

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DEL IMPACTO HUMANO-ROBOT

AUTOR: SERRANO MARTÍNEZ, ADRIÁN

TUTOR: MEDINA HERNÁNDEZ, JOSE

DIRECTOR: JARDÓN HUETE, ALBERTO

LEGANÉS, A 22 DE JUNIO DE 2014

Índice

Lista de figuras	3
Lista de tablas.....	5
Lista de ecuaciones	6
Resumen	7
Abstract.....	8
Agradecimientos	9
Capítulo I. Planteamiento del Problema y Motivación	10
a. Introducción	10
b. Motivación	11
c. Objetivos	12
d. Estructura.....	13
e. Planificación y presupuesto	14
Capítulo II. Estado del arte de brazos robóticos para la interacción física Humano-Robot.....	18
a. Introducción	18
b. Seguridad en la interacción física humano-robot (pHRI).	20
I. Estrategias de control.	21
II. Diseño.	22
c. Diseño morfológico seguro.....	22
I. Robótica industrial (restricciones, dispositivos y control)	22
II. Robótica ligera.....	23
III. Robótica Flexible	23
IV. Robótica Blanda.....	24
d. Métrica de seguridad.....	25
e. Conclusiones	27
Capítulo III. Colisión Humano-Robot.....	28
a. Introducción	28
b. Escenarios de impacto.....	28
c. Modelo de impacto entre el robot y la cabeza.....	30

d.	Análisis de impacto Humano-Robot.....	32
I.	Modelo analítico simplificado	32
II.	Modelo computacional	39
Capítulo IV.	Resultados del modelo.....	46
a.	Introducción	46
b.	Resultados del modelo	46
I.	Magnitudes fundamentales del modelo hertziano	47
II.	Mecánica de contacto.....	53
III.	Teorías de fallo	56
IV.	Magnitudes de seguridad pHRI	60
c.	Variaciones del caso general:.....	63
I.	Parámetros físicos del modelo	63
II.	Parámetros de forma.....	66
d.	Coberturas	70
I.	Modelo computacional con capas.....	70
II.	Parámetros del modelo	71
III.	Mecánica de contacto.....	72
IV.	Teorías de fallo	73
V.	Parámetros de seguridad.....	75
e.	Conclusiones	77
Capítulo V.	Conclusiones.....	78
a.	Introducción	78
b.	Modelo analítico-computacional	78
c.	Influencia de los parámetros del robot en la seguridad	80
d.	Cubierta de material suave.....	82
e.	Cumplimiento de los objetivos	83
f.	Trabajos futuros	85
Bibliografía		86

Lista de figuras

Figura I.1 Desglose de la planificación. Elaboración propia.	15
Figura I.2 Diagrama de Gantt correspondiente a las tareas del proyecto. Elaboración propia.	15
Figura I.3 Tabla del diagrama de Gantt planteado en MS-Proyect. Elaboración propia.	16
Figura II.1 De la robótica industrial a la HRI segura. Elaboración propia.....	18
Figura II.2 Componentes de eslabones del LWR-III [29]	23
Figura II.3 Actuador de rigidez variable UAL. [32]	24
Figura II.4 Grasping hand [51]	25
Figura III.1 Escenarios de contacto [28].	28
Figura III.2 Representación de la cabeza y el robot. Elaboración propia.....	30
Figura III.3 Contacto Hertziano: Choque entre dos esferas con una fuerza aplicada P [4]	33
Figura III.4 Contacto Hertziano: distribución de la presión de contacto [4]	34
Figura III.5 Penetración: a) Justo antes del impacto y b) Durante e impacto, de formadas y sin deformar. Elaboración propia.	35
Figura III.6 Choque de estudio. Elaboración propia.	37
Figura III.7 Diagrama de bloques en Matlab Simulink. Elaboración propia.	38
Figura III.8 Entorno de COMSOL Multiphysics 4.4 ®. Elaboración propia.	40
Figura III.9 Despliegue de las definiciones. Elaboración propia	41
Figura III.10 Apartado Geometría. Elaboración propia.....	42
Figura III.11 Despliegue de la mecánica de sólidos. Elaboración propia.	43
Figura III.12 Apartados Mallado. Elaboración propia.	44
Figura III.13 Apartado resultados. Elaboración propia.	45
Figura IV.1 Fuerza de contacto. Elaboración propia.....	47
Figura IV.2 Sectores de la cabeza y varios de sus límites de fractura [52].	47
Figura IV.4 Velocidad del robot. Elaboración propia.	48
Figura IV.5 Velocidad de penetración. Elaboración propia.....	49
Figura IV.6 Radio de contacto. Elaboración propia.	50
Figura IV.7 Presión de contacto. Elaboración propia.....	51
Figura IV.8 Distribución de presiones vs radio de contacto. Elaboración propia.	51
Figura IV.3 Penetración. Elaboración propia.....	52
Figura IV.9 Distribución de tensiones superficiales para $v=0.3$ [4]	53
Figura IV.10 Tensiones superficiales. Elaboración propia.....	54
Figura IV.11 Distribución de tensiones subsuperficiales para $v=0.3$ [4]	54
Figura IV.12 Tensiones subsuperficiales. Elaboración propia.	55
Figura IV.13 Diagrama de criterios de fallo en ejes principales. [56]	56
Figura IV.14 Distribución de la T.V.M. normalizada. Sección del corte de la esfera [4] .	58
Figura IV.15 Tensión de Treska. Elaboración propia.....	59
Figura IV.16 Tensión de Von Misses. Elaboración propia.	59

