
Ilustración XLVIII - Probetas de plastisol + 30% fibras de coco.....	73
Ilustración XLIX - Máquina de tracción ensayando las probetas.	74
Ilustración L - Probetas ensayadas de plastisol + 30% PM, plastisol + 15%PM + 15%FB y plastisol + 30%FC.....	74
Ilustración LI - Añadir nuevos materiales a SolidWorks 2018.....	80
Ilustración LII - Añadir nuevos materiales a SolidWorks 2018 II.....	81
Ilustración LIII - Estudio de caída del prototipo.	82
Ilustración LIV - Configuraciones del estudio de caída del prototipo.	82
Ilustración LV - Control de malla del prototipo.....	83

Ilustración LVI - Configuración del mallado del prototipo.	83
Ilustración LVII - Mallado del prototipo en caída.	84
Ilustración LVIII - Dirección de la caída.	84
Ilustración LIX - Configuración de análisis de caída.	85
Ilustración LX - Resultados simulaciones caída del prototipo.	86
Ilustración LXI - Desplazamientos prototipo de plastisol + 30% PM en simulación de caída.	86
Ilustración LXII - Tensión de Von Misses prototipo de plastisol + 30% PM en simulación de caída.	87
Ilustración LXIII - Deformaciones unitarias prototipo de plastisol + 30% PM en simulación de caída.	87
Ilustración LXIV - Prototipo modificado para simulaciones de flexión.	90
Ilustración LXV - Ley de conversión de la energía.	91
Ilustración LXVI - Anclajes fijos para la simulación flexión.	92
Ilustración LXVII - Área zona redondeada exterior del núcleo del prototipo.	93
Ilustración LXVIII - Área zona redondeada interior del núcleo del prototipo.	93
Ilustración LXIX - Aplicación de fuerzas para la simulación de flexión.	94
Ilustración LXX - Mallado del prototipo en flexión.	95
Ilustración LXXI - Tensión de Von Misses prototipo de plastisol + 30% PM en simulación en flexión.	95
Ilustración LXXII - Desplazamiento prototipo de plastisol + 30% PM en simulación en flexión.	96
Ilustración LXXIII - Deformación unitaria prototipo de plastisol + 30% PM en simulación en flexión.	96
Ilustración LXXIV - Vista detalle tensión de Von Misses en disco plastisol + 30% partículas metálicas.	97
Ilustración LXXV - Diseño final núcleo de acero cromado.	101
Ilustración LXXVI - Diseño final del disco de caucho vulcanizado con el ensamblaje del núcleo.	102
Ilustración LXXVII - Diseño final del disco de plastisol con partículas metálicas y fibra de basalto con el ensamblaje del núcleo.	103
Ilustración LXXVIII - Tensión de Von Misses del diseño final del disco de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto en caída.	103

Il·lustració LXXIX - Desplazamiento del diseño final del disco de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto en caída.	104
Il·lustració LXXX - Desplazamientos unitarios del diseño final del disco de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto en caída.	104
Il·lustració LXXXI - Tensión de Von Mises del diseño final del disco de caucho vulcanizado en caída.	105
Il·lustració LXXXII - Desplazamientos del diseño final del disco de caucho vulcanizado en caída.	105
Il·lustració LXXXIII - Desplazamientos unitarios del diseño final del disco de caucho vulcanizado en caída.	106
Il·lustració LXXXIV - Tensión de Von Mises del diseño final del disco de caucho vulcanizado en flexión.	107
Il·lustració LXXXV - Desplazamientos del diseño final del disco de caucho vulcanizado en flexión.	107
Il·lustració LXXXVI - Desplazamientos unitarios del diseño final del disco de caucho vulcanizado en flexión.	108
Il·lustració LXXXVII - Tensión de Von Mises del diseño final del disco de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto en flexión.	108
Il·lustració LXXXVIII - Desplazamiento del diseño final del disco de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto en flexión.	109
Il·lustració LXXXIX - Desplazamientos unitarios del diseño final del disco de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto en flexión.	109
Il·lustració XC - Ensamblaje conjunto con los discos de caucho vulcanizado.	111
Il·lustració XCI - Ensamblaje conjunto con los discos de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto.	111
Il·lustració XCII - Ensamblaje conjunto con máximos discos de caucho vulcanizado.	112
Il·lustració XCIII - Ensamblaje conjunto con máximos discos de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto.	112
Il·lustració XCIV - Posibles procesos para el caucho.	113
Il·lustració XCV - Esquema del proceso de moldeo por inyección.	114
Il·lustració XCVI - Inyectora de termoplásticos Arburg GmbH.	116
Il·lustració XCVII - Esquema proceso de moldeo por compresión.	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I - Características de 5 fabricantes de discos de competición según catálogos.	15
Tabla II - Características de 5 fabricantes de bumpers según catálogos.	16
Tabla III - Comparativa número de caídas los discos según fabricante	17
Tabla IV - Clasificación discos de competición según peso y color.	24
Tabla V - Clasificación discos de competición según masa y color.	24
Tabla VI - Tamaños de los discos según su masa.	26
Tabla VII - Diferencias de tipos de discos de entrenamiento.....	30
Tabla VIII - Resumen medidas y pesos oficiales barra olímpica para categoría masculina y femenina.	34
Tabla IX - Impacto medioambiental de la producción de materia prima y procesado de material del caucho.	40
Tabla X - Producción mundial caucho.	41
Tabla XI - Puntos fuertes y limitaciones del caucho SBR.....	41
Tabla XII - Comparativa procesabilidad caucho natural y SBR.....	41
Tabla XIII - Diferencias entre el caucho SBR y NR	42
Tabla XIV - Enumeración de desperfectos comunes en bumpers y sus orígenes.	43
Tabla XV - Características ELEIKO IWF Weightlifting Competition Bar.	47
Tabla XVI - Dimensiones prototipos del collarín.	48
Tabla XVII - Dimensiones fijas y variables del disco para diseño.	49
Tabla XVIII - Dimensiones prototipos del disco.....	50
Tabla XIX - Características técnicas del equipo TGA Mettler-Toledo TGA/SDTA 851.	52
Tabla XX - Características técnicas del equipo DSC Mettler-Toledo 821.	53
Tabla XXI - Condiciones de ensayo utilizadas en la Calorimetría Diferencia de Barrido (DSC). ..	53
Tabla XXII - Características técnicas del equipo TGA Mettler-Toledo TGA/SDTA 851.	54
Tabla XXIII - Condiciones de ensayo utilizadas en la Caracterización Termogravimétrica (TGA).	54
Tabla XXIV - Ventajas fibras naturales.....	57
Tabla XXV - Comparativa de características de fibras naturales.....	58
Tabla XXVI - Caracterización de los materiales.	75

Tabla XXVII - Propiedades caucho vulcanizado y caucho vulcanizado con partículas mecánicas.	75
Tabla XXVIII - Cálculo de volúmenes de cada prototipo.	77
Tabla XXIX - Cálculo de espesores de cada prototipo.	78
Tabla XXX - Comparativa resultados simulaciones de caída en SolidWorks 2018.	88
Tabla XXXI - Cálculo del factor de seguridad para caída.	89
Tabla XXXII - Comparativa resultados simulaciones de flexión en SolidWorks 2018.	97
Tabla XXXIII - Cálculo del factor de seguridad para flexión.	98
Tabla XXXIV - Comparativa factores de seguridad y precios de cada prototipo.	99
Tabla XXXV - Dimensiones del disco de caucho vulcanizado	101
Tabla XXXVI - Dimensiones del disco de PL + 15% PM + 15% FB	102
Tabla XXXVII - Comparativa factor de seguridad entre diseño final y prototipo en caída.	106
Tabla XXXVIII - Comparativa factor de seguridad entre diseño final y prototipo en flexión. ..	110
Tabla XXXIX - Aptitudes del moldeo por inyección en termoestables	115
Tabla XL - Aptitudes del moldeo por inyección en termoestables.....	118
Tabla XLI - Datos sobre los discos de plastisol con fibras de carbono y partículas metálica. ...	119
Tabla XLII - Inversión inicial.	119
Tabla XLIII - Ingresos anuales	120
Tabla XLIV - Gastos anuales.....	120
Tabla XLV - Flujos ingresos, gastos y beneficios.....	120
Tabla XLVI - V N y TIR.....	121

ABREVIATURAS

<i>E</i>	Módulo elástico
<i>v</i>	Coefficiente de Poisson
<i>G</i>	Módulo cortante
ρ	Densidad de masa
<i>X_t</i>	Límite a tracción
<i>X_c</i>	Límite de compresión
<i>FEM</i>	Método de los elementos finitos
<i>MPa</i>	Mega Pascales
<i>URES</i>	Desplazamiento
<i>ESTRN</i>	Deformación unitaria
<i>NR</i>	Caucho natural
<i>PL</i>	Plastisol
<i>FC</i>	Fibra de coco
<i>PM</i>	Partículas metálicas
<i>PB</i>	Partículas de basalto
<i>VULC</i>	Caucho vulcanizado
<i>SBR</i>	Caucho estireno-butadieno

1. OBJETIVO GENERAL

Este Trabajo Final de Grado se ha llevado a cabo con la finalidad de rediseñar discos de halterofilia, mejorando sus prestaciones para lograr una mayor resistencia y duración. Mediante pequeñas modificaciones en los aditivos del material y en el diseño del disco, se pretende conseguir considerables mejoras y abaratamiento de costes dentro de la viabilidad.

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Análisis del entorno actual.

Estudio de materiales y diseño actual.

Búsqueda de nuevos materiales.

Diseño del prototipo.

Simulación por elementos finitos del prototipo.

Análisis de resultados de los ensayos.

Diseño final del prototipo.

Optimización del diseño.

Adecuar los procesos de fabricación al nuevo diseño y material.

Realización de estudio económico.

3. MOTIVACIÓN/JUSTIFICACIÓN

Tras varios años de haber conocido diferentes centros de entrenamiento Crossfit (conocidos como box de Crossfit), he podido observar que el material que en ellos se utiliza con el uso y paso del tiempo tiende a desgastarse y en muchos casos acaba por romperse. Esto supone un alto coste para los dueños ya que se trata de material muy específico, que solo se encuentran en proveedores especializados y con un precio bastante elevado.

Uno de los elementos que más sufre sin duda son los discos de entrenamiento. Estos discos se colocan en las barras para realizar algunos ejercicios y, tras ser ejecutados, se deja caer la barra al suelo, golpeándose contra éste y muchas veces desde alturas importantes (por debajo de las rodillas, desde la altura de los hombros o por encima de la cabeza, según el ejercicio). Por este motivo, decidí empezar con este proyecto. Poder encontrar una mejora en el rendimiento de estos discos podría suponer un gran ahorro para todos los Box que así lo quieran.

4. NORMATIVA

Para la realización de este Trabajo Final de Grado no se ha requerido la aplicación de ninguna normativa específica, pero sí que se ha consultado el reglamento de halterofilia y la norma **ISO:527** en lo relativo a los ensayos de tracción para caracterizar mecánicamente la serie de nuevos materiales propuestos para la fabricación de los discos.

5. ESTUDIO DE MERCADO

Dado que aunque este proyecto sea puramente académico, se puede plantear un estudio de mercado para orientar a cerca de la viabilidad de éste.

5.1 OFERTA

Actualmente existe una gran variedad de marcas que se dedican a producir y comercializar discos de halterofilia. Para conocer un poco acerca de ella, se han seleccionado 5 de las más importantes y se han elaborado estos resúmenes a partir de la información que da cada fabricante de sus discos.

Para simplificar, se ha realizado las tablas para los discos de 10kg, ya que son estos unos de los más problemáticos.

	Modelo	Material		Dimensiones			Precio unidad	Garantía
		Disco	Anillo	Diámetro interior	Diámetro exterior	Ancho		
Eleiko	Eleiko IWF Weightlifting Competition Discs	Goma SBR	Acero zincado	50,4 mm	450 mm	34 mm	128 €	5 años
Singular Wod	Discos Olímpicos SingularWod	Caucho virgen	Acero cromado	50,5 mm	450 mm	30 mm	114 €	3 años
BOXPT	Disco Competición	Goma	Acero calibrado	50,4 mm	450 mm	32 mm	91 €	-
ATX	50-HQRB-C-1000	Caucho alta calidad	Acero inox.	50,5 mm	450 mm	27 mm	112 €	3 años
Hatlex	Competition bumpers	Goma virgen y aditivos	Acero inox.	50,4 mm	450 mm	29 mm	132 €	5 años

Tabla 1 - Características de 5 fabricantes de discos de competición según catálogos.

	Modelo	Material		Dimensiones			Precio unidad	Garantía
		Disco	Anillo	Diámetro interior	Diámetro exterior	Ancho		
Eleiko	Eleiko XF Bumpers	Goma reciclada	Acero inox.	50,5 mm	450 mm	58 mm	48 €	1 año
Singular Wod	Discos Training Negro	Caucho virgen de alta calidad	Acero zincado	50,4 mm	450 mm	46 mm	45 €	2 años
BOXPT	Disco Hi-Temp	Caucho vulcanizado reciclado	Acero inox.	50,3 mm	450 mm	57 mm	43 €	-
ATX	50-ATX-GB	Caucho alta calidad	Acero inox.	50,8 mm	450 mm	46 mm	38 €	2 años
Hatlex	Training black bumper plates	Caucho virgen y aditivos	Acero inox.	50,5 mm	450 mm	48 mm	49 €	1 año

Tabla II - Características de 5 fabricantes de bumpers según catálogos.

Por otra parte, es importante conocer el número de caídas que soportan los discos. Algunos fabricantes aportan este dato en sus catálogos, lo que ayuda a tener una idea de la duración que pueden tener éstos, pero hay que tener en cuenta que es de manera orientativa, ya que no especifican para qué alturas ni condiciones de suelo se han calculado.

Estimación de caídas al día

Resulta interesante estimar el número de caídas al día aproximadas que puede tener cada disco. Este dato permite tener una idea de la duración en tiempo que pueden tener los discos, según aseguran sus fabricantes:

Condiciones

- En un Box se estima una media de 6 clases al día
- En cada clase puede haber aproximadamente 20 caídas de discos (por persona)

$$6 \text{ clases/día} \times 20 \text{ caídas/clase} = 120 \text{ caídas por día (cada disco)}$$

Se suponen 5 días a la semana de clases, en total 30 clases aproximadamente a la semana.

Según algunos fabricantes, para probar la durabilidad de los discos les realizan ensayos en bancos de pruebas, de los cuales obtienen datos sobre la cantidad de caídas que soportan. Con aquellos fabricantes que aportan públicamente este dato, se ha elaborado la siguiente tabla sobre duración de los discos y la estimación de semanas aproximadas:

	COMPETICIÓN		ENTRENAMIENTO	
	Caídas	Semanas	Caídas	Semanas
Eleiko	-	-	-	-
Singular Wod	-	-	-	-
BOXPT	50.000	83	30.000	50
ATX	+30.000	+50	+20.000	+33
HATLEX	+10.000	+16	-	-

Tabla III - Comparativa número de caídas los discos según fabricante

5.2 DEMANDA

Este producto estaría enfocado a todos los Box de CrossFit que existen actualmente y futuros proyectos de estos, por tanto la demanda que se pueda prever es muy amplia. Los fabricantes de este producto, ofrecen de media una garantía de 18 meses (o entre 1 y 2 años) no incluyéndose en la garantía el desgaste normal por uso ni por mal uso de los mismos, por lo que sería previsible que todos los Box cada año renovarían la flota de discos de entrenamiento además de los nuevos centros que se abrieran cada año.

5.3 NICHOS DE MERCADO

Según datos de la página oficial de Crossfit, entre 2017 y 2018 el número de Box de Crossfit en España aumentó un 19% y entre 2018 y 2019 el aumento fue de un 23%, lo que hacen un total de 474 boxes oficiales afiliados a la marca en nuestro país a día de hoy.



Ilustración 1 - Mapa de España con los centros registrados en Crossfit.

Si en España la cifra es significativa, en el resto del mundo la acogida también es bastante relevante, según Crossfit Oficial, hay más de 13.000 centros de Crossfit repartidos por todo el mundo y en aumento cada año.



Ilustración II - Mapa mundial con los centros registrados en Crossfit.

Con esto se puede afirmar que es un sector en auge y en constante crecimiento, lo cual hace que aunque sea un sector bastante explotado, también sea una oportunidad de la cual obtener algún beneficio.

6. ESTADO DEL ARTE

6.1 INTRODUCCIÓN

Crossfit es una marca que se registró en el año 2000 en E.E.U.U. dándose a conocer como una nueva forma de entrenamiento y que en pocos años ha ido revolucionando el mundo del fitness tal y como se conocía hasta el momento. Éste es un deporte que ha ido ganando adeptos día tras día hasta convertirse en uno de los deportes más practicados del planeta. Crossfit se define como un método de entrenamiento funcional que combina fuerza con acondicionamiento físico a alta intensidad. Dentro de este deporte se incluyen varias disciplinas como strongman, gimnásticos o halterofilia. Este proyecto va a centrarse en esta última, la halterofilia ya que es en la cual se maneja el material del que trata este TFG.

6.2 HALTEROFILIA

6.2.1 HISTORIA

El levantamiento de pesas es uno de los deportes más antiguos que se conoce. Se tiene constancia de su práctica entorno al año 3600 a.C. en China, donde los soldados lo usaban como entrenamiento militar. Más adelante, Grecia sentó las bases de este deporte, proporcionándole nombre, halterofilia, que sigue siendo usado en la actualidad. Con el paso del tiempo, la práctica de este deporte fue extendiéndose por Europa. A partir del siglo XIX, incluso comenzaron a realizarse exhibiciones de levantamiento de pesas en tabernas y circos y posteriormente, se organizaron competiciones entre clubes de halterofilia.

En las Olimpiadas de 1896 (Atenas), este deporte fue incluido por primera vez como deporte olímpico. Tras varios años de irregularidad, su incorporación definitiva a los Juegos Olímpicos fue en Amberes 1920, donde además se incorporaron subcategorías según el peso corporal de los atletas. En cuanto a la categoría femenina, no comenzaron a realizarse campeonatos hasta 1987 y en 1997 el Comité Olímpico Internacional aprobó la incorporación de la categoría femenina a los Juegos Olímpicos. Actualmente las categorías se dividen según el peso corporal: la masculina consta de 8 subcategorías y la categoría femenina de 7 subcategorías.

Por otra parte, cabe destacar la creación de la federación internacional de levantamiento de peso (IWF) en 1905. Esta federación se ha venido encargando desde su creación y hasta la actualidad de regir las normas de halterofilia a nivel mundial. Además, está reconocida por el COI (Comité Olímpico Internacional) como único organismo que lleva el control sobre este deporte.

6.2.2 LEVANTAMIENTOS

La halterofilia se basa principalmente en tres movimientos: arrancada, cargada y jerk. Estos dos últimos se realizan consecutivamente, dando lugar a un ejercicio llamado 2 tiempos. Por lo tanto, la IWF solo reconoce estos dos ejercicios:

- Arrancada
- 2 tiempos

Ambos son ejercicios poliarticulares y requieren de una gran técnica y potencia por parte del atleta que la ejecuta.

ARRANCADA

El atleta se coloca centrado detrás de la barra (que previamente ha sido cargada con discos) y sujeta la barra en la posición inicial: agarre prono (palmas hacia abajo), brazos extendidos y abiertos a la altura de las marcas de agarre de la barra, piernas flexionadas (abiertas aproximadamente a la anchura de las caderas) y mirada al frente. El movimiento se inicia con un tirón de la barra, la cual debe deslizarse a lo largo de los muslos y termina con la barra por encima de la cabeza con los brazos totalmente estirados, espalda recta y en posición de cuclillas. La ejecución termina cuando el atleta recupera la posición y queda de pie con los brazos y las piernas totalmente estirados y la barra sigue manteniéndose alineada con el cuerpo por encima de la cabeza. La idea es que en toda la trayectoria del ejercicio la barra dibuje una línea lo más recta y vertical posible.

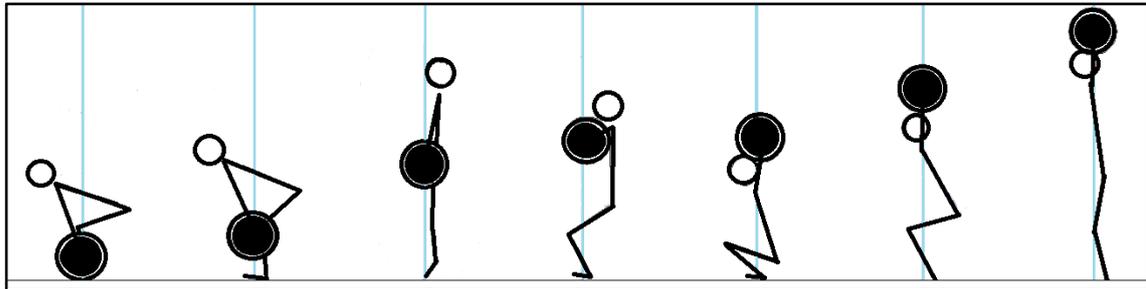


Ilustración III - Movimientos de la arrancada paso a paso

DOS TIEMPOS

Este ejercicio consta de dos partes, primera parte: Cargada, segunda parte: Jerk.

Dos tiempos primera parte. Cargada

El atleta se coloca centrado detrás de la barra (que previamente ha sido cargada con discos) y sujeta la barra en la posición inicial: agarre prono (palmas hacia abajo), brazos extendidos y abiertos a la anchura de las caderas, piernas flexionadas (abiertas aproximadamente a la anchura de las caderas) y mirada al frente. El movimiento se inicia con un tirón de la barra, la cual debe deslizarse a lo largo de los muslos y termina con la barra apoyada sobre los hombros o clavículas, los brazos flexionados totalmente sujetando la barra y las piernas flexionadas en posición de cuclillas. A esta última fase se le denomina "recepción".

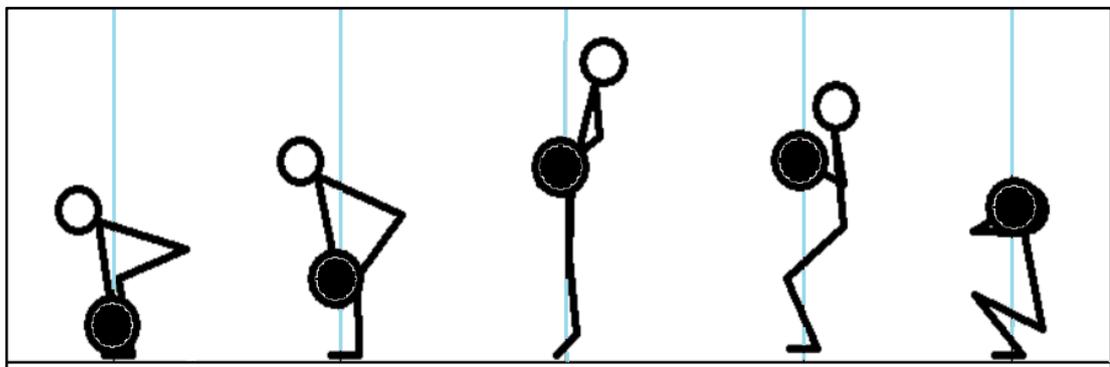


Ilustración IV - Movimientos de la cargada paso a paso

Dos tiempos segunda parte. Jerk

El atleta deberá permanecer inmóvil tras realizar la cargada. El siguiente movimiento es levantar la barra hasta encima de la cabeza con los brazos totalmente extendidos a la misma vez que se ejecuta con las piernas en la posición de tijera, una pierna flexionada delante y la otra semiflexionada detrás apoyando la punta del pie. Una vez estabilizado, se recupera la posición erguida, con los pies abiertos a la anchura de las caderas y los brazos estirados por encima de la cabeza.

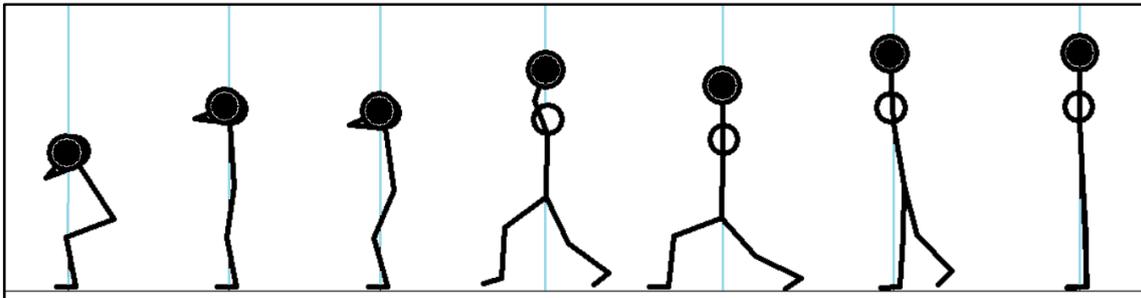


Ilustración V - Movimientos del Jerk paso a paso

7. MATERIAL

El material que se utiliza para realizar los ejercicios de halterofilia se resume en discos, barra olímpica y collarines. A continuación se expone una breve descripción de cada uno de ellos y de las especificaciones de la IWF hace de ellos:

7.1 DISCOS

- Los discos son los elementos que marcan el peso de cada ejercicio.
- Tienen forma circular y compacta.
- Existen dos variaciones: discos de competición y discos de entrenamiento.
- En los discos de competición, varían su tamaño y color según el peso (según IWF):



Tabla IV - Clasificación discos de competición según peso y color.

