



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Desarrollo de Máscaras de Protección Facial Impresas en 3D

Autor:

González Tamames, Roberto

Tutor(es):

Mansilla Gallo, Alberto

CMelM, EGI, IM, IPF

Valladolid, Julio 2024.





RESUMEN

En este trabajo de fin de grado de Ingeniería Mecánica se evaluará la resistencia a la deformación por impactos de una máscara de protección facial hecha de polipropileno mediante impresión 3D, dirigida especialmente a evitar posibles lesiones en la nariz de la persona. Esto se hará gracias a una simulación usando el programa Ansys y a unos ensayos prácticos con un banco de ensayos, tras los cuales se propondrán ajustes al producto para aumentar su resistencia a la deformación y, por ende, ofrecer un producto de mejor calidad al usuario.

PALABRAS CLAVE: Máscara de protección, ensayo, simulación, resistencia

ABSTRACT

The aim of this final degree project in Mechanical Engineering is to evaluate the resistance to impact deformation of a protective face mask made of polypropylene using 3D printing, in particular to avoid possible injuries to a person's nose. This will be done through a simulation using Ansys software and practical tests on a test bench, after which adjustments to the product will be proposed to increase its resistance to deformation, thus providing a better quality product for users.

KEYWORDS: Protective face mask, test, simulation, resistance.





ÍNDICE

1. Introducción y Objetivos.	12
2. Marco Teórico y Estado del Arte	14
2.1. Lesiones Faciales y Máscaras de Protección Facial	14
2.2. Método de Elementos Finitos (FEM)	15
2.3. Material de las Máscaras: PP	17
3. Validación del Modelo FEM	20
3.1 Modelo de Viga Empotrada	20
3.2 Caracterización del Material	22
4. Metodología de Ensayos.....	30
4.1 Banco de Ensayos.....	30
4.2 Preparación de las Máscaras para Ensayos.....	33
4.3 Elaboración del Switch.....	36
5. Máscara de Protección Facial Original	42
5.1 Mallado FEM Máscara de Protección Facial Original.....	42
5.2 Ensayos Máscara de Protección Facial Original	46
5.3 Simulación Máscara de Protección Facial Original.....	50
6. Modificaciones Realizadas a la Máscara Original.....	56
7. Máscara de Protección Facial Modificada	60
7.1 Mallado FEM Máscara de Protección Facial Modificada	60
7.2 Comprobación Mejora Máscara Modificada.....	65
7.3 Ensayos Máscara de Protección Facial Modificada.....	68
7.4 Simulación Máscara de Protección Facial Modificada	71
7.5 Segunda Máscara de Protección Facial Modificada.....	77
7.5.1 Ensayos Segunda Máscara de Protección Facial Modificada.....	77
7.5.2 Simulación Segunda Máscara de Protección Facial Modificada	81
8. Conclusiones y Líneas Futuras.....	86
Bibliografía	88
Agradecimientos	90





ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.....	14
Figura 2.....	15
Figura 3.....	17
Figura 4.....	21
Figura 5.....	21
Figura 6.....	22
Figura 7.....	23
Figura 8.....	24
Figura 9.....	25
Figura 10.....	30
Figura 11.....	31
Figura 12.....	32
Figura 13.....	33
Figura 14.....	34
Figura 15.....	35
Figura 16.....	36
Figura 17.....	37
Figura 18.....	38
Figura 19.....	39
Figura 20.....	42
Figura 21.....	43
Figura 22.....	44
Figura 23.....	45
Figura 24.....	46
Figura 25.....	47
Figura 26.....	48
Figura 27.....	50
Figura 28.....	51
Figura 29.....	52
Figura 30.....	56
Figura 31.....	57
Figura 32.....	58
Figura 33.....	60
Figura 34.....	61
Figura 35.....	62
Figura 36.....	63
Figura 37.....	64
Figura 38.....	65
Figura 39.....	66
Figura 40.....	67
Figura 41.....	68
Figura 42.....	70
Figura 43.....	72
Figura 44.....	73
Figura 45.....	74
Figura 46.....	78



Figura 47.....	80
Figura 48.....	82



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.....	18
Tabla 2.....	45
Tabla 3.....	46
Tabla 4.....	49
Tabla 5.....	53
Tabla 6.....	62
Tabla 7.....	63
Tabla 8.....	64
Tabla 9.....	69
Tabla 10.....	75
Tabla 11.....	79
Tabla 12.....	83





ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1.....	26
Gráfica 2.....	26
Gráfica 3.....	27
Gráfica 4.....	28
Gráfica 5.....	29
Gráfica 6.....	49
Gráfica 7.....	53
Gráfica 8.....	71
Gráfica 9.....	76
Gráfica 10.....	81
Gráfica 11.....	84





1. Introducción y Objetivos.

INTRODUCCIÓN:

Hoy en día la práctica de deporte es muy habitual en gran parte de la población, ya que es beneficioso para la salud y las distintas autoridades sanitarias recomiendan su práctica varias veces a la semana. Sin embargo, esto hace que aumenten las lesiones, siendo más frecuentes de lo que parecen los daños faciales, sobre todo en deportes de contacto como el fútbol o el baloncesto. Dentro de estas lesiones, se encuentran las de mandíbula, ceja, pómulos, nariz... Este proyecto, se centrará en las de la nariz, porque como se mostrará más adelante, son las lesiones faciales más comunes (Quintana Díaz, J., Hernández Izquierdo, D., & Giralt López, B. (1998)).

Años atrás este tipo de máscaras solamente eran utilizadas por deportistas de alto rendimiento que buscaban volver lo antes posible a la competición, mientras los deportistas aficionados no las usaban debido a su gran coste. Sin embargo, gracias al desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación, como la impresión 3D, estas máscaras se han abaratado, permitiendo llegar a una mayor parte de la población.

Otro punto importante es la capacidad de protección de las máscaras, tema que no se ha estudiado mucho debido a estar fabricadas mediante impresión 3D, la cual es una tecnología relativamente nueva.

Por todo esto, este proyecto abarcará el estudio de la resistencia a la deformación ante impactos de una máscara ya existente (Ser Gómez, M. D. (2022)), a la cual se le hará un estudio mediante simulación para entender las zonas más afectadas a la hora de recibir un impacto y así rediseñar la máscara original, para que tenga una mayor resistencia a la deformación contra los distintos impactos que pueda recibir.

OBJETIVOS:

Los objetivos que se plantean en este trabajo comenzarán con el establecimiento de una metodología para ensayar las máscaras de protección facial y determinar así su resistencia a la deformación.

A continuación, se ensayará la máscara de la que se parte para establecer su resistencia a la deformación. Una vez realizado esto se elaborará un modelo de simulación para entender que partes se pueden modificar en la máscara para mejorar su resistencia a la deformación.

Después se procederá a modificar estas partes y a imprimir una nueva máscara mejorada, la cual, antes de imprimirla, se habrá comprobado mediante simulación si se ha obtenido mejora ante la resistencia a deformaciones.

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA.



Y, por último, se ensayará esta máscara y se interpretarán los resultados obtenidos. Además de imprimir una tercera máscara igual a la segunda y también ensayarla para asegurar la mejora conseguida con las modificaciones realizadas a la máscara original.



2. Marco Teórico y Estado del Arte

2.1. Lesiones Faciales y Máscaras de Protección Facial

El rostro es una de las partes más importantes de nuestro cuerpo, ya que interfiere directamente en nuestras relaciones sociales y protege órganos vitales. Sin embargo, muchas veces no va lo suficientemente protegido respecto a su importancia, por lo que las lesiones faciales son bastante habituales y variadas.

En la siguiente imagen, se muestra un estudio realizado sobre el número de lesiones faciales, donde se ve que las fracturas nasales son las más comunes:

Figura 1.

Incidencia de las diferentes lesiones faciales en el Hospital General Docente “Ciro Redondo García” de Artemisa, Cuba

TIPO DE FRACTURA	No	%
. Nasales	18	64.2
. Dentoalveolares	5	17.8
. Maxilomales grado III	2	7.2
. Maxilomales grado I	1	3.6
Mandibular	1	3.6
. Selectiva de piso de orbita	1	3.6
TOTAL	28	100

Fuente: Quintana Díaz & Giralt López, 2005

Diversos estudios se refieren a las lesiones nasales (Brook & Wood, 1983; J. Quintana Díaz et al., 1998; Telfer et al., 1991; Torgersen & Tornes, 1992), como las lesiones faciales más comunes mientras se practica deporte, en este proyecto se procederá a realizar un análisis sobre las máscaras de protección facial específicas para lesiones nasales, para así saber cómo mejorarlas usando el programa de simulación Ansys.

Las máscaras de protección facial se emplean en todo tipo de deportes, pero mayoritariamente en aquellos en los que el contacto físico es un aspecto importante y también hay riesgo de sufrir impactos en la cara con la pelota (fútbol, baloncesto...) (Sherry, Eugene., & Wilson, S. F. (2002)).

Las principales funciones que debe cumplir una máscara de protección facial son la de proteger la cara, en este caso en especial la nariz y ser capaz de absorber la

energía que se produzca en el choque, por lo que se cuantificará la carga máxima que puede soportar. Además de todo esto la máscara debe de ser lo más cómoda posible y ser capaz de proporcionar al deportista la confianza de que si recibe un impacto la careta realizará su función y evitará cualquier daño.

La forma de fabricar las máscaras ha cambiado a lo largo de los años. Antes se elaboraba un molde de la cara del paciente con yeso mientras que hoy en día se hace escaneando en 3D la cara del paciente, mejorando así la calidad de los modelos de las máscaras y también la productividad.

Las máscaras que se van a estudiar están impresas en 3D con polipropileno, un material capaz de absorber impactos. Primero se partirá de una máscara impresa en 3D que formaba parte de un proyecto anterior (Ser Gómez, M. D. (2022)), se estudiará mediante Ansys y, posteriormente, será modificada para que resista más.

2.2. Método de Elementos Finitos (FEM)

Ansys (Ansys (s.f.)) es un programa de simulación que permitirá hacer un estudio sobre las deformaciones y tensiones que sufre la máscara para así mejorar la máscara de la que se parte.

Para realizar la simulación en Ansys se usará el método de elementos finitos (FEM), ya que es el método por excelencia para el cálculo de sólidos. Este consiste en transformar un sistema continuo en un sistema discreto, es decir, en hacer una división del sólido real en pequeños elementos de tamaño finito que se unen mediante nodos, que es el punto de unión entre los distintos elementos.

Figura 2.

Proceso de discretización



Fuente: García Jacomino, 2011

El procedimiento de cálculo numérico es análogo al análisis matricial de estructuras de barras, por lo que las etapas básicas de cálculo son (Oñate E. (1995)):

- Etapa 1: seleccionar un modelo matemático apropiado para describir el comportamiento de la estructura.
- Etapa 2: discretizar la estructura, formando la malla, que es como se conoce al conjunto de elementos.



- Etapa 3: aplicar el Principio de los Trabajos Virtuales para obtener las matrices de rigidez y los vectores de cargas.
- Etapa 4: ensamblar las matrices de rigidez y los vectores de carga.
- Etapa 5: resolver el sistema de ecuaciones resultante, obteniéndose los desplazamientos en los nodos.
- Etapa 6: cálculo de deformaciones, esfuerzos y reacciones.
- Etapa 7: interpretación y presentación de los resultados.

Gracias a la asignatura de MNSSF (Sierra J. (2023)) estudiada en la carrera se sabe que la generación de la malla es una de las etapas más importantes ya que debe ajustarse a la capacidad computacional porque, a mayor número de elementos mayor esfuerzo computacional, sin embargo, mejor será el resultado obtenido. La malla debe ser lo más regular posible y en las zonas donde cambie alguna de las variables; esta deberá tener una mayor resolución para poder controlar bien el cambio de valor de esa variable.

En sólidos tridimensionales los principales tipos de mallas usadas son hexaédricas y tetraédricas. Las hexaédricas son la que mayor precisión aportan, pero las tetraédricas son las que mejor se adaptan a la geometría.

Los mallados se pueden hacer de forma manual o de forma automática con los softwares de análisis FEM actuales. Para la creación del mallado se usará este último; sin embargo, se modificarán una serie de parámetros para obtener el tipo de malla deseado.

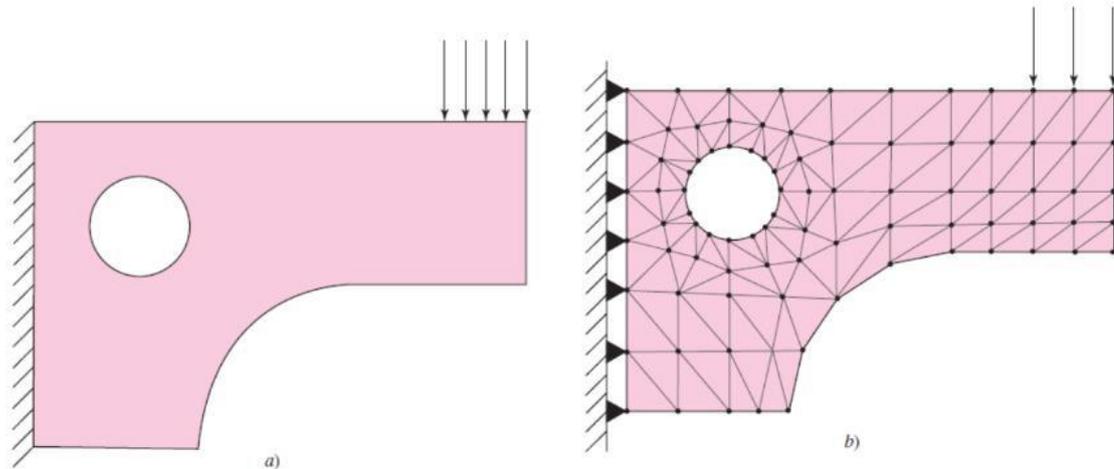
Budynas et al., (2008) señalan que, el análisis FEM al ser una técnica numérica que transforma un dominio continuo en uno discreto lleva asociados una serie de errores de precisión.

El primer tipo de error que aparece es el propio error computacional asociado al cálculo iterativo que realizan los programas FEM para obtener las soluciones.

El segundo tipo de error es el asociado a la discretización que se ha hecho del sólido original, al aproximar la geometría y los desplazamientos que esta sufre. Como se puede observar en la siguiente figura

Figura 3.

Ejemplo error de discretización



Fuente: Budynas et al., 2008

Además de este tipo de errores, puede haber otra serie de errores relacionada con la aplicación de las condiciones de contorno, debido a que estas normalmente no son fáciles de aplicar. Junto con la generación de la malla, esta es la otra gran dificultad que aparece a la hora de trabajar con FEM.

2.3. Material de las Máscaras: PP

El material elegido para fabricar las máscaras de protección facial es el polipropileno. El polipropileno (PP) es un polímero termoplástico derivado del propileno, un gas que se obtiene del craqueo térmico de diferentes combustibles como la nafta y GLP (gas licuado del petróleo) (REPSOL. (2023, septiembre 13)).

La razón por la que se ha decidido utilizar el polipropileno en la fabricación de las máscaras de protección facial es debido a que se pueden imprimir en 3D fácilmente para poder hacer el producto a medida y debido a que sus propiedades físicas y mecánicas lo hacen apto para el uso que se le van a dar.

Las principales características del polipropileno son (REPSOL. (2023, septiembre 13)):

- Buena resistencia química
- Baja densidad
- Baja absorción de humedad
- Elevado punto de fusión (160°C)
- No sufre agrietamiento por esfuerzo
- Gran resistencia mecánica, tanto a impacto como a la fatiga



Todas estas características hacen al polipropileno un material muy adecuado para la fabricación de máscaras de protección facial porque permitirá absorber los impactos gracias a su capacidad de deformación, no se agrietará al recibir un impacto, debido a su baja densidad pesará poco por lo que será más cómodo de llevar y gracias a su resistencia química y baja absorción de humedad resistirá el sudor.

A continuación, se presenta la tabla de características mecánicas del polipropileno usado para la fabricación de las máscaras (Fiberlogy. (2022)). Sin embargo, algunas de sus características se pueden ver modificadas ya que estas son las propiedades del material bobinado en hilo. Al fabricar una pieza por impresión 3D el material se funde y se vuelve a solidificar provocando un ciclo térmico que puede provocar que se modifiquen las características mecánicas de este (Handayani, et. Al (2021)), (Ingeniería Investigación y Tecnología volumen XVIII (2017)).

Tabla 1.

Características mecánicas PP

Physical Properties	Test Method	Unit	Typical Value
Specific Gravity	ISO 1183	g/cm ³	1.05
Mechanical Properties	Test Method	Unit	Typical Value
Tensile Strength @ Yield	ISO 527	MPa	26
Tensile Strength @ Break	ISO 527	MPa	21
Tensile Modulus	ISO 527	MPa	1100
Elongation @ Yield	ISO 527	%	>30
Elongation @ Break	ISO 527	%	250
Flexural Strength	ISO 178	MPa	18
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	1200
Izod Impact Strength (Notched) @ 23°C	ISO 180	kJ/m ²	20
Thermal Properties	Test Method	Unit	Typical Value
Heat Distortion Temperature @ 0.45 MPa	ISO 75	°C	80
Heat Distortion Temperature @ 1.8 MPa	ISO 75	°C	65
Vicat Softening Temperature	ISO 306	°C	135
Glass Transition Temperature T _g	DSC	°C	-
Melting Temperature T _m	DSC	°C	163
Continuous Use Temperature (UL Yellow Card)	UL 746	°C	65

The information set forth herein has been gathered from standard reference materials and/or supplier test data. To the best knowledge and belief of Fiberlab S.A. they are accurate and reliable. Information is offered only for your consideration, investigation and verification. Fiberlab S.A. makes no warranties, expressed or implied, with respect to the use of such information or the use of the specific material identified herein combination with any other material or process, and assumes no responsibility therefore.

Fuente: Fiberlogy, 2022





3. Validación del Modelo FEM

3.1 Modelo de Viga Empotrada

Primero, en la utilización de Ansys para realizar análisis de métodos finitos, se estudió el caso de viga empotrada cargada puntualmente en el extremo. Este es un caso ampliamente estudiado (Foces A. (2020)) por lo que, a partir de ecuaciones relativamente sencillas, se consigue conocer la deformación que sufre la viga y así comprobar que los resultados obtenidos a través del programa son correctos.

Con el propósito de calcular el desplazamiento máximo y la tensión máxima se emplean las siguientes ecuaciones (Foces A. (2020)):

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{-F \times L^3}{3 \times E \times I}$$

$$\sigma_{Max} = \frac{|M_{m\acute{a}x}|}{I} \times \frac{h}{2} = \frac{|F \times L|}{I} \times \frac{h}{2}$$

Siendo:

E: Módulo de Young

I: Momento de inercia

h: Canto de la sección

Los datos dimensionales y propiedades mecánicas de la viga que se ha estudiado son los siguientes:

Material: acero (E = 193MPa)

Ancho de la sección: b = 0,010 m

h = 0,004 m

I = 5,33·10⁻¹¹ m⁴

L = 0,080 m

F = 10 N

Sustituyendo los datos en las ecuaciones se obtiene:

$$y_{m\acute{a}x} = -0,1658 \text{ mm}$$

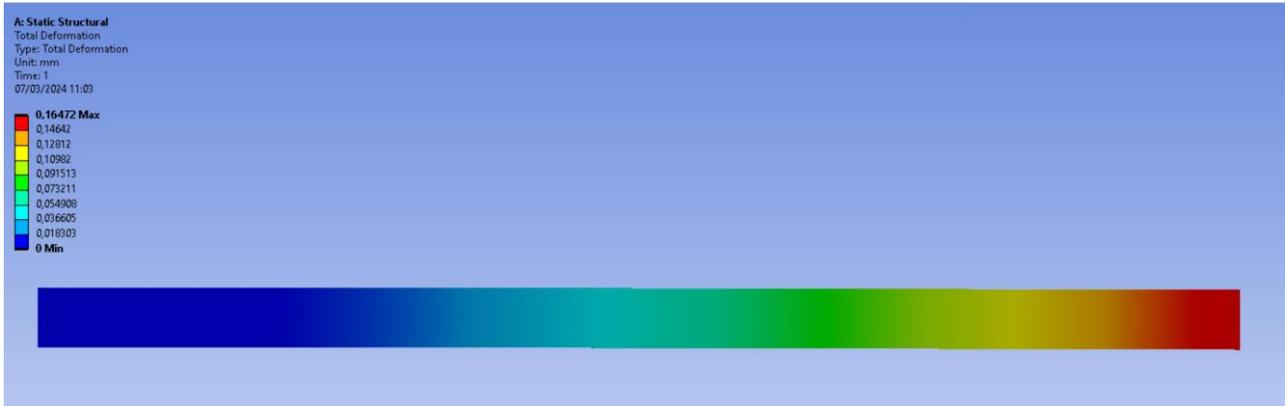
$$\sigma_{m\acute{a}x} = 30 \text{ MPa}$$

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en Ansys ante el mismo problema:

Deformación:

Figura 4.