Figura IV.17 Tensión hidrostática o volumétrica. Elaboración propia.....	60
Figura IV.18 Densidad de energía de deformación elástica a lo largo de la superficie de contacto. Elaboración propia.	62
Figura IV.19 Tensiones en durante el choque. Elaboración propia.....	62
Figura IV.20 Tracción en dirección tangencial en la zona de contacto. Elaboración propia.	63
Figura IV.21 Presión máxima variando E_r en Pa. Elaboración propia.....	64
Figura IV.22 Presión máxima variando V_r . Elaboración propia.	65
Figura IV.23 Presión máxima variando M_r en kg. Elaboración propia.	65
Figura IV.24 Presión máxima variando R_{ro} . Elaboración propia.	66
Figura IV.25 Presión máxima variando la diagonal mayor en una elipse en m. Elaboración propia.	68
Figura IV.26 Presión máxima en función de la velocidad caso plano. Elaboración propia.	69
Figura IV.27 Choque de un cilindro plano con la cabeza. Elaboración propia.	69
Figura IV.28 Tensiones superficiales con cobertura. Elaboración propia.....	72
Figura IV.29 Tensiones subsuperficiales con cobertura. Elaboración propia.	73
Figura IV.30 Tensión de Tresca con cobertura. Elaboración propia.....	74
Figura IV.31 Tensión de Von Mises con cobertura. Elaboración propia.	75
Figura IV.32 Densidad de energía de deformación elástica con cobertura. Elaboración propia.	76
Figura IV.33 Tracción en dirección tangencial con cobertura. Elaboración propia.	76

Lista de tablas

Tabla I.1 Cálculo total del presupuesto. Elaboración propia.	17
Tabla II.1 Métodos de seguridad HRI. Elaboración propia.....	20
Tabla III.1 Datos del material de la cabeza [29]	31
Tabla III.2 Propiedades material del robot [29]	32
Tabla IV.2 Frontal del área de contacto desde 10ms hasta 0.22ms. Elaboración propia.	50
Tabla IV.1 Lateral del área de contacto de 10ms a 22ms. Elaboración propia.	52
Tabla IV.3 Profundidad relacionada con v. Elaboración propia.	55
Tabla IV.4 Tensiones principales. Elaboración propia.	57
Tabla IV.5 Barrido de parámetros con circunferencias variando el radio. Elaboración propia.	67
Tabla IV.7 Barrido de parámetros con elipsoides variando un eje. Elaboración propia.	68
Tabla IV.8 Propiedades de los materiales de las capas. Elaboración propia.	70
Tabla IV.9 Parámetros del contacto Hertziano. Elaboración propia.	71