ROJO	AZUL	AMARILLO	VERDE	BLANCO
25kg	20kg	15kg	10kg	5
2,5kg	2kg	1,5kg	1kg	0,5kg

Tabla V - Clasificación discos de competición según masa y color.

Por otra parte, las estipulaciones de la IWF con respecto a los tamaños y tolerancias en los discos de competición son las siguientes:

Diámetro

- Discos ≥ 10 kg: 45 cm con una tolerancia de $\pm 0,1$ cm
- Discos < 10 kg: menor de 45 cm con una tolerancia de $\pm 0,1$ cm

Material

- Discos ≥ 10 kg: deben de estar recubiertos con goma o plástico y cubiertos con una capa permanente de color por ambos lados.
- Discos < 10 kg: pueden ser de metal u otro material aprobado por la IWF

Tolerancia

- Discos ≥ 5 kg: de + 0,1% a -0,05%
- Discos < 5 kg: de +10 gramos a - 10 gramos cada uno

Marcado

- Los discos deben llevar una marca visible de su masa en “kg”

Tamaños

	ANCHO	DIÁMETRO
25kg	Máximo 6,7 cm	45 cm
20kg	Máximo 5,4 cm	45 cm
15kg	Máximo 4,3 cm	45 cm
10kg	Máximo 3,5 cm	45 cm
5kg	Máximo 2,65 cm	23 cm – 26 cm
2,5kg	Máximo 2,3 cm	19 cm – 22 cm
2kg	Máximo 2,2 cm	15,5 cm – 19 cm
1,5kg	Máximo 2,0 cm	13,9 cm – 17,5 cm
1kg	Máximo 1,9 cm	11,8 cm – 16 cm
0,5kg	Máximo 1,6 cm	9,7 cm – 13,7 cm

Tabla VI - Tamaños de los discos según su masa.

7.1.2 DIFERENCIAS ENTRE DISCOS DE COMPETICIÓN Y ENTRENAMIENTO

Como se ha comentado anteriormente, entre los discos de halterofilia se pueden encontrar dos tipos, discos de entrenamiento (también llamados “bumpers”) y discos de competición. Las diferencias entre ellos no son grandes, pero cabe exponerlas para tener un concepto claro:

- **Material.** Una de las diferencias puede ser el material. Se suele usar caucho de mejor calidad para los discos de competición que para los discos de entrenamiento, aunque depende del fabricante, algunos suelen usar el mismo. Este punto se amplía en el apartado **8. Antecedentes**.
- **Espesor.** Según la IWF, los discos de competición deben cumplir con un espesor máximo (**Ilustración VI [pág.23]**) correspondiente con su peso, sin embargo, los discos de entrenamiento no tienen ninguna restricción en este sentido, ya que su uso es meramente “amateur”. El espesor de estos depende de cada fabricante. Los discos de competición requieren una calibración adicional que los bumpers no necesitan, por ello estos últimos suelen ser más voluminosos. Para entender la diferencia de espesores se presentan las siguientes ilustraciones:

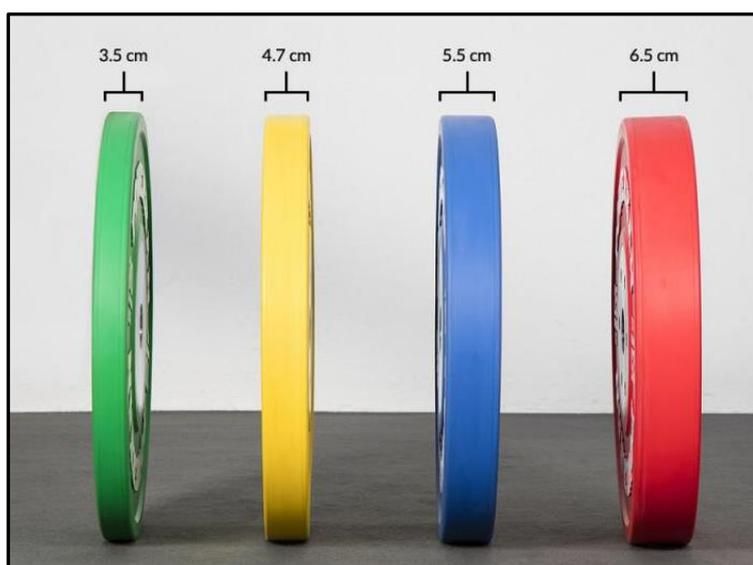
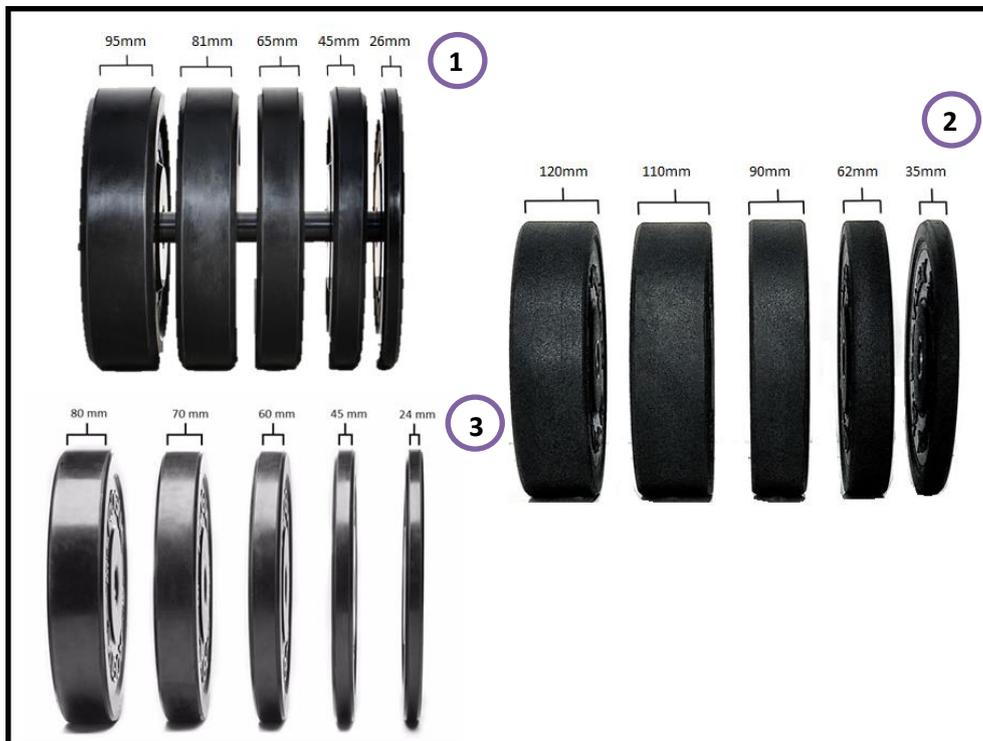


Ilustración VI - Discos de competición de 10, 15, 20 y 25 kg de la marca Powerkan.



Il·lustració VII - Discos de entrenament de 25, 20, 15, 10 y 5 kg de les marques Powerkan (1), SingularWod (2) y Hatlex (3).

- **Color.** Los discos de competición siguen una norma de colores según su peso (como se explica en el apartado **7.1 Discos**), mientras que los discos de entrenamiento no es necesario que sigan esta normativa, aunque algunas marcas si optan por seguir con esta pauta.

- **Núcleo.** El núcleo de los discos de competición suele estar reforzado con un anillo interior, mientras que en los discos de entrenamiento no suele haber ningún tipo de refuerzo, únicamente un anillo de acero zincado o cromado, que solo sirve de unión entre la barra y el disco.



Ilustración VIII - Discos de competición de la marca SingularWod.



Ilustración IX - Discos de entrenamiento de la marca SingularWod negros y a color.

- **Precio.** Por todas las razones anteriormente nombradas, es obvio que el precio de los discos de competición tienen un precio más elevado que el de los de entrenamiento.
- **Discos de 5 kg.** Otra gran diferencia es el tamaño de los discos de 5 kg. En los discos de competición, los discos de 5 kg tienen un diámetro menor que los discos de mayor peso, mientras que en los bumpers éstos tienen el mismo diámetro que los discos entre 10 y 25 kg (450 mm).

Como se habrá podido observar en la **Ilustración VIII**, existen dos subtipos de bumpers, los llamados “heavy bumpers” y los “training bumpers”. Cabe hacer una breve explicación sus diferencias:

	HEAVY BUMPERS	TRAINING BUMPERS
MATERIAL (Según fabricantes)	Caucho de alta calidad	Goma reciclada vulcanizada
REBOTE	+	-
RUIDO	-	+
VOLUMEN	+	-
DUREZA	-	+

Tabla VII - Diferencias de tipos de discos de entrenamiento.

Para dejar clara la diferencia entre los tres discos, se puede observar la siguiente ilustración:



Ilustración X - Diferentes espesores de los tipos de discos.

Este proyecto se ha basado exclusivamente en la búsqueda de una mejora de discos de entrenamiento, ya que los discos de competición solo son usados por competidores o deportistas de alto rendimiento, mientras que los discos de entrenamiento son usados por todos los atletas que practican Crossfit diariamente, lo que hace que la cantidad que se puede albergar es mucho mayor en bumpers. Además, que no tengas restricciones en cuanto a medidas ha facilitado bastante la tarea.

Por otra parte, los discos de entrenamiento ya se hacen de materiales más resistentes que los bumpers y con un coste bastante más elevado, incluso a veces duplicando su precio. Esto es debido a que los discos de competición aparte de mejoras en su material, es un artículo muy específico que solo suelen utilizar profesionales de la halterofilia, la demanda es mucho menor que la de los bumpers.

7.2 BARRA OLÍMPICA

La barra es el elemento principal con el cual se ejecutan los ejercicios de halterofilia. Consiste en un eje de forma cilíndrica de metal con mangas giratorias también de metal instaladas en los extremos, permitiendo que el eje gire independientemente del peso colocado en las mangas, lo cual es esencial para el desempeño de dichos ejercicios, ya que evita posibles lesiones por sobrecarga. Por este motivo, no cualquier barra es válida para realizar los ejercicios. Están establecidas unas condiciones que debe cumplir la barra de halterofilia, comúnmente conocida como barra olímpica. Estas son sus partes principales:

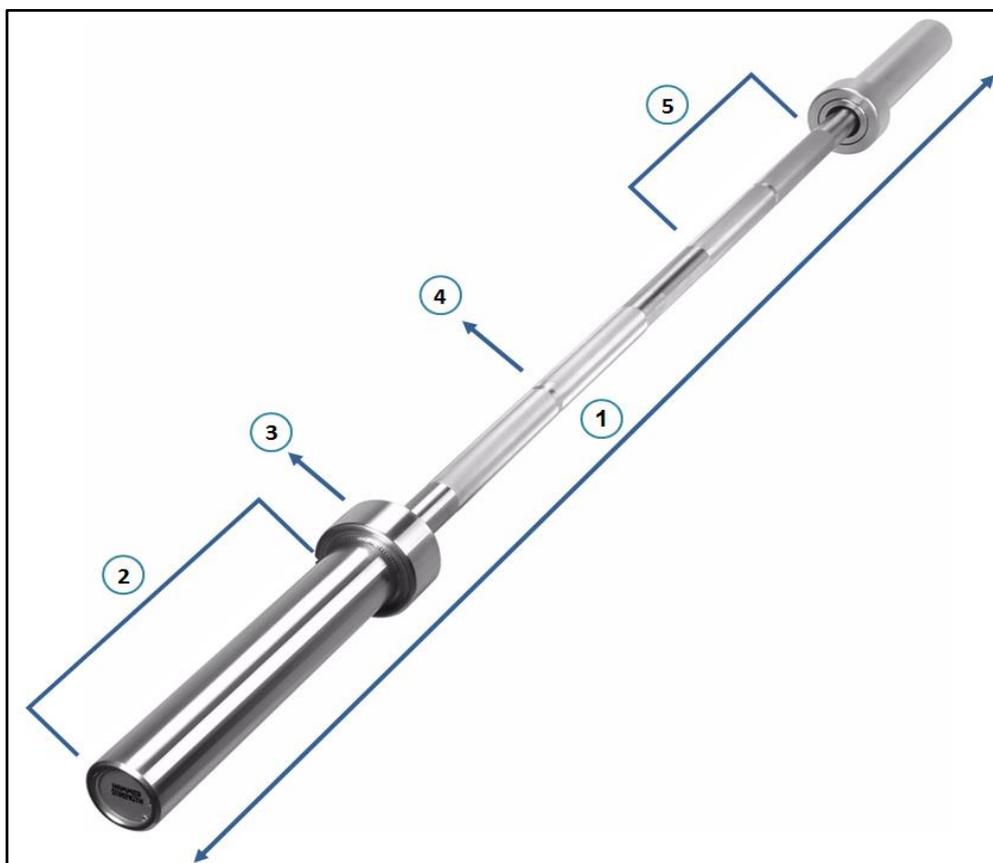


Ilustración XI - Partes principales de una barra olímpica.

1. **Longitud total de la barra.** Existen dos longitudes diferentes, una para la barra masculina y otra para la barra femenina.
2. **Manga.** Zona donde se colocan los discos y los collarines.
3. **Rodamiento.** Elemento que hace girar la manga. Suele ser rodamiento de agujas.
4. **Marca de agarre.** Separación no estriada.
5. **Sección de agarre.** Superficie rugosa que evita el resbalamiento. También llamado moleteado.

Todas las condiciones oficiales de la barra olímpica están recogidas en el **Reglamento Técnico IWF 2017-2020**, concretamente en el **Artículo 3.3.3. La barra**, donde se hace referencia a las características que deben cumplir las barras de competición, tanto masculinas como femeninas:

BARRA MASCULINA

- Fabricada en acero cromado
- Marcada con resaltes en la sección de agarre
- Peso = 20 kg
- Longitud = 220 cm
- Extremos exteriores (mangas) = 5 cm de diámetro / 41,5 cm de largo
- Sección de agarre = 2,8 cm de diámetro / 131 cm largo
- 2 secciones de agarre = 44,5 cm con una separación no estriada de 0,5 cm y de 19,5 cm en la manga interna
- Estriado central = 12 cm de largo
- Marcada con identificación de color azul en cada extremo y en el centro de la barra
- Tolerancia = de + 0,1% a - 0,05%
- Diámetro del tope del extremo de la barra = mínimo 7,3 cm, máximo 8,0 cm
- Los extremos de la barra deben girar libremente

BARRA FEMENINA

- Fabricada en acero cromado
- Marcada con resaltes en la sección de agarre
- Peso = 15 kg
- Longitud = 201 cm
- Extremos exteriores (mangas) = 5 cm de diámetro / 32 cm de largo
- Sección de agarre = 2,5 cm de diámetro / 131 cm largo
- 2 secciones de agarre, separadas 42 cm con una separación no estriada de 0,5 cm y de 19,5 cm en la manga interna
- Marcada con identificación de color amarillo en cada extremo y en el centro de la barra
- Tolerancia = de + 0,1% a - 0,05%
- Diámetro del tope del extremo de la barra = mínimo 6,3 cm, máximo 7,5 cm
- Los extremos de la barra deben girar libremente

Sintetizando los puntos más importantes de este apartado:

	MASCULINA	FEMENINA
PESO	20kg	15kg
LONGITUD	220cm	201cm
DIÁMETRO DISCOS	50mm	50mm
DIÁMETRO AGARRE	28mm	25mm

Tabla VIII - Resumen medidas y pesos oficiales barra olímpica para categoría masculina y femenina.

7.3 COLLARINES

Para asegurar los discos a la barra, cada barra debe estar equipada con collarines. Los collarines deben cumplir con las siguientes especificaciones autorizadas:

- Dos (2) collarines por barra
- Peso = 2,5 kg cada uno



Ilustración XII - Collarines para barra olímpica

7.4 NORMAS DE CARGA

Aunque no sean de especial relevancia para este proyecto las normas de carga de la barra, es importante tenerlas en cuenta a la hora de hacer la simulación:

- Los discos se deben cargar en orden descendente (según peso) de dentro de la barra hacia afuera, quedando en el exterior los discos más ligeros.
- Los collarines irán a continuación del último disco colocado, asegurando los discos a la manga de la barra.

8. ANTECEDENTES

Antes de seguir con este proyecto, es importante conocer qué trayectoria se ha seguido a lo largo de los tiempos en este ámbito en tema de materiales, formas, etc. Aunque la información que se ha podido recoger es bastante escasa debido a que no hay demasiada documentación de años pasados respecto a esta disciplina y los materiales utilizados, se han recabado algunos datos interesantes para poner en antecedentes.

En la antigüedad, los recursos que existían no eran tan amplios como los que existen hoy en día. En los principios de la halterofilia el material utilizado era muy rudimentario, rocas, hierro y hasta incluso animales (común en los circos). Se tiene constancia de que en la antigua Roma, las mujeres participaban de este deporte, usando pequeñas mancuernas o las conocidas como “bolsas de arena”.

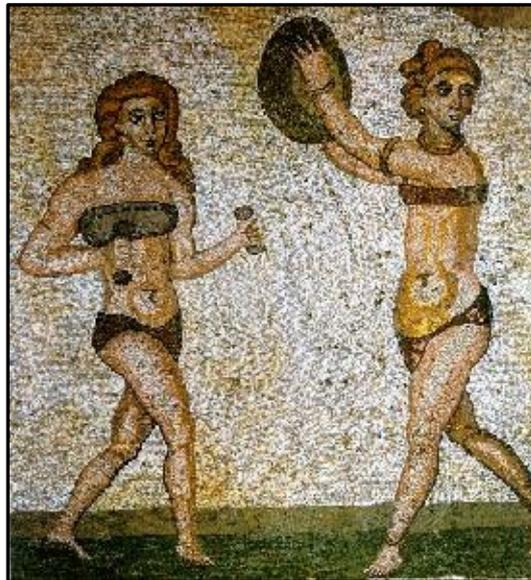


Ilustración XIII - Mujeres en la antigua Roma practicando halterofilia.

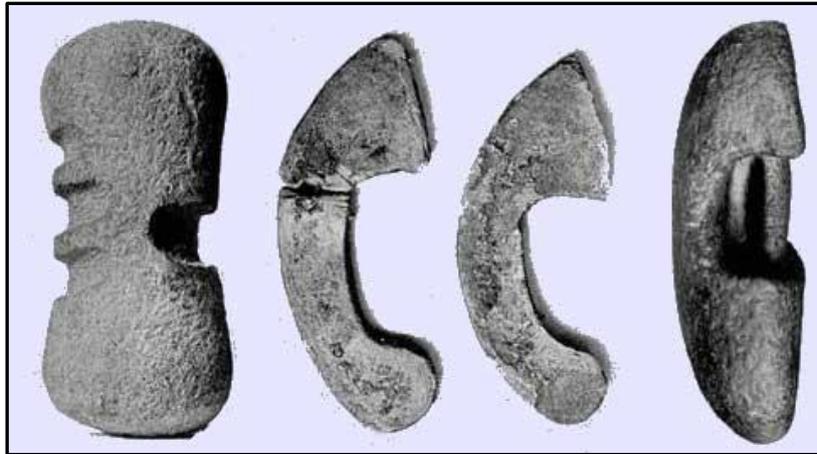


Ilustración XIV - "Halteras" utilizadas en los juegos de la Antigua Grecia.

Se tiene muy poca información acerca de normativa o reglamento alguno sobre materiales anterior de la existencia de la IWF ya que no había otro organismo regulador hasta el momento. Las primeras barras a finales del siglo XIX eran de hierro con enormes bolas en los extremos, unas veces huecas para ser llenadas de arena y poder controlar el peso y otras directamente enteras de plomo.

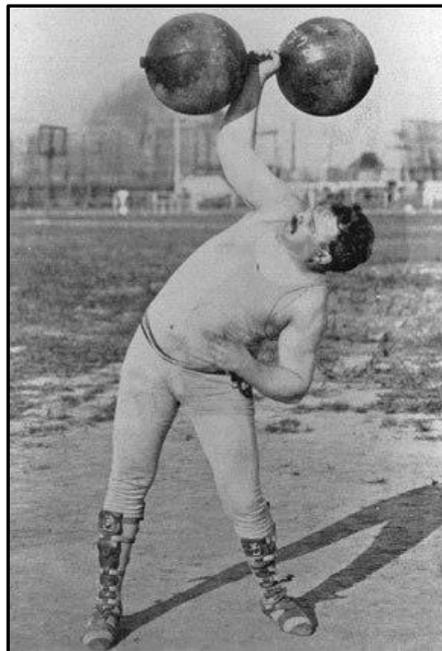


Ilustración XV - Frederick Winters en los Juegos Olímpicos de San Luis (1904).

A partir del siglo XX estos artilugios fueron sustituidos por los discos con la forma que se conocen en la actualidad. A cerca del material no se encuentra demasiada información, pero por las fotografías de aquella época se puede deducir que son discos de acero.

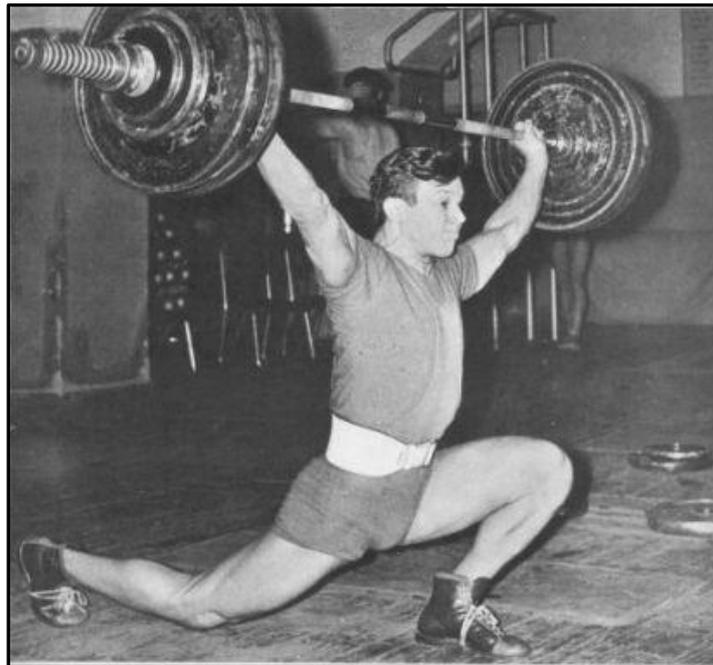


Ilustración XVI - Frederick Winters en los Juegos Olímpicos de San Luis (1904).

Con el paso del tiempo se han encontrado materiales más resistentes y duraderos para este tipo de prácticas. Actualmente, se utilizan en mayor medida gomas de alta resistencia a impacto. En el apartado siguiente se explica más ampliamente.

8.1 MATERIALES

A pesar de que la información proporcionada por los fabricantes es bastante escasa ya que la mayoría de estos datos son confidenciales, se ha podido saber que en la actualidad los materiales principales utilizados son el caucho vulcanizado y el caucho SBR. Dada su calidad y su precio, el caucho vulcanizado se suele utilizar para los discos de entrenamiento y el caucho SBR para los discos de competición. A continuación se hace una explicación de estos materiales y sus propiedades.

8.1.2 CAUCHO VULCANIZADO

El caucho natural es un material que se obtiene del látex, extraído de la savia de los árboles productores (*Hevea Brasiliensis*). Para mejorar sus propiedades, se utiliza azufre a alta presión y temperatura para entrecruzar sus cadenas de polímeros. Esto provoca cambios en sus propiedades físicas y en su estructura interna de manera irreversible; a este proceso se le denomina vulcanizado. Éste es un proceso en el cual el caucho pasa de ser un material termoplástico a tener un comportamiento elastomérico, además le aporta solidez y gran resistencia, lo que hace que llegue pueda llegar ser muy duradero.

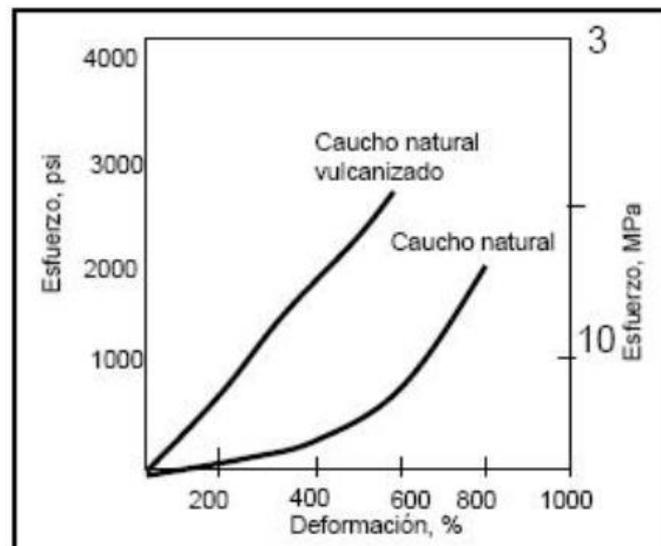


Ilustración XVII - Gráfica comparativa esfuerzo (psi, Mpa) y deformación (%) del caucho natural y caucho natural vulcanizado.