Deformación probeta Ansys



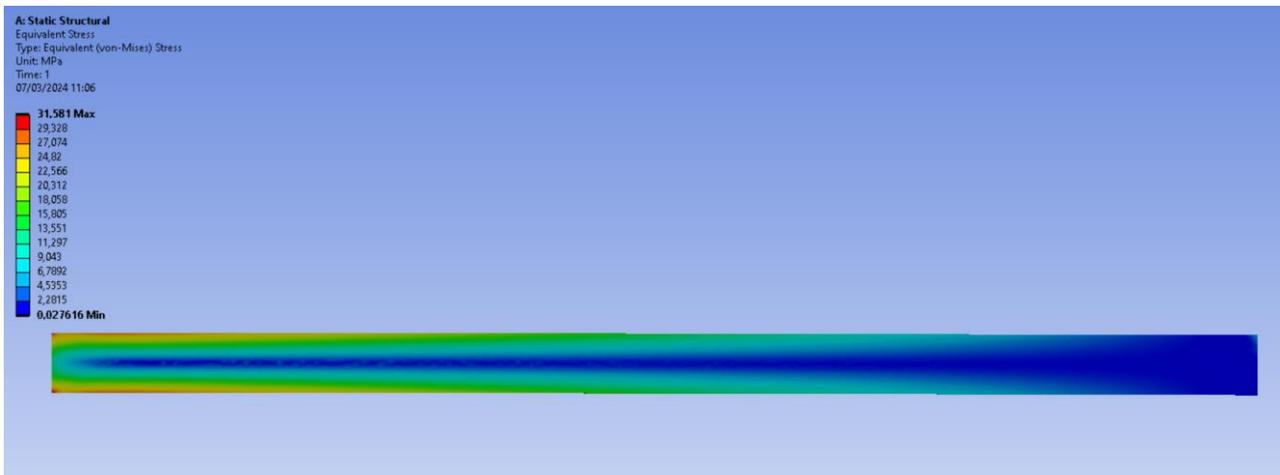
Fuente: Elaboración propia

En este caso según la simulación el máximo desplazamiento es de 0,16472mm.

Tensión máxima:

Figura 5.

Tensiones probeta Ansys



Fuente: Elaboración propia

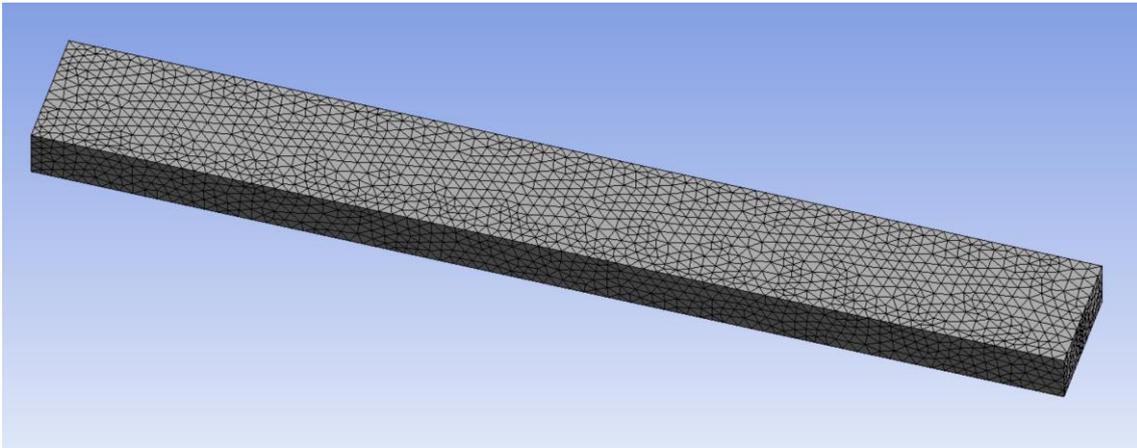
Para la tensión máxima la simulación muestra que es de 31,581 MPa.

Si comparamos los resultados teóricos y los de la simulación obtenemos que las desviaciones de los resultados son del 5,27% para la tensión máxima y del 0,65% para la deformación. Esta desviación de los valores es completamente asumible ya

que hay que tener presente que una simulación siempre será una aproximación de la realidad. Además, estos resultados pueden estar influenciados por el tipo de malla utilizada, ya que se ha decidido utilizar una malla de tetraedros para validar este modelo debido a que en las simulaciones posteriores de las máscaras se ha usado una malla tetraédrica.

Figura 6.

Mallado probeta Ansys



Fuente: Elaboración propia

3.2 Caracterización del Material

El material usado en las máscaras de protección facial es polipropileno, sin embargo, al estar impreso en 3d es necesario caracterizar este material de nuevo, ya que puede haber sufrido modificaciones en el módulo de Young debido a que se ha fundido y vuelto a solidificar (Handayani, et. Al (2021)), (Ingeniería Investigación y Tecnología volumen XVIII (2017)).

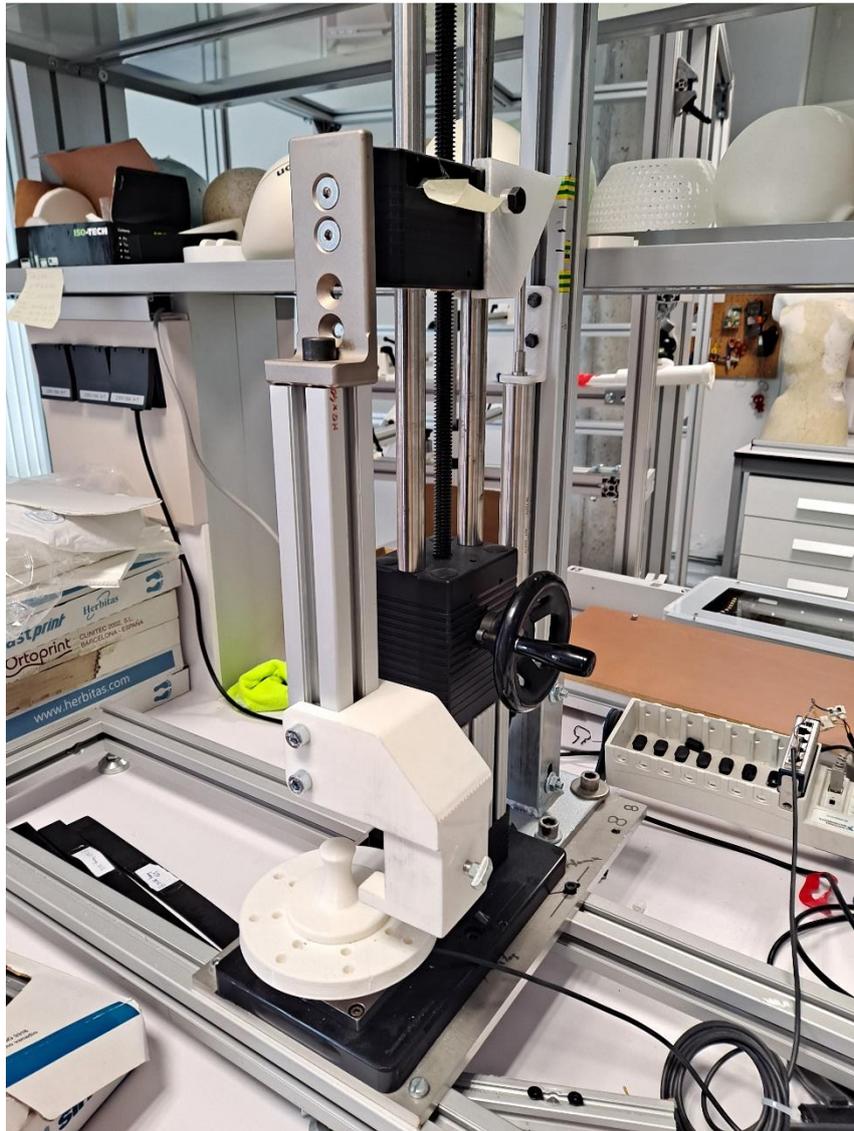
Para caracterizar el módulo de Young, que es el parámetro que mide la resistencia del material a la deformación elástica bajo una carga, se va a hacer el ensayo de viga empotrada en voladizo con carga en unos de sus extremos (Budynas R, Keith J. (2008)), (Foces A. (2020)).

Las probetas de ensayo serán placas rectangulares de 50mm de largo y 10mm de ancho. Debido a que el espesor de la máscara va variando, puesto que en las zonas de impacto es de 6mm y en la periferia es de 3mm, se estudiarán probetas tanto de 3mm y 6mm de espesor del mismo polipropileno del que está hecha la máscara.

En el ensayo se utilizó la siguiente máquina, que posibilita medir fuerza gracias a una célula de carga que se encuentra en su parte inferior y desplazamiento que se contrala manualmente mediante la manivela.

Figura 7.

Vista 1 de la máquina de ensayo de probetas



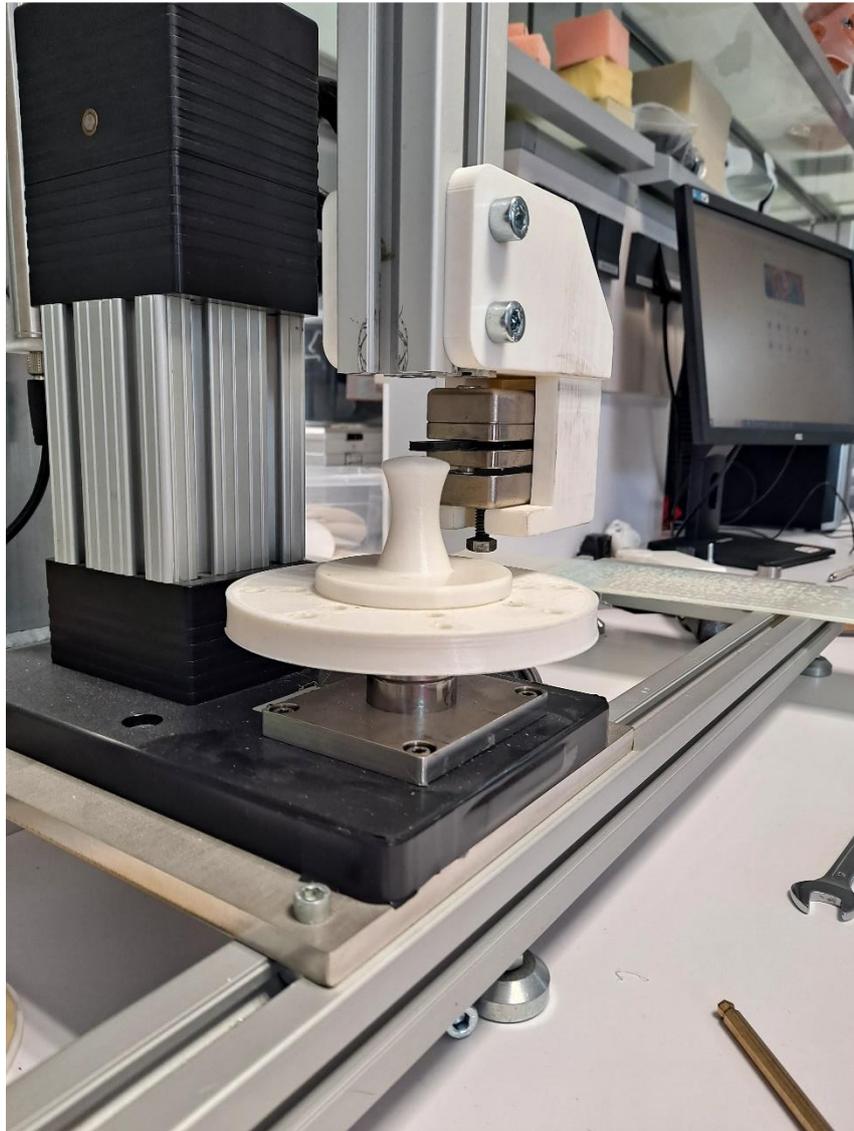
Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de poder realizar este ensayo se usó una mordaza que sujetará las probetas y así simular que las probetas se encuentran empotradas. Se diseñó un soporte mediante impresión 3D para la mordaza, asegurando que esta estuviera bien sujeta, no se moviera y pudiera actuar como un empotramiento para la probeta.

Asimismo, las probetas, a pesar de ser de 50mm de longitud, en la realidad se comportarán como probetas de 30mm de longitud debido a que el extremo de la probeta donde se va a aplicar la fuerza debe coincidir perpendicularmente con la zona de la célula de carga. Así, teniendo en cuenta todas estas consideraciones, se ejecutará el ensayo.

Figura 8.

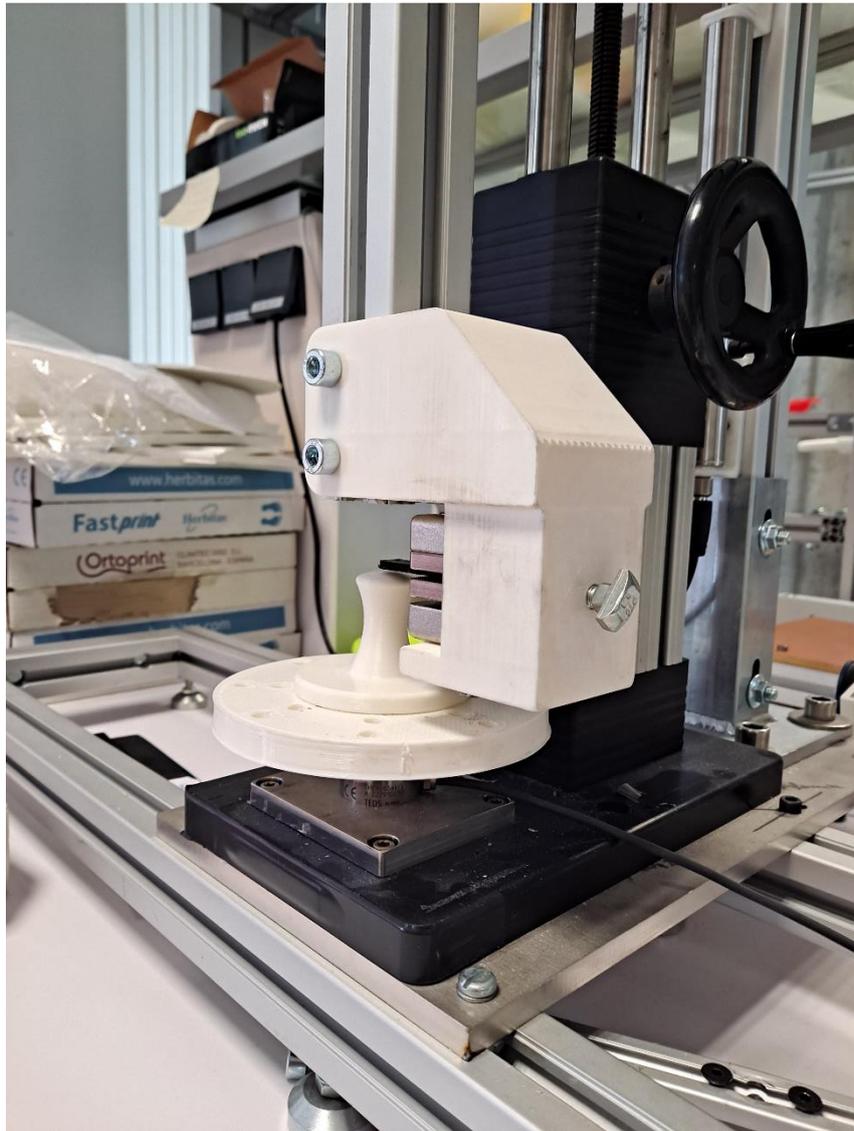
Vista 2 de la máquina de ensayo de probetas



Fuente: Elaboración propia

Figura 9.

Vista 3 de la máquina de ensayo de probetas



Fuente: Elaboración propia

A partir de estos ensayos se puede obtener el módulo de elasticidad o Young despejándolo de la fórmula:

$$y_{\text{máx}} = \frac{-F \times L^3}{3 \times E \times I}$$

$$E = \frac{-F \times L^3}{3 \times y_{\text{máx}} \times I}$$

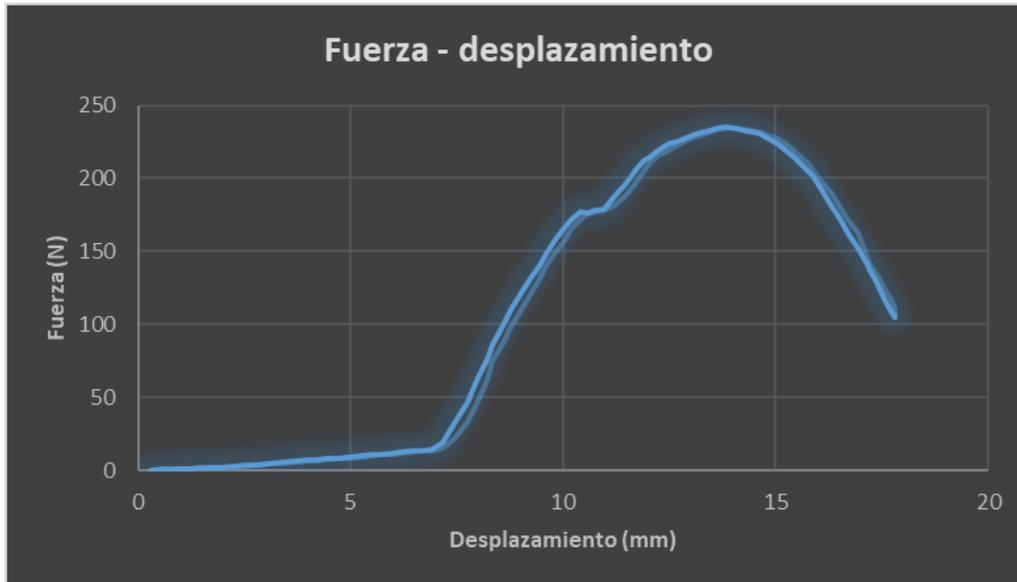


Se hicieron ensayos con dos probetas de 3mm de grosor y dos probetas de 6mm de grosor.

Seguidamente, se presentan las gráficas fuerza-desplazamiento de las probetas de 3mm de grosor:

Gráfica 1.

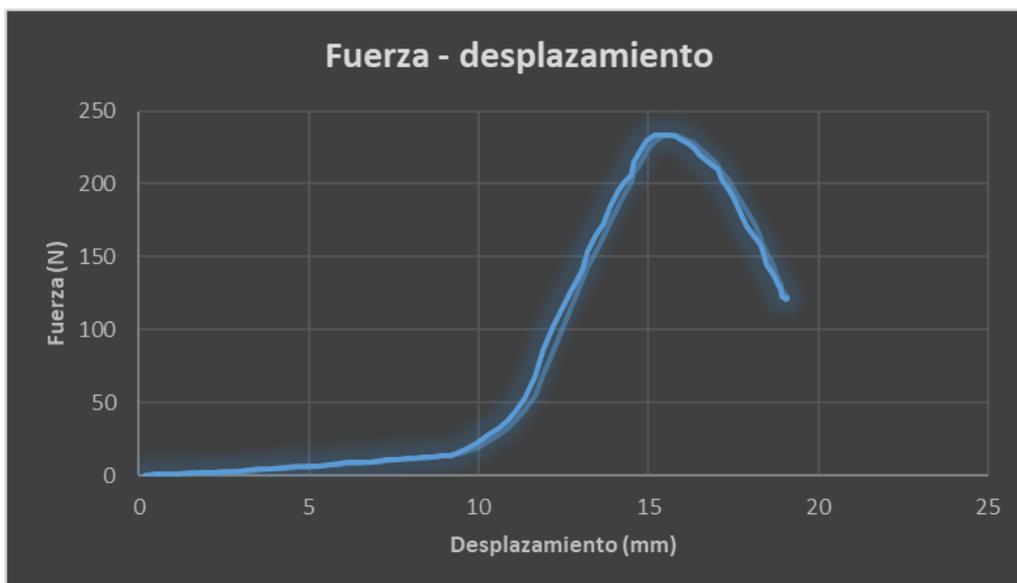
Fuerza-desplazamiento probeta 3mm-1



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 2.