Como se observa en la **Ilustración XVII**, las posibilidades de deformación varían considerablemente entre los dos materiales. Las mejoras del caucho vulcanizado respecto al caucho natural son bastante notorias. El caucho vulcanizado posee mejores cualidades que el no vulcanizado: mayor fuerza, más resistencia a los cambios de temperatura y más elasticidad. Asimismo se le atribuyen las cualidades de impermeabilidad, resistencia a la abrasión y a la acción química y aislamiento eléctrico.

ADITIVOS

Además del azufre para la vulcanización, generalmente al caucho se le añaden otros aditivos, ya sea para mejorar sus propiedades o para abaratar costes. En este caso no se tiene suficiente información como para saber la composición exacta del material que se usa para la fabricación de los discos ni tampoco se dispone de los medios necesarios para averiguarlo. Por tanto, solo se puede hacer una estimación basándose en lo que suele usarse en la mayoría de los casos:

- **Suavizantes.** Hacen que sea más fácil trabajar con él, se añaden antes de la vulcanización.
- **Activadores.** Se usan para reducir el tiempo de vulcanización, ya que aceleran notablemente este proceso además de mejorar la calidad del producto. Pueden ser el Óxido de Zinc y de Magnesio.
- **Antioxidantes.** Ayudan a que la acción del oxígeno y el ozono no degrade el material.
- **Cargas.** Se utilizan principalmente para abaratar costes. También pueden dar rigidez y aumentar densidad.

DEGRADACIÓN/CONTAMINACIÓN

El reciclaje del caucho vulcanizado ha supuesto un problema desde el descubrimiento de este material. Como se ha comentado anteriormente, tras la vulcanización el comportamiento del caucho se torna termoestable, los entrecruzamientos que se generan hacen que sea un proceso irreversible, por lo tanto, resulta imposible conseguir de nuevo las cadenas poliméricas del caucho natural de partida. Este hecho acarrea como consecuencias el no poder

ser reprocesado, una gran dificultad para el reciclado. Cabe destacar el problema económico que esto supone, pero sobre todo el importante aspecto medioambiental, ya que tampoco puede ser devuelto al medio ambiente de forma directa por ser un material no biodegradable. Se calcula que puede tardar en descomponerse unos 100 años, lo hace que este material sea considerado como altamente contaminante. Además, el caucho tiene otras consecuencias para el medio ambiente:

- Muy inflamable, dificultad para controlar los incendios.
- Su quema produce gases altamente perjudiciales para la salud.
- Son comunes los cúmulos de este material en vertederos, foco de infecciones y enfermedades.

En cuanto a la producción de huella de CO₂, del software CES EduPack 2018 se han obtenido los siguientes datos:

Producción de materia prima: CO ₂ , energía y agua			
Contenido en energía, producción primaria	* 64,2	- 71	MJ/kg
Huella de CO₂, producción primaria	* 1,97	- 2,18	kg/kg
Agua consumida	* 1,5e4	- 2e4	l/kg
Procesado de material: energía			
Energía en moldeo de polímeros	* 15,3	- 16,9	MJ/kg
Energía de lijado (p/u peso eliminado)	* 6,3	- 6,96	MJ/kg
Procesado de material: huella de CO ₂			
CO₂ en moldeo de polímeros	* 1,23	- 1,35	kg/kg
CO₂ en lijado (p/u peso eliminado)	* 0,472	- 0,522	kg/kg

* Valores aproximados, no verificados.

Tabla IX - Impacto medioambiental de la producción de materia prima y procesado de material del caucho.

Actualmente no existe una fórmula para una recuperación completa del caucho vulcanizado, pero sí algunos tratamientos para la recuperación o reutilización parcial, pero con un empeoramiento de sus propiedades.

Por otra parte, es importante hacer mención de la producción anual mundial de caucho. Se ha obtenido este dato del software CES EduPack 2018:

Datos geo-económicos para componentes principales			
Producción anual mundial, componente principal	7,76e6	-	7,8e6 toneladas/año

Tabla X - Producción mundial caucho.

8.1.3. CAUCHO SBR

El copolímero de caucho estireno butadieno (SBR) (75% de butadieno en peso) es el caucho sintético más utilizado y con mayor volumen de producción a nivel mundial. Suele formularse con compuestos de refuerzo como el negro de carbono.

CAUCHO SBR	
PUNTOS FUERTES	LIMITACIONES
Al ser reforzado su resistencia aumenta aproximándose a la del caucho natural (NR) y a la del policloropreno.	Resistencia a fatiga bastante baja, por debajo de la del NR. Aún más notorio cuando no lleva refuerzo.
Sus propiedades físicas y químicas son similares a las del caucho natural y la resistencia a la abrasión mejora sensiblemente.	Propiedades similares al NR: Fácil oxidación, degradación en presencia de ozono, pierde propiedades con hidrocarburos líquidos, tiende a hincharse.

Tabla XI - Puntos fuertes y limitaciones del caucho SBR

PROCESADO DEL CAUCHO SBR

En cuanto a la procesabilidad del caucho SBR, se puede afirmar que se procesa en los mismos equipos y, salvo cuestión de algún detalle o magnitud, se procesan de la misma forma que NR. Algunas diferencias entre los dos materiales son:

	NR	SBR
MASTICACIÓN INICIAL	+	-
RENDIMIENTO DEL EQUIPO	-	+
REQUERIMIENTO DE POTENCIA (MEZ)	-	+
GENERACIÓN DE CALOR (MEZ)	-	+
PROPIEDADES DE EXTRUSIÓN	-	+
TENDENCIA A LA PRE-VULCANIZACIÓN	+	-

Tabla XII - Comparativa procesabilidad caucho natural y SBR

PROPIEDADES DE RUPTURA

Se han mencionado las bajas propiedades mecánicas que el SBR tiene por si solo y requiere de formación de compuestos para su refuerzo. Las partículas de negro de humo son importantes en la acción reforzante ya que dependiendo del tamaño de éstas, varía su influencia sobre sus propiedades mecánicas; cuanto menor sea el tamaño de las partículas la resistencia a la carga es mayor. Por otra parte, en cuanto a la cantidad, a mayor carga de negro de humo mayor es la resistencia hasta un cierto nivel, a partir de un punto la resistencia a rotura comienza a decrecer.

DEGRADACIÓN

En cuanto a la resistencia al ozono y al envejecimiento oxidativo en general, el caucho SBR tiene mejores cualidades que NR para aguantar la degradación. Es un material muy apto para estar expuesto a la intemperie.

ABRASIÓN

El SBR tiene mejor comportamiento que el NR en la resistencia al desgaste, especialmente en momentos de fatiga por rozamiento. Además, mejora sus propiedades con la adición de negro de humo, como la resistencia a la abrasión.

DIFERENCIAS ENTRE EL CAUCHO SBR Y EL CAUCHO NATURAL

NR	SBR
Mejor procesado	Más permeabilidad
Mayor resistencia a tracción, rotura y adherencia	Mayor resistencia al calor, al desgaste y al envejecimiento
Para vulcanizar NR se requiere menos acelerador	Para vulcanizar el SBR se requiere menos azufre
	El resultado al reforzar con negro de carbón se acrecenta en SBR

Tabla XIII - Diferencias entre el caucho SBR y NR

9. PROBLEMÁTICA

Ya sea por el material o por la forma del núcleo, el mayor problema que acarrear los bumpers son las roturas y el desgaste al que se ven sometidos. Esto afecta directamente a la parte tanto estética como funcional de los mismos, en ocasiones llegando a ser inservibles debido al grado de rotura.

Es importante destacar qué desperfectos concretos son los más acusados y cuáles son los orígenes que generan estos desperfectos para intentar corregirlos y buscar posibles soluciones:

DESPERFECTO	ORIGEN
Desprendimiento de material por el borde	Repetición de impactos contra el suelo
Desgaste del material por el interior (núcleo)	Repetición de impactos contra la barra
Fractura radial	Repetición de impactos contra el suelo

Tabla XIV - Enumeración de desperfectos comunes en bumpers y sus orígenes.

Todos estos desperfectos afectan directamente al rendimiento de los discos ya que durante su uso se generan una serie problemas que impiden su utilización de forma correcta y segura. Se pueden ver algunos ejemplos en las ilustraciones siguientes:

- **Desgaste del material por el interior (núcleo).** Este tipo de desperfecto es el más común. Los repetidos golpes contra la barra y la fricción con el anillo generan desprendimientos del material por la parte interior, lo que hace que se vuelvan menos rígidos y por tanto menos seguros. Provoca una mayor inestabilidad a la hora de recibir los golpes, tienden a la flexión y generan movimientos más amplios.



Il·lustració XVIII - Disco Hatlex de 10kg desgastado por el núcleo

- **Desprendimiento de material por el borde.** Este tipo de rotura es similar al anterior, pero el desprendimiento de material se hace por el borde. Suele aparecer por repetición de golpes contra el suelo y también causa inestabilidad a la hora de practicar los ejercicios.



Il·lustració XVIII - Disco Hatlex de 10 kg desgastado por el borde

- **Fractura radial.** Este tipo de rotura es el más problemático. Cuando estas fracturas aparecen, los discos dejan de ser servibles y deben desecharse. Suele ocurrir en discos de pequeño tamaño, por eso se recomienda que la barra cargada con discos menores de 10 kg no se deje caer al suelo.



Ilustración XIX - Disco Capital Sports de 2,5kg con fractura radial

10. DESARROLLO DEL PROYECTO

El diseño de este proyecto se ha realizado con el software SolidWorks 2018. Consta de 3 piezas diferentes: barra, collarín y disco.

- **Barra.** El diseño de la barra ha sido de acuerdo a la selección de la barra olímpica que se ha realizado (**Apartado 10.1**).
- **Collarín.** Este elemento se incluye únicamente para intentar acercarse a la realidad lo máximo posible, pero según se ha visto en las simulaciones que se han lanzado, su influencia sobre las tensiones/deformaciones es despreciable. El diseño del collarín se explica en el apartado **10.2**.
- **Disco.** En esta pieza reside la carga importante de trabajo, ya que ha sido la pieza en la cual se ha realizado el reestyling. Se explica más ampliamente en el **apartado 10.3**.

10.1 DISEÑO BARRA

Para diseñar la barra, se ha hecho la selección de una barra existente. Para ello, se ha optado por el apoyo en un artículo científico (Chiu, LZF. Mechanical properties of weightlifting bars. J Strength Cond Res 24 (9): 2390–2399, 2010). En él se explica el estudio que se realizó acerca de la deformación y la rigidez de una muestra de 9 barras de diferentes modelos y fabricantes, 8 de las cuales cumplían con las exigencias de barras de competición y una no. La selección de barras fue la siguiente:

Bar manufacturer	Bar model	Advertised use
Eleiko (Halmstad, Sweden)	Unavailable	Weightlifting training
Iron Grip (Santa Ana, CA, USA)	Olympic competition bar	Weightlifting training
Iron Grip (Santa Ana, CA, USA)	Power Bar	General weight training
Ivanko (San Pedro, CA, USA)	OB-20 kg	Weightlifting training
Mavrik (North Hills, CA, USA)	Men's SS training bar	Weightlifting training
Uddeholm (Sweden)	Unavailable	Weightlifting training
Uesaka (Tokyo, Japan)	WG-158TW	Weightlifting training
York (York, PA, USA)	#211015	Weightlifting training and general weight training

Ilustración XX - Fabricantes y modelos de las barras testadas.

Después de realizar el ensayo, encuentran que todas las barras sufren deformación durante el ensayo, pero ninguna sufre deformación permanente, es decir, vuelven a su estado natural. Se observa que la barra con mayor deformación es “Eleiko”. Para este proyecto, se escogerá realizar los ensayos con dicha barra, ya que se considera que una barra con mayor capacidad de deformación es preferible para los atletas, ya que hace que sea menos lesivo para las articulaciones. En el **Anexo 1** se explica con mayor amplitud cómo se llega a esta conclusión.

ELEIKO IWF Weightlifting Competition Bar

PESO	20 kg
LONGITUD	2200 mm
DIÁMETRO DE LA MANGA	50 mm
DIÁMETRO DE AGARRE	28 mm
SUPERFICIE DE LA MANGA	Cromado
SUPERFICIE DE AGARRE	Cromado
MOLETEADO	1.2 - Profundo
LONGITUD CARGABLE DE LA MANGA	415 mm
ANCHO DE ALA	30 mm
RODAMIENTOS	Rodamientos de agujas
CARGA MÁXIMA	1500 kg

Tabla XV - Características ELEIKO IWF Weightlifting Competition Bar.



Ilustración XXI - Prototipo barra realizado con SolidWorks 2018.

10.2. DISEÑO COLLARÍN

Se ha diseñado un collarín sencillo ya que, como se ha explicado, el collarín es un elemento de sujeción pero su influencia sobre las simulaciones es prácticamente despreciable.

DIMENSIONES DEL PROTOTIPO DEL COLLARÍN	
Diámetro exterior del collarín	80 mm
Diámetro interior del collarín	51 mm
Ancho del collarín	66 mm
Diámetro del agujero	12 mm
Ángulo de la vara	45º

Tabla XVI - Dimensiones prototipos del collarín.

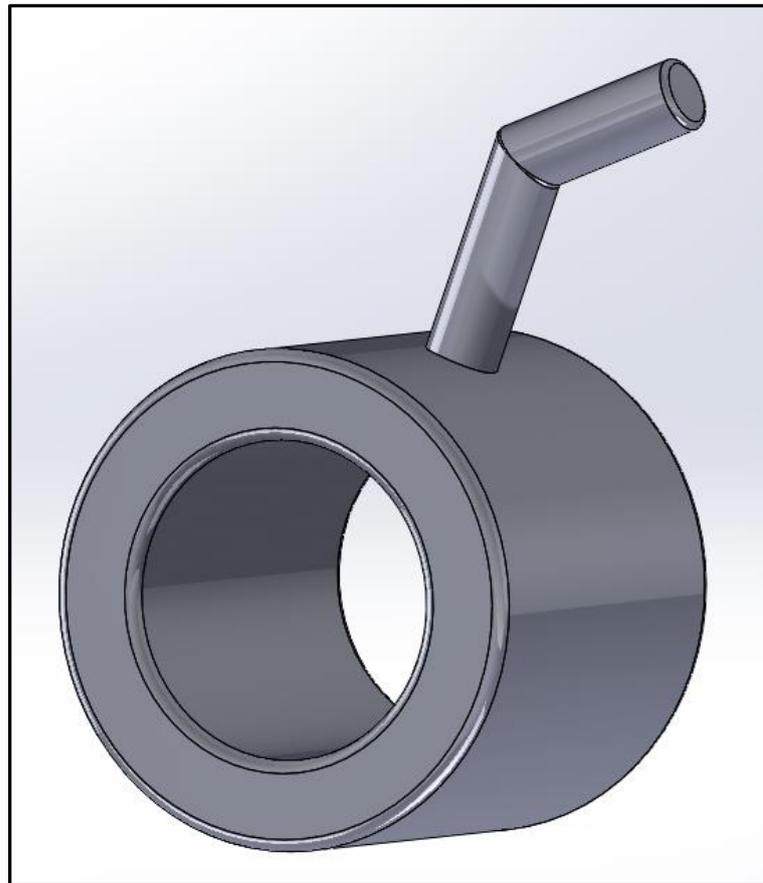


Ilustración XXII - Prototipo collarín realizado con SolidWorks 2018.

10.3. DISEÑO DISCO

Para el diseño del disco se han tenido en cuenta varios factores. Aunque se ha mencionado que los bumpers no tienen restricciones en cuanto a sus medidas, hay ciertas dimensiones que deben asemejarse a los discos de competición, para que la transferencia de unos a otros sea lo más semejante posible.

DIMENSIONES FIJAS	DIMENSIONES VARIABLES
Diámetro exterior	Espesor del borde
Diámetro interior	Espesor del núcleo
	Espesor de la zona intermedia
	Chaflán borde exterior

Tabla XVII - Dimensiones fijas y variables del disco para diseño.

En este caso, no se puede hablar de un solo prototipo, ya que como se ha trabajado con distintos materiales y por tanto distintas densidades, hay que tener en cuenta que el valor de la masa debe de ser siempre el mismo en todos los prototipos. Como se ha comentado anteriormente, las dimensiones de los diámetros es fija y existen otras 4 variables que pueden modificarse. Para simplificar los cálculos, se ha optado por dejar fijas todas las dimensiones variables excepto el espesor, que variará en función de la densidad del material para adaptarse a la masa requerida. Con esto se intenta que las simulaciones sean lo más exactas posibles para después realizar las comparaciones.

Tras realizar las simulaciones con SolidWorks 2018, se elegirá el material que mejor se adapte a los requisitos y con las dimensiones variables se optimizará el modelo. Las pautas que se han seguido para la realización de los prototipos son las siguientes:

DIMENSIONES DE LOS PROTOTIPOS DE DISCO	
Diámetro exterior del disco	450 mm
Diámetro interior del disco	50 mm
Chaflán borde exterior	5 mm
Espesor exterior*	Varía según densidad

*Por simplificación, para los prototipos no se ha hecho diferenciación entre el espesor del borde y el espesor de la zona intermedia.

Tabla XVIII - Dimensiones prototipos del disco.

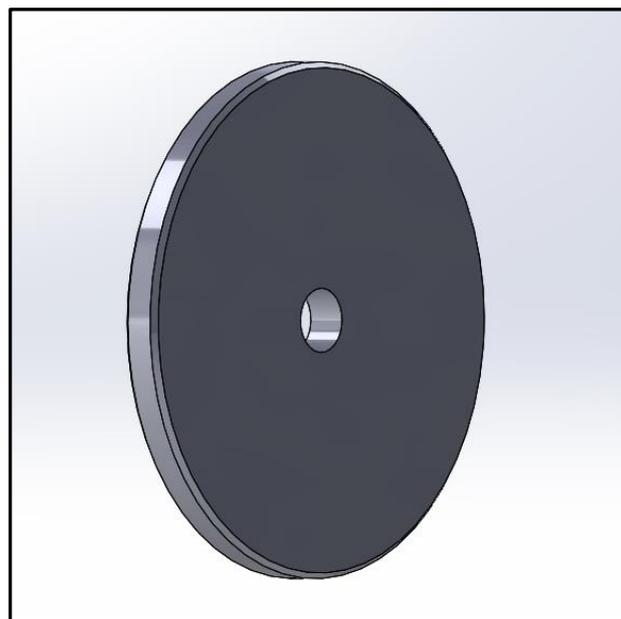


Ilustración XXIII - Prototipo disco realizado con SolidWorks 2018.

11. PRESENTACIÓN DE OPCIONES PARA EL MATERIAL DEL DISCO

Los discos se componen de dos partes: el núcleo y el recubrimiento.

Para la selección del material de los discos, se ha hecho un análisis de las características que los discos deben cumplir, tanto de propiedades físicas como mecánicas, precio, etc.

Respecto a sus características físicas:

- **Densidad.** La densidad del material seleccionado está bastante acotada, debe ser similar a la usada normalmente ya que las medidas de los discos pueden variar apenas unos milímetros su ancho.

Respecto a sus características mecánicas:

- **Resistencia a compresión e impacto.** Como se ha comentado, el material estará expuesto a repetidas caídas y golpes, por lo que estas características son indispensables.
- **Tenacidad.** Se busca que el material tenga una alta ductilidad pero también alta resistencia.
- **Alta resiliencia.** El material debe tener alta capacidad de absorber energía antes de su deformación plástica.

Otras características:

- **Resistente al agua.** Es importante que el material sea resistente al agua porque aunque deba usarse en lugares secos y bien acondicionados, estará expuesto al contacto con sudor y posible agua.
- **Aislante eléctrico.** Para evitar posibles calambres con el contacto, el material no debe conducir electricidad.
- **Ignífugo.** Esta característica no es indispensable, pero puede ser un punto positivo.
- **Económico.** Uno de los requisitos más importantes es este, ya que es uno de los móviles de este proyecto. Sería interesante encontrar un material que al menos sea más económico que los usados actualmente.

- **Ecológico.** Con la creciente concienciación del respeto al medio ambiente, otro aspecto positivo a tener en cuenta es la parte ecológica: que el material sea biodegradable, que no sea tóxico y que provenga de fuentes renovables.

Respecto a su procesabilidad:

- Otro punto importante a tener en cuenta es la procesabilidad del material. Sería conveniente encontrar un material que tuviera fuera fácil de procesar y que además pueda tener flexibilidad en el diseño.

ENSAYOS DE CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC) Y ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

Antes de plantear ninguna opción, se optó por realizar un ensayo TGA y un ensayo DSC de una muestra de un bumper de la marca Hatlex. La temperatura de transición térmica de la muestra del disco se determinó mediante Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), con una célula de medida Mettler-Toledo 821 (Mettler-Toledo Inc., Schwerzenbach, Suiza), la cual pertenece al conjunto de técnicas de análisis térmico integrables de la serie STAR e-2000. En la siguiente tabla se detallan las características técnicas.

Propiedad	Valor
Rango de temperatura	T _{amb} hasta 700°C
Precisión en temperatura	± 0,2°C
Reproducibilidad temperatura	± 0,1°C
Velocidad de calentamiento	0 (cond. Isotérmicas) hasta 100°C/min
Velocidad de enfriamiento (aire)	Máx T hasta 100°C en 8-9 min
Velocidad de enfriamiento (N ₂ liq.)	100°C hasta -100°C en 15 min
Precisión medidas de entalpía	± 2 %

Tabla XIX - Características técnicas del equipo TGA Mettler-Toledo TGA/SDTA 851.

Tipo de sensor	Cerámico
Constante de tiempo de señal	2,3 s
Rango de medidas 100°C	± 350 mW
Rango de medidas 300°C	± 250 mW
Rango de medidas 700°C	± 200 mW
Resolución	0,04 μW

Tabla XX - Características técnicas del equipo DSC Mettler-Toledo 821.

Los crisoles que se utilizaron donde se depositaron las muestras para realiza el ensayo fueron crisoles de aluminio con un volumen de 40μl, tapa de aluminio para cubrir la muestra. En la siguiente tabla se describen las condiciones con las que se realizó el ensayo

Propiedad	Valor
Cantidad de material	2-10 mg
Tipo de atmósfera	Aire
Rampa de temperatura	30 a 350°C
Velocidad de calentamiento	10°C·min ⁻¹

Tabla XXI - Condiciones de ensayo utilizadas en la Calorimetría Diferencia de Barrido (DSC).

Para el estudio de la estabilidad térmica de la muestra a altas temperaturas, se ha utilizado con una célula de medida Mettler-Toledo TGA/SDTA 851 (Mettler-Toledo Inc., Schwerzenbach, Suiza), la cual pertenece al conjunto de módulos de la serie STAR e-2000.

Propiedad	Valor
Rango de temperatura	T _{amb} hasta 1100°C
Precisión de temperatura	± 0,25°C
Reproducibilidad de temperatura	± 0,15°C
Velocidad de calentamiento	T _{amb} hasta 1100°C en 5 min
Velocidad de enfriamiento	1000°C hasta 100°C en 20 min
Rango de medidas balanza	1 g o 5 g
Resolución balanza	1,0 µg
Resolución SDTA	0,005°C
Ruido SDTA	0,01°C
Constante de tiempo de señal SDTA	15 s

Tabla XXII - Características técnicas del equipo TGA Mettler-Toledo TGA/SDTA 851.

Los crisoles que se utilizaron donde se depositaron las muestras para realiza el ensayo fueron crisoles de aluminio con un volumen de 40µl, tapa de aluminio para cubrir la muestra. En la siguiente tabla se describen las condiciones con las que se realizó el ensayo.

Propiedad	Valor
Cantidad de material	3-10 mg
Tipo de atmósfera	Aire
Rampa de temperatura	25 a 850°C
Velocidad de calentamiento	20°C·min ⁻¹

Tabla XXIII - Condiciones de ensayo utilizadas en la Caracterización Termogravimétrica (TGA).

Para realizar los ensayos se ha usado la máquina electromecánica de tracción Elib 50 (S.A.E. Ibertest, Madrid, España).

Tras el análisis no se ha esclarecido su composición exacta, pero si se ha confirmado lo que el fabricante manifiesta en su catálogo que su componente principal es el caucho, pero no se sabe qué tipo. Además, el ensayo ha concluido que también está compuesto por partículas

metàlicas (tampoco se sabe cuál concretamente, pero se intuye que del acero más económico), las cuales aportan el peso necesario al disco, pero con seguridad hace que sea menos tenaz y se rompa con más facilidad.

Teniendo en cuenta las pautas anteriores y con la información obtenida de los análisis, se han buscado diversas alternativas y finalmente se han planteado 5 opciones, con las cuales se realizarán los ensayos y simulaciones pertinentes. Las 5 opciones se han planteado siguiendo los criterios, pero también adaptándose a los recursos a los que se han podido acceder. En el laboratorio de materiales de la Escuela Politécnica Superior de Alcoy se obtuvieron probetas con diferentes materiales y con ellos se realizaron diferentes ensayos a tracción y ensayo Charpy.

Se ha optado por utilizar composites para hacer las probetas, ya que tienen una gran cantidad de ventajas. Una de las principales virtudes de la matriz polimérica es su elevada resistencia mecánica en relación a su densidad, comparándolo con otros materiales convencionales. Los materiales compuestos admiten la adaptación a formas muy complejas y con gran precisión, además de su alta resistencia a la degradación y a la corrosión. Por otra parte, son una opción con un bajo coste y fácil accesibilidad.

Un material compuesto (composite) se define como una combinación de diferentes componentes consiguiéndose un efecto sinérgico en las propiedades finales del compuesto, en el cual las prestaciones que se obtienen son muy superiores a las de los componentes individuales.

Las características que definen un material compuesto son las siguientes:

- Debe ser fabricado por el hombre.
- Deben presentar discontinuidad estructural.
- Componentes distinguibles físicamente y separables física o químicamente.
- Son materiales novedosos y la mezcla mejora alguna de las características.
- Se pueden diferenciar dos fases: fase matriz y fase dispersa.

MATRIZ

Constituye la fase matriz. Actúa como soporte del refuerzo y proporciona la resistencia térmica y aguante ambiental. Es el elemento que aporta procesabilidad y consistencia al conjunto del material compuesto.

ELEMENTO DE REFUERZO

Constituye la fase dispersa. Es el elemento que proporciona las propiedades mecánicas al composite. Presentan excelentes propiedades mecánicas; sin embargo, presentan dificultades para ser procesadas.

Elección de la matriz

Para la elección de la matriz, se han fijado algunas cualidades que debe tener para cumplir los objetivos demandados para este proyecto:

- **Resistencia compresión**
- **Tenacidad a fractura**
- **Resistente al agua**
- **Aislante eléctrico**
- **No contaminante/biodegradable**
- **Duradera**
- **Densidad apropiada**

En base a lo expuesto anteriormente, se ha seleccionado como matriz el plastisol. El plastisol es un compuesto de partículas de PVC con plastificante y otros aditivos. A temperatura ambiente se encuentra en estado líquido por lo que se puede verter en moldes y, tras ser calentado (por encima de 180º), plastifica. Al enfriar se consigue un producto permanentemente plastificado y flexible. El plastisol tiene propiedades como la resistencia a la abrasión, a la electricidad y a la corrosión. Además admite aditivos que mejoran sus propiedades ignífugas, al calor, luz y se le puede modificar el color (comúnmente es blanco).

Se ha elegido el plastisol como matriz por tener buenas propiedades mecánicas y por su fácil procesado y mezclado en frío. Sin ser un caucho, es un material muy resistente y con la

proporció adequada de plastificant té un comportament semblant al cautxó vulcanitzat. A més, el PVC al plastificar-lo perd la seua rigidesa i es fa flexible i moldeable.

Elección elemento de refuerzo

En cuanto a la elección de los elementos de refuerzo, se ha optado por fibras naturales. El uso de este tipo de fibras para crear materiales compuestos junto con matrices poliméricas (biocomposites) se está haciendo cada vez más extendido por sus innumerables ventajas. Es una buena alternativa ya que cuentan con una serie de características y propiedades óptimas:

VENTAJAS FIBRAS NATURALES
Recurso renovable
Biodegradable (bajo impacto medioambiental)
Coste considerablemente bajo (comparado con otras fibras como Kevlar)
Baja densidad
Buen aislante acústico y térmico
Alta resistencia a la tensión

Tabla XXIV - Ventajas fibras naturales.

Para la elección de la fibra natural, se ha elaborado esta tabla comparativa entre diversas fibras naturales y sus propiedades físicas y mecánicas con la ayuda de CES EduPack 2018:

	DENSIDAD $\cdot 10^3(\text{kg}/\text{m}^3)$	TENACIDAD (kJ/ m ²)	TENACIDAD FRACTURA (MPa.m ^{0.5})	PRECIO PESO (€/kg)	PRECIO VOLUMEN (€/m ³)
COCO	1,14-1,2	2,27-17,2	3,33-11,3	0,21-0,42	0,2e3-0,5e3
CÁÑAMO	1,48-1,5	0,02-0,05	1-2	0,88-1,75	1,3e3-2,6e3
LINO	1,40-1,50	0,017-0,84	1-2	1,75-3,51	2,4e3-5,2e3
ALGODÓN	1,50-1,60	0,06-0,404	1-2	1,75-3,51	2,6e3-5,6e3
YUTE	1,30-1,50	0,04-3,49	0,7-16,1	0,29-1,27	0,4e3-1,5e3
RAMINA	1,45-1,55	1,01-4,15	9,2-19,7	1,27-2,11	1,8e3-3,3e3
LANA	1,2-1,32	0,24-0,81	1-2	1,75-3,50	2,1e3-4,6e3
SISAL	1,45-1,50	38,5-496	19,6-101	0,50-0,59	0,7e3-0,8e3
SEDA	1,26-1,35	0,09-0,32	1-2	17,5-52,6	2,2e4-7,1e4
BASALTO	2,50-2,89	70-507	12,1-183	2,01-2,22	5,02e3-6,4e3

Tabla XXV - Comparativa de características de fibras naturales.

Observando la tabla, se puede ver que hay cuatro fibras naturales que destacan por su alta tenacidad a fractura: Coco, Ramina, Sisal y Basalto. Se desea plantear 4 hipotéticos casos para ensayar con las diferentes fibras, pero se hace imposible acceder a todas en el laboratorio, por lo que solo se ha podido trabajar con fibras de coco y fibras de basalto.

Por otra parte, como se ha podido saber con los ensayos TGA y DSC, otras marcas le añaden partículas metálicas para aumentar la densidad, por tanto, en algunas de las probetas también se han añadido partículas metálicas.

11.1 ENSAYOS LABORATORIO Y CARACTERIZACIÓN

A continuación, se explica el proceso que se ha seguido en el laboratorio para la obtención de las probetas y sus posteriores ensayos para la caracterización. Se prepararon 5 alternativas diferentes al plastisol:

1. Plastisol + 30% fibras basalto
2. Plastisol + 30% partículas metálicas
3. Plastisol + 15% fibras basalto + 15% partículas metálicas
4. Plastisol + 30% yeso
5. Plastisol + 30% fibras coco

Utensilios:

- Báscula
- Moldes de probetas
- Recipientes para las mezclas
- Horno TCN 115 Plus
- Varilla de vidrio
- Máquina ensayo a tracción Ibertest



Ilustración XXIV - Báscula



Ilustración XXV - Moldes de probetas.



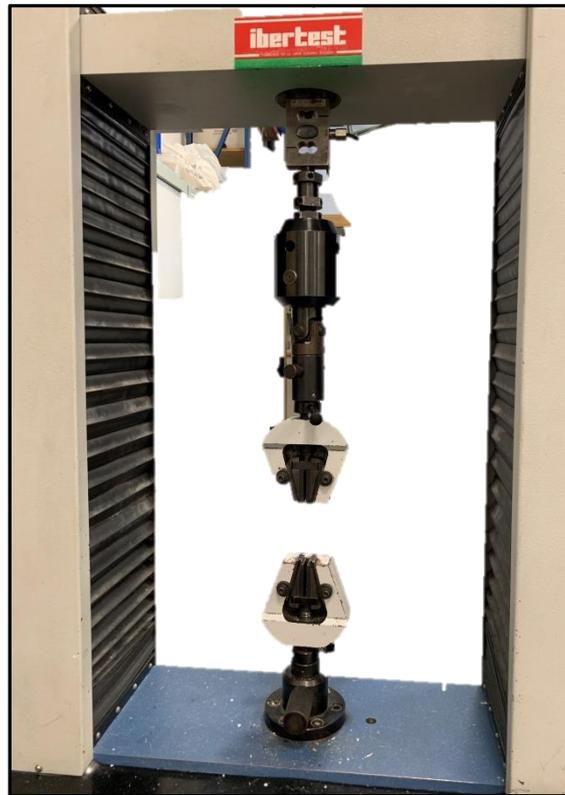
Ilustración XXVI - Recipiente metálico.



Ilustración XXVII - Horno TCN 115 Plus parte exterior.



Ilustración XXVIII - Horno TCN 115 Plus parte interior.



Il·lustració XXIX - Màquina ensayo a tracció Ibertest

Materials:

- PVC en polvo (Arkena EMB. 10S4)
- Plastificante (Aceite de linaza epoxidado Traquisa)
- Fibras de coco
- Fibras de basalto
- Yeso
- Partículas metálicas
- Colorante negro



Ilustración XXX - Aceite de linaza epoxidado TRAQUISA



Ilustración XXXI - Colorante negro



Ilustración XXXII - Yeso en polvo



Ilustración XXXIII - Partículas metálicas



Ilustración XXXIV - Ilustración XXXV - Varilla agitadora vidrio



Ilustración XXXV - Fibras de basalto



Ilustración XXXVI - Fibras de coco

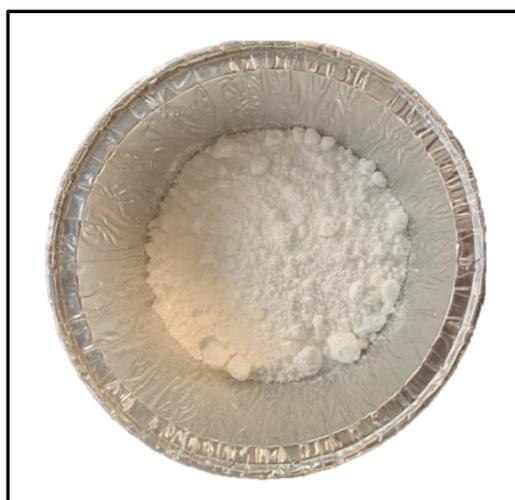


Ilustración XXXVII - PVC en polvo

En primer lugar, se preparó la mezcla para la matriz. En la báscula se pesaron 250 g de PVC en polvo, 175 g de plastificante (Proporción 100/70) y se removieron junto al colorante negro en un gran recipiente.



Ilustración XXXVIII - Mezclado de la matriz.

Manualmente se removió la mezcla durante 15 minutos hasta que quedó completamente homogénea.



Ilustración XXXIX - Mezcla homogénea de la matriz.

A partir de esta matriz, se crearon las probetas de los 5 materiales diferentes:

1. Plastisol + 30% fibras basalto
2. Plastisol + 30% partículas metálicas
3. Plastisol + 15% fibras basalto + 15% partículas metálicas
4. Plastisol + 30% yeso
5. Plastisol + 30% fibras coco

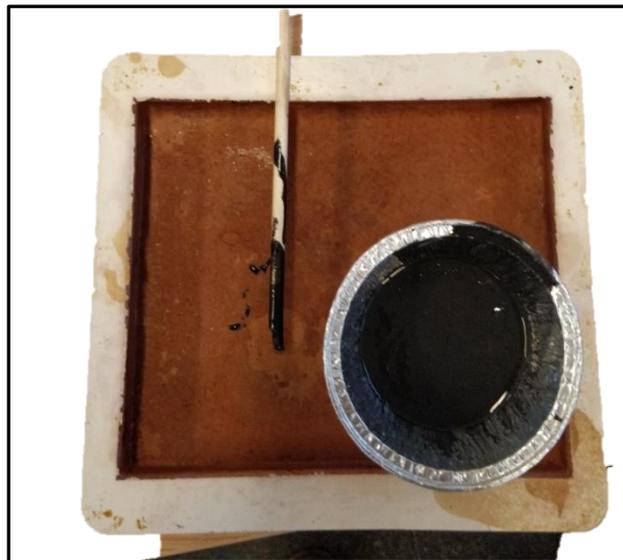


Ilustración XL - Báscula con las partículas metálicas.



Il·lustració XLI - Mezcla de los materiales con la matriz.

Esta mezcla se colocó en un pequeño recipiente de aluminio y se vertió en el molde de probetas para conseguir 3 probetas de cada mezcla.



Il·lustració XLII - Mezcla de los materiales con la matriz II.



Il·lustració XLIII - Molde de las probetas de plastisol con partículas metálicas.



Il·lustració XLIV - Molde de las probetas de plastisol con partículas metálicas II.

Por último, se colocó el molde en el horno a 180º durante 20 min para que la curación de las probetas. Este fue el resultado final tras la cura.



Ilustración XLV - Probetas de plastisol + 30% partículas metálicas

Se repitió el mismo proceso para los otros 4 materiales. Cabe comentar las particularidades que en cada una de ellas se encontraron.

- **Plastisol + 30% fibras basalto**

Para la segunda tanda de probetas se utilizaron fibras de basalto. En la mezcla con la matriz, se obtuvo una pasta de difícil procesamiento debido a la rigidez de las fibras. Las fibras tuvieron que orientarse de manera manual adaptándolas al molde para que cogiera la forma correcta de la probeta. Se obtuvieron unas probetas mucho más consistentes pero de un peso bastante ligero



Ilustración XLVI - Probetas de plastisol + 30% de fibras de basalto.

- **Plastisol + 15% fibras basalto + 15% partículas metálicas**

Para darle más densidad, a la tercera tanda de probetas se crea con la misma mezcla anterior y además se le añaden partículas metálicas. La proporción fue 15% de partículas metálicas y 15% de fibras en peso y añadiendo la matriz hasta obtener una mezcla homogénea. Las fibras ayudan a dar consistencia y unión y las partículas metálicas para dar el peso.



Ilustración XLVII - Probetas de plastisol + 15% partículas metálicas +15% de fibras de basalto.

Las probetas obtenidas presentaban muy buena consistencia además de un peso adecuada para un disco de gimnasio. Además eran flexibles y resistentes a impactos.

- **Plastisol + 30% fibras coco**

Las probetas plastisol y fibra de coco tuvieron un difícil procesado y poca uniformidad. Peso más ligero. A esta nos e le añadió colorante.



Ilustración XLVIII - Probetas de plastisol + 30% fibras de coco.

- **Plastisol + 30% yeso**

Las probetas con yeso tuvieron un procesado sencillo, pero fueron las probetas con menos consistencia de todas.

Tras la cura de todas las probetas, se prosiguió con los ensayos a tracción para obtener a caracterización de los materiales. Se usó una máquina de ensayos a tracción de la marca Ibertest. A una velocidad de 10 mm/min se ensayaron las 3 probetas de cada material.



Il·lustració XLIX - Màquina de tracció ensayando las probetas.

Este fue el resultado final de algunas de las probetas tras los ensayos de tracción:



Il·lustració L - Probetas ensayadas de plastisol + 30% PM, plastisol + 15%PM + 15%FB y plastisol + 30%FC.

Con los datos obtenidos se rellenó la siguiente tabla:

		PLASTISOL					
		PLASTISOL*	30% FB	30% PM	15% PM + 15%FB	30% Yeso	30% FC
Densidad	Kg/m ³	1170	1686	3174	2444,25	1509	1029
Modulo Young	MPa	4,11	9,5	10,8	8,2	8,95	7,9
Limite elástico	MPa	20,3	12,1	5,4	14,4	6,4	8,6
Tensión de rotura	Mpa	20,6	12,1	5,4	14,4	6,4	8,6
Alargamiento rotura	%	320	225	62	185	92	130
Tenacidad a rotura	Mpa·m ^{0,5}	0,517	0,133	0,072	0,128	0,095	0,115

*Se ha añadido el plastisol con los datos sacado de la ficha técnica.

Tabla XXVI - Caracterización de los materiales.

Por otra parte, se han añadido también las hipótesis principales de caucho vulcanizado y caucho vulcanizado con partículas metálicas mediante sus fichas técnicas correspondientes.

		CAUCHO VULCANIZADO		
		VULCANIZADO	30% PM	15% PM
Densidad	Kg/m ³	970	3020	1994
Modulo Young	MPa	2,1	10,2	8,4
Limite elástico	MPa	21	6,2	16,1
Tension de rotura	Mpa	21	6,2	16,1
Alargamiento rotura	%	600	120	280
Tenacidad a rotura	Mpa·m ^{0,5}	0,192	0,075	0,089

Tabla XXVII - Propiedades caucho vulcanizado y caucho vulcanizado con partículas mecánicas.

NÚCLEO

El núcleo del disco es un anillo que va ensamblado a presión en el disco por su orificio interior. Éste es el nexo de unión entre el bumper y la barra, por lo que estará en constante fricción con ella. Esta pieza debe tener unas características para cumplir adecuadamente con su función:

- Dúctil.
- Tenaz.
- Resistente a la abrasión y a la fricción.
- Inoxidable.

Para el prototipo no se ha incluido esta parte ya que el ensamblaje dificultaba las simulaciones. Se ha incorporado directamente en el diseño final.

12. ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE ESTADOS TENSIONALES

Siguiendo el prototipo y con la ayuda del software SolidWorks 2018 se han lanzado las simulaciones con todos los materiales de los que se han obtenido datos y además con la ayuda de otras fichas técnicas se han obtenido valores del caucho natural, caucho vulcanizado con 30% de partículas metálicas y caucho vulcanizado con 15% de partículas metálicas.

Como se ha comentado en el apartado de diseño, la única magnitud que varía en cada prototipo (uno para cada material) es el espesor, para así poder adaptarse al peso requerido del disco. Para ello, basándose en la densidad, se calcula el volumen de cada prototipo si la masa del disco fuera de 10kg.

MATERIAL	DENSIDAD (kg/m ³)	VOLUMEN DEL DISCO (10kg) (m ³)
Caucho vulcanizado	970	0,010309
Caucho vulcanizado + 30% PM	3020	0,003311
Caucho vulcanizado + 15% PM	1994	0,005015
Plastisol	1170	0,008547
Plastisol + 30% fibras basalto	1686	0,005931
Plastisol + 30% PM	3174	0,003151
Plastisol + 15% fibras basalto + 15% PM	2444,25	0,004091
Plastisol + 30% yeso	1509	0,006627
Plastisol + 30% fibras coco	1029	0,009718

Tabla XXVIII - Cálculo de volúmenes de cada prototipo.

Con ese cálculo y con la fórmula del volumen de un cilindro hueco, se calcula el espesor que debe tener cada prototipo en función de su densidad.

$$Volumen cilindro hueco = \frac{\pi}{4} * h * (D^2 - d^2)$$

Siendo:

h = espesor

D = diámetro exterior = 45 cm

d = diámetro interior = 5 cm

Sustituyendo en la ecuación:

$$\text{Volumen cilindro hueco} = \frac{\pi}{4} * h * (0,45^2 - 0,05^2)$$

$$\text{Volumen prototipo} = 0,15708 * h$$

MATERIAL	V=0,15708*h	Espesor (h)
Caucho vulcanizado	0,010309=0,15708*h	65,0 mm
Caucho vulcanizado + 30% partículas metálicas	0,003311=0,15708*h	22,0 mm
Caucho vulcanizado + 15% partículas metálicas	0,005015=0,15708*h	31,9 mm
Plastisol	0,008547=0,15708*h	54,4 mm
Plastisol + 30% fibras basalto	0,005931=0,15708*h	37,7 mm
Plastisol + 30% partículas metálicas	0,003151=0,15708*h	20,0 mm
Plastisol + 15% fibras basalto + 15% partículas metálicas	0,004091=0,15708*h	26,0 mm
Plastisol + 30% yeso	0,006627=0,15708*h	42,2 mm
Plastisol + 30% fibras coco	0,009718=0,15708*h	61,8 mm

Tabla XXIX - Cálculo de espesores de cada prototipo.

12.1 SIMULACIÓN MEDIANTE FEM

La simulación mediante el método de elementos finitos nos permite saber el comportamiento de una pieza frente a esfuerzos o fuerzas externas. Con los estudios que se han ejecutado, se han hallado los estados tensionales de los prototipos en las zonas más conflictivas, sus desplazamientos en el espacio, deformaciones, límite elástico y factor de seguridad.

- **Tensión de Von Misses.** La teoría expone que un material dúctil comienza a ceder en una ubicación cuando la tensión de von Mises es igual al límite de tensión. Se calcula de la siguiente manera: $\sigma_{\text{vonMises}} = \{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] / 2\}^{1/2}$
- **Límite elástico.** El límite elástico es una propiedad dependiente de la temperatura. Este valor especificado del límite elástico debe considerar la temperatura del componente.
- **Factor de seguridad (FDS).** Se obtiene de la siguiente forma: $\sigma_{\text{limit}} / \sigma_{\text{vonMises}}$
- **Desplazamientos.** Desplazamiento que ocurre al aplicar dicho esfuerzo.
- **Deformación unitaria.** Hace referencia a la proporción de cambio en longitud con respecto a la longitud original. Es adimensional.

Para las simulaciones, se han presentado 2 tipos de estudio: flexión y caída en el software SolidWorks 2018. Con la realización de estos estudios, se han obtenido los datos de desplazamientos y tensiones que han permitido seleccionar el material más resistente.

12.1.1 APLICACIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales que se han utilizado tienen un comportamiento isotrópico, es decir, se comportan igual en todas las direcciones. Por lo tanto, la introducción de un nuevo material se hace una copia un material con características similares al que se quiere crear y se sustituyen los valores de las propiedades obtenidas en los ensayos. Una vez se guarda este material en la biblioteca ya se pueden aplicar para los estudios.

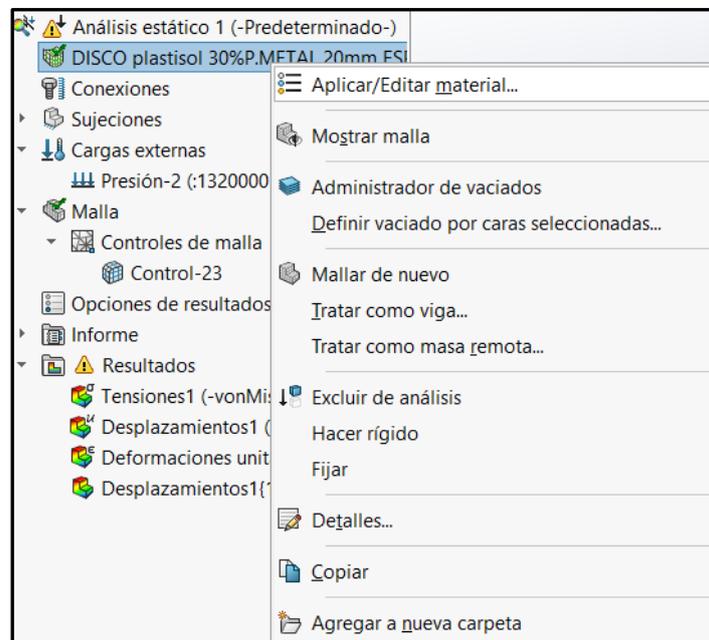


Ilustración LI - Añadir nuevos materiales a SolidWorks 2018.

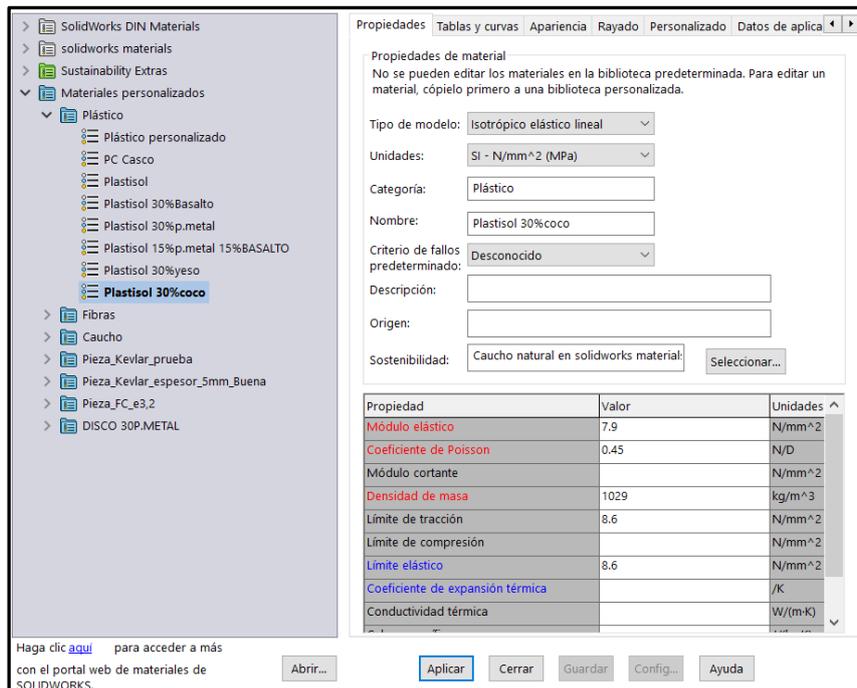


Ilustración LII - Añadir nuevos materiales a SolidWorks 2018 II.

12.1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DE LOS ESTUDIOS

ESTUDIO DE CAÍDA

La caída es el estudio principal del proyecto. En estas simulaciones se han sacado las tensiones y desplazamientos para cada prototipo con unas condiciones determinadas. Hubiera sido interesante realizar un estudio de caídas sucesivas para ver cuantas caídas podría aguantar cada prototipo, pero no se ha encontrado ningún software con el cual poder simular este tipo de ensayo. Además, según catálogos de algunas marcas calculan el número de caídas que aguanta en un banco de ensayos a los cuales con los recursos que se disponían para este Trabajo Final de Grado no ha sido posible acceder.