Fuerza-desplazamiento probeta 3mm-2



Fuente: Elaboración propia

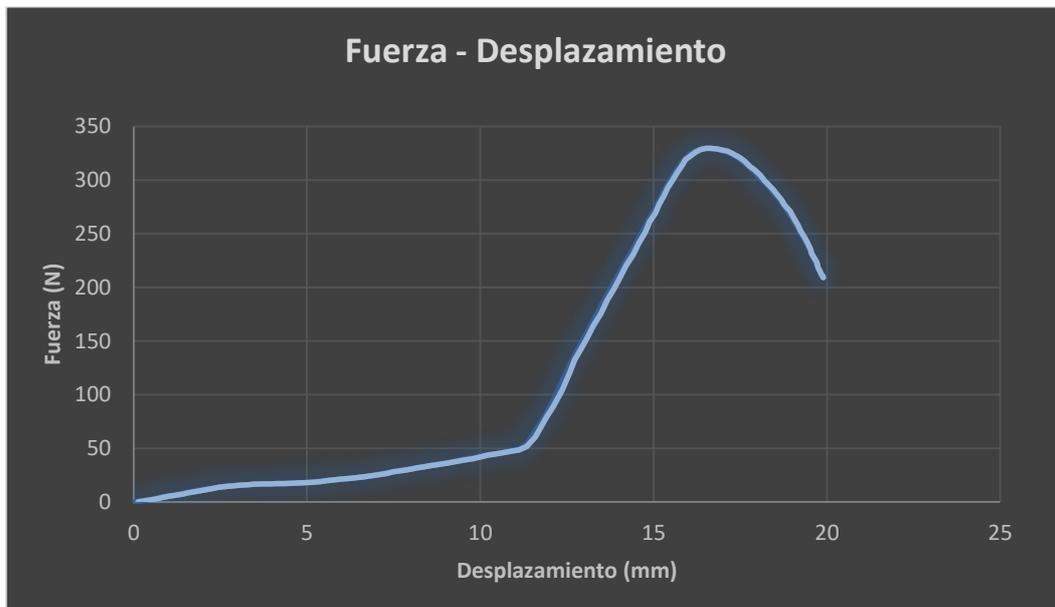


Se puede observar que en las dos gráficas las fuerzas máximas alcanzadas son parecidas, sobre los 230N. Sin embargo, se ve que se alcanzan en desplazamientos distintos, lo que se debe a que la velocidad de aplicación de la carga no se hizo de forma automatizada y el momento de contacto entre la probeta y el punto de apoyo se determinó manualmente. A pesar de esto, como se verá más adelante, el módulo de Young obtenido en las dos es parecido.

Ahora se presentan las gráficas de las probetas de 6mm de grosor:

Gráfica 3.

Fuerza-desplazamiento probeta 6mm-1

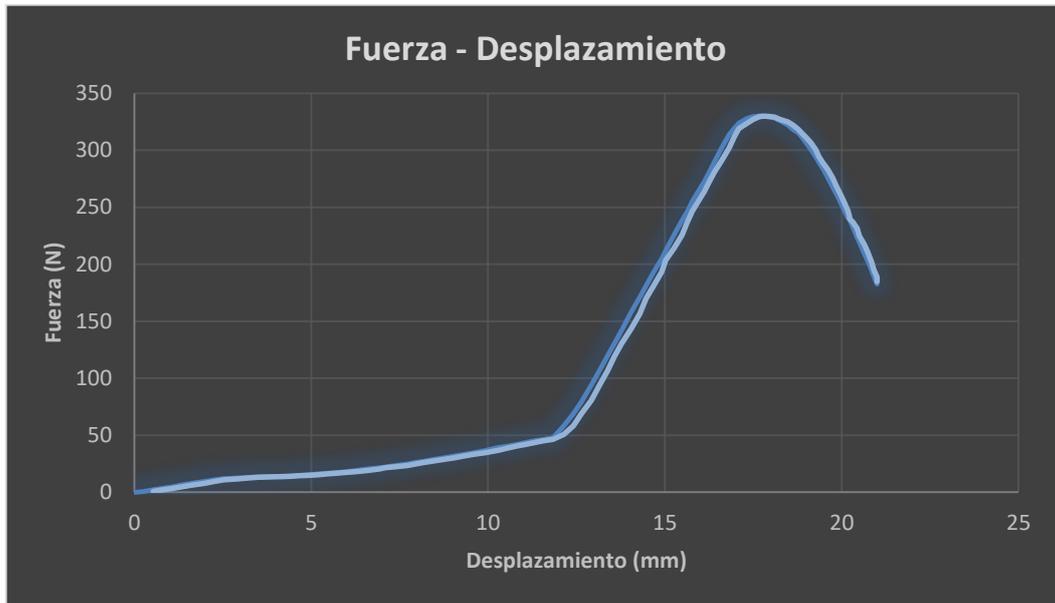


Fuente: Elaboración propia



Gráfica 4.

Fuerza-desplazamiento probeta 6mm-2



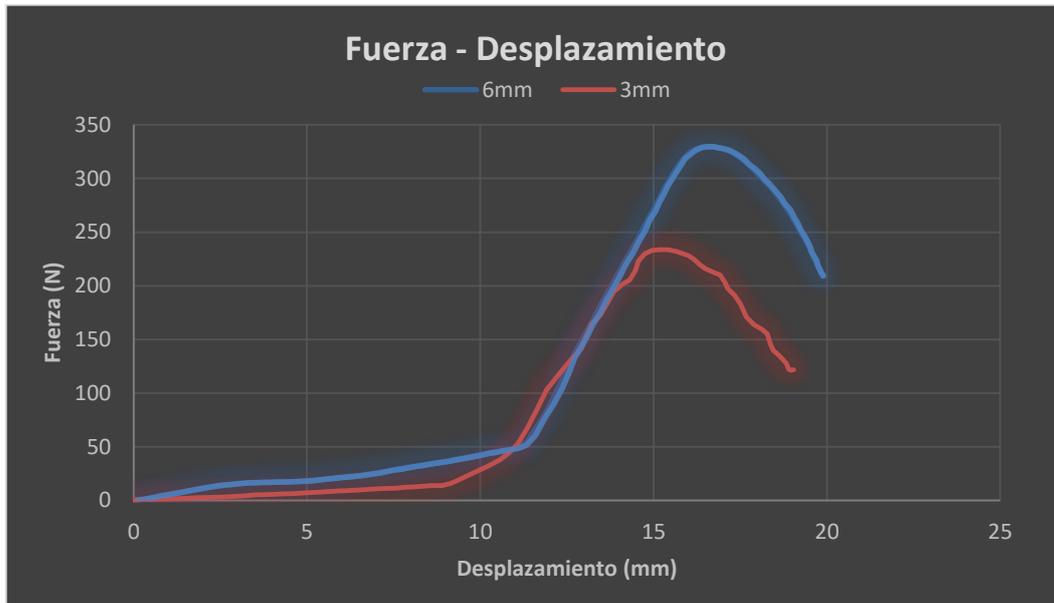
Fuente: Elaboración propia

Otra vez se puede observar que las fuerzas máximas alcanzadas son similares, alrededor de los 330N en este caso. Además, el desplazamiento en el que se alcanza es más parecido que en el caso anterior, aunque sigue siendo dispar debido a las mismas razones de antes.

Si se comparan las gráficas de las probetas de 3mm y 6mm de grosor se aprecia que la pendiente de subida de la fuerza-desplazamiento de cada una son muy semejantes por lo que los módulos de Young obtenidos deberán de tener valores parecidos.

Gráfica 5.

Comparación entre probetas de 3mm y 6mm



Fuente: Elaboración propia

Si de la ecuación anterior se calcula el módulo de Young en la zona de comportamiento lineal que forma el perfil de Fuerza-Desplazamiento se obtiene que el módulo de Young oscila entre 900 y 1000MPa. El módulo de Young del material original era de 1100MPa, lo que supone una reducción de entre el 9,1% y el 18,2%. Esto es debido a que el material al ser impreso en 3D se funde y vuelve a solidificar provocando una pérdida de propiedades del material, además de que el hecho de estar impreso en capas también afecta debido a la adhesión que puede haber entre las distintas capas.

Se hizo una media entre todos los valores de las probetas para el cálculo del Módulo de Young que se va a utilizar en las simulaciones, obteniendo 945,36MPa; lo cual es un valor que disminuye respecto del valor original del material en un 14%.

4. Metodología de Ensayos

4.1 Banco de Ensayos

El banco de ensayos utilizado para realizar los distintos ensayos sobre las máscaras de protección facial fue el siguiente.

Figura 10.

Banco de ensayos



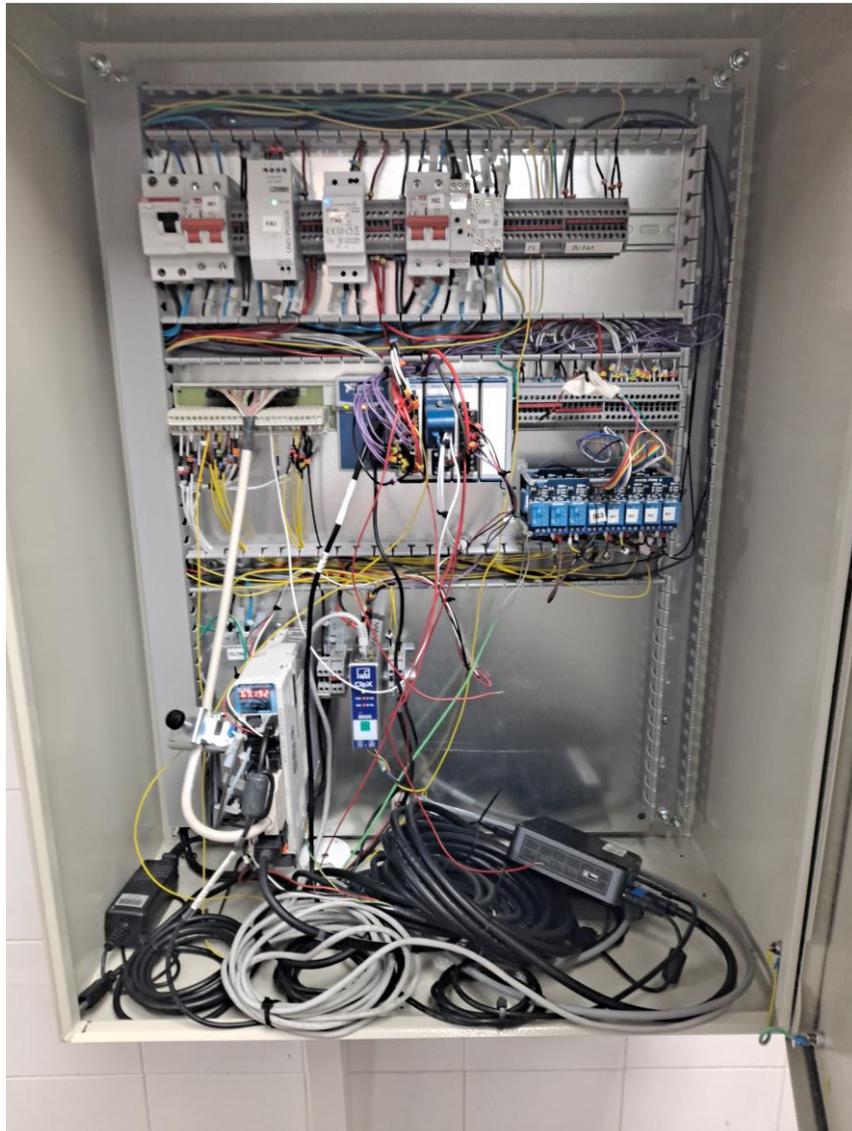
Fuente: Elaboración propia

Este está formado por:

- Célula de carga, nos permitirá registrar las fuerzas aplicadas. En este caso la célula de carga aguantaba hasta 10kN por lo que no habría problema a la hora de registrar las distintas fuerzas ya que sabíamos que estas serían bastante menores.
- Actuador, en el cual está puesta la célula de carga. Conoceremos la posición del actuador gracias a que este se desplaza mediante un motor eléctrico y un tornillo sin fin que se controlan mediante el programa LabView.
- Un equipo, formado por un cuadro eléctrico donde se encuentran todos los componentes necesarios para controlar el actuador y un ordenador para poder utilizar el programa LabView y así manejar fácilmente el actuador.
- Unos perfiles que nos permitirán sujetar una cabeza de plástico ya existente, que fue a partir de la cual se construyeron las máscaras, y así poder sujetar las máscaras a la cabeza y ensayarlas.
- Un Switch creado entre las máscaras y la cabeza para saber en qué momento se producía el contacto entre la máscara y la nariz de la cabeza.

Figura 11.

Cuadro eléctrico banco de ensayos



Fuente: Elaboración propia

Figura 12.

Programa LabView



Fuente: Elaboración propia

Desde el programa LabView, que permite modificar distintos parámetros del actuador como la velocidad o la posición a la que se desee que llegue, se puede obtener un fichero Excel con todos los datos de fuerza y posición recogidos durante los ensayos.

La metodología para realizar los ensayos siempre fue la misma, desde el programa de LabView se puso el actuador justo en contacto con la máscara sin que este ejerciera fuerza sobre la máscara. A continuación, se le pidió al programa que avanzara 0,2mm y después retrocediera para descargar la máscara y así sucesivamente incrementando la distancia que recorría el actuador de 0,2mm en 0,2mm hasta que la máscara hiciera contacto con la cabeza. Para saber esto se hizo un switch en el que se encendía un led que avisa de cuando esto ocurría. Como se hizo se explicará más adelante.

4.2 Preparación de las Máscaras para Ensayos

Para la realización de los ensayos se decidió que las máscaras fueran lo más parecidas posibles a como son cuando se usan en la realidad, por ello se decidió que el interior de la máscara estuviera recubierto de goma EVA (Etileno Vinil Acetato). La goma EVA es un material similar a la goma espuma, impermeable, ligera y suave al tacto. Además, se puede cortar y pegar fácilmente y no es tóxica (Eroski Consumer (2022, octubre 13)).

Para poner la goma EVA en las máscaras primero se corta un trozo de goma EVA de la plancha en la que viene con un tamaño mayor al de la máscara, posteriormente mediante una pistola de calor vamos modelando la goma EVA para que se adapte a la forma de la máscara y se corta los bordes que sobresalgan de la máscara. Una vez hecho todo esto se pegó la goma EVA al interior de la máscara mediante pegamento y este se le dejó secar durante al menos un día entero antes de realizar los ensayos.

Figura 13.

Máscara sin goma EVA



Fuente: Elaboración propia

Figura 14.

Goma EVA modelada



Fuente: Elaboración propia

Figura 15.

Máscara y goma EVA



Fuente: Elaboración propia

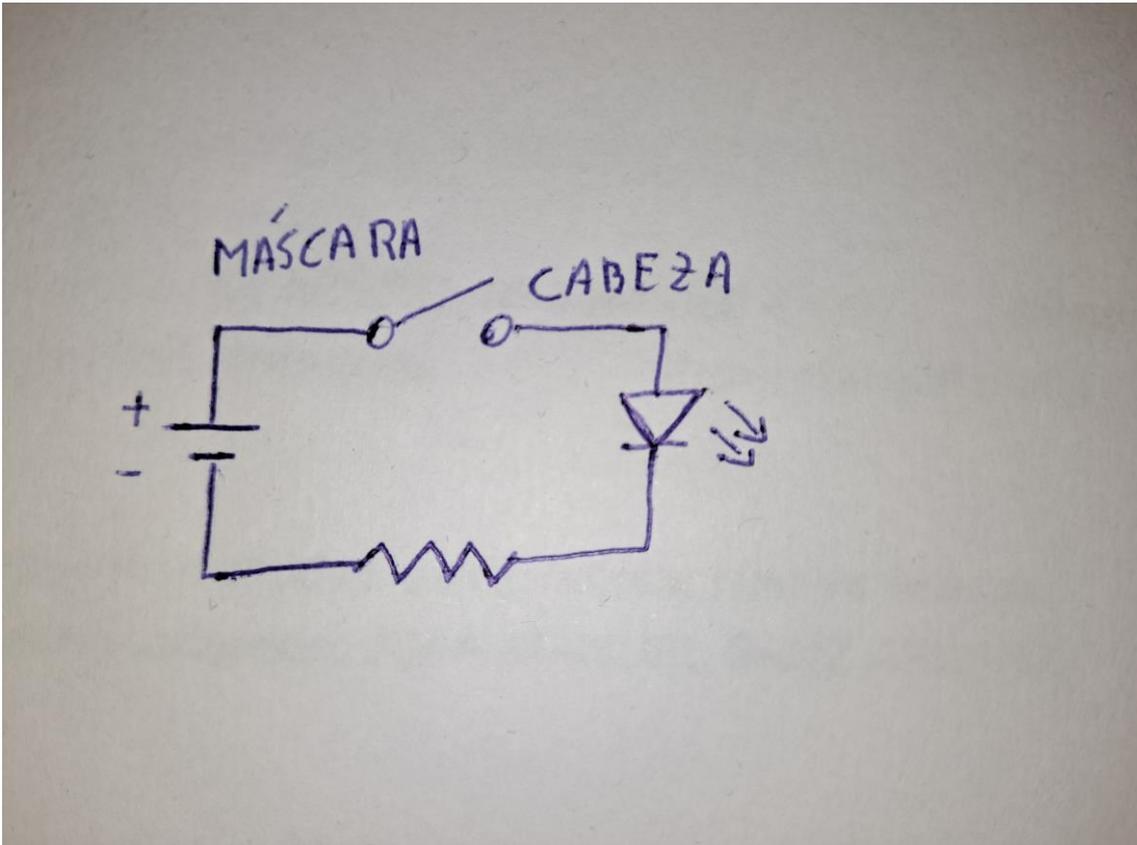
Posteriormente, una vez que estuviera pegada la goma EVA a la máscara se recortaba la zona de la nariz para que esta no tuviera goma EVA y poder poner el Switch para saber en qué momento ocurría el contacto entre la máscara y la cabeza.

4.3 Elaboración del Switch

Para conocer el momento de contacto entre la máscara y la nariz de la cabeza se decidió hacer un Switch sencillo que encendiera un led cuando se produjera el contacto. Básicamente se hizo un pequeño circuito eléctrico en el que el contacto entre la máscara y la nariz de la cabeza funcionara como interruptor.

Figura 16.

Esquema Switch



Fuente: Elaboración propia

Para realizar el Switch se utilizó:

- Cinta de aluminio, esta se puso en la nariz de la cabeza y en la zona de la nariz de la máscara.
- Una pila de 9V, para alimentar el circuito, cables, una resistencia y un diodo led de color rojo.

Figura 17.

Cinta de aluminio cabeza



Fuente: Elaboración propia

Figura 18.

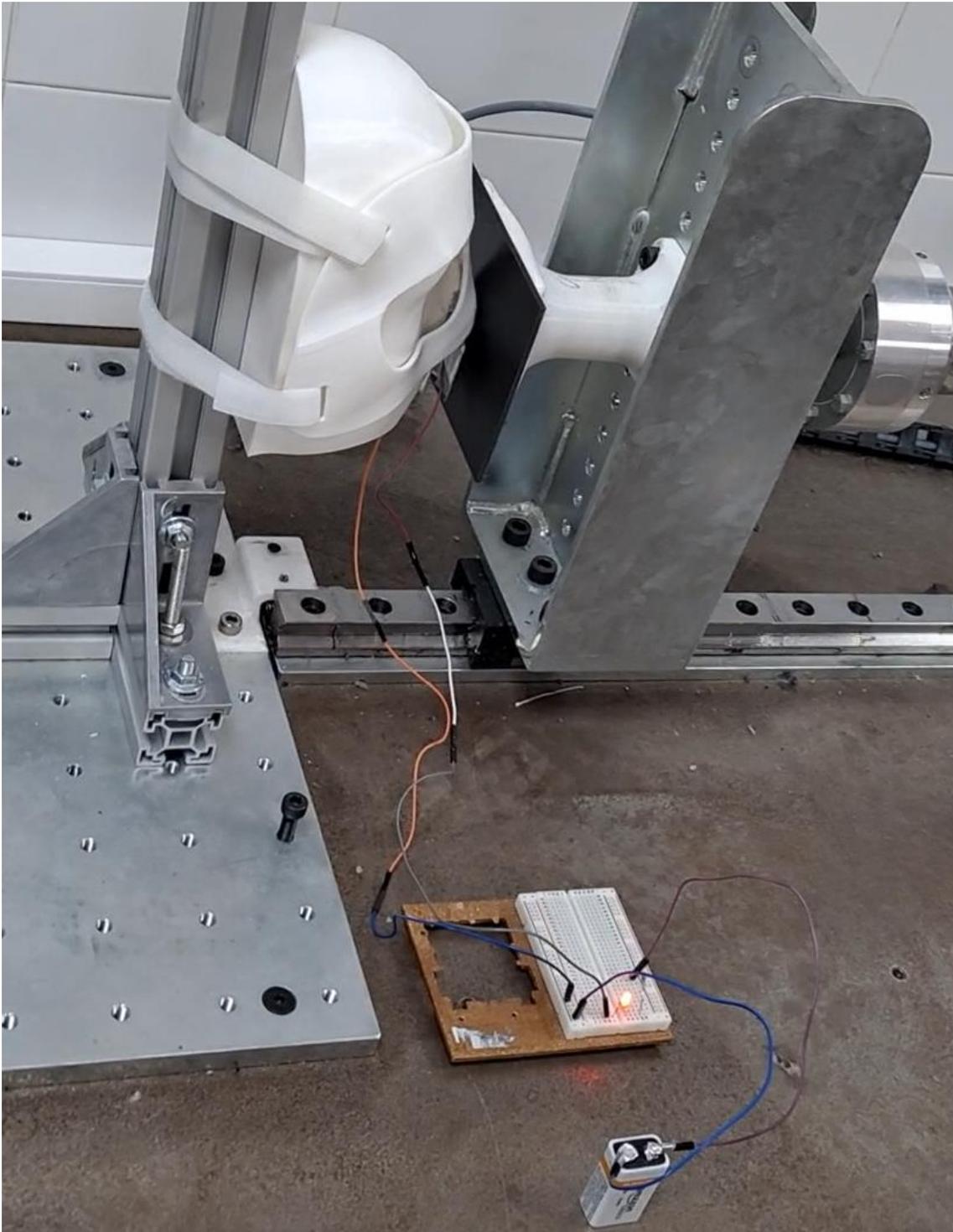
Cinta aluminio máscara



Fuente: Elaboración propia

Figura 19.