Se han realizado configuraciones idénticas para todos los prototipos, de esta forma se asegura que los resultados están bajo las mismas condiciones y por tanto se pueden comparar equitativamente.

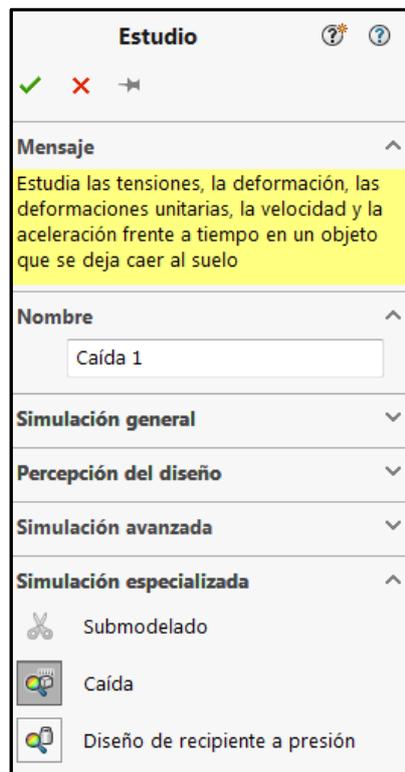


Ilustración LIII - Estudio de caída del prototipo.

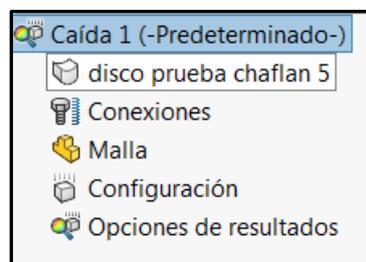


Ilustración LIV - Configuraciones del estudio de caída del prototipo.

El primer paso es crear la malla. Ésta se encarga de dividir la pieza en pequeñas partes unidas por nodos, con las cuales SolidWorks realiza el cálculo de elementos finitos (FEM). Como la zona más conflictiva es la parte inferior del disco ya que es donde recibe el golpe contra el suelo, se añade un control de mallado. A mayor densidad de malla, los resultados obtenidos sean más precisos.

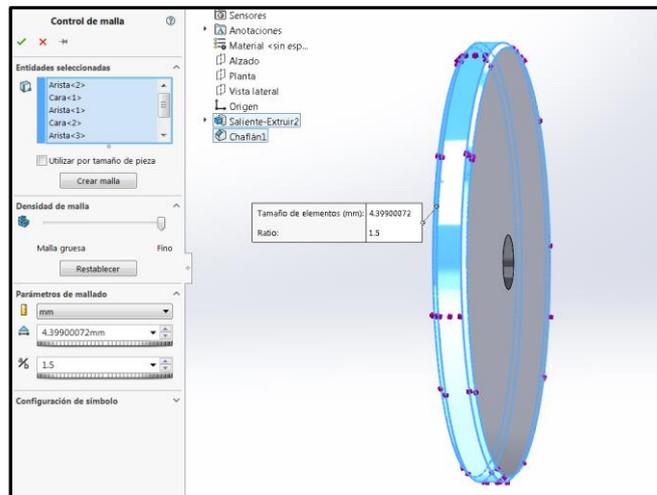


Ilustración LV - Control de malla del prototipo.

A continuación se realiza un mallado de toda la pieza. La densidad de malla será media y en parámetros de mallado se selecciona “malla basada en curvatura”.

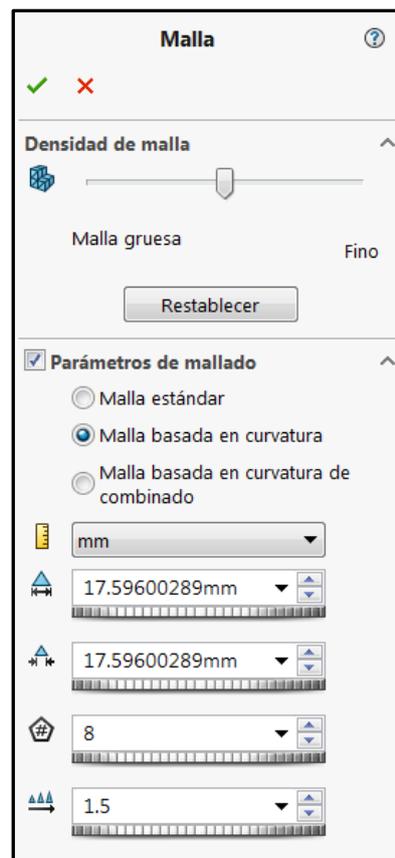
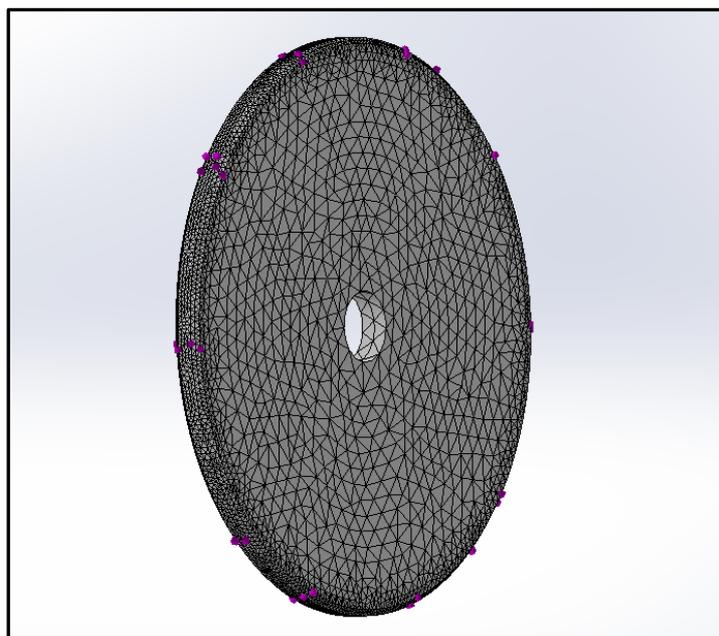
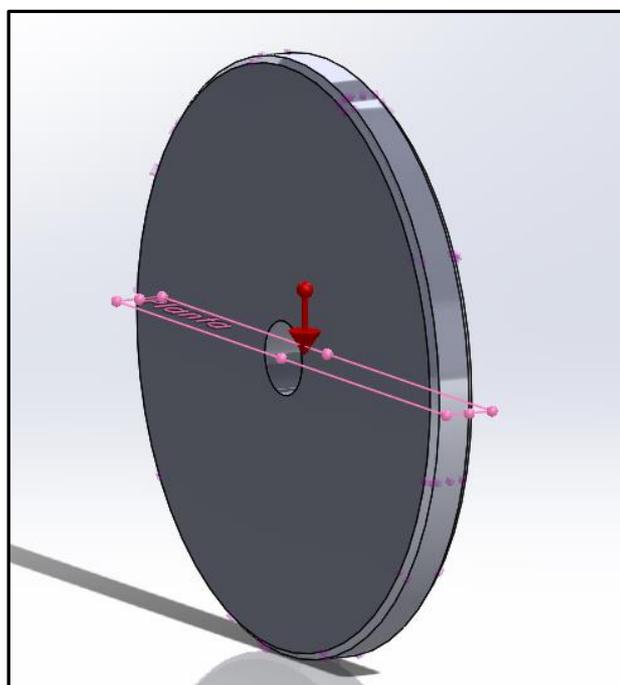


Ilustración LVI - Configuración del mallado del prototipo.



Il·lustració LVII - Mallado del prototipo en caïda.

El siguiente paso es realizar la configuración del estudio. Esta configuración será fija para todos los estudios de los prototipos.



Il·lustració LVIII - Direcció de la caïda.

Se supone una caída de 3 metros, viendo así qué material resiste mejor una caída fuerte. Se supone también un suelo rígido, para ver de manera más clara los resultados, aunque normalmente estos discos se utilicen en suelos con amortiguación.

Ilustración LIX - Configuración de análisis de caída.

Se calcula el tiempo y la altura de caída aplicando las fórmulas de caída libre:

$$H = \frac{g * t^2}{2} \rightarrow 3 = \frac{9,81 * t^2}{2} \rightarrow t = 0,785 \text{ segundos}$$

$$V_f = V_0 + g * t \rightarrow V_f = 9,81 * 0,785 \rightarrow V_f = 7,67 \text{ m/s}$$

Tras rellenar todos los parámetros, se ejecuta el estudio. Estos son los resultados obtenidos para el caucho vulcanizado:

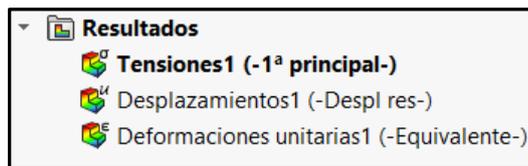


Ilustración LX - Resultados simulaciones caída del prototipo.

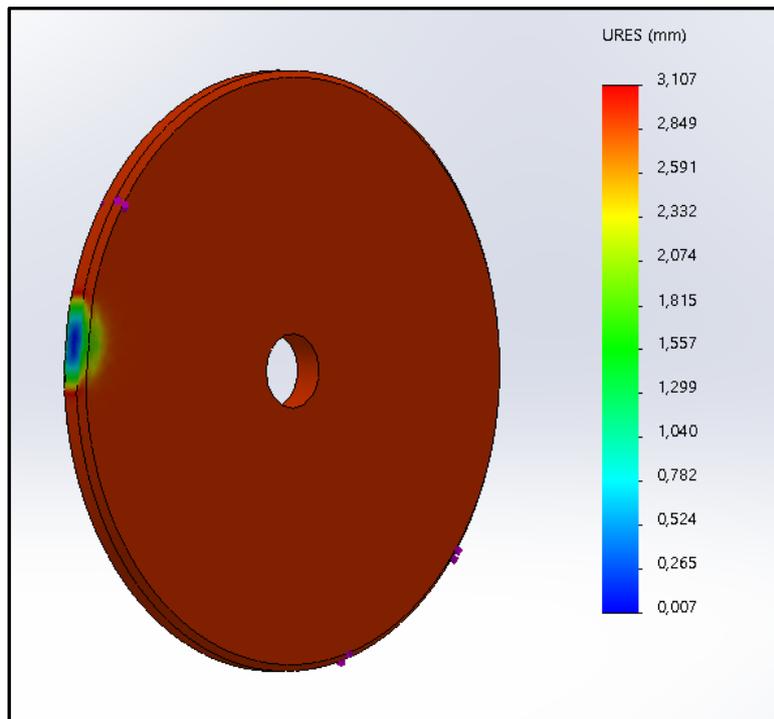


Ilustración LXI - Desplazamientos prototipo de plastisol + 30% PM en simulación de caída.

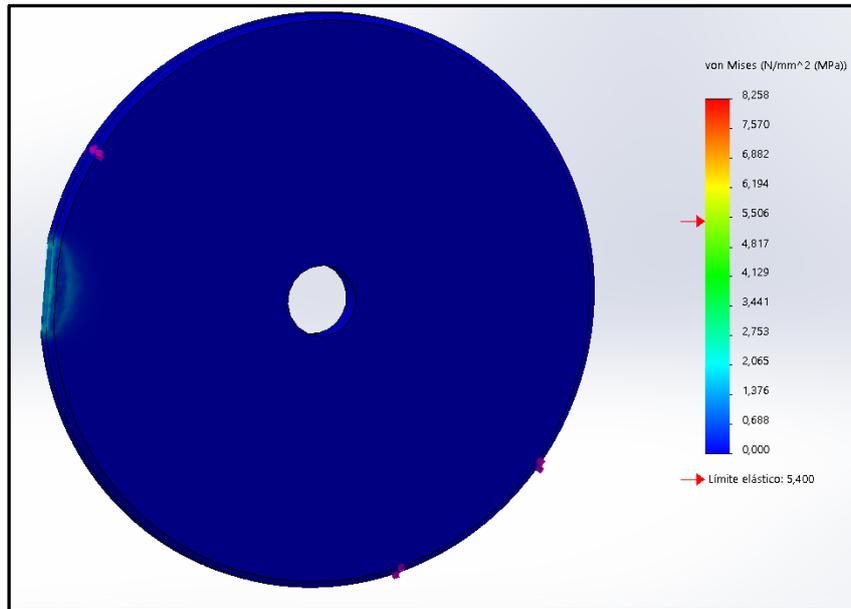


Ilustración LXII - Tensión de Von Misses prototipo de plastisol + 30% PM en simulación de caída.

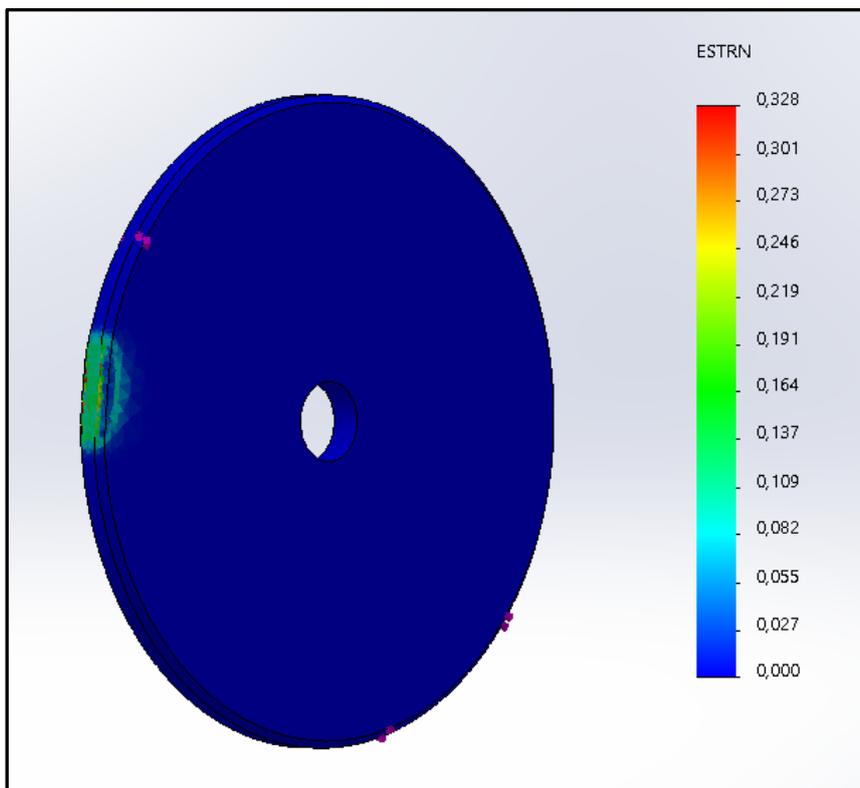


Ilustración LXIII - Deformaciones unitarias prototipo de plastisol + 30% PM en simulación de caída.

Se repite el mismo proceso con todos los materiales y se sacan los informes correspondientes. Con los resultados obtenidos se rellena la siguiente tabla con los valores más considerables:

MATERIAL	TENSIÓN DE VON MISSES (MPa)	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	DESPLAZAMIENTOS (mm)	DEFORMACIÓN UNITARIA
Caucho vulcanizado	1,12	21	3,33	0,353
Caucho vulc. + 30% PM	6,67	6,6	3,14	0,339
Caucho vulc. + 15% PM	3,92	16,1	3,27	0,242
Plastisol	1,37	20,3	3,45	0,323
Plastisol + 30% FB	2,37	12	3,27	0,226
Plastisol + 30% PM	6,56	5,4	3,09	0,314
Plastisol+15% FB+15% PM	3,04	14,4	3,20	0,342
Plastisol + 30% yeso	3,17	6,4	3,32	0,209
Plastisol + 30% FC	2,14	8,6	3,48	0,168

Tabla XXX - Comparativa resultados simulaciones de caída en SolidWorks 2018.

Trazado del factor de seguridad para caída

Es importante calcular el factor de seguridad para cada prototipo para poder sacar conclusiones claras de cada material.

$$FDS = \frac{\text{Limite elástico}}{\text{Tensión máxima } (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)}$$

MATERIAL	TENSIÓN DE VON MISSES (MPa)	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	FDS
Caucho vulcanizado	1,12	21	18,78
Caucho vulc. + 30% PM	6,67	6,6	0,99
Caucho vulc. + 15% PM	3,92	16,1	4,11
Plastisol	1,37	20,3	14,77
Plastisol + 30% FB	2,37	12,1	5,06
Plastisol + 30% PM	6,56	5,4	0,82
Plastisol+15% FB+15% PM	3,04	14,4	4,73
Plastisol + 30% yeso	3,17	6,4	2,02
Plastisol + 30% FC	2,14	8,6	4,02

Tabla XXXI - Cálculo del factor de seguridad para caída.

Para que el material se pueda dar por válido, el valor del factor de seguridad debe estar por encima de 1. Todos los materiales a excepción de 2 cumplen con esta premisa. Estos son el Caucho vulcanizado + 30% de partículas metálicas y plastisol + 30% partículas metálicas. Estos resultados tienen sentido porque las partículas metálicas dan peso y consistencia pero también hacen que el disco sea menos tenaz y tenga más facilidad para la ruptura. Por tanto, estos dos materiales quedan descartados.

Por otra parte, los factores de seguridad más altos los tienen los prototipos de caucho vulcanizado y el plastisol sin reforzar. Con este estudio se podría pensar que están sobredimensionados, pero en realidad se ha de tener en cuenta que van a estar sometidos a múltiples caídas, no solo a una como en este estudio se calcula.

ESTUDIO DE FLEXIÓN

Realizar el estudio de flexión también es interesante ya que con caída se está suponiendo un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, pero no siempre es así. En ocasiones la barra cae en diagonal, con lo que uno de los discos cae primer y es sometido a toda la fuerza de la barra y el otro disco a alta velocidad por su parte central (donde va sujeta la barra), por lo que tiende a pandear.

Para hacer las simulaciones de flexión, se tuvieron que hacer unas pequeñas modificaciones en el diseño del prototipo. Se necesitaron añadir dos partes fijas en los extremos para poder simular el flexión que sufre el disco cuando la barra golpea contra él. Además se añade un redondeo en el núcleo del disco para poder aplicar la fuerza requerida en dicho punto.

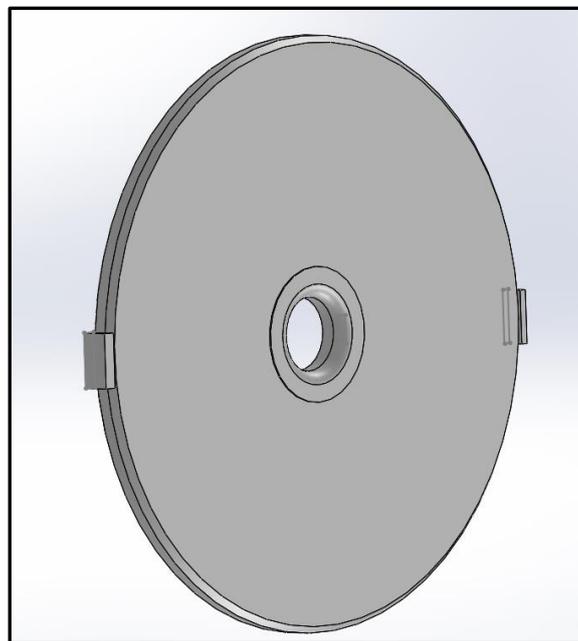


Ilustración LXIV - Prototipo modificado para simulaciones de flexión.

Para calcular la magnitud de la fuerza aplicada, es necesario conocer su velocidad de impacto y su energía cinética. Para ello se aplican las fórmulas de conservación de la energía sobre un objeto en caída libre.

- Igual que en la simulación de caída, se supone una altura de 3 metros.
- La velocidad de impacto a esa altura, ya calculada, es igual a 7,67 m/s.
- La masa se ha supuesto de 30kg, equivalente a la masa de la barra (20kg) + la masa de otro disco semejante de 10 kg alojado en el otro extremo de la barra.

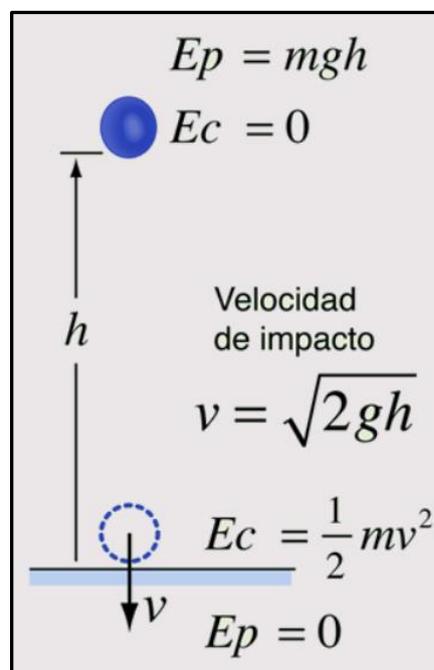


Ilustración LXV - Ley de conversión de la energía.

Con estos valores se calcula la energía cinética en el momento del impacto:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} * 30 * 7,67^2 = 907 \text{ J}$$

Para sacar la fuerza media de impacto, se aplica el principio de trabajo-energía. Para hacer este cálculo, Es necesario saber la distancia que recorre el disco tras el impacto, es decir, la cantidad que se hunde en el suelo. Para hacer los ensayos lo más objetivos posible, en los ensayoas de caída se ha comentado que el suelo era rígido, por tanto para calcular la fuerza de impacto en este apartado se ha supuesto un suelo prácticamente rígido, por tanto el recorrido del disco es el mínimo posible, $d = 0,01 \text{ m}$.

$$F_{\text{impacto}} = \frac{Ec}{d} = \frac{907 \text{ J}}{0,01 \text{ m}} = 90.700 \text{ N}$$

Para la configuración del ensayo, se añaden dos anclajes fijos en los extremos del disco. Estos anclajes ayudan a simular el momento del disco cuando golpea contra el suelo y la barra ejerce la fuerza sobre él en núcleo y se produce el flexión

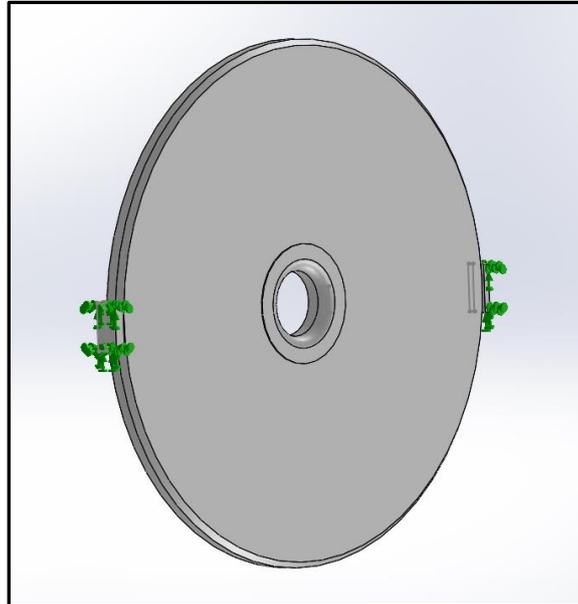


Ilustración LXVI - Anclajes fijos para la simulación flexión.

Para la aplicación de las fuerzas, se ha considerado ésta como una presión ejercida sobre el área de impacto de la barra contra el disco. Para ello se ha calculado el área de las zonas sobre las que se va a ejercer la presión:

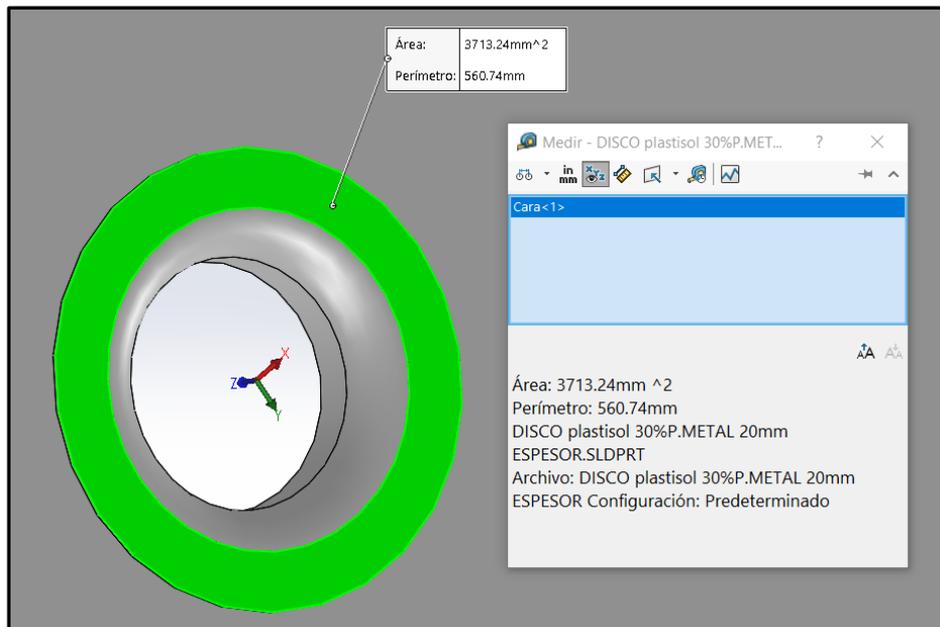


Ilustración LXVII - Área zona redondeada exterior del núcleo del prototipo.

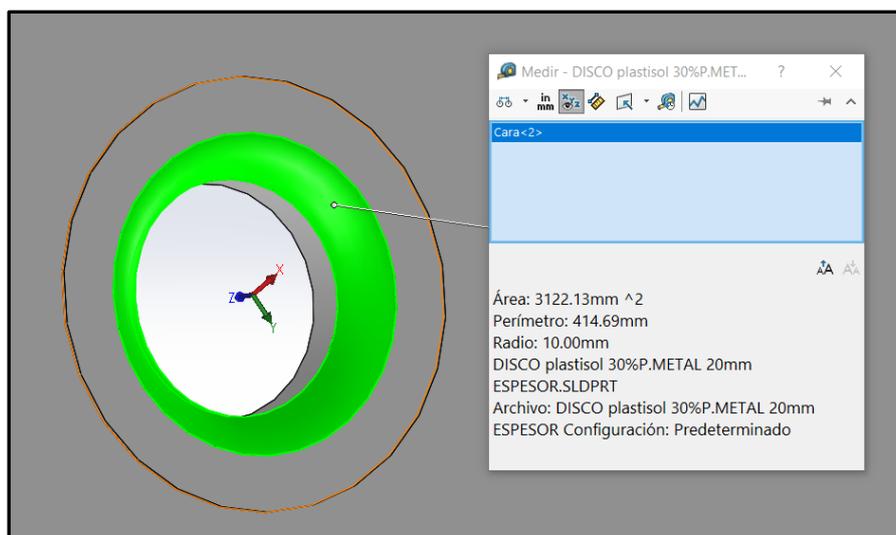


Ilustración LXVIII - Área zona redondeada interior del núcleo del prototipo.

Àrea total zona redondeada = Àrea interior + Àrea exterior

$$\text{Àrea total zona redondeada} = 3122,13 \text{ mm}^2 + 3713,24 \text{ mm}^2 = \mathbf{6835,37 \text{ mm}^2}$$

Las unidades que se han utilizado para introducir la presión en la simulación con N/m^2 , por lo que para calcularlo, se debe establecer una relación entre la fuerza de impacto y el área:

$$90.700 \text{ N} \div 6835,37 \text{ mm}^2 \rightarrow \mathbf{1.326.921 \text{ N/m}^2}$$

Se introduce la presión en la configuración, de tal forma que quedan así:

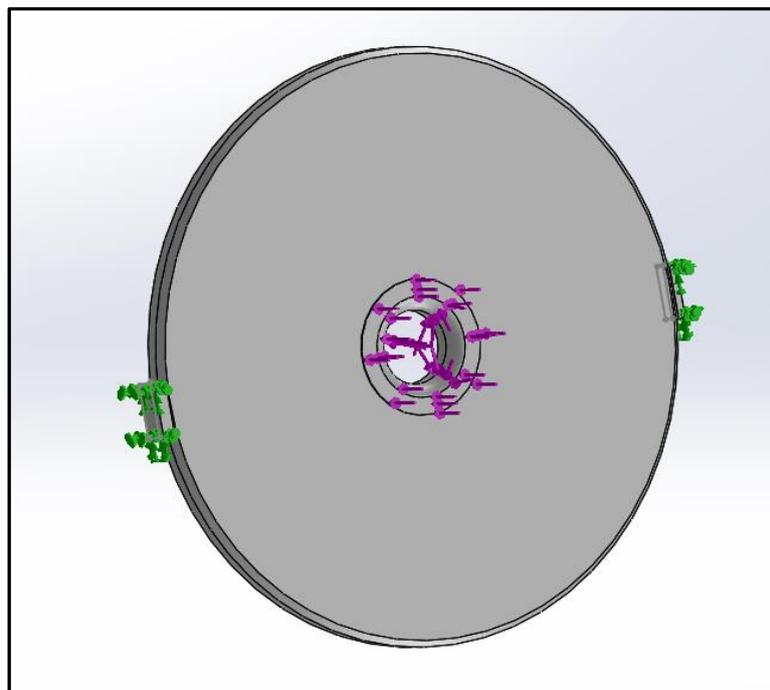


Ilustración LXIX - Aplicación de fuerzas para la simulación de flexión.

Se repite el proceso de control de mallado y creación de malla para obtener mejores resultados.

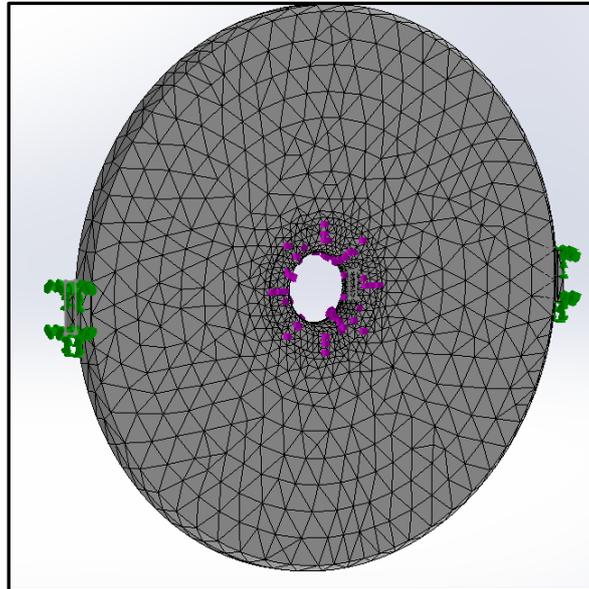


Ilustración LXX - Mallado del prototipo en flexión.

Tras crear el mallado, se ejecuta la simulación dando estos resultados:

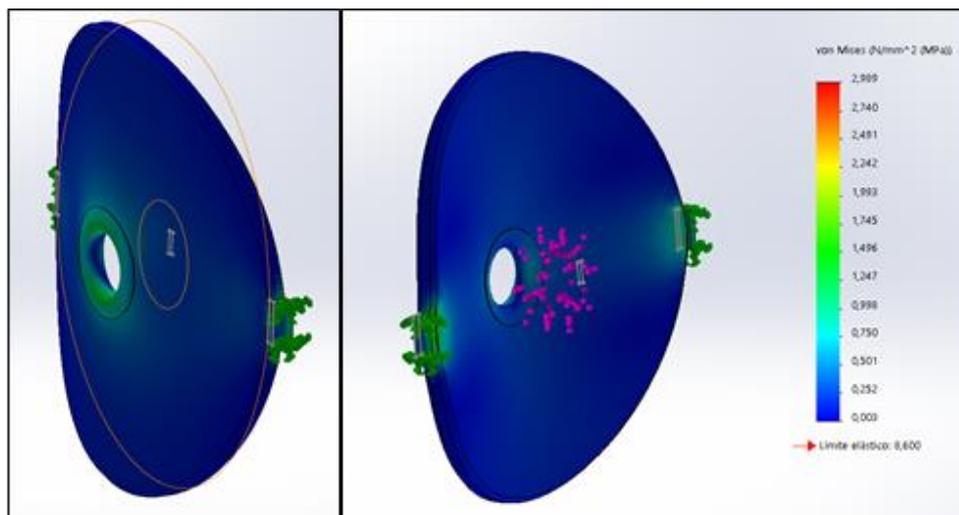
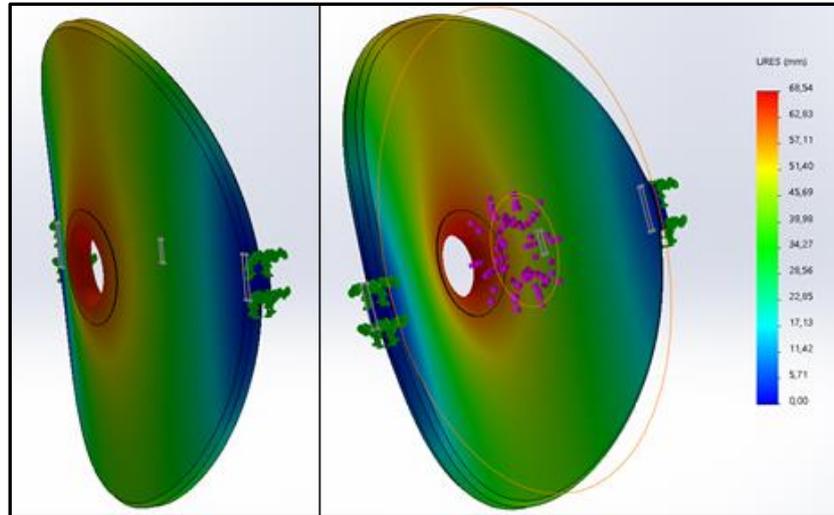
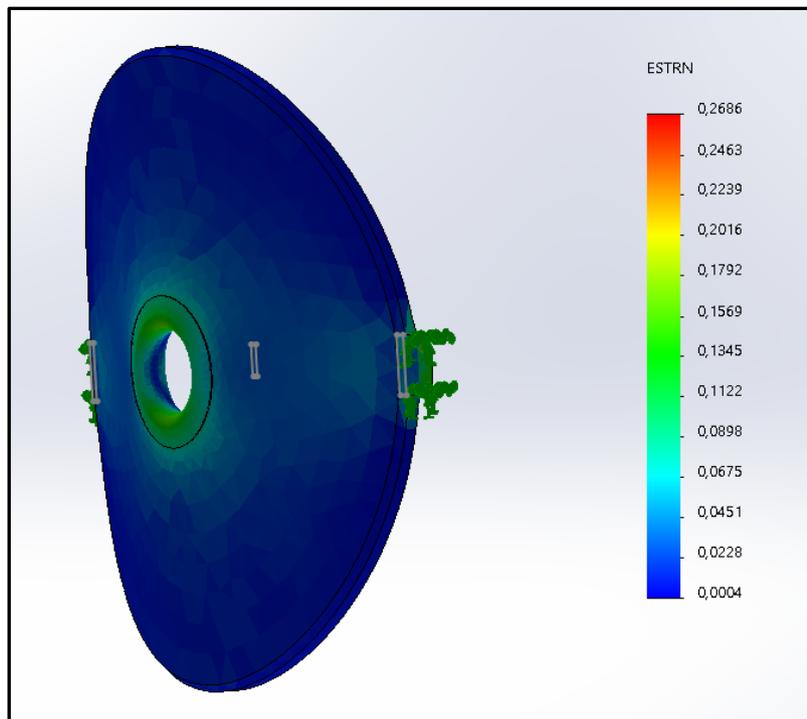


Ilustración LXXI - Tensión de Von Mises prototipo de plastisol + 30% PM en simulación en flexión.



Il·lustració LXXII - Desplazamiento prototipo de plastisol + 30% PM en simulación en flexión.



Il·lustració LXXIII - Deformación unitaria prototipo de plastisol + 30% PM en simulación en flexión.

En este caso no se han tenido en cuenta las tensiones máximas de Von Mises porque éstas no se encuentran en la zona central que es el punto de interés, sino en las sujeciones de los extremos. Las tensiones en estas zonas se ignoran ya que se han construido exclusivamente para correcta ejecución del estudio (poder tener una parte fija a la cual poner el anclaje). Por ello, se ha tenido en cuenta el punto de mayor tensión de la parte del núcleo de cada prototipo.

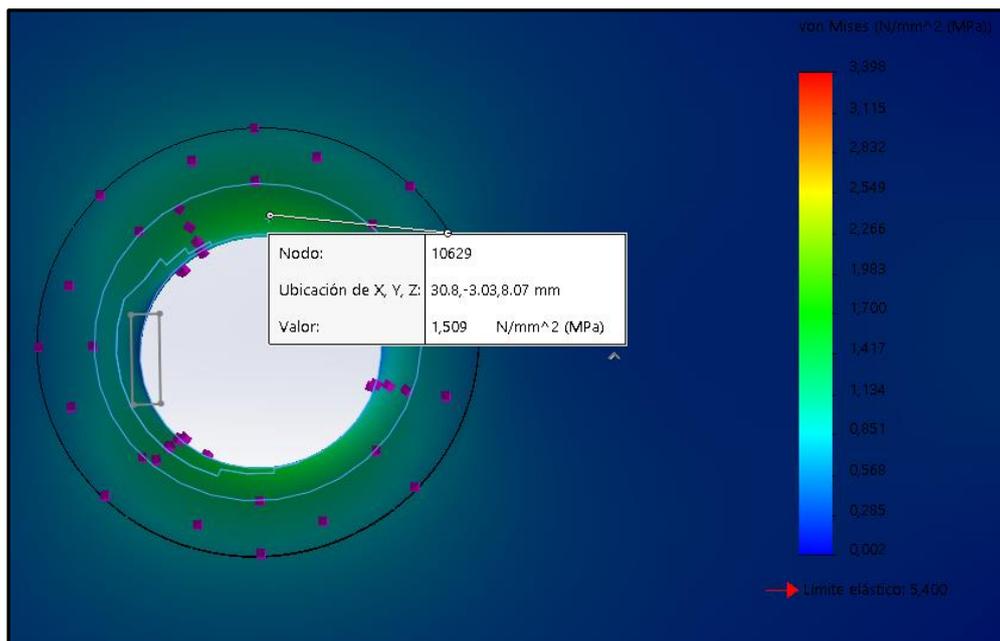


Ilustración LXXIV - Vista detalle tensión de Von Mises en disco plastisol + 30% partículas metálicas.

MATERIAL	TENSIÓN DE VON MISES (MPa)	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	DESPLAZAMIENTOS (mm)	DEFORMACIÓN UNITARIA
Caucho vulcanizado	0,325	21	52,53	0,1074
Caucho vulc. + 30% PM	0,451	6,2	57,12	0,1204
Caucho vulc. + 15% PM	0,253	16,1	43,81	0,0988
Plastisol	0,125	20,3	38,79	0,089
Plastisol + 30% FB	0,186	12,1	33,56	0,0728
Plastisol + 30% PM	0,447	5,4	59,64	0,1105
Plastisol+15% FB+15% PM	0,318	14,4	55,51	0,1184
Plastisol + 30% yeso	0,178	6,4	30,93	0,639
Plastisol + 30% FC	0,115	6,4	19,53	0,0381

Tabla XXXII - Comparativa resultados simulaciones de flexión en SolidWorks 2018.

Trazado del factor de seguridad para flexión

Igual que en caída, se calcula el factor de seguridad para cada prototipo:

$$FDS = \frac{\text{Limite elástico}}{\text{Tensión máxima } (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)}$$

Realizando los cálculos, se obtienen los siguientes resultados de factor de seguridad:

MATERIAL	TENSIÓN DE VON MISES (MPa)	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	FDS
Caucho vulcanizado	0,325	21	64,62
Caucho vulc. + 30% PM	0,451	6,2	13,75
Caucho vulc. + 15% PM	0,253	16,1	63,64
Plastisol	0,125	20,3	162,40
Plastisol + 30% FB	0,186	12,1	65,05
Plastisol + 30% PM	0,447	5,4	12,08
Plastisol+15% FB+15% PM	0,318	14,4	45,28
Plastisol + 30% yeso	0,178	6,4	35,96
Plastisol + 30% FC	0,115	6,4	55,65

Tabla XXXIII - Cálculo del factor de seguridad para flexión.

Los factores de seguridad tan altos advierten de que los discos están sobredimensionados, pero hay que tener en cuenta que no se trata solo de un estudio en concreto en un momento determinado. Estos discos estarán sometidos a golpes y flexiones constantes, lo que hará que el material pueda acabar cediendo.

		FDS CAÍDA	FDS FLEXIÓN	PRECIO (€/kg)	PRECIO DISCO 10 KG (€)	ESPESOR (mm)
CAUCHO VULCANIZADO	VULCANIZADO	18,78	64,62	1,33	13,3	65,0
	VULC. + 30% PM	0,99	13,75	2,20	22,0	22,0
	VULC. + 15% PM	4,11	63,64	2,00	20,0	31,9
PLASTISOL	0	14,77	162,40	2,06	20,6	54,4
	30% FB	5,06	65,05	3,20	32,0	37,7
	30% PM	0,82	12,08	1,95	19,5	20,0
	15%PM + 15% FB	4,73	45,28	2,90	29,0	26,0
	30% Yeso	2,02	35,96	1,457	14,5	42,2
	30% Fibra Coco	4,02	55,65	1,90	19,0	61,8

Tabla XXXIV - Comparativa factores de seguridad y precios de cada prototipo.

Se ha realizado esta tabla para ver de forma más clara las diferencias entre todos los materiales y los factores que se deberán tener en cuenta. De cada tipo de ensayo se ha sacado su factor de seguridad y teniendo en cuenta el precio por kg, se ha calculado que costaría el material de cada disco. Además, el espesor es otro parámetro a tener en cuenta ya que de él depende la cantidad de discos que pueden abarcar los manguitos de una barra, a mayor espesor, menos discos pueden caber.

Se comprueba que el caucho vulcanizado es el que mejores propiedades tiene y el material que más resistencia tiene tanto a impacto como a flexión, además de ser el más económico, pero por otra parte aparece el problema de su voluminosidad. Como se ha explicado en este proyecto, algunos fabricantes añaden partículas metálicas al caucho vulcanizado para añadirle densidad y así que el volumen de los discos sea menor, pero empeorando sus propiedades.

Con este proyecto se ha buscado innovar en este sector, por lo que aunque el caucho vulcanizado haya sido el más resistente de todos los materiales probados, cabe mirar otro punto de vista, por ejemplo el del volumen.

Otros materiales como el plastisol + 15% Partículas metálicas + 15% Fibras de Basalto y el plastisol con 30% de fibra de basalto tiene también unos factores de seguridad bastante altos. Además, sus espesores son $1/3$ y $1/2$ respectivamente del espesor del prototipo de caucho vulcanizado. Estos dos materiales también son buenos candidatos para realizar el diseño y reestyling de la pieza.

Por otro lado, el plastisol y el plastisol + 30% de fibra de coco se puede observar que también tienen buenos factores de seguridad sobre todo en flexión, pero tienen el mismo problema que el caucho vulcanizado, un espesor demasiado grande.

Finalmente, se ha optado por coger las dos opciones más seguras, el caucho vulcanizado y el plastisol con fibras de basalto y partículas metálicas. Así se podrá hacer una comparación de realizar el estudio con distintos materiales para su posterior comparación.

13. DISEÑO FINAL

Para el diseño final, se ha tenido en cuenta el prototipo inicial con algunas modificaciones. Por seguridad, se han añadido refuerzos tanto en el núcleo como en el borde para aumentar su resistencia. Por otra parte se ha realizado el diseño definitivo del núcleo, realizado en acero cromado.

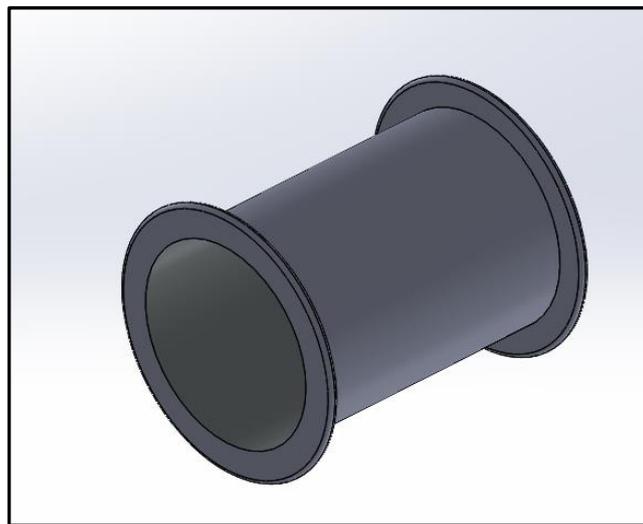
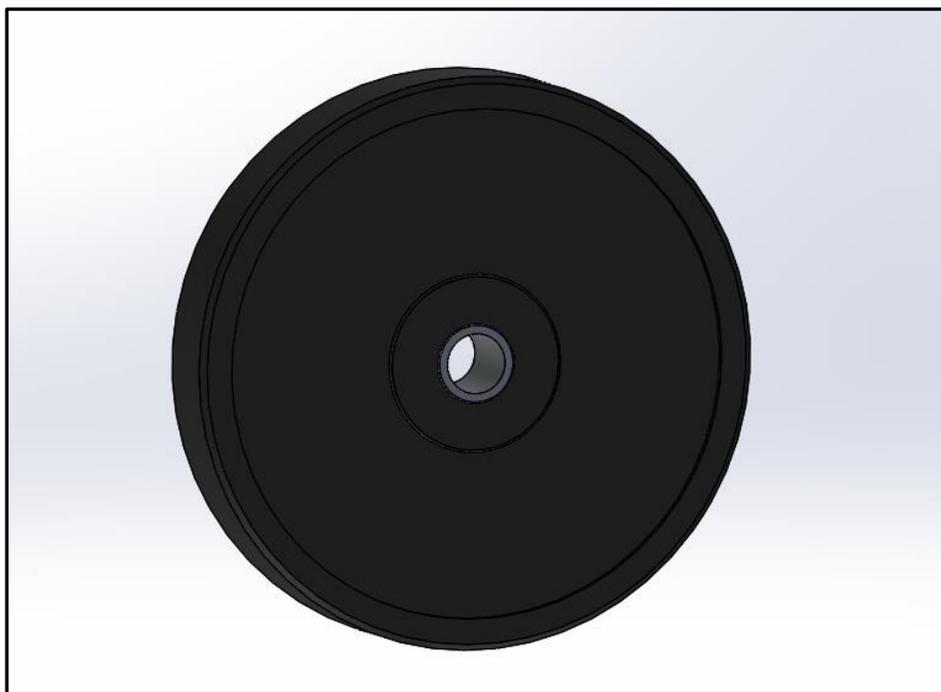


Ilustración LXXV - Diseño final núcleo de acero cromado

DIMENSIONES DEL DISCO DE CAUCHO VULCANIZADO	
Diámetro exterior del disco	450 mm
Diámetro interior del disco	50 mm
Chablán borde exterior	5mm
Espesor intermedio	65 mm
Espesor borde	75 mm
Espesor núcleo	69 mm

Tabla XXXV - Dimensiones del disco de caucho vulcanizado



Il·lustració LXXVI - Disseny final del disc de cautxó vulcanitzat amb el muntatge del nucli.

DIMENSIONES DEL DISCO DE PL + 15% PM + 15% FB	
Diámetro exterior del disco	450 mm
Diámetro interior del disco	50 mm
Chablán borde exterior	5 mm
Espesor intermedio	26 mm
Espesor borde	36 mm
Espesor núcleo	28 mm

Tabla XXXVI - Dimensiones del disco de PL + 15% PM + 15% FB

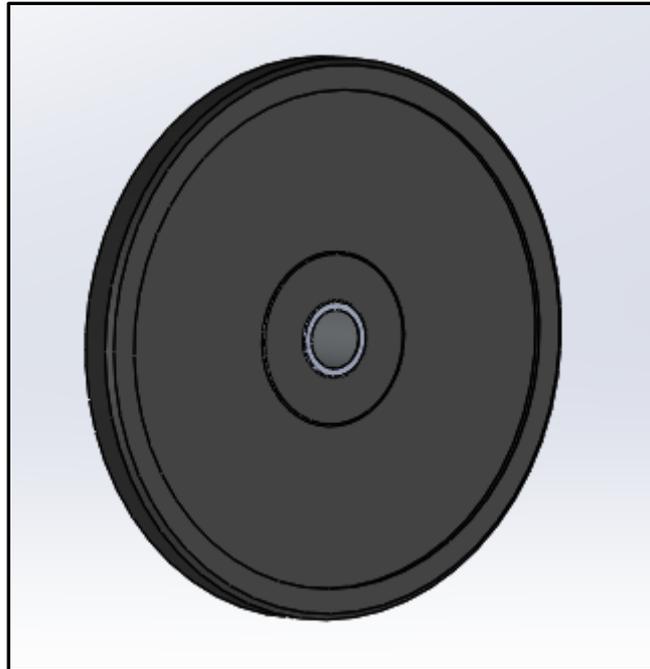


Ilustración LXXVII - Diseño final del disco de plastisol con partículas metálicas y fibra de basalto con el ensamblaje del núcleo.

Por otra parte, se han realizado de nuevo las simulaciones de caída, ya que era las simulaciones más conflictiva en cuanto al factor de seguridad se refiere.