Circuito Switch



Fuente: Elaboración propia

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA.



El motivo por el que se decidió recortar la zona de la nariz de goma EVA para poner el Switch fue debido a que si se hubiera instalado el Switch encima de la goma EVA este hubiera detectado el contacto mucho antes, debido al propio grosor del material. Sin embargo, la goma EVA al ser fácilmente moldeable si se presiona su espesor pasa a ser poco significativo y esto ocurre con poca fuerza, por lo que se decidió quitar la goma EVA de la zona de la nariz para saber el momento en el que la propia máscara haría contacto con la nariz y así saber la fuerza y el desplazamiento necesario para que esto ocurriera.

Todas las máscaras se prepararon igual, tanto en la preparación de la goma EVA como en la preparación del Switch



5. Máscara de Protección Facial Original

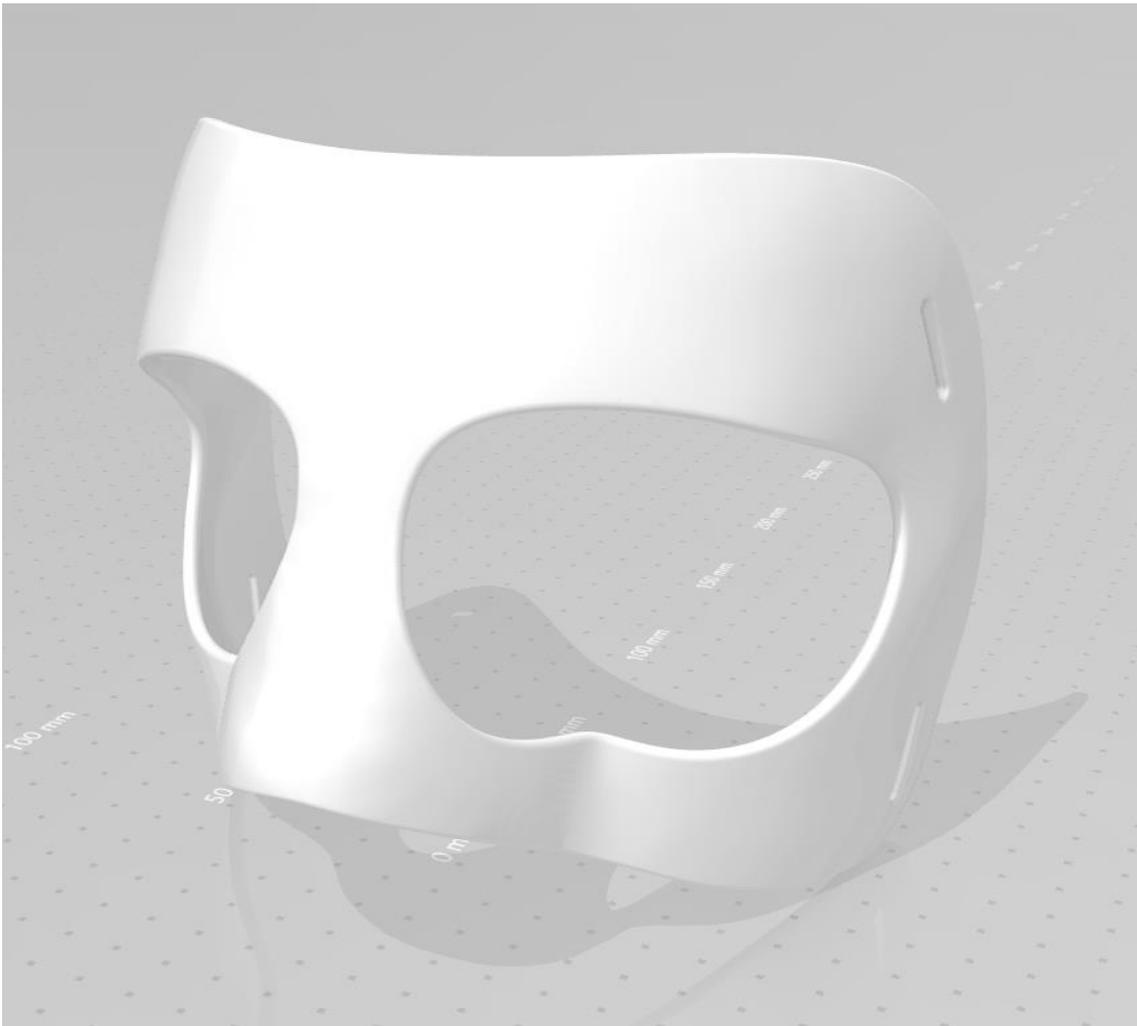
5.1 Mallado FEM Máscara de Protección Facial Original

Primero se mallará la máscara original, de 3mm de espesor constante.

El mallado de la máscara se ha efectuado a partir de un modelo en 3D en formato stl que ha sido proporcionado.

Figura 20.

Máscara protección facial original



Fuente: Elaboración propia

A partir de este formato con Ansys se ha realizado el mallado. Debido a su forma, que es totalmente curva, se ha decidido usar un mallado tetraédrico para que se adaptara lo mejor posible a la geometría de la máscara en vez de usar un mallado hexaédrico, ya que, este último, aunque proporcione mejor calidad de mallado, no se adapta tan fácilmente a la geometría y tiene un mayor coste computacional (Sierra J. (2023)).

Al ejecutar el mallado de la máscara se le ha pedido al programa, aparte de realizar un mallado tetraédrico, que el número aproximado de elementos fuera de un millón y con una transición suave entre estos con el objetivo de lograr una buena calidad de malla con buena densificación y así conseguir buenos resultados.

Finalmente hay 1506888 nodos y 993560 elementos.

El resultado del mallado es el siguiente:

Figura 21.

Mallado máscara original



Fuente: Elaboración propia

Ahora se comprobará la calidad del mallado, para ello hay que señalar tres parámetros de la malla (Mateo, D. S. (2024, febrero 12)):

- Element quality: Se refiere a como el elemento seleccionado en la malla rellena perfectamente el modelo 3D, es decir, es la relación entre el volumen del elemento y la longitud entre sus nodos. Se considera que este valor se tiene que encontrar entre 0,8 y 1.



- Orthogonal quality: La ortogonalidad alude a lo perpendicular que son los elementos finitos respecto a las caras o bordes de la geometría circundante. Es la forma en la que los elementos finitos se pegan al modelo original. Se considera que este valor se tiene que encontrar entre 0,2 y 1.
- Skewness: El skewness, en el contexto de mallado para el cálculo por elementos finitos, se refiere a la distorsión o falta de simetría de un elemento finito. Concretamente, el skewness se utiliza para evaluar cómo de deformado o desviado está un elemento respecto a una forma geométrica ideal. Se estima que este valor debe encontrarse entre 0 y 0,6.

A continuación, se encuentra una tabla con toda la información sobre la calidad del mallado:

Tabla 1.

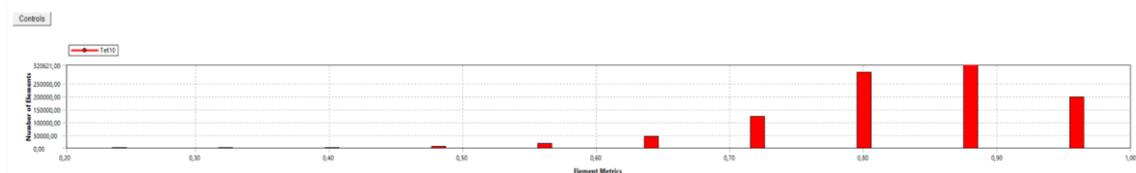
Element quality máscara original

ELEMENT QUALITY		
Element metrics	Nº de elementos	%
0,243	17	0,00171102
0,323	155	0,01560047
0,402	944	0,09501188
0,482	4950	0,49820846
0,562	16400	1,65063006
0,641	43400	4,36813076
0,721	121000	12,1784291
0,801	290000	29,1879705
0,88	321000	32,3080639
0,96	196000	19,7270422
Nº de elementos TOTALES		993560
Media Element metrics		0,8354068

Fuente: Elaboración propia

Figura 22.

Valores element quality máscara original



Fuente: Elaboración propia



Tabla 2.

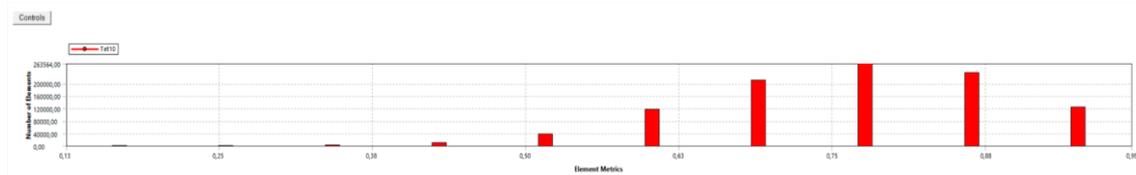
Orthogonal quality máscara original

ORTHOGONAL QUALITY		
Element metrics	Nº de elementos	%
0,169	8	0,00080519
0,256	122	0,01227908
0,342	1300	0,13084263
0,429	8610	0,86658078
0,516	38200	3,84476026
0,603	116000	11,6751882
0,69	209000	21,0354684
0,777	264000	26,571118
0,864	233000	23,4510246
0,951	123000	12,3797254
Nº de elementos TOTALES		993560
Media Element metrics		0,76638862

Fuente: Elaboración propia

Figura 23.

Valores orthogonal quality máscara original

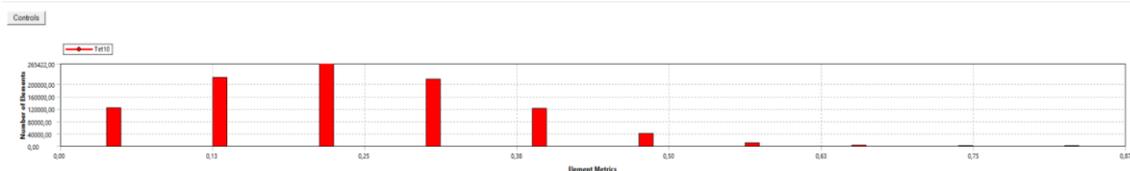


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.*Skewness máscara original*

SKEWNESS		
Element metrics	Nº de elementos	%
0,0437	123000	12,3797254
0,131	220000	22,1425983
0,219	265000	26,6717662
0,306	214000	21,5387093
0,394	121000	12,1784291
0,481	40100	4,03599179
0,569	9070	0,91287894
0,656	1360	0,13688152
0,743	125	0,01258102
0,799	8	0,00080519
Nº de elementos TOTALES		993560
Media Element metrics		0,23232489

Fuente: Elaboración propia

Figura 24.*Valores skewness máscara original*

Fuente: Elaboración propia

Como se ve la media de todos los parámetros se encuentran en los rangos anteriormente mencionados, además de que los porcentajes de los elementos fuera de rango en cada uno de los parámetros son muy bajos, por lo que se puede concluir que la malla es de buena calidad y por lo tanto proporcionará resultados apropiados.

5.2 Ensayos Máscara de Protección Facial Original

A continuación, se realizaron los ensayos de la máscara de protección facial original, a fin de saber cuál era su resistencia y así poder hacer un modelo de la máscara en simulación a partir del mallado explicado anteriormente.

Figura 25.

Ensayo máscara original



Fuente: Elaboración propia

Figura 26.

Comprobación impacto máscara original



Fuente: Elaboración propia

Una vez concluido el ensayo de la máscara de protección facial original se obtuvieron los siguientes resultados:

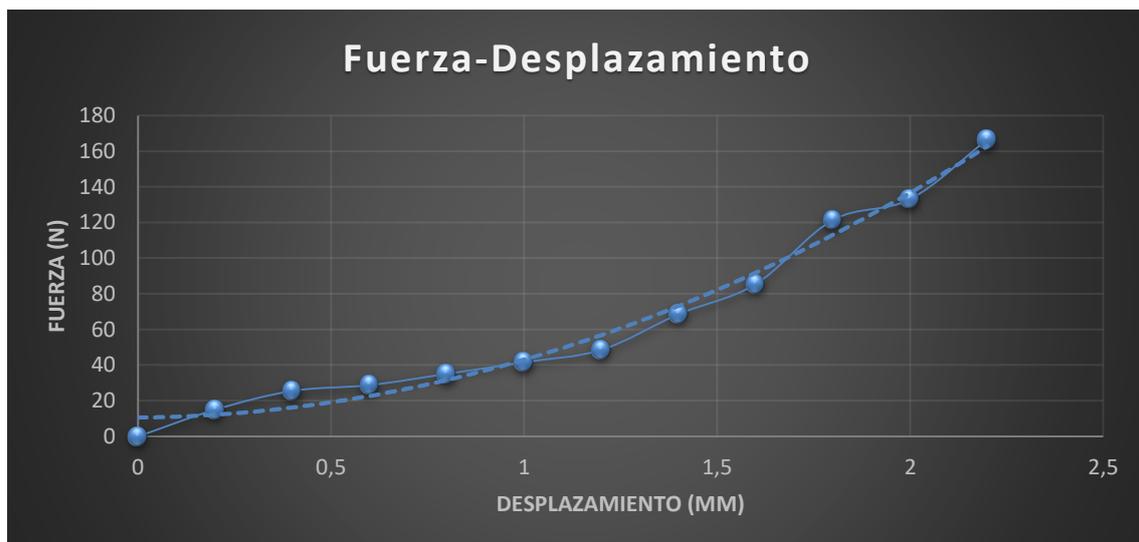
Tabla 4.*Fuerza-Desplazamiento máscara original*

Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)
0	0
15,0427344	0,2
25,5599004	0,4
28,8028382	0,6
35,1209604	0,8
41,6543514	1
48,602055	1,2
68,6484108	1,4
85,5396168	1,6
121,5210726	1,8
133,1855658	2
166,6492758	2,2

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en la tabla superior la fuerza máxima soportada por la máscara antes de hacer contacto con la nariz fue de 166,649 N, lo cual son aproximadamente unos 16,98 Kg de peso.

A continuación, se presenta una gráfica con la curva Desplazamiento-Fuerza de la máscara.

Gráfica 6.*Fuerza-Desplazamiento máscara original*

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar como en la gráfica la curva Fuerza-Desplazamiento de la máscara no es lineal, sino que sigue una línea de tendencia polinómica de segundo grado.

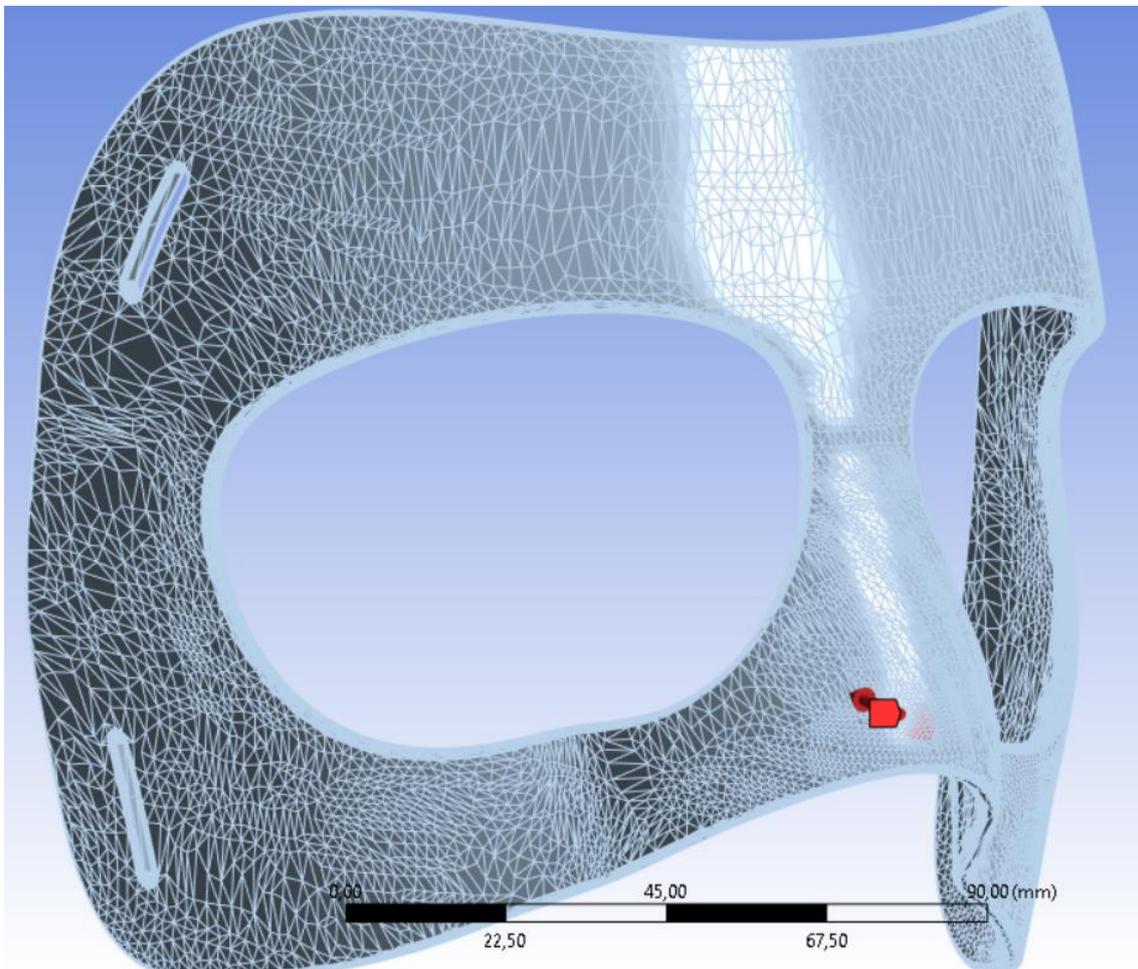
5.3 Simulación Máscara de Protección Facial Original

Ahora se realizará la simulación de la máscara de protección facial original a partir del mallado explicado anteriormente. Se usará la simulación Static Structural disponible en Ansys, porque la velocidad del ensayo es bastante baja, debido a la toma de datos, por lo que se acerca más a una carga estática que una dinámica. Además, si se utilizara simulación dinámica, los tiempos de espera de la simulación de unos pocos segundos sería de días por lo que no es viable hacerlo con el equipo informático disponible.

Con el fin de poder ejecutar la simulación se han establecido una serie de condiciones de contorno, estas son un impedimento en los desplazamientos de las aristas en las caras de la máscara por donde pasan las cintas que sujetan la máscara a la cabeza y la aplicación de una fuerza en la punta de la nariz de la máscara.

Figura 27.

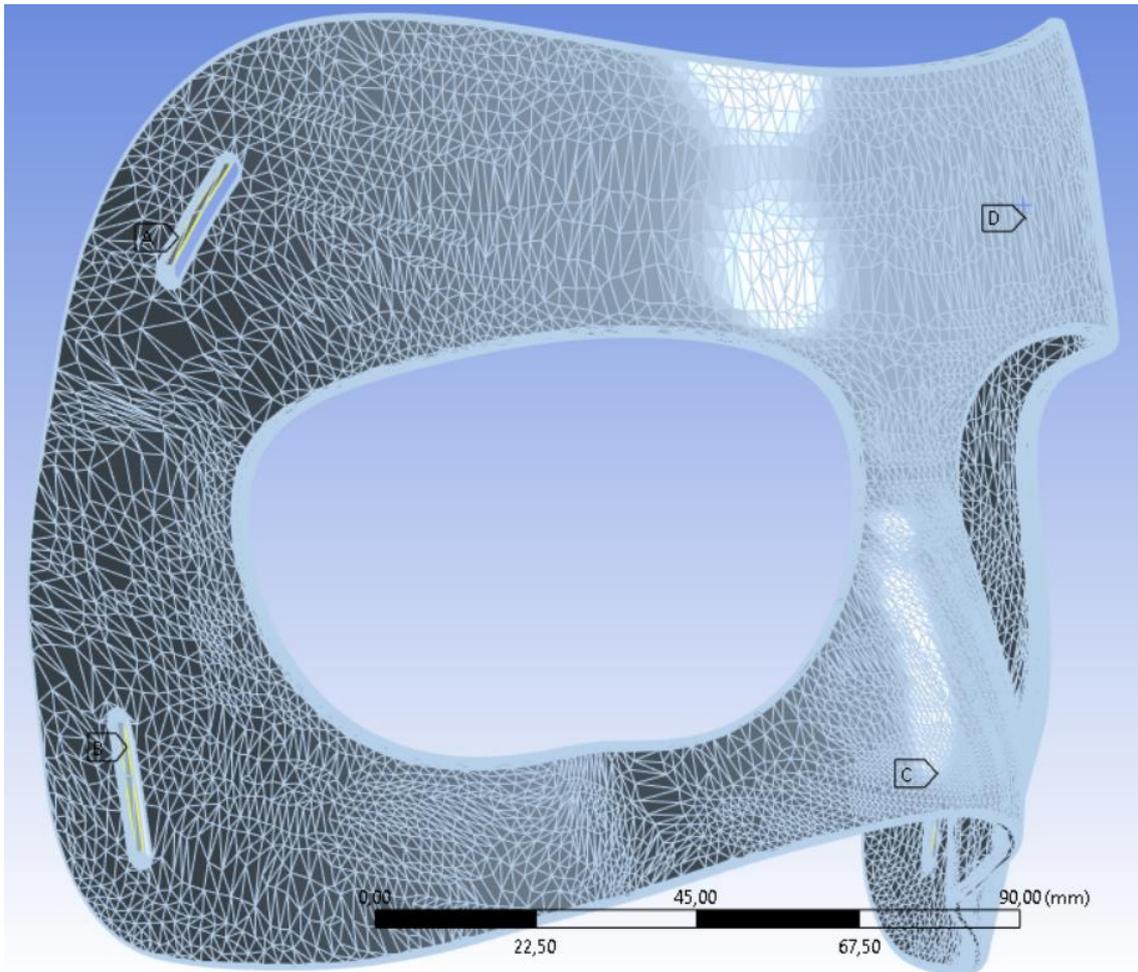
Fuerzas aplicadas en la máscara original



Fuente: Elaboración propia

Figura 28.