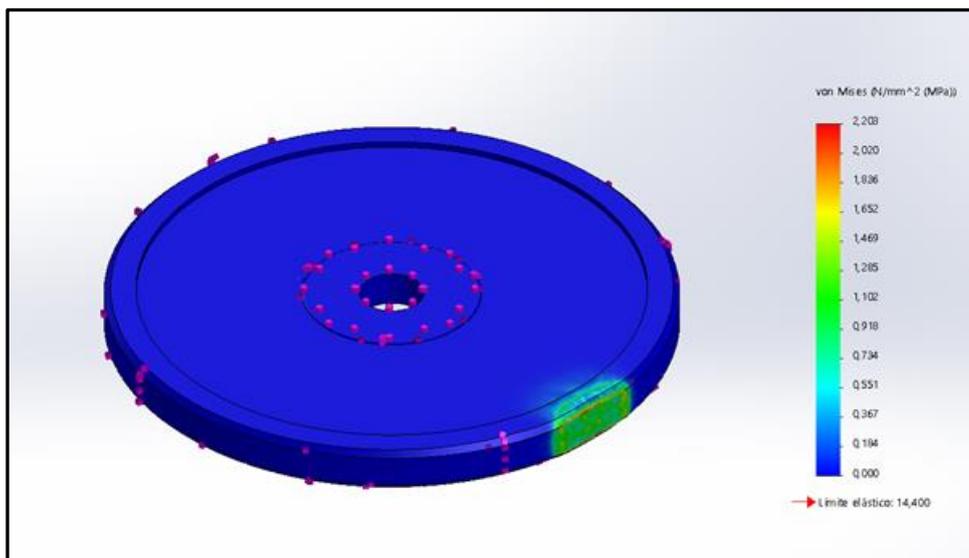


Ilustración LXXVIII – Tensión de Von Mises del diseño final del disco de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto en caída.

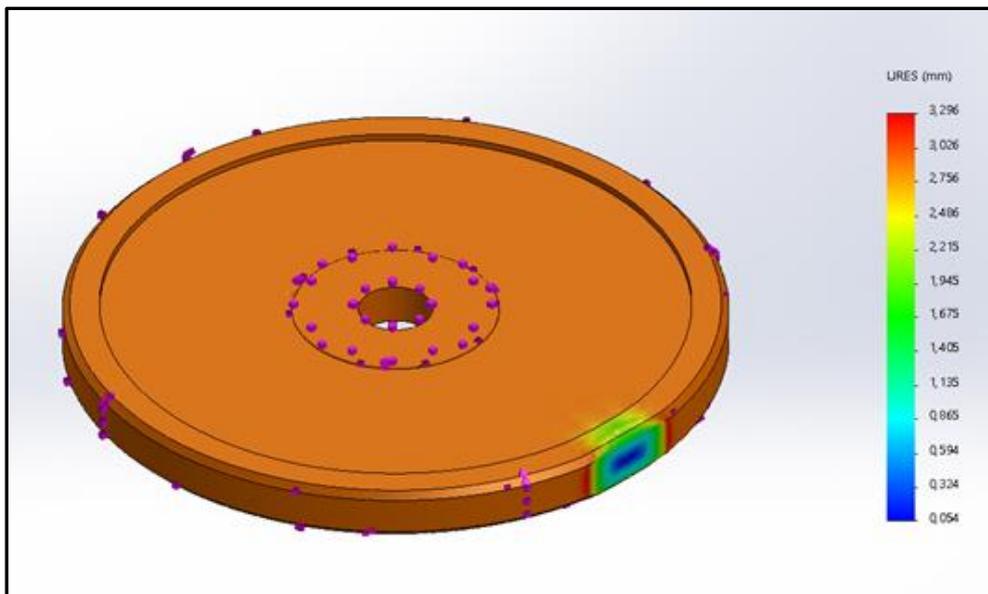


Ilustración LXXIX - Desplazamiento del diseño final del disco de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto en caída.

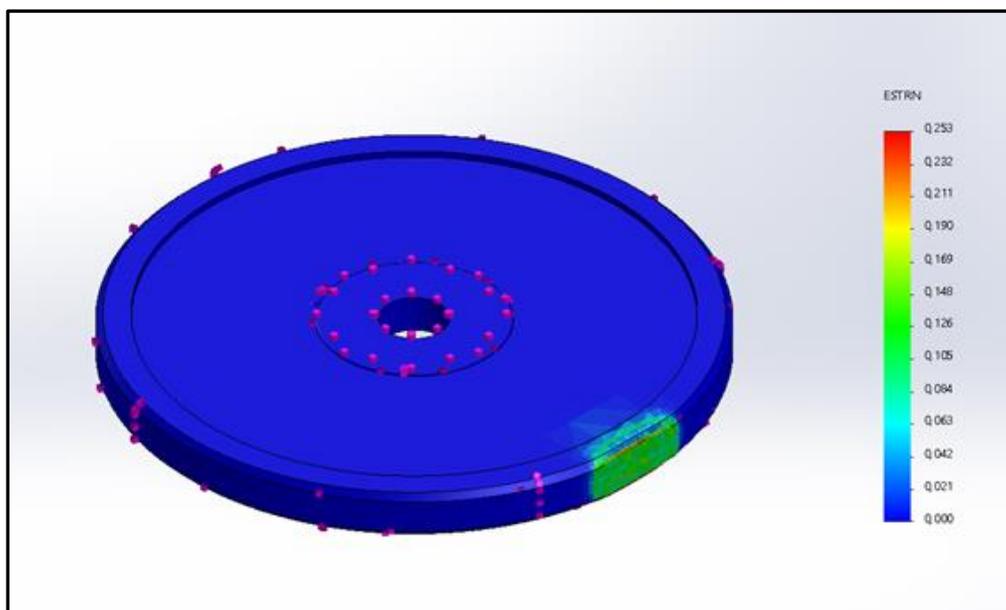


Ilustración LXXX - Desplazamientos unitarios del diseño final del disco de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto en caída.

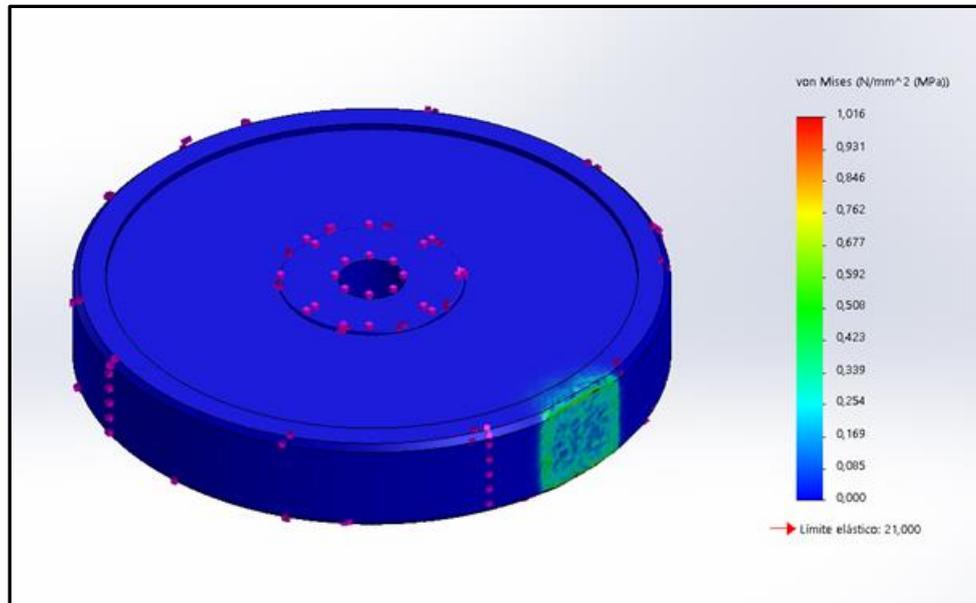


Ilustración LXXXI - Tensión de Von Mises del diseño final del disco de caucho vulcanizado en caída.

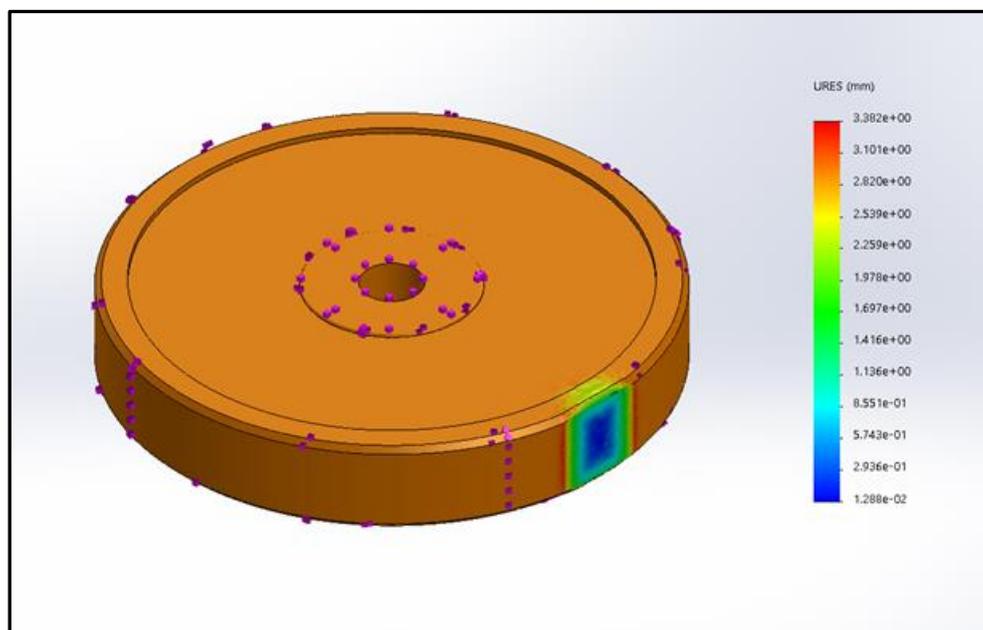
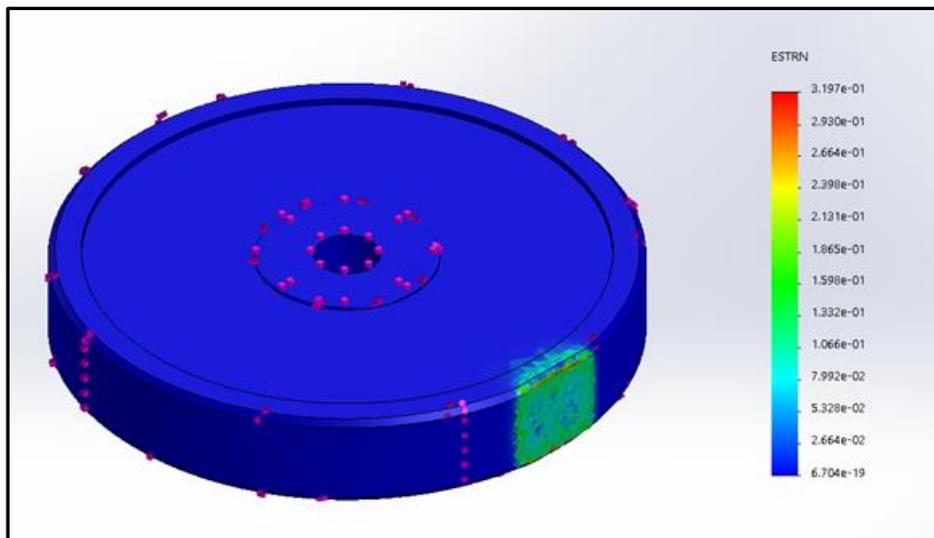


Ilustración LXXXII - Desplazamientos del diseño final del disco de caucho vulcanizado en caída.



Il·lustració LXXXIII - Desplazamientos unitarios del diseño final del disco de caucho vulcanizado en caída.

	FDS SIN REFUERZOS (PROTOTIPO)	FDS CON REFUERZOS (DISEÑO FINAL)
CAUCHO VULCANIZADO	18,78	20,67
PLASTISOL + 15%PM + 15% FB	4,73	6,52

Tabla XXXVII - Comparativa factor de seguridad entre diseño final y prototipo en caída.

Se realiza también el estudio de flexión para la comparativa con el prototipo inicial.

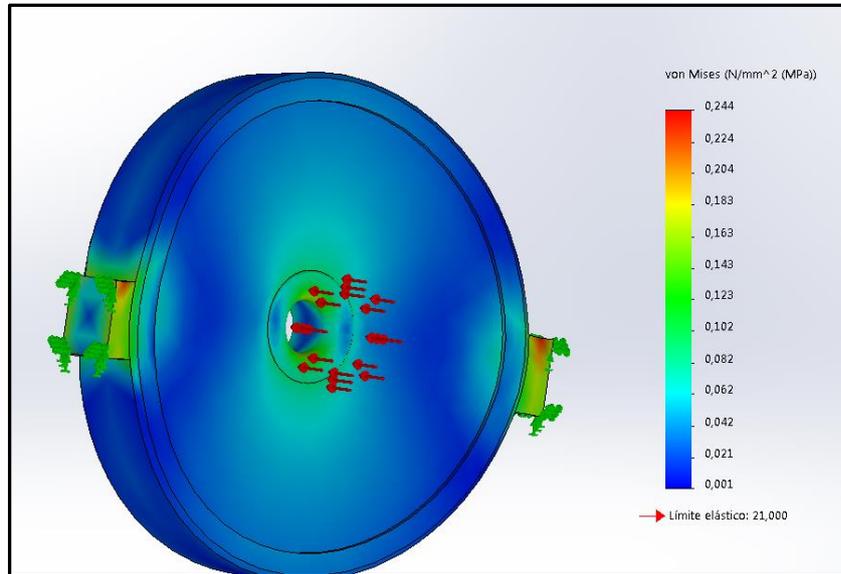


Ilustración LXXXIV - Tensión de Von Misses del diseño final del disco de caucho vulcanizado en flexión.

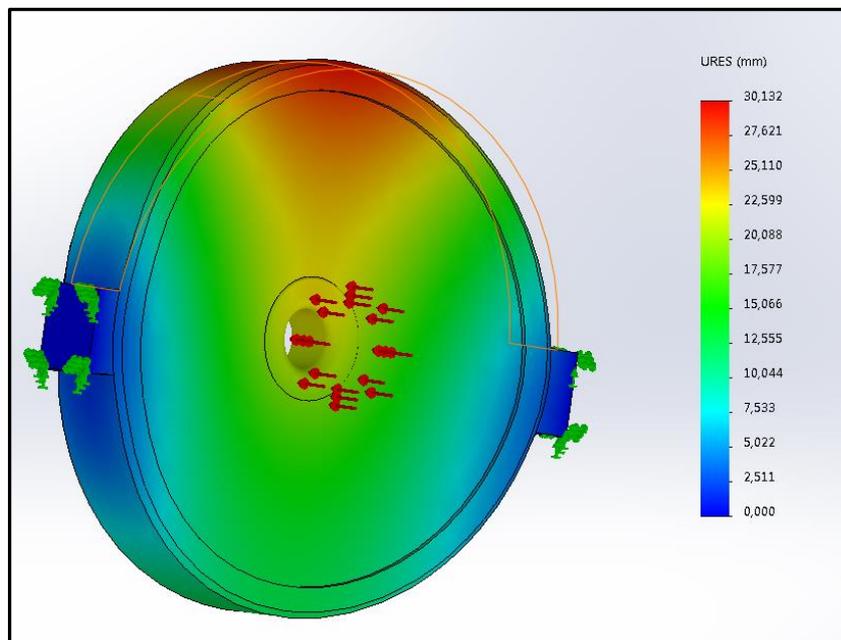
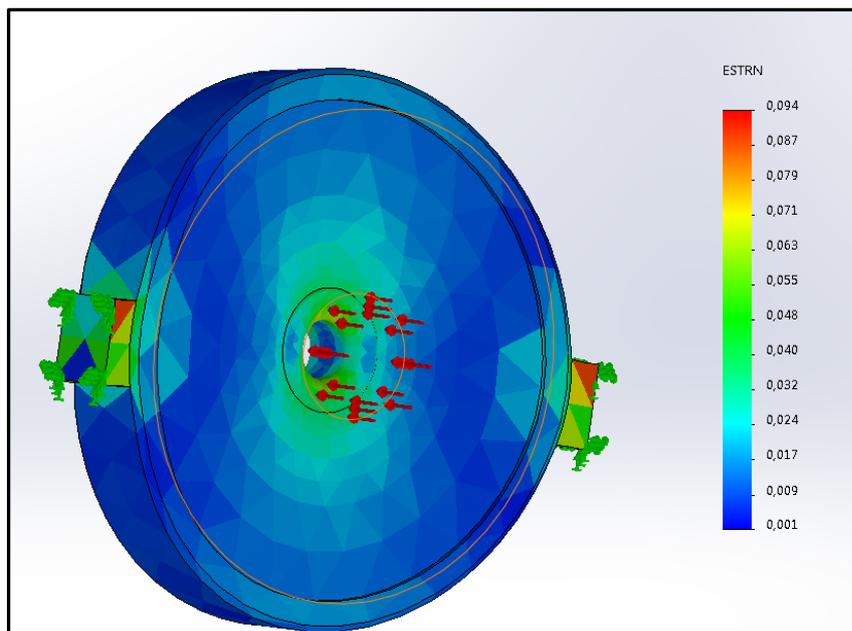
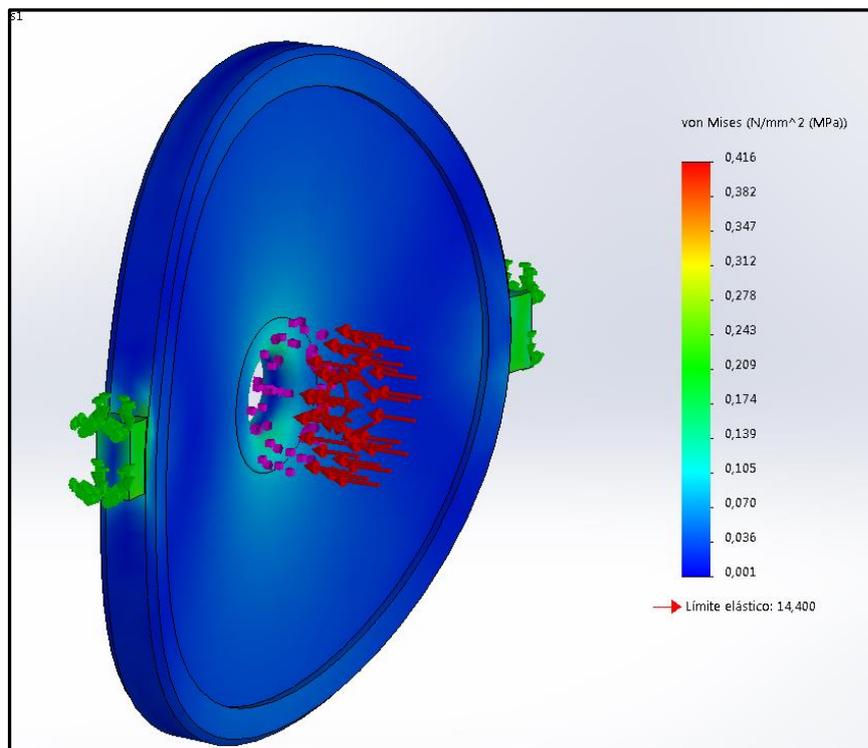


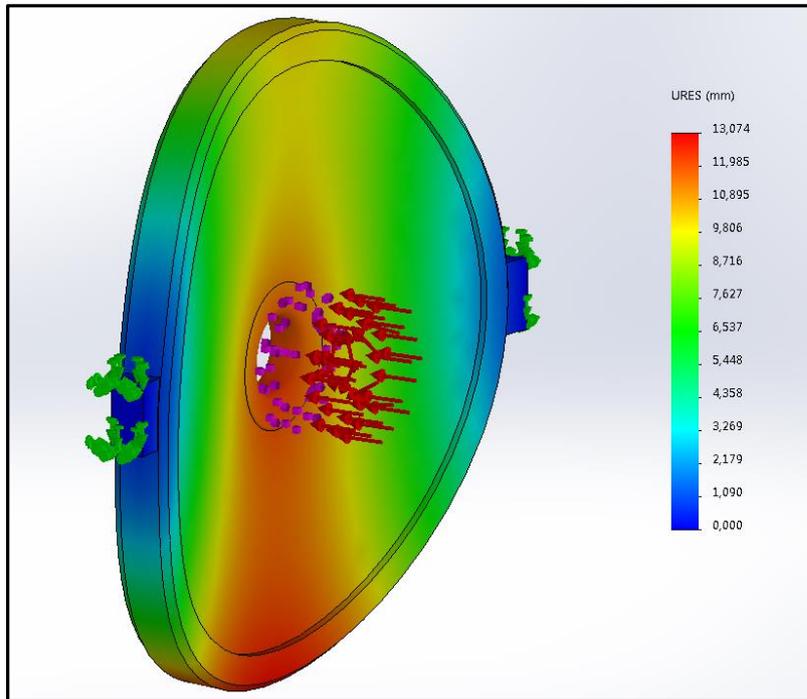
Ilustración LXXXV - Desplazamientos del diseño final del disco de caucho vulcanizado en flexión



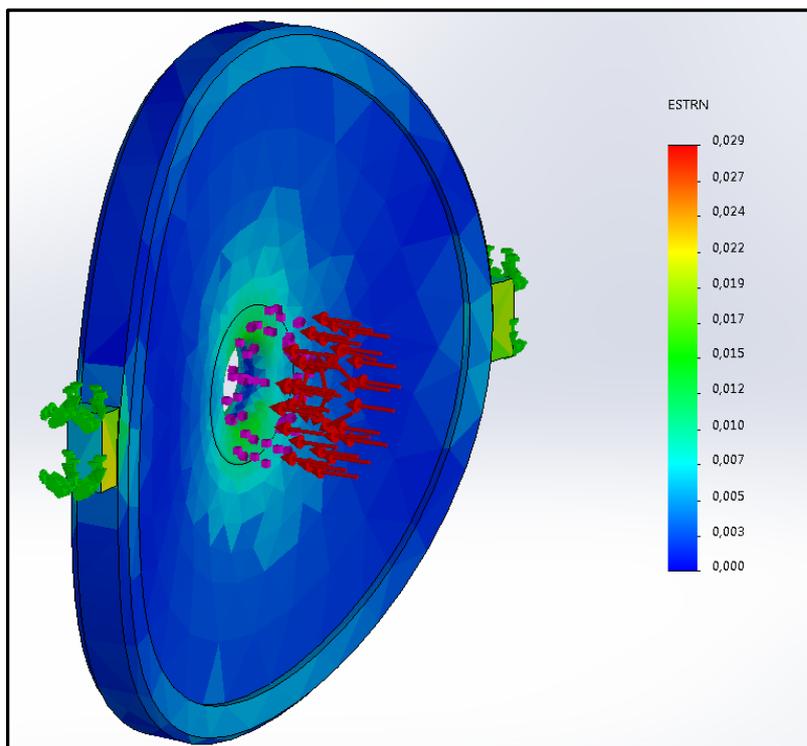
Il·lustració LXXXVI - Desplazamientos unitarios del diseño final del disco de caucho vulcanizado en flexión.



Il·lustració LXXXVII - Tensió de Von Mises del diseño final del disco de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto en flexión.



Il·lustració LXXXVIII - Desplazamiento del diseño final del disco de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto en flexión.



Il·lustració LXXXIX - Desplazamientos unitarios del diseño final del disco de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto en flexión.

	FDS SIN REFUERZOS (PROTOTIPO)	FDS CON REFUERZOS (DISEÑO FINAL)
CAUCHO VULCANIZADO	64,62	138,15
PLASTISOL + 15%PM + 15% FB	45,28	98,63

Tabla XXXVIII - Comparativa factor de seguridad entre diseño final y prototipo en flexión.

14. ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE CONTORNO

Se ha realizado el ensamblaje de todo el conjunto: barra, discos y collarines, además del subensamblaje del disco con el núcleo de acero cromado.

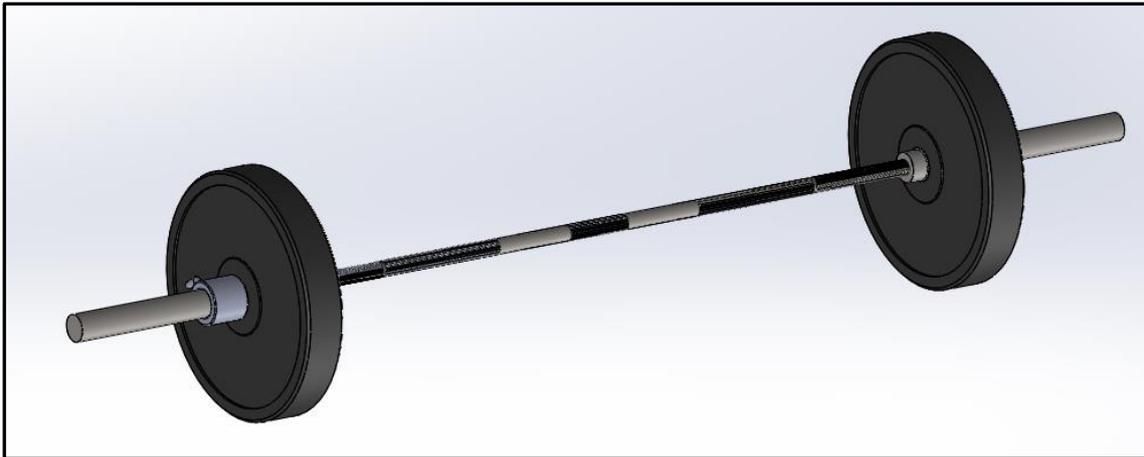


Ilustración XC - Ensamblaje conjunto con los discos de caucho vulcanizado.