Condición de desplazamiento máscara original

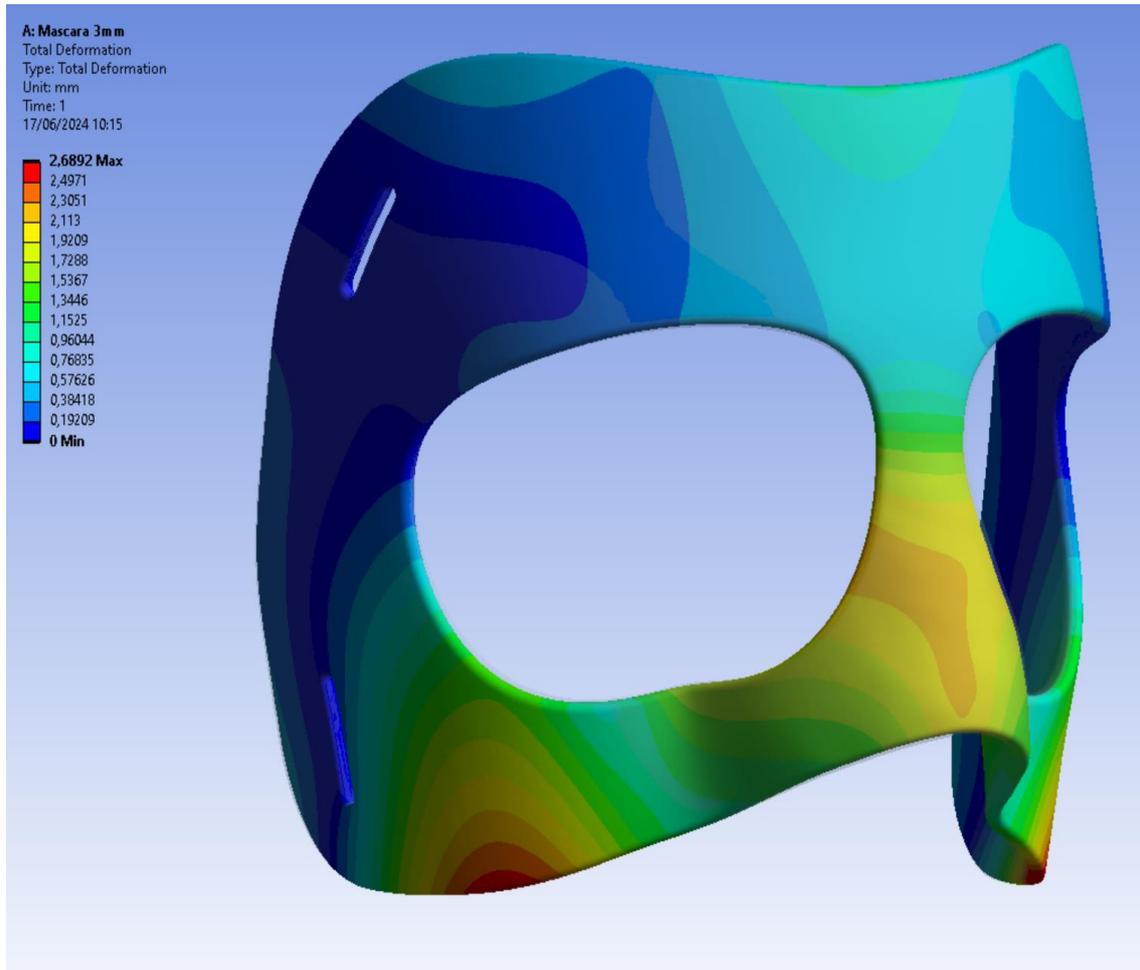


Fuente: Elaboración propia

A continuación, se le pedirá al ordenador que realice la simulación con las distintas fuerzas obtenidas en los ensayos y se compararán las deformaciones obtenidas en la simulación con las extraídas en los ensayos.

Figura 29.

Deformaciones máscara original $F=166,65\text{ N}$



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura anterior las deformaciones que sufre la máscara cuando se le aplica una fuerza en la zona de la nariz se producen principalmente en dicha área, como es lógico, y en la parte de los pómulos, por debajo de los ojos, esto se debe a que es una zona que se deforma bastante para poder absorber las fuerzas.

Primero se calculará el error de los desplazamientos resultantes de la simulación con los obtenidos en el ensayo.

Tabla 5.

Fuerza-Desplazamiento simulación máscara original

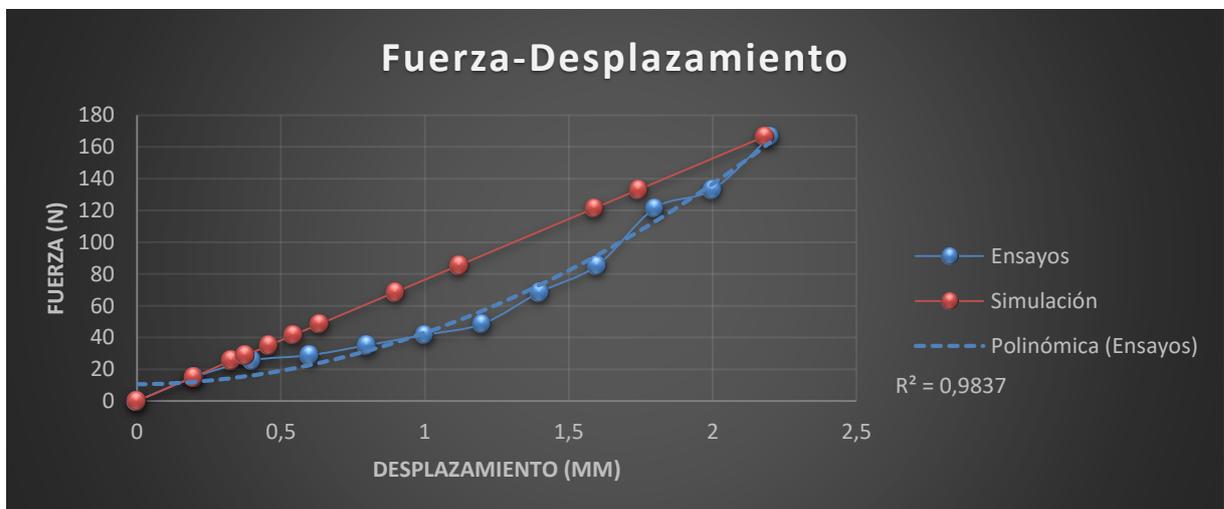
Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Error (%)
0	0	0
15,0427344	0,19688	1,56
25,5599004	0,3283	17,925
28,8028382	0,3771	37,15
35,1209604	0,4598	42,525
41,6543514	0,54541	45,459
48,602055	0,63595	47,004167
68,6484108	0,89886	35,795714
85,5396168	1,12	30
121,5210726	1,5906	11,6333333
133,1855658	1,7441	12,795
166,6492758	2,182	0,8181818

Fuente: Elaboración propia

Ahora, mediante una gráfica, las curvas Fuerza-Desplazamiento obtenidas en la simulación y el ensayo serán comparadas.

Gráfica 7.

Fuerza-Desplazamiento comparación máscara original



Fuente: Elaboración propia

Se aprecia como la simulación tiene una curva completamente lineal, que difiere bastante de la obtenida en el ensayo. La diferencia entre las dos curvas es bastante apreciable y con los porcentajes de error vistos en la tabla anterior la simulación solo se aproxima adecuadamente a la realidad en los puntos iniciales o finales. El error medio entre las curvas es del 25,69%.

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA.



Esta gran diferencia entre las dos curvas se puede deber a diversos factores como la plastificación de algún punto de la máscara, debido a que esta se ensayó varias veces al hacer diversas pruebas para determinar cuál sería la metodología de ensayo y comprobar que todo funcionara adecuadamente, debido a la degradación del material, ya que esta máscara llevaba ya tiempo fabricada al ser de un TFG (Ser Gómez, M. D. (2022)) anterior, o debido al propio comportamiento del plástico, ya que el plástico tiene una zona de deformación elástica-lineal y otra zona de deformación plástica.

Debido a este conjunto de razones y a que en la simulación se ha considerado que el comportamiento del plástico sería ideal, por lo que su deformación sería completamente lineal respecto a su fuerza, las curvas de la simulación y los ensayos difieren tanto.



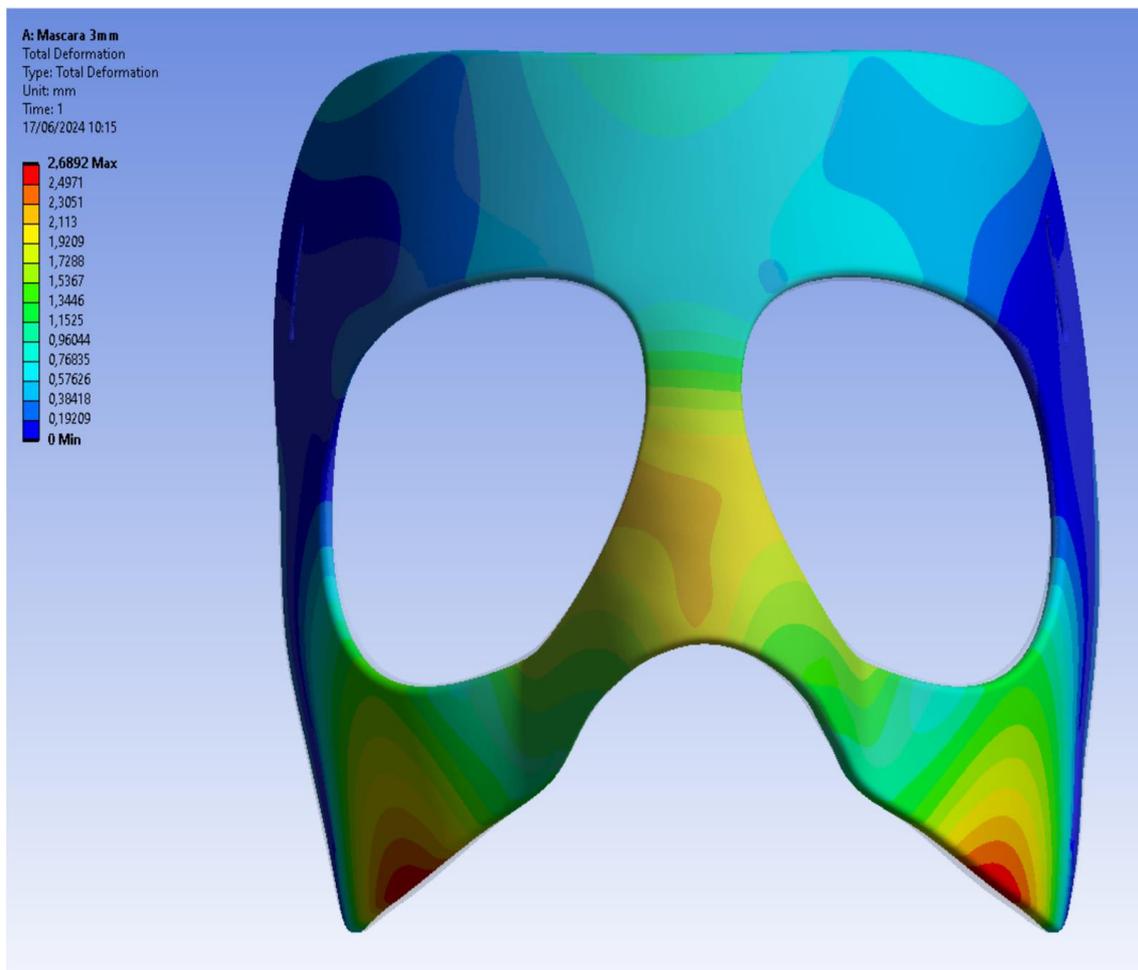
6. Modificaciones Realizadas a la Máscara Original

A continuación, se hará un breve estudio de las distintas modificaciones que se le han realizado a la máscara original para que aguante más fuerza.

A partir de las simulaciones obtenidas en Ansys y de los vídeos realizados durante los ensayos se observó que la zona más crítica era la zona de la nariz, como se puede comprobar en la siguiente figura.

Figura 30.

Deformaciones máscara original



Fuente: Elaboración propia

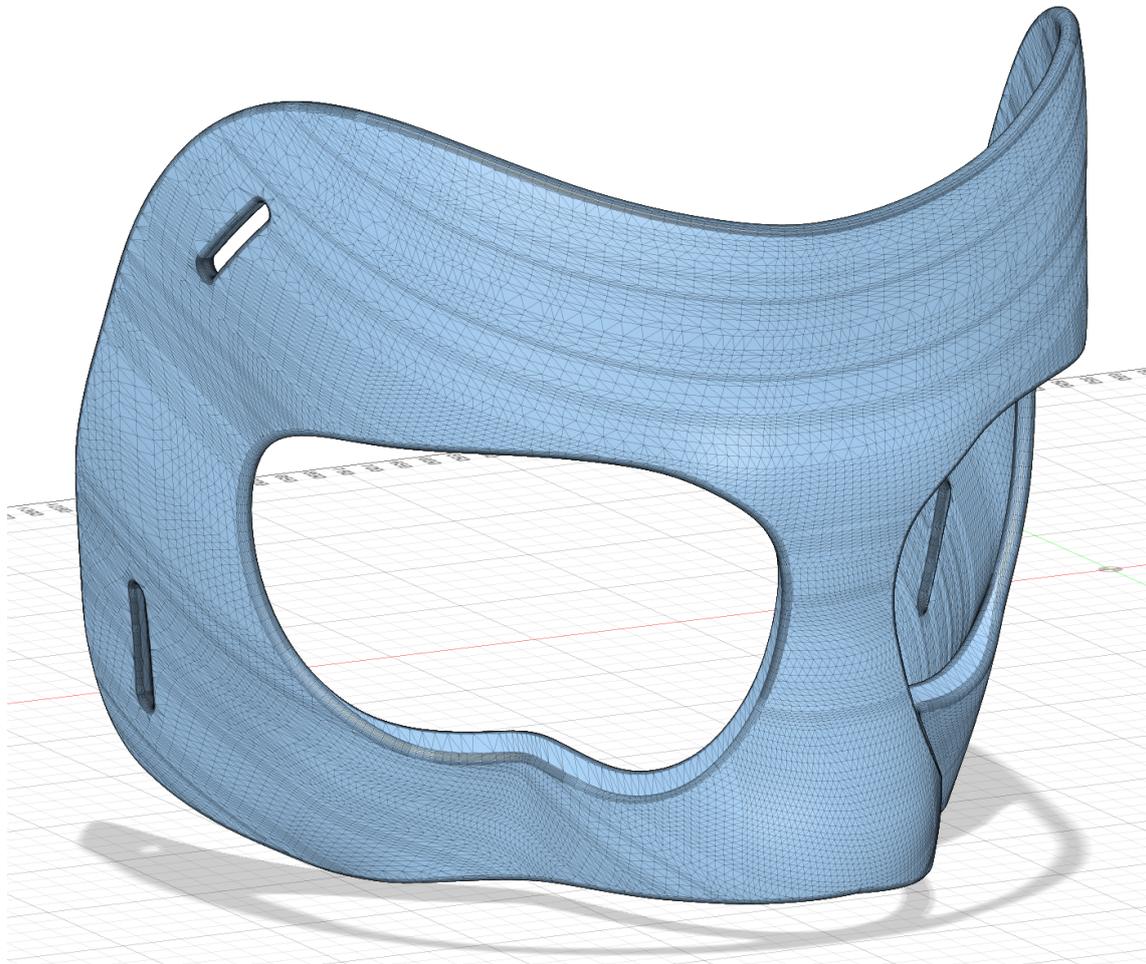
La zona de los pómulos, por debajo de los ojos, se decidió no modificarla debido a que es necesario un área que se deforme y así disipe la energía de la fuerza que se aplica en la nariz.

Además, se tomó la decisión de cambiar la concavidad de la zona de la nariz, para que la máscara tuviera que deformarse más para poder hacer contacto con la nariz.

Así, con todas estas consideraciones, se modificó el diseño de la máscara original mediante el programa de diseño 3D Autodesk Fusion, llegando al siguiente resultado:

Figura 31.

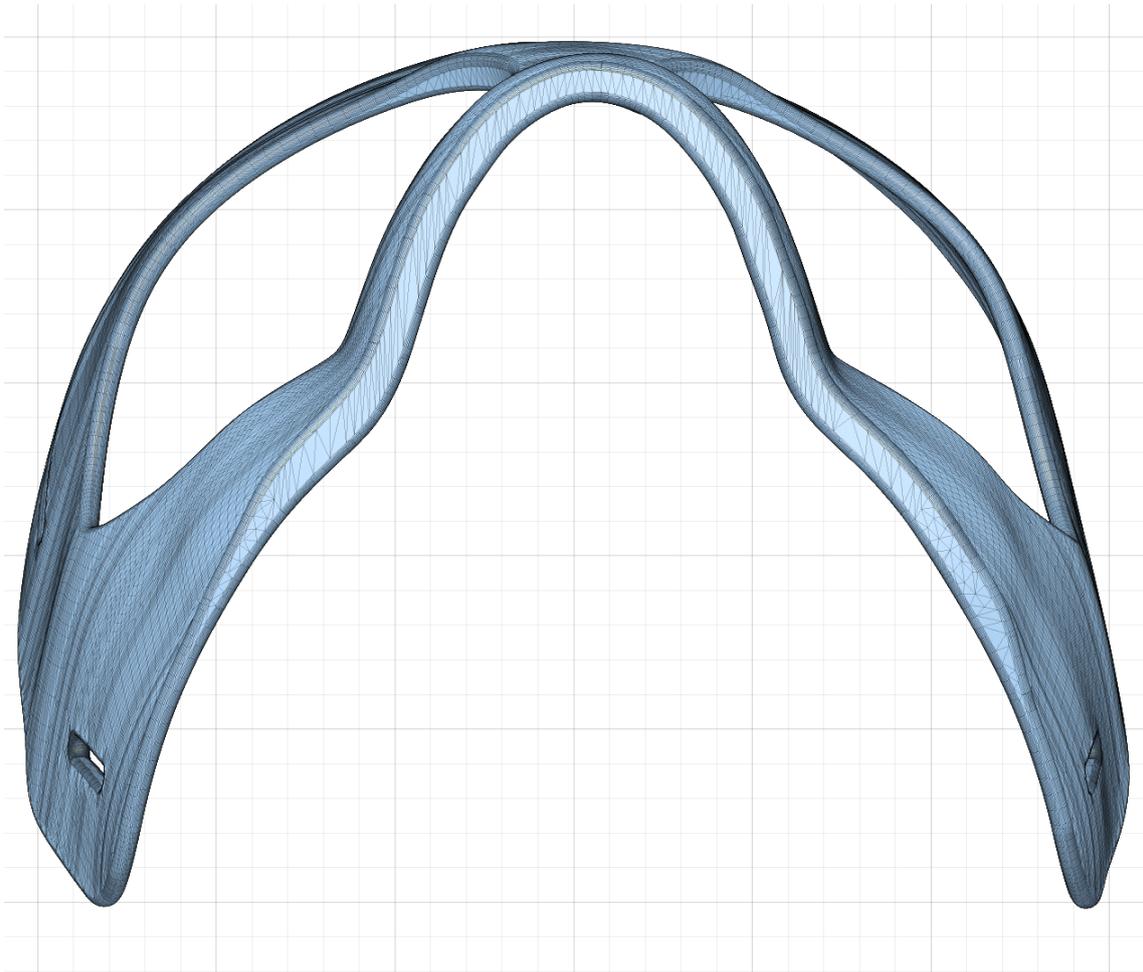
Máscara modificada 1



Fuente: Elaboración propia

Figura 32.

Máscara modificada 2



Fuente: Elaboración propia

Como se ha podido ver de las dos imágenes anteriores se ha engrosado la zona de la nariz y la zona inferior de la máscara, pasando de un grosor de 3mm a un grosor de 6mm. Gracias a esta modificación del grosor también se cambió la concavidad de la zona de la nariz para que haya más espacio entre la máscara y la nariz.

Después de todo esto se decidió imprimir la máscara modificada y realizar todo el estudio hecho anteriormente con la máscara original.



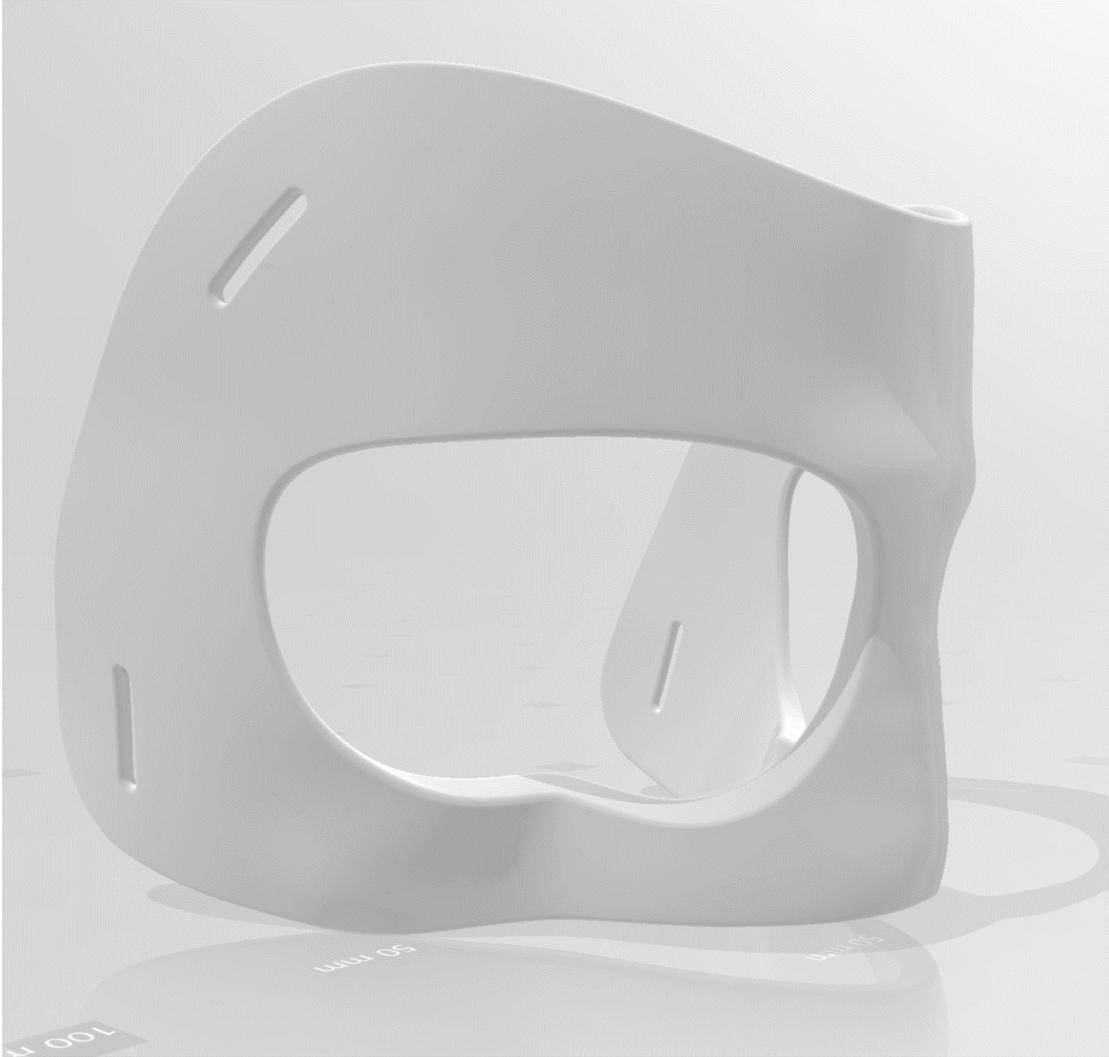
7. Máscara de Protección Facial Modificada

7.1 Mallado FEM Máscara de Protección Facial Modificada

Ahora se efectuará el mallado de la máscara modificada. Al igual que antes se partirá de un modelo 3d en un formato de extensión stl.

Figura 33.

Máscara protección facial modificada



Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el modelo anterior el mallado se hizo mediante tetraedros para que la malla se consiguiera adaptar sin problemas a las zonas curvas de la máscara. Sin embargo, al tener un mayor grosor las curvas no son tan pronunciadas lo que favorece realizar un mallado menos denso que en el caso anterior, pero con un nivel de calidad similar.

Así, se termina obteniendo un mallado con 925345 nodos y 591303 elementos. Se intentó elaborar un mallado más denso, pero presentaba problemas debido al coste computacional que suponía hacerlo.

Figura 34.

Mallado máscara modificada



Fuente: Elaboración propia

Ahora se comprobará la calidad del mallado realizado, para ello se volverán a verificar los mismos parámetros que en la máscara anterior (Mateo, D. S. (2024)): element quality, orthogonal quality y skewness.

A continuación, se presentan las tablas con toda la información sobre la calidad del mallado:



Tabla 6.

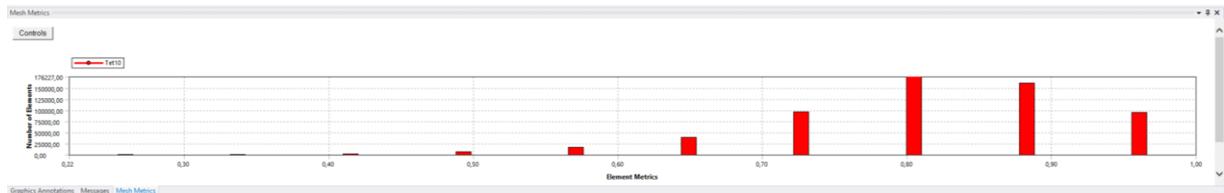
Element quality máscara modificada

ELEMENT QUALITY		
Element metrics	Nº de elementos	%
0,259	49	0,008286784
0,337	396	0,066970741
0,415	1820	0,307794819
0,493	6060	1,024855277
0,571	16100	2,722800324
0,649	38500	6,511044253
0,727	95700	16,18459571
0,805	176000	29,76477373
0,883	161000	27,22800324
0,961	95100	16,0831249
Nº de elementos TOTALES		591303
Media Element metrics		0,816631444

Fuente: Elaboración propia

Figura 35.

Valores element quality máscara modificada



Fuente: Elaboración propia



Tabla 7.

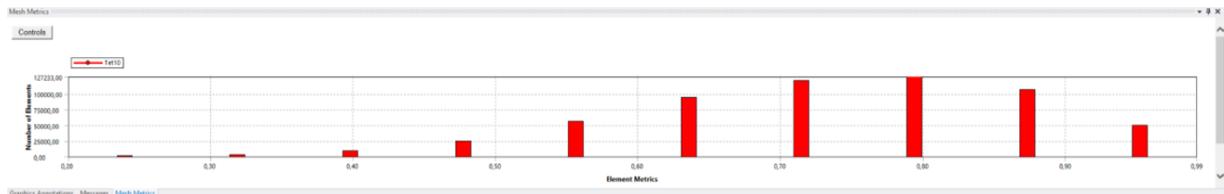
Orthogonal quality máscara modificada

ORTHOAGONAL QUALITY		
Element metrics	Nº de elementos	%
0,24	648	0,109588485
0,319	3130	0,529339442
0,398	9010	1,523753473
0,477	23900	4,041920978
0,557	56300	9,521345232
0,636	93800	15,86327145
0,715	121000	20,46328194
0,794	127000	21,47799013
0,873	107000	18,09562948
0,953	49300	8,337519005
Nº de elementos TOTALES		591303
Media Element metrics		0,735499515

Fuente: Elaboración propia

Figura 36.

Valores orthogonal quality máscara modificada



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8.

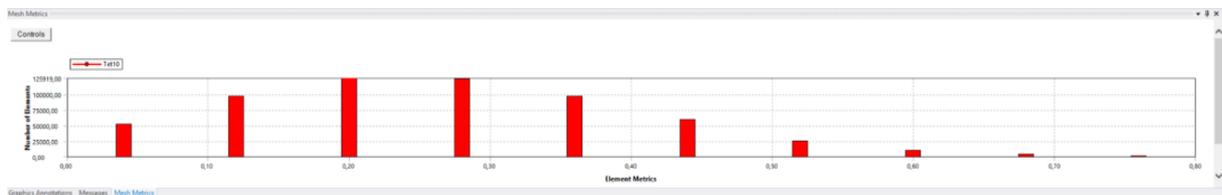
Valores skewness máscara modificada

SKEWNESS		
Element metrics	Nº de elementos	%
0,04	51800	8,760314086
0,12	96300	16,28606653
0,2	126000	21,3088721
0,28	124000	20,97063604
0,36	96400	16,30297834
0,44	58700	9,927228511
0,52	24900	4,21103901
0,6	9390	1,588018326
0,68	3200	0,541177704
0,76	664	0,112294374
Nº de elementos TOTALES		591303
Media Element metrics		0,262712416

Fuente: Elaboración propia

Figura 37.

Valores skewness máscara modificada



Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el modelo de máscara original se puede comprobar que todas las medias de todos los parámetros se encuentran en los valores oportunos con porcentajes bajos de los valores de los elementos fuera del rango adecuado. Por lo que el mallado de la máscara modificada se puede concluir que es apropiado a pesar de que no sea tan denso como lo era el de la máscara original.

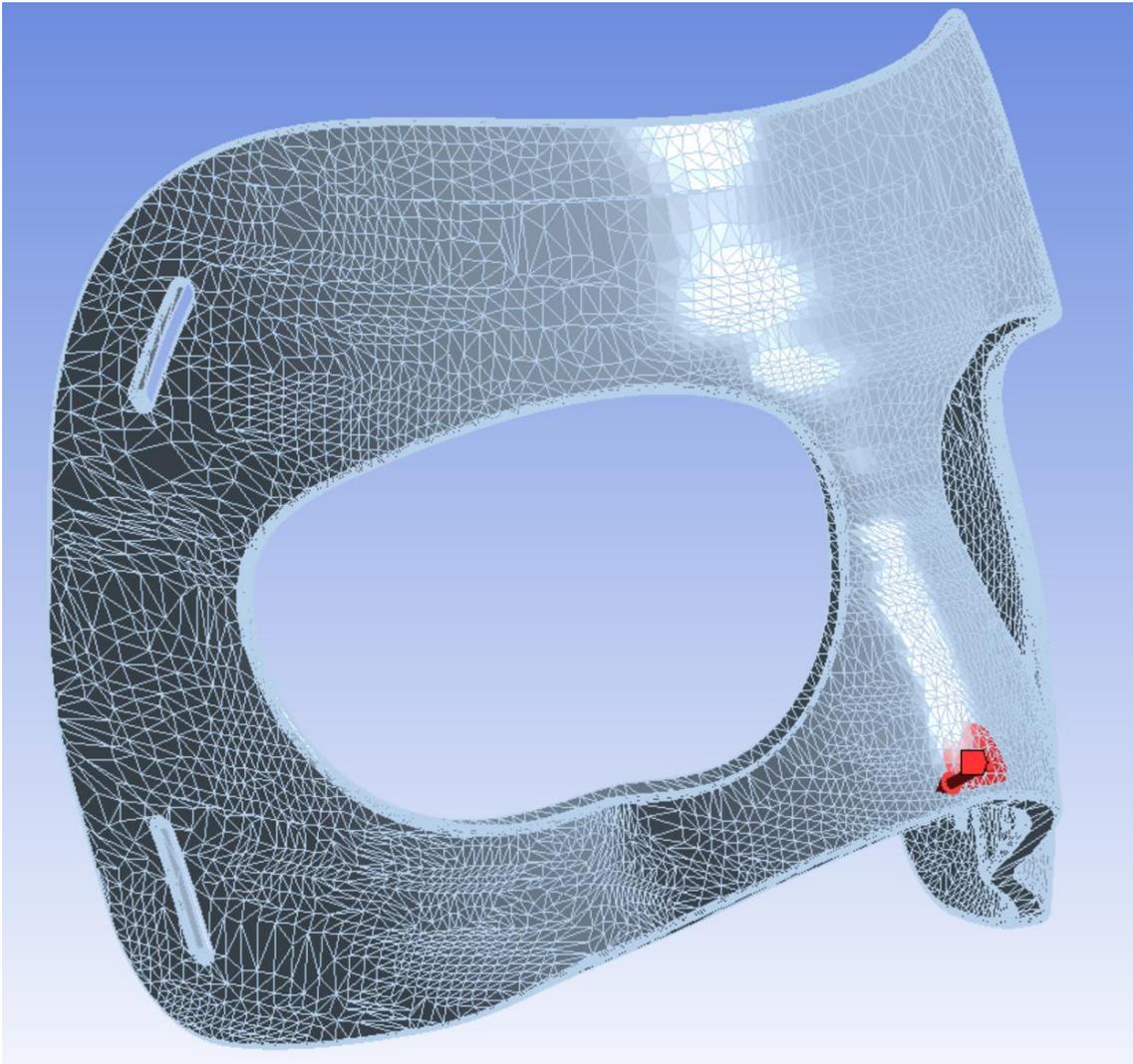
7.2 Comprobación Mejora Máscara Modificada

Una vez logrado el mallado de la máscara modificada lo primero que se hizo fue mediante simulación someter a la máscara a la fuerza máxima obtenida anteriormente en la simulación de la máscara original.

Las condiciones de contorno aplicadas fueron las mismas que en la máscara original, impedir el desplazamiento en las aristas de las zonas sujetadas por las gomas y la aplicación de la fuerza en la zona de la nariz.

Figura 38.

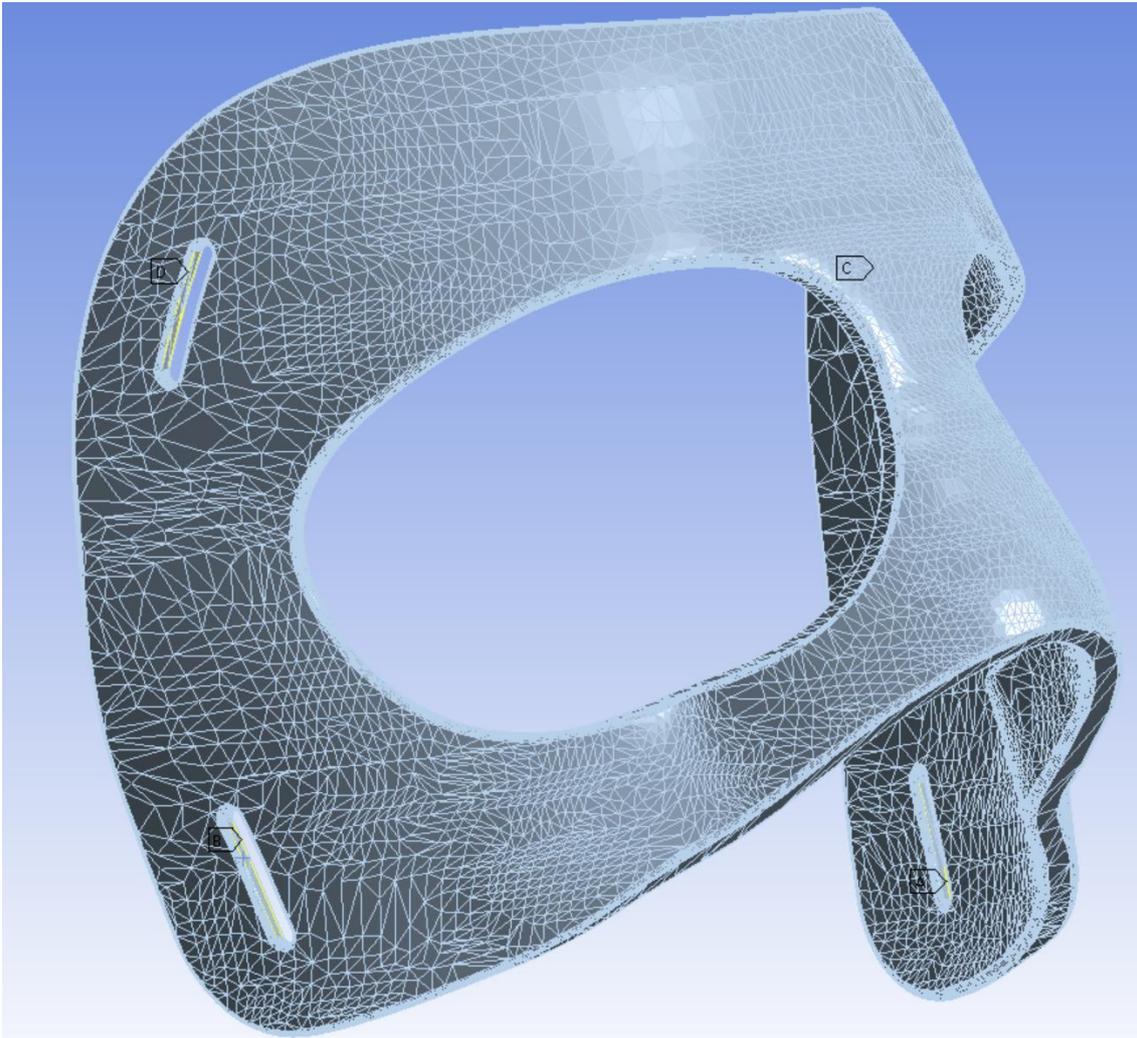
Fuerzas aplicada máscara modificada



Fuente: Elaboración propia

Figura 39.

Condiciones de desplazamiento máscara modificada

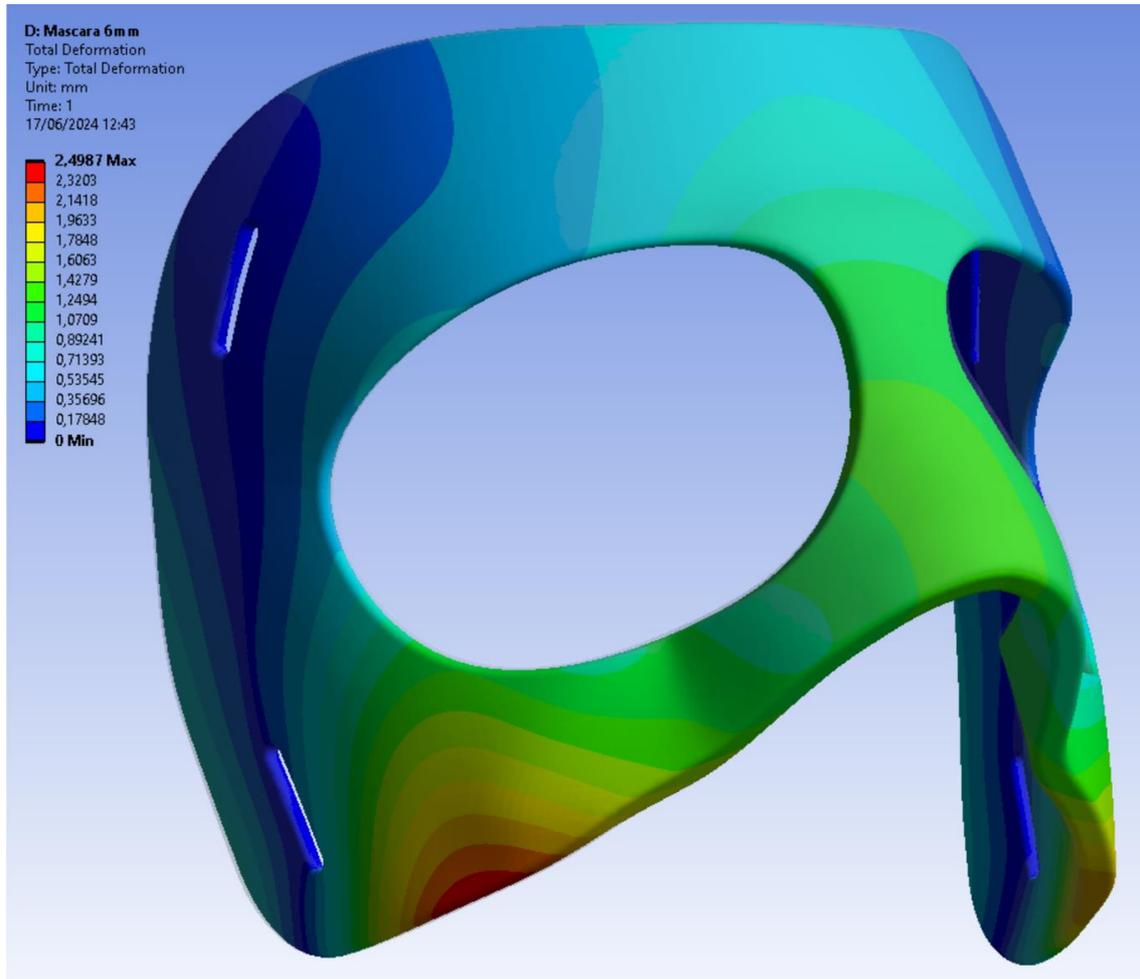


Fuente: Elaboración propia

Acto seguido se presentan las deformaciones que sufre la máscara modificada al estar sometida a una fuerza de 166,65 N, que es la máxima fuerza que aguantó la máscara original en los ensayos antes de hacer contacto con la nariz.