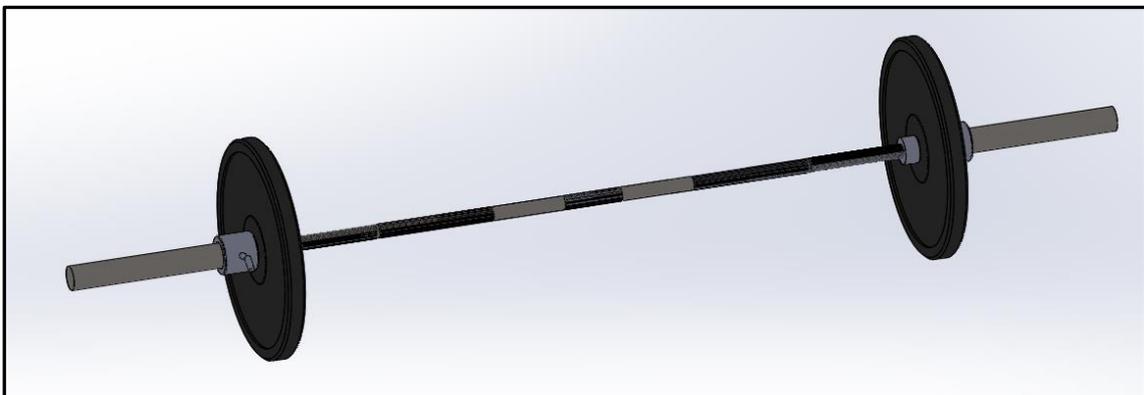


Ilustración XCI - Ensamblaje conjunto con los discos de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto.

Hubiera sido interesante realizar el estudio de caída con todo el ensamblaje, pero ha resultado imposible dada la complejidad. Aparece error al intentar crear el mallado.

Otro parámetro a tener en cuenta es la cantidad de discos de puede albergar la barra. Es interesante este dato ya que puede variar mucho la cantidad de peso que se puede cargar en la barra. La longitud cargable de la manga es de 415mm. Si se trata de cargar al máximo la barra, se obtienen estos resultados:

- **Nuevo espesor del disco de caucho vulcanizado:** 75 mm
- **Longitud cargable de la manga de la barra:** 415 mm
- **Número de discos que caben por manga:** $415/75 = 5,53 \rightarrow 5$ discos /manga
- **Número de discos que caben por barra:** $5 \times 2 = 10$ discos / barra
- **Masa máxima cargada en la barra:** 10 discos x 10 kg = **100 kg de peso máximo**

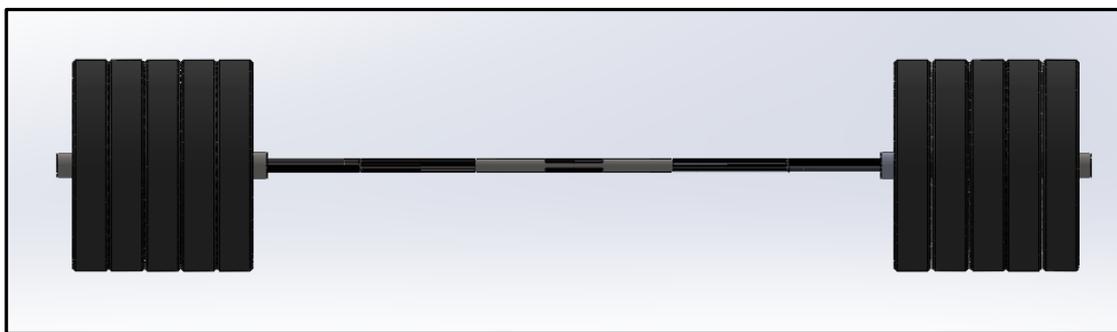


Ilustración XCII - Ensamblaje conjunto con máximos discos de caucho vulcanizado.

- **Nuevo espesor del disco de plastisol con basalto y partículas metálicas:** 36 mm
- **Longitud cargable de la manga de la barra:** 415 mm
- **Número de discos que caben por manga:** $415/36 = 10,91 \rightarrow 10$ discos /manga
- **Número de discos que caben por barra:** $5 \times 2 = 20$ discos / barra
- **Masa máxima cargada en la barra:** 20 discos x 10 kg = **200 kg de peso máximo**

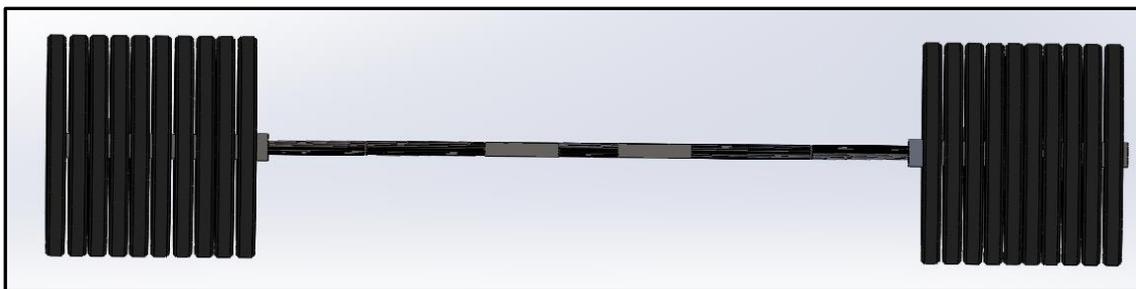


Ilustración XCIII - Ensamblaje conjunto con máximos discos de plastisol con partículas metálicas y fibras de basalto.

Se observa que la influencia del espesor es bastante grande entre una barra y otra.

15. FABRICACIÓN

Como se han seleccionado dos materiales totalmente diferentes, se van a realizar por dos procesos de fabricación distintos. A continuación se justifican los procesos de cada material.

FABRICACIÓN DISCOS CAUCHO VULCANIZADO

Para la elección del proceso de fabricación del Caucho vulcanizado se ha utilizado de nuevo CES EduPack 2018. Este software además de la base de datos de materiales, tiene otra con procesos de fabricación óptimos para cada material. Para el caucho las opciones aportadas son las siguientes:

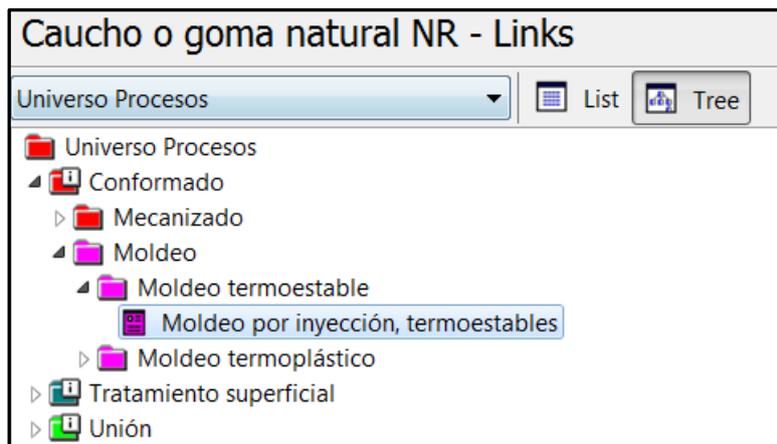


Ilustración XCIV - Posibles procesos para el caucho.

Como se ha comentado anteriormente, el caucho vulcanizado es termoestable, por lo que el proceso ideal para este material es el moldeo por inyección para termoestables. Este tipo de conformado permite crear la forma del diseño del disco además de poder añadir grabados gracias a su adaptabilidad.

MOLDEO POR INYECCIÓN, TERMOESTABLES

PROCESO

Los gránulos de caucho vulcanizado (granza) se introducen en una espiral de prensado donde se mezclan y suavizan hasta conseguir una masa de consistencia homogénea que pueda forzarse a entrar a través de uno o más canales ("bebederos") al molde. El caucho se solidifica bajo presión y la pieza es expulsada. Por otra parte, la co-inyección permite moldear piezas las piezas añadiéndole el colorante negro que se busca para estos discos.

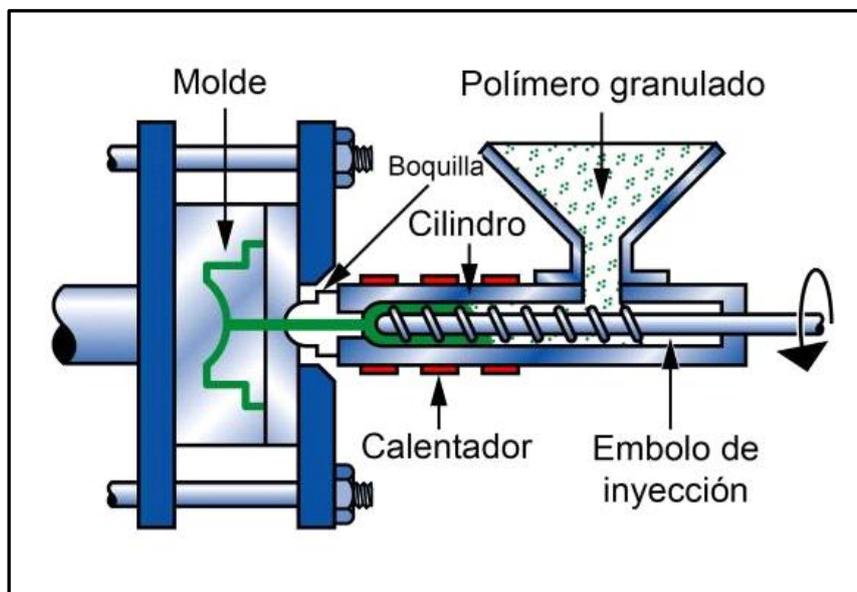


Ilustración XCV - Esquema del proceso de moldeo por inyección.

Moldeo por inyección: la granza del polímero es calentada y forzada a pasar, mediante un tornillo sinfín, a través de una boquilla hasta la matriz.

Forma				
Prisma circular	Apto			
Prisma no circular	Apto			
Solidó 3D	Apto			
Hueco 3D	Apto			
Compatibilidad económica				
Coste relativo del utillaje	Muy alto			
Coste relativo del equipamiento	Alto			
Consumo de mano de obra	Bajo			
Lote económico (unidades)	1e4	-	1e6	
Atributos de físicos y de calidad				
Rango de masas	0,001	-	25	kg
Rango de espesores	0,4	-	6,3	mm
Tolerancia	0,07	-	1	mm
Rugosidad	0,2	-	1,6	µm
Rugosidad superficial (A=muy suave)	A			

Tabla XXXIX - Aptitudes del moldeo por inyección en termoestables

GUÍAS DE DISEÑO

El acabado superficial es bueno: la textura y el estampado pueden cambiarse fácilmente en la propia herramienta, y los detalles más finos se reproducen bien. Se pueden moldear etiquetas directamente sobre la pieza. La única operación de acabado es la eliminación del bebedero.

ECONOMÍA

La inversión inicial varía entre media y alta, los gastos en utillaje son normalmente elevados, lo que hace que el moldeo por inyección sea rentable sólo para lotes grandes. La velocidad de producción suele ser elevada, pueden usarse moldes multicavida o de una sola cavidad.



Ilustración XCVI - Inyectora de termoplásticos Arburg GmbH

FABRICACIÓN DISCOS PLASTISOL CON PARTÍCULAS METÁLICAS Y FIBRA DE BASALTO

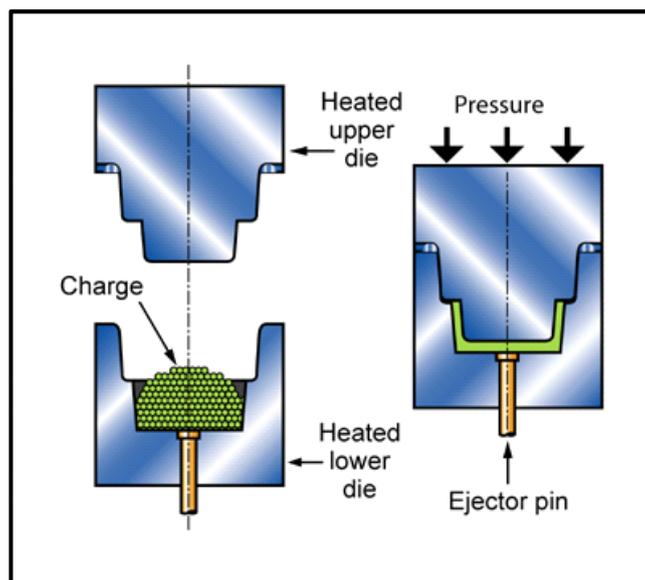
Para la elección del proceso de fabricación del plastisol con partículas metálicas y fibra de basalto, ha servido de apoyo la información aportada por la marca Ensayo sobre los procesos de fabricación que utilizan y además el software CES EduPack2018 ha sido de ayuda para encontrar información al respecto. El método seguido es el moldeo por compresión.

El moldeo por compresión es un tipo de proceso de fabricación similar a la forja y a la fundición por compresión de metales, pero se utiliza principalmente para polímeros termoestables.

En primer lugar, en un molde de metal de dos partes previamente calentado, se introduce una cantidad preestablecida del composite, en este caso el plastisol con 15% de partículas metálicas y 15% de fibra de basalto en peso. El siguiente paso es cerrar el molde creando una presión suficiente para forzar el material penetre en todos los orificios de la cavidad del molde.

Con el molde ya cerrado, se deja curar el material para posteriormente abrir el molde y retirar la pieza. Al salir del molde las piezas generalmente requieren algunas operaciones de acabado, debido a la formación de material sobrante, por lo tanto, el proceso es relativamente laborioso ya que requiere de un post-procesado.

El moldeo por compresión se utiliza con mayor frecuencia para piezas más grandes para las que a menudo es más barato que otros procesos. El límite de tamaño superior al proceso solo está limitado por la capacidad de la prensa.



Il·lustració XCVII - Esquema proceso de moldeo por compresión.

Forma			
Prisma circular	Apto		
Prisma no circular	Apto		
Solidó 3D	Apto		
Hueco 3D	Apto		
Atributos de físicos y de calidad			
Rango de masas	0,01	-	20 kg
Rango de espesores	1,5	-	25 mm
Tolerancia	0,15	-	1 mm
Rugosidad	0,2	-	1,6 µm
Rugosidad superficial (A=muy suave)	A		

Tabla XL - Aptitudes del moldeo por inyección en termoestables.

16. ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se realizará un estudio económico mediante el VAN y el TIR. El VAN calcula los ingresos que entran en la empresa, los gastos y la inversión. Si la cantidad obtenida es igual o mayor que cero, el proyecto es viable, representa los beneficios brutos.

El TIR representa el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá la empresa al realizar una inversión. Se podría decir que representa la rentabilidad del proyecto.

Para realizar el estudio económico de este proyecto se han tenido en cuenta la visión a 5 años. Se ha realizado el estudio para los discos de plastisol con fibras de basalto y partículas metálicas ya que es la novedad con respecto al caucho vulcanizado que se usa habitualmente.

Datos principales	
Precio material	2,9€/kg
Precio por disco	29€
Cantidad a fabricar	7.000 uds

Tabla XLI - Datos sobre los discos de plastisol con fibras de carbono y partículas metálica.

Inversión inicial (IO)	
Prensa calefactada 12 t	57000 €
Torno	32500 €
Máquina de corte	560 €
EPIS	1000 €
Moldes	10000 €
Total	101060 €

Tabla XLII - Inversión inicial.

Ingresos anuales		
Discos anuales	7000	Uds.
Precio fabrica	55	€
Ingresos brutos	385000€	

Tabla XLIII - Ingresos anuales

Gastos anuales			
	Unidades/Operarios	Precio unidad/kg	Coste total (€)
Coste material total	70000	2,9	203000
Alquiler Nave	12	4000	48000
Mano de obra	3	18000	54000
Electricidad	12	1000	12000
Gelcoat	1,2	150	180
Costes totales			317180

Tabla XLIV - Gastos anuales.

Años	Flujo Ingresos (+)	Flujo de Gastos (-)	Flujo de beneficios Netos
1	385000€	317180€	67820€
2	386540€	318131,54€	68408,46€
3	388080€	319400,26€	68679,74€
4	389620€	320351,8€	69268,2€
5	391160€	321303,34€	69856,66€

Tabla XLV - Flujos ingresos, gastos y beneficios.

VAN	14.432,44 €
TIR	62%

Tabla XLVI - VN y TIR.

El proyecto es rentable ya que el VAN es mayor que 0 y por lo tanto se ha recuperado el valor de la inversión inicial. Y en cuanto al TIR presenta una rentabilidad muy elevada, podría decirse que muy pocos proyectos podrían ofrecer rentabilidades tan elevadas.

17. BIBLIOGRAFÍA

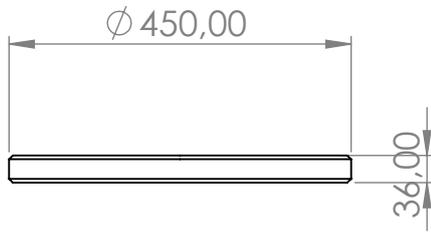
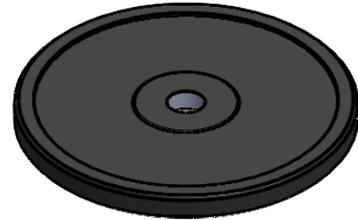
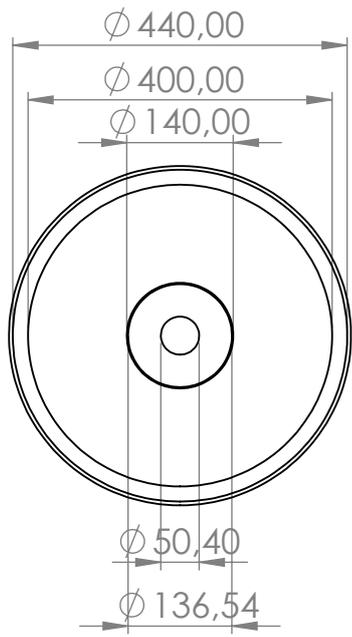
(Chiu, LZF. Mechanical properties of weightlifting bars. J Strength Cond Res 24 (9): 2390–2399, 2010)

Carlos García Jiménez. Degradación y reciclaje de elastómeros. Universidad Complutense de Madrid. 2017.

Guillermo Castro. Materiales y compuestos para la industria del neumático. 2008.

Smith, William F., Hashemi, Javad. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. 2014

Reglas y Reglamentos Técnicos de Competición IWF. 2019.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Disco Plastisol 10 kg

Escala

1:10

Material:

Plastisol

Fecha:

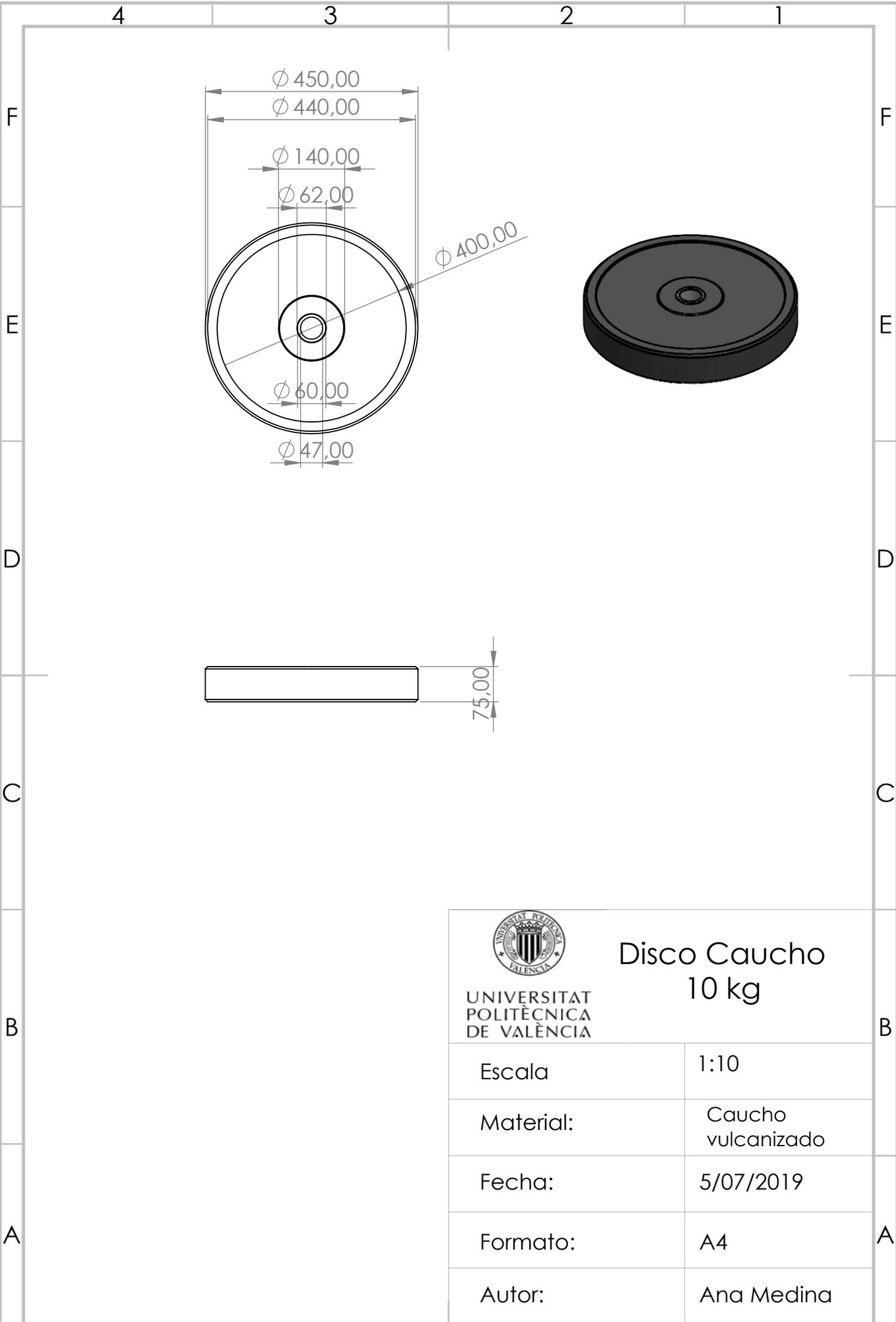
5/07/2019

Formato:

A4

Autor:

Ana Medina



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Disco Caucho 10 kg

Escala	1:10
Material:	Caucho vulcanizado
Fecha:	5/07/2019
Formato:	A4
Autor:	Ana Medina

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

C

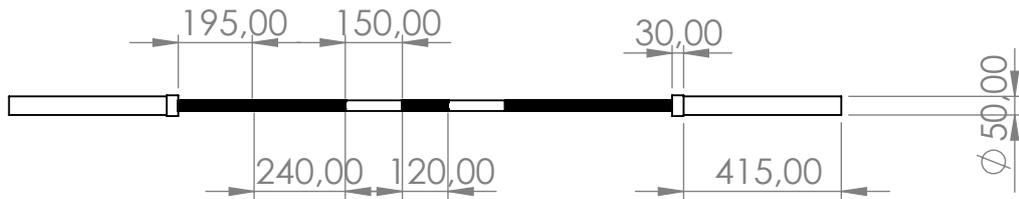
B

B

A

A

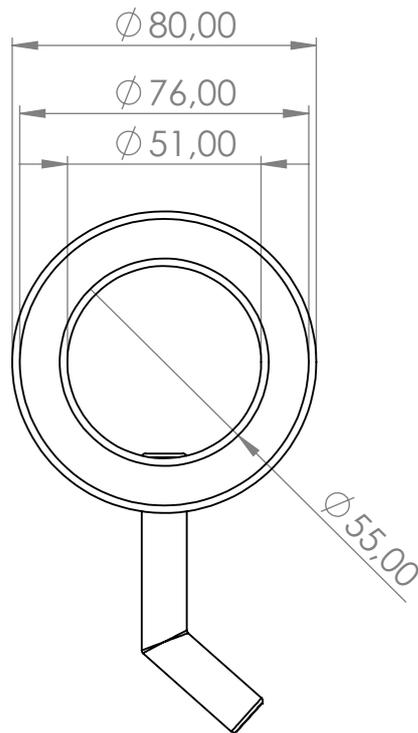
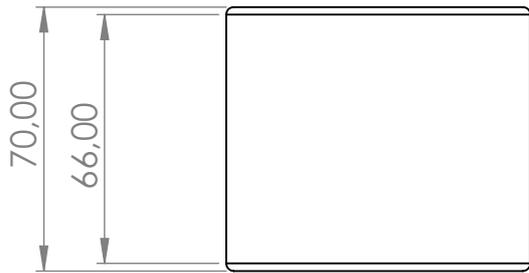
4 3 2 1



Barra Olímpica

UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Escala	1:10
Material:	Acero
Fecha:	5/07/2019
Formato:	A4
Autor:	Ana Medina



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Collarín

Escala

1:10

Material:

Acero

Fecha:

5/07/2019

Formato:

A3

Autor:

Ana Medina