Figura 40.

Deformación máscara modificada $F=166,65\text{ N}$



Fuente: Elaboración propia

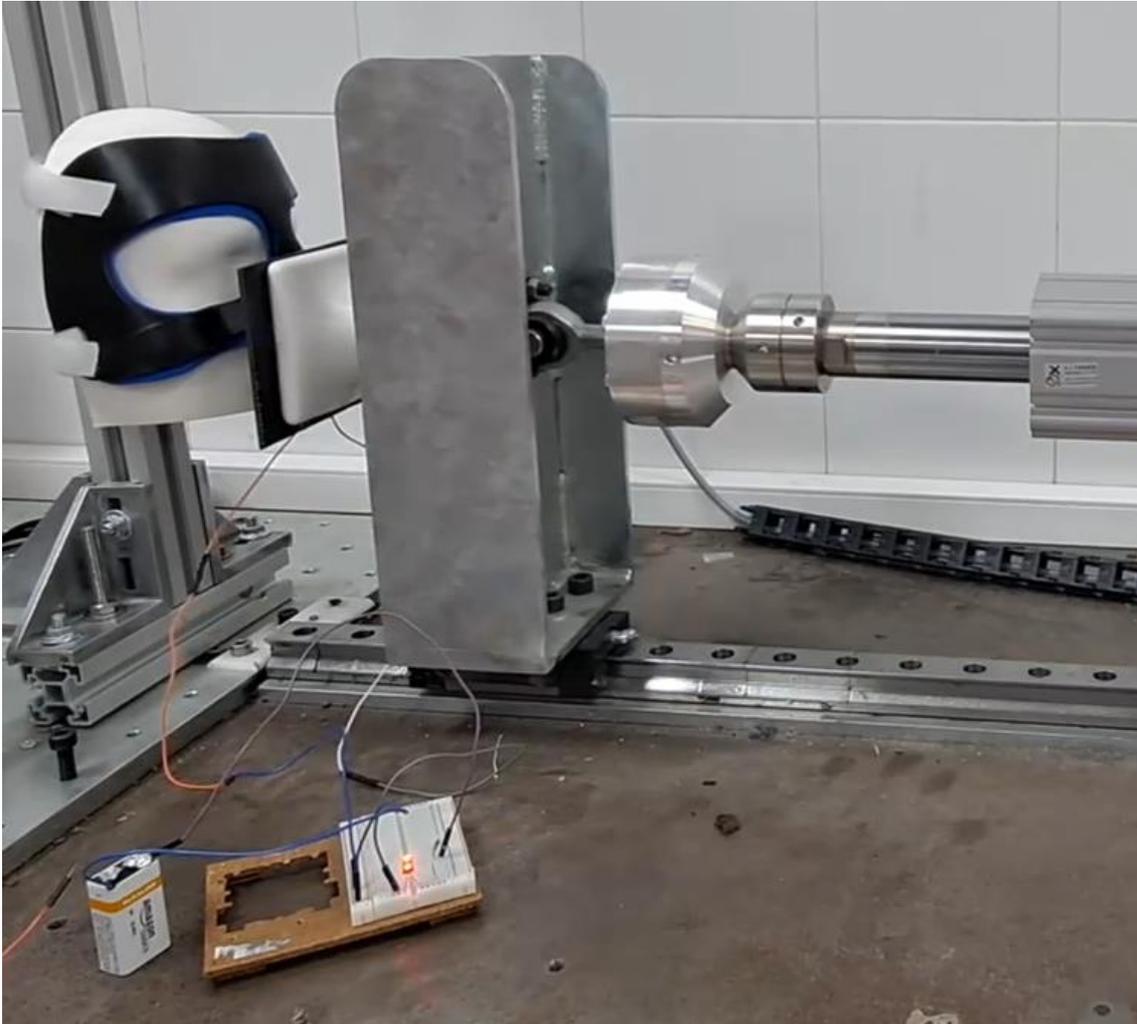
Gracias a la simulación se ha podido comprobar como las variaciones realizadas a la máscara permiten a esta soportar la misma fuerza con una menor deformación, especialmente en la zona de la nariz. También se puede observar como la zona de los pómulos sigue sufriendo una deformación parecida a la que sufría en la máscara original, debido a que la zona no se modificó al pretender que esta zona se siguiera deformando para así absorber la energía de la fuerza aplicada.

7.3 Ensayos Máscara de Protección Facial Modificada

Los ensayos de la máscara de protección facial modificada fueron iguales que los ensayos de la máscara de protección facial original, se siguió la misma metodología.

Figura 41.

Ensayo máscara modificada



Fuente: Elaboración propia

Tras realizar el ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 9.***Fuerza-desplazamiento máscara modificada*

Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)
0	0
31,232796	0,2
59,5654038	0,4
71,8035606	0,6
87,3562182	0,8
100,932923	1
120,246265	1,2
130,062286	1,4
146,029256	1,6
156,801384	1,8
161,422563	2
170,601181	2,2
206,359545	2,4
260,362149	2,6
296,169769	2,8
350,221628	3
384,609574	3,2
400,927116	3,4
411,922335	3,6
458,612178	3,8
483,439064	4
498,035615	4,2

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla superior la fuerza máxima soportada antes de realizar contacto con la nariz fue de 498,03 N, lo cual son aproximadamente 50,76 Kg de peso.

Figura 42.

Comprobación impacto máscara modificada

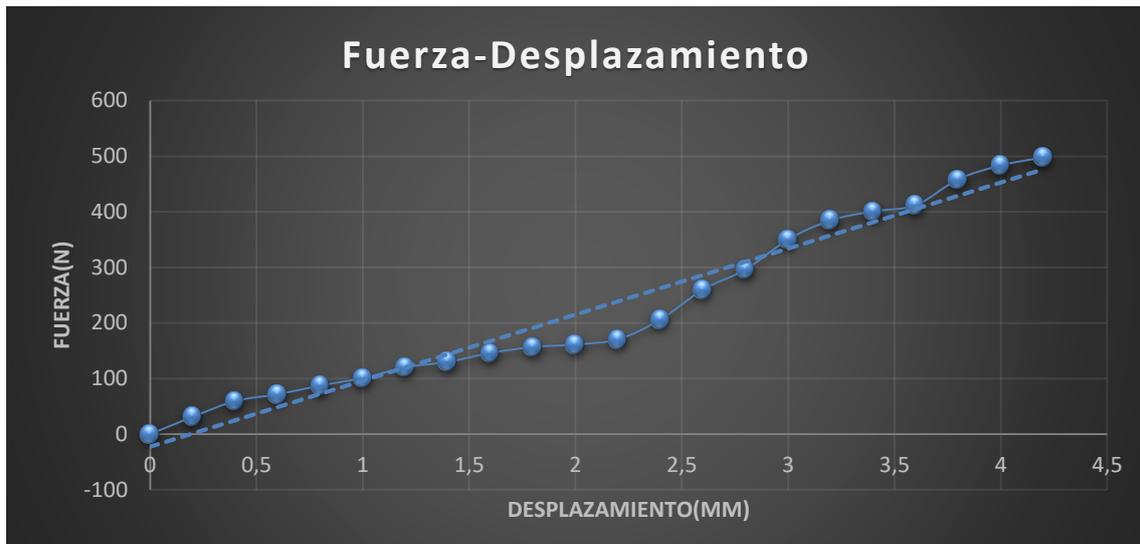


Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta una gráfica con la curva Fuerza- Desplazamiento de la máscara.

Gráfica 8.

Fuerza-Desplazamiento máscara modificada



Fuente: Elaboración propia

Se observa como en la gráfica la curva Fuerza-Desplazamiento de la máscara tiende a ser lineal, como se puede apreciar con la línea de tendencia.

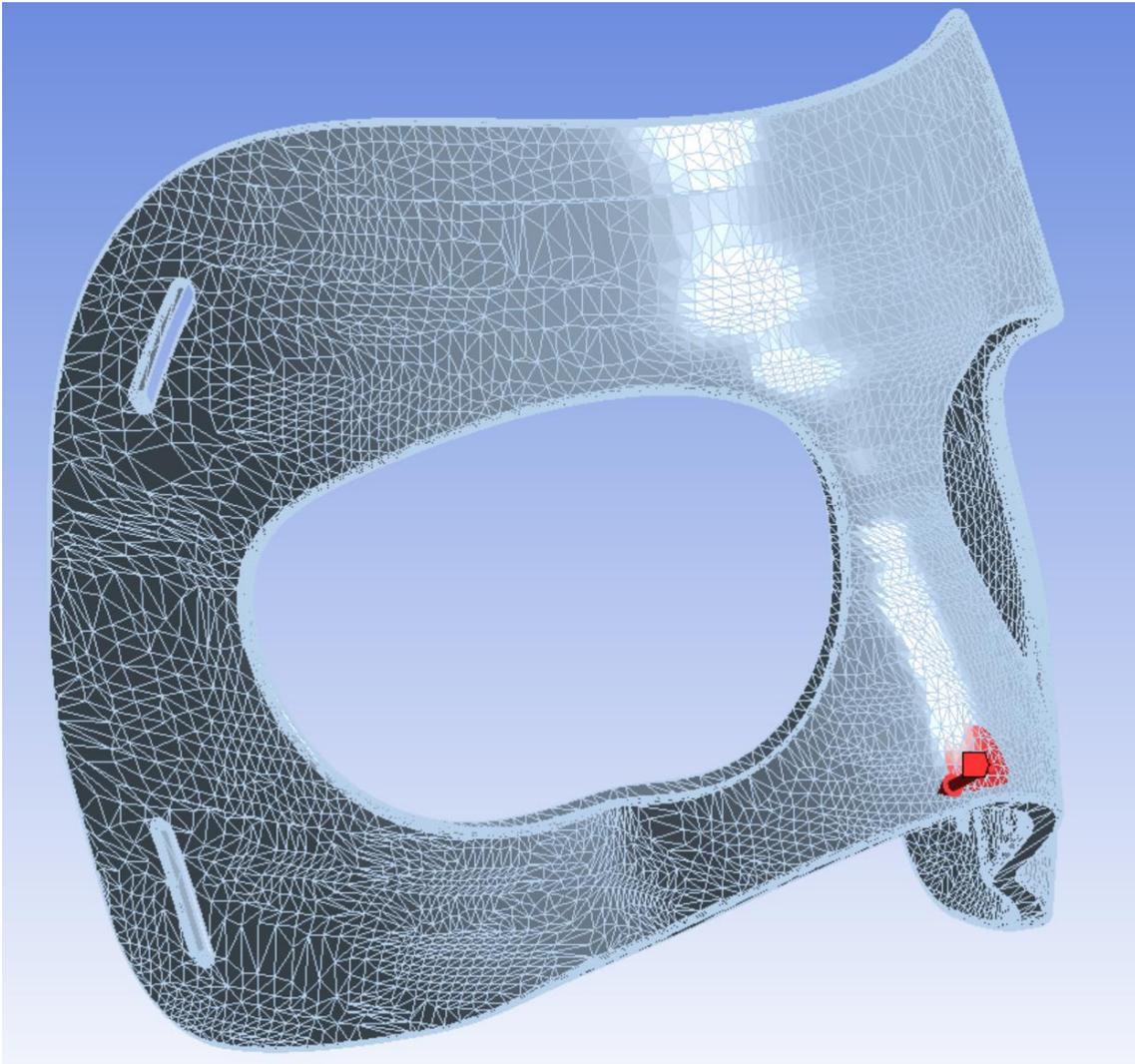
7.4 Simulación Máscara de Protección Facial Modificada

En este apartado se realizará la simulación de la máscara de protección facial modificada a partir del mallado explicado anteriormente. Se usará la simulación Static Structural disponible en Ansys.

Con el fin de ejecutar la simulación se han establecido una serie de condiciones de contorno, estas son un impedimento en los desplazamientos de las aristas en las caras de la máscara por donde pasan las cintas que sujetan la máscara a la cabeza y la aplicación de una fuerza en la punta de la nariz de la máscara.

Figura 43.

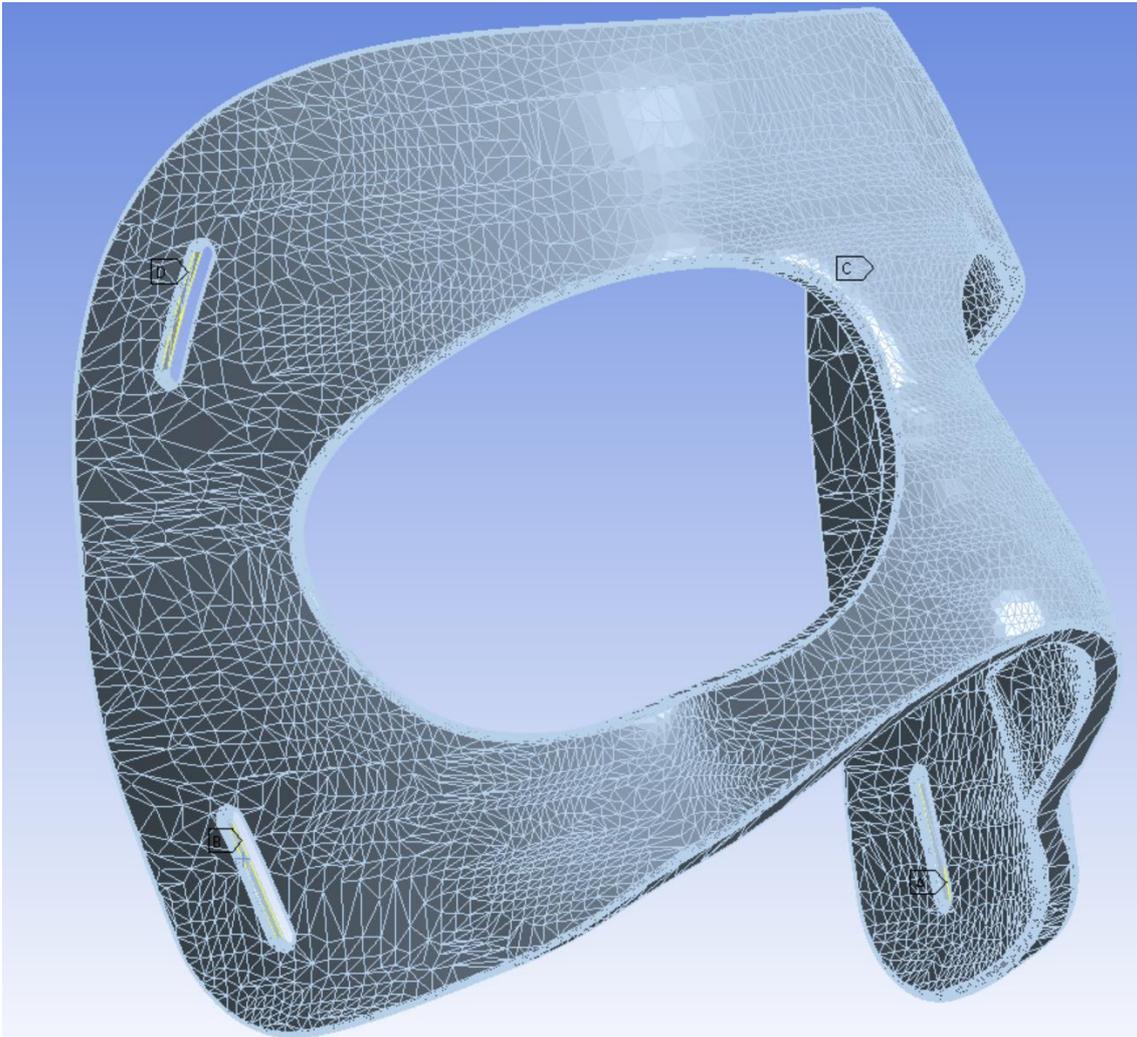
Fuerzas aplicadas máscara modificada



Fuente: Elaboración propia

Figura 44.

Condiciones de desplazamiento máscara modificada

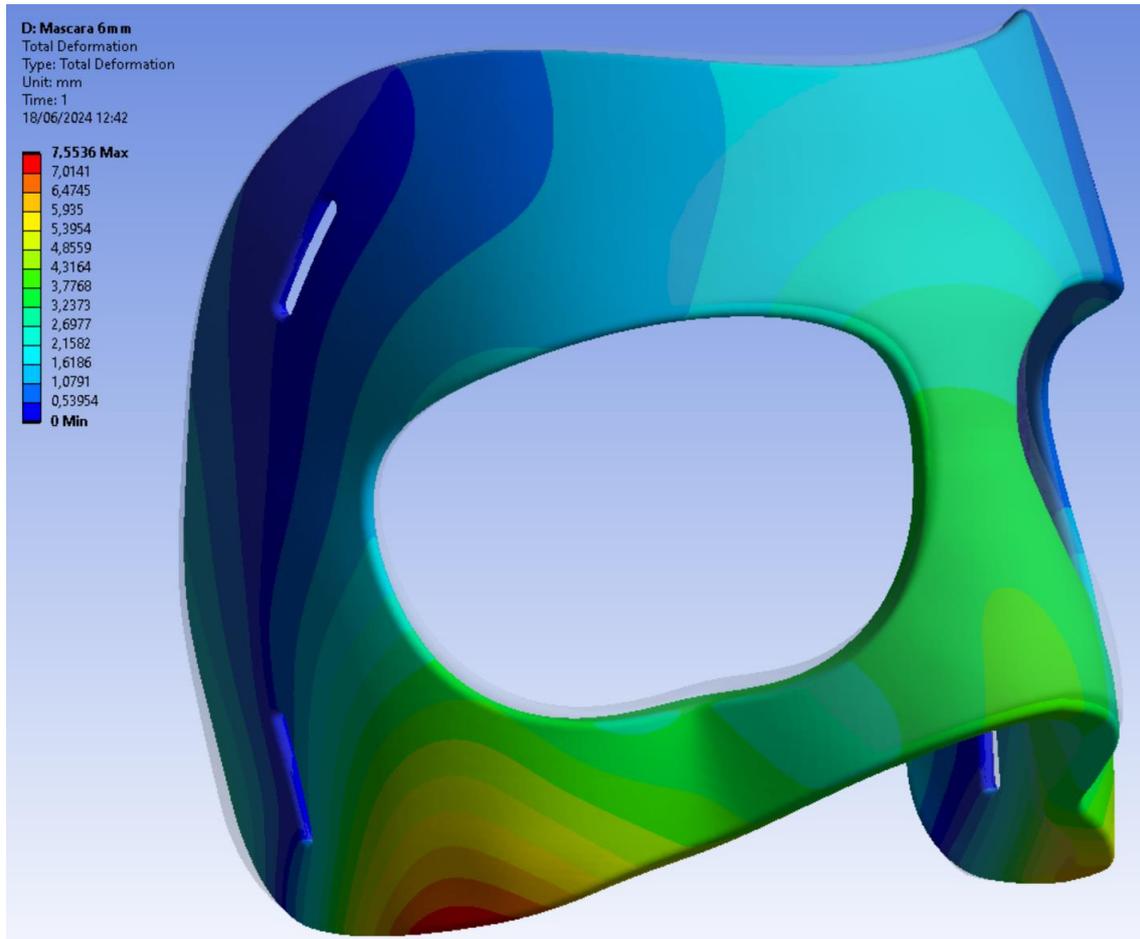


Fuente: Elaboración propia

Ahora, se le pedirá al ordenador que realice la simulación con las distintas fuerzas obtenidas en los ensayos y se compararán las deformaciones procedentes de la simulación con las de los ensayos.

Figura 45.

Deformación máscara modificada $F=498\text{ N}$



Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se calculará el error de los desplazamientos obtenidos en la simulación con los del ensayo.



Tabla 10.

Fuerza-Desplazamiento simulación máscara modificada

Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Error (%)
0	0	0
31,232796	0,31975	59,875
59,5654038	0,53286	33,215
71,8035606	0,62549	4,2483333
87,3562182	0,75903	5,12125
100,932923	0,87806	12,194
120,246265	1,0334	13,883333
130,062286	1,115	20,357143
146,029256	1,259	21,3125
156,801384	1,3295	26,138889
161,422563	1,3612	31,94
170,601181	1,443	34,409091
206,359545	1,7284	27,983333
260,362149	2,1712	16,492308
296,169769	2,4597	12,153571
350,221628	2,8829	3,9033333
384,609574	3,1744	0,8
400,927116	3,3166	2,4529412
411,922335	3,3907	5,8138889
458,612178	3,7679	0,8447368
483,439064	3,981	0,475
498,035615	4,0952	2,4952381

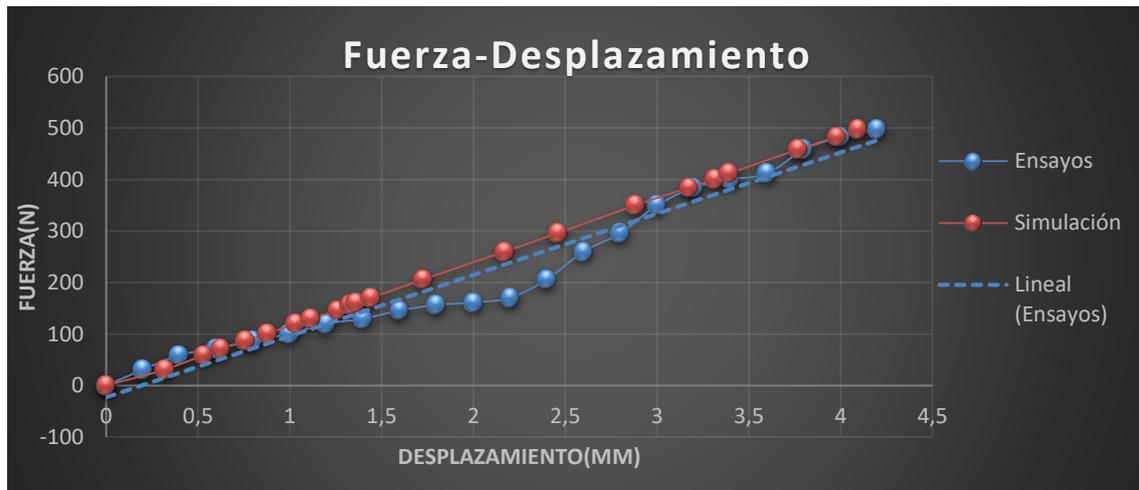
Fuente: Elaboración propia

Si se comparan los porcentajes de error de la máscara original con el de la máscara modificada se observa que el error cometido en la simulación de la máscara modificada es menor, la media de error de la máscara original es del 25,6968%, mientras que la media de error cometido en la máscara modificada es del 16,005%.

Ahora se comparará mediante una gráfica las curvas Fuerza-Desplazamiento obtenidas en la simulación y el ensayo.

Gráfica 9.

Fuerza-Desplazamiento comparación máscara modificada



Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar como la simulación tiene una curva completamente lineal, la cual es bastante similar a la obtenida en el ensayo. Donde la mayor diferencia se da entre los desplazamientos 1,5mm y 2,5mm, donde el porcentaje de error es bastante elevado, aunque inferior que en la máscara original.

Esta diferencia entre las dos curvas se puede deber a diversos factores como la plastificación de algún punto de la máscara, debido a que esta se ensayó varias veces para comprobar que todo el equipo utilizado funcionara adecuadamente, debido a la degradación del material, ya que puede que el material utilizado para imprimir la máscara hubiera estado mucho tiempo almacenado o en condiciones no adecuadas, o debido al propio comportamiento del plástico, ya que el plástico tiene una zona de deformación elástica-lineal y otra zona de deformación plástica.

Debido a este conjunto de razones y a que en la simulación se ha considerado que el comportamiento del plástico sería ideal y por lo tanto su deformación sería completamente lineal respecto a su fuerza las curvas de deformación de la simulación y los ensayos difieren.

Sin embargo, las curvas de la simulación y del ensayo son muy próximas entre sí, con un porcentaje de error medio entre los puntos de una y de otra del 16,005%. Por lo que en este caso se puede decir que la simulación se ajusta bastante bien a los ensayos, en especial a partir de 3mm de deformación.



7.5 Segunda Máscara de Protección Facial Modificada

Debido a que los ensayos de la máscara de protección facial modificada diferían respecto a la simulación, especialmente entre el desplazamiento 1,5mm y 2,5mm, se decidió imprimir otra máscara de protección facial cambiada igual a la primera para volver a ensayarla. En este caso, en la segunda máscara de protección facial modificada nunca se han hecho ensayos previos para establecer la metodología de ensayo, como si se hizo con la primera. Además, cuando se imprimió en PP se utilizó una bobina de material recientemente comprada, para así evitar que se haya podido degradar el PP y que haya perdido propiedades.

7.5.1 Ensayos Segunda Máscara de Protección Facial Modificada

Los ensayos de la segunda máscara de protección facial cambiada fueron iguales que los ensayos de la máscara de protección facial original y los de la primera máscara de protección facial modificada.

Figura 46.

Ensayo segunda máscara modificada



Fuente: Elaboración propia

Una vez realizado el ensayo de la segunda máscara de protección facial modificada se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 11.**

Fuerza-Desplazamiento segunda máscara modificada

Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)
0	0
30,8822238	0,2
47,008545	0,4
64,8877272	0,6
76,5840906	0,8
94,813845	1
109,8565794	1,2
120,8517984	1,4
145,328112	1,6
161,5500438	1,8
185,325213	2
199,9536348	2,2
239,4408126	2,4
248,7787812	2,6
286,194396	2,8
308,1529638	3
333,7447344	3,2
365,6149344	3,4
382,123698	3,6
415,5236676	3,8
444,2068476	4
489,0800892	4,2

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla superior la fuerza máxima soportada por la máscara antes de realizar contacto con la nariz fue de 489,08N, lo cual son prácticamente 49,855 Kg de peso.

Figura 47.

Comprobación impacto segunda máscara modificada

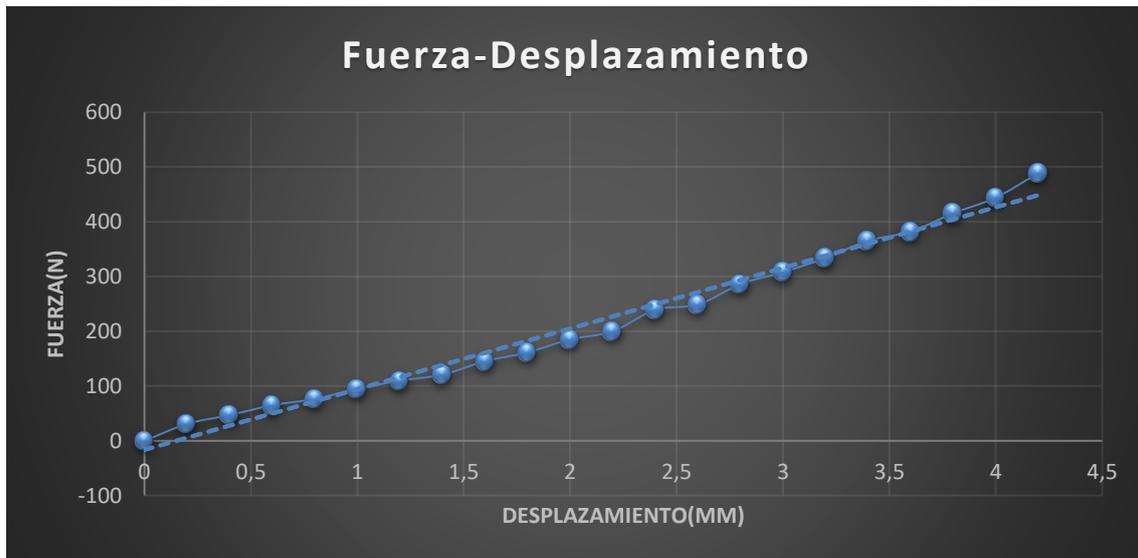


Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta una gráfica con la curva Fuerza-Desplazamiento de la máscara.

Gráfica 10.

Fuerza-Desplazamiento segunda máscara modificada



Fuente: Elaboración propia

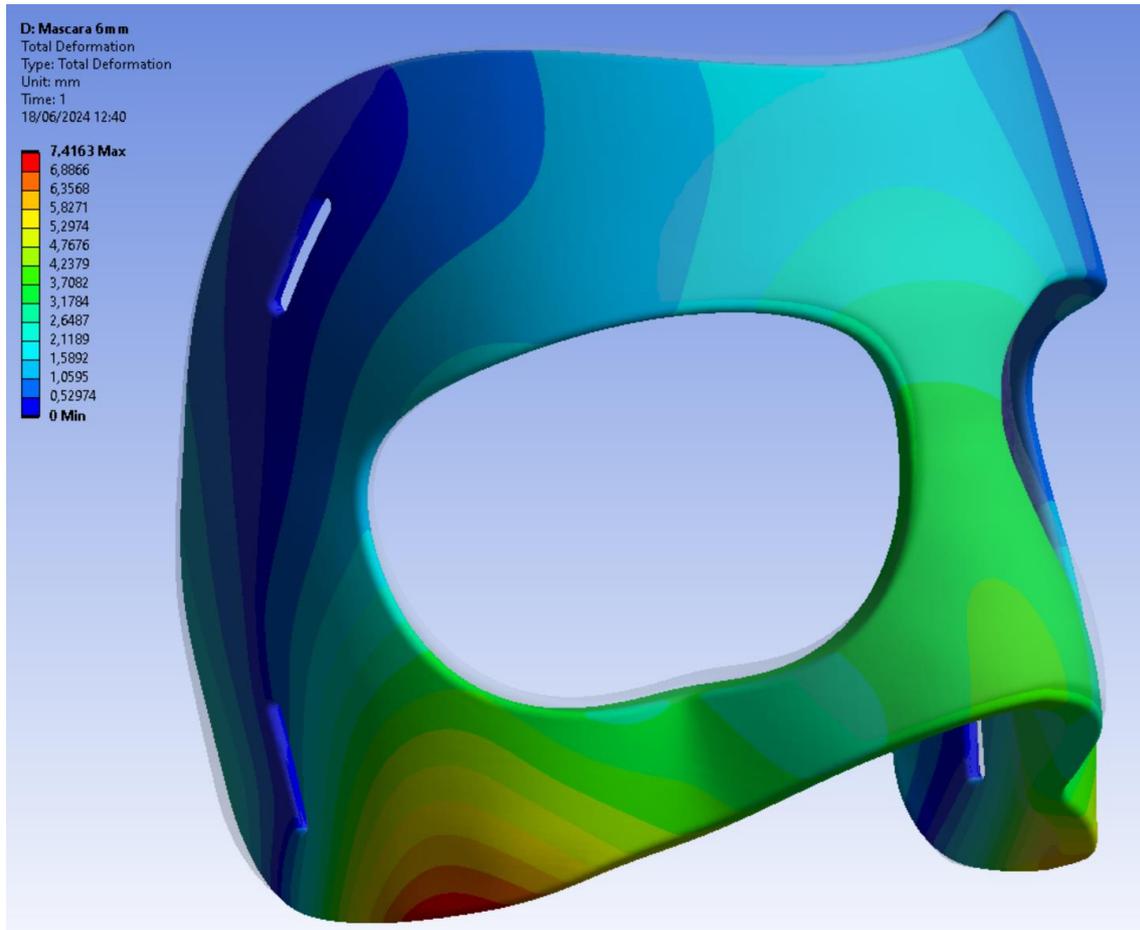
En esta gráfica se puede ver como la curva Fuerza-Desplazamiento de la máscara tiende a ser lineal, como se puede apreciar con la línea de tendencia de la propia gráfica, de hecho, esta es más lineal que la curva Fuerza-Desplazamiento de la primera máscara de protección facial modificada.

7.5.2 Simulación Segunda Máscara de Protección Facial Modificada

Ahora se realizará la simulación de la segunda máscara de protección facial modificada igual que como se hizo para la primera máscara modificada, utilizando el mismo mallado y comandos en Ansys, las condiciones de contorno también serán las mismas. Se le pedirá al ordenador que realice la simulación con las distintas fuerzas obtenidas en los ensayos y se compararán las deformaciones obtenidas en la simulación con las obtenidas en los ensayos.

Figura 48.

Deformación máscara modificada $F=489,08\text{ N}$



Fuente: Elaboración propia



Tabla 12.

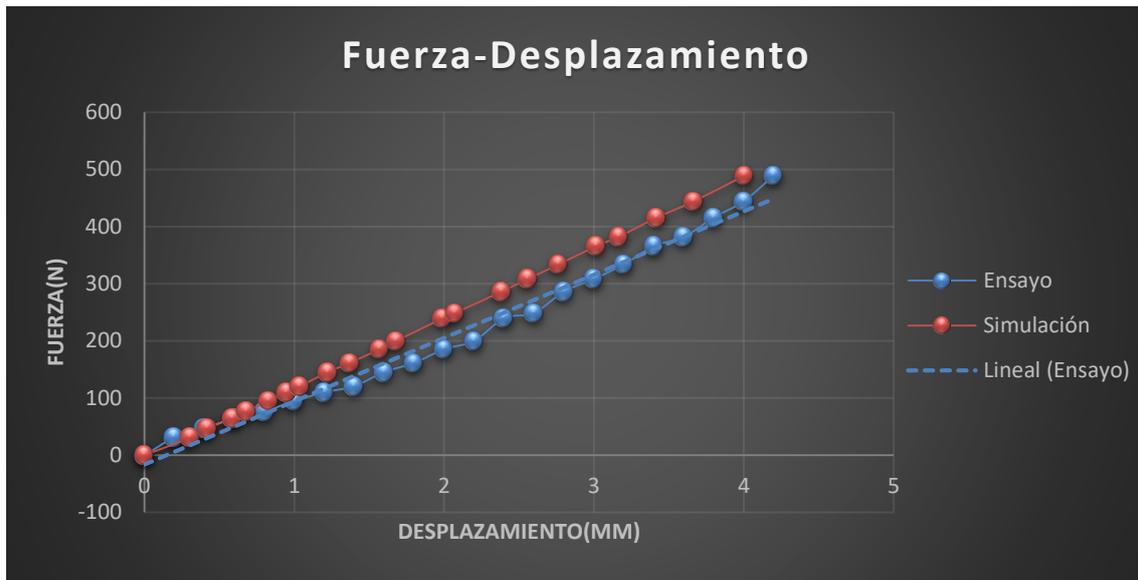
Fuerza-Desplazamiento simulación segunda máscara modificada

Fuerza	Desplazamiento	Error(%)
0	0	0
30,8822238	0,30586	52,93
47,008545	0,42047	5,1175
64,8877272	0,589	1,833333333
76,5840906	0,68231	14,71125
94,813845	0,83158	16,842
109,8565794	0,95149	20,70916667
120,8517984	1,04	25,71428571
145,328112	1,2243	23,48125
161,5500438	1,3719	23,78333333
185,325213	1,5689	21,555
199,9536348	1,6812	23,58181818
239,4408126	1,9907	17,05416667
248,7787812	2,074	20,23076923
286,194396	2,3836	14,87142857
308,1529638	2,5588	14,70666667
333,7447344	2,7648	13,6
365,6149344	3,0158	11,3
382,123698	3,1663	12,04722222
415,5236676	3,4195	10,01315789
444,2068476	3,6683	8,2925
489,0800892	4,0043	4,65952381

Fuente: Elaboración propia

Si se comparan los porcentajes de error de la primera máscara modificada con el de la segunda máscara modificada se observa que el error cometido en la simulación de la primera máscara modificada es ligeramente menor, la media de error de la primera máscara modificada es del 16,005%, mientras que la media de error cometido en la máscara modificada es del 17,001%.

Ahora se contrastarán las curvas Fuerza-Desplazamiento obtenidas en la simulación y el ensayo.

Gráfica 11.*Fuerza-Desplazamiento comparación segunda máscara modificada*

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar como la simulación tiene una curva completamente lineal que se adapta bastante bien a la curva Fuerza-Deformación de los ensayos. A pesar de que el error medio cometido es ligeramente superior al error cometido en la primera máscara modificada, esta presenta un comportamiento mucho más lineal por lo que la simulación se adapta mejor en una mayor parte de los puntos.

Esta máscara al no haberla ensayado previamente se puede descartar que la diferencia entre las curvas sea debido a la plastificación. Puede ser debido a la impresión, a que haya algún fallo en la adhesión entre capas, debido al comportamiento no del todo lineal del PP en la realidad o debido a que la simulación siempre considera condiciones perfectas, lo cual nunca ocurre en la vida real.





8. Conclusiones y Líneas Futuras

CONCLUSIONES:

Se concluye el proyecto dando por adecuadas las modificaciones realizadas en la máscara de protección facial original, debido a que se ha conseguido aumentar la resistencia a la deformación respecto a esta, que era uno de los objetivos principales.

Además, se ha establecido una metodología para realizar ensayos a las máscaras de protección facial y así determinar su resistencia a la deformación. También, durante el proyecto, se han desarrollado modelos de simulación que permiten hacerse una idea de cómo afectan los cambios realizados a las máscaras para lograr que estas puedan tener una mayor resistencia a la deformación.

LÍNEAS FUTURAS:

En cuanto a las líneas futuras en las que se podría seguir trabajando en este proyecto, se encuentra el realizar un cambio en el procedimiento de realizar los ensayos. Estos podrían pasar a ser completamente dinámicos, haciendo que el actuador deforme continuamente la máscara hasta realizar contacto con la zona de la nariz. Esto se podría conseguir si se localizara el cuello de botella de los datos que se recogen, que se produce a la hora de llevar a cabo este tipo de ensayos, debido a que alguno de los componentes de recogida o escritura de los datos no presenta la velocidad adecuada.

Por otro lado, la simulación se podría mejorar, haciendo que se ajustara más la deformación obtenida en la simulación a la real; esto se podría lograr teniendo en cuenta que la deformación real del PP no es completamente lineal. Sin embargo, esto es muy complicado de tener en cuenta a la hora de realizar simulaciones. Además, en caso de que se pasara a realizar ensayos en las máscaras dinámicos, se podrían hacer simulaciones dinámicas de las deformaciones que sufren las máscaras, para lo cual sería necesario disponer de equipos informáticos muy potentes.

Además, otro punto a estudiar sería cómo afectan las distintas modificaciones realizadas a las máscaras a su resistencia a la deformación, como por ejemplo distintos espesores o cambios en la forma de algunas zonas.

Otro punto que se podría introducir, es la realización de un estudio de mercado y de costes para ver la viabilidad de la fabricación de máscaras de protección facial y si sería rentable la idea de comercializarlos; y de qué forma hacerlo.





Bibliografía

- Ansys (s.f.) *Ansys for students*. <https://www.ansys.com/academic/students>
- Budynas R, Keith J. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*: Mc Graw Hill
- Eroski Consumer (2022, octubre 13). *Características y usos de la goma EVA*.
<https://www.consumer.es/bricolaje/caracteristicas-y-usos-de-la-goma-eva.html>
- Fiberlogy. (2022). *Filamento de polipropileno: extremadamente duradero y flexible*. <https://fiberlogy.com/es/filamentos/pp/>
- Foces A. (2020). Apuntes de la asignatura: *Elasticidad y resistencia de materiales I*. Universidad de Valladolid.
- Handayani, et. al. *Journal of Vocational Studies on Applied Research*. Vol. 3(1) 2021:1-4,
- Ingeniería Investigación y Tecnología volumen XVIII (número 3), julio-septiembre 2017 245-252 ISSN 1405-7743 FI-UNAM
- Mateo, D. S. (2024, febrero 12). *Cómo validar un mallado en elementos finitos*. Ingeniería SAMAT. <https://ingenieriasamat.es/blog/como-crear-buen-mallado-elementos-finitos/>
- Oñate E. (1995). *Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos*.
- Quintana Díaz, J., Hernández Izquierdo, D., & Giralt López, B. (1998). Incidencia de fracturas maxilofaciales en el municipio Artemisa. *Revista Cubana de Ortopedia y Traumatología*,12(1-2),69-71.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-215X1998000100013
- REPSOL. (2023, septiembre 13). *Polipropileno*.
<https://www.repsol.com/es/productos-y-servicios/quimica/productos/polipropileno/index.cshtml>
- Ser Gómez, M. D. (2022). *Desarrollo de máscaras de protección facial utilizando termoconformado e impresión 3D*.
- Sherry, Eugene., & Wilson, S. F. (2002). *Manual Oxford de medicina deportiva*.
https://www.academia.edu/17887482/Manual_Oxford_de_Medicina_Deportiva_Eugene_Sherry_and_Stephen_F_Wilson



Sierra J. (2023). Apuntes de la asignatura: *Modelado numérico de sistemas sólidos y fluidos*. Universidad de Valladolid.



Agradecimientos

Primero quiero agradecer a mi tutor Alberto Mansilla y a todo el equipo de Orthomedical 3D y de Newgentechs por toda la ayuda que me han brindado a lo largo de la realización del TFG.

Así, también quiero agradecer a mi familia; mi padre, mi madre y mi hermana por todo el apoyo que me ofrecieron no solo en la realización del TFG, sino a lo largo de toda la carrera.