Lista de ecuaciones

Ecuación (1) Brecha.....	33
Ecuación (2) Área de contacto.....	33
Ecuación (3) Modulo de Young conjugado	34
Ecuación (4) Radio conjugado	34
Ecuación (5) Distribución de presión	34
Ecuación (6) Radio equivalente	34
Ecuación (7) Presión máxima	34
Ecuación (8) Módulo de rigidez	35
Ecuación (9) Presión media	35
Ecuación (10) Penetración.....	36
Ecuación (11) Fuerza en función de la penetración	36
Ecuación (12) Segunda ley de Newton	36
Ecuación (13) Masa conjugada	36
Ecuación (14) Coeficiente de restitución	48
Ecuación (15) Velocidad de penetración de entrada.....	48
Ecuación (16) Velocidad de penetración de salida.....	49
Ecuación (17) Coeficiente de restitución expresado con velocidades de penetración ..	49
Ecuación (18) Tensión radial normalizada	53
Ecuación (19) Tensión circunferencial normalizada	53
Ecuación (20) Tensión en dirección Z normalizada	53
Ecuación (21) Tensiones fuera de la zona de contacto.....	53
Ecuación (22) Tensión tangencial 1	54
Ecuación (23) Tensión de Tresca 1.....	57
Ecuación (24) Tensión de Tresca 2.....	57
Ecuación (25) Tensión de Tresca 3.....	57
Ecuación (26) Tensión de Von Mises	58
Ecuación (27) Fuerza por capas 1	85
Ecuación (28) Fuerza por capas 2	85
Ecuación (29) Fuerza por capas 3	85

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado (TFG), se pretende analizar la colisión entre un robot y un ser humano. Para ello se desarrollan dos modelos, que representan la dinámica de una zona específica del cuerpo humano (cabeza) y de un robot simplificado. El objetivo principal de este proyecto es caracterizar el impacto (distribución de fuerza, área de contacto, presión, etc), para así poder recomendar parámetros de seguridad en el diseño de un robot que comparta espacio con los seres humanos.

Primero se introducen los aspectos más importantes del planteamiento: la motivación, los objetivos principales, así como la estructura y la planificación del proyecto y el presupuesto. Donde se exponen a grandes rasgos las condiciones más importantes sobre las que se desarrolla el conjunto.

Después mediante el estado del arte, se estudian las características históricas de los robots, desde sus comienzos hasta nuestros días. Así se situó el contexto sobre el que se realiza este trabajo, asimilando el desarrollo de la robótica en su conjunto.

Entonces se caracterizaron las condiciones para realizar dos modelos de estudio: un modelo analítico de contacto con las ecuaciones matemáticas, y un modelo computacional de elementos finitos (EF). Estos se desarrollaron hasta cierto punto, se comparan entre sí para mostrar la validez del computacional, y se prosigue hasta desarrollar por completo el modelo computacional, obteniendo parámetros interesantes de la mecánica de contacto y estudiando la lesión leve que engloba contusiones y laceraciones en la piel.

Por último con el modelo computacional explicado y contrastado, se plantean barridos de parámetros que consisten en analizar el modelo cambiando los valores de un parámetro a intervalos regulares para observar su variación en la presión máxima, dado que está relacionada con la magnitud de la lesión. Además, se añade al modelo computacional unas capas que representen a la piel y un recubrimiento de seguridad alrededor del brazo robótico para estudiar sus beneficios.

Abstract

In this Bachelor Thesis, the goal is to analyze the collision between a robot and a human. This is developed in two models, representing the dynamics of a specific area of the human body (head) and a simplified robot. The main objective of this project is to characterize the impact (force distribution, contact area, pressure, etc.), in order to recommend security parameters in the design of a robot that share space with humans.

First the most important aspects of the approach are introduced: the motivation, the main objectives, the structure as well as the planning and the budget of the project. This outlines the most important conditions on which all unfolds.

After through the state of art, the historic features of the robots are studied, from its beginnings to the present day. So the context on which this work is done stood, taking in the development of robotics as a whole.

Conditions were characterized to study two models: an analytical contact model with mathematics equations, and a computational model of finite element (FE). These were developed to some extent, and then compared with each other to show the validity of the computerized, to proceed to fully develop the computational model, obtaining interesting parameters of mechanical contact and studying the slight injury that includes bruises and lacerations on the skin.

Finally, with the computational model explained and contrasted, parameter sweeps are posed. These consist in analyzing the model by changing one parameter at regular intervals to observe the variation in the maximum pressure. Also to the computational model, layers representing skin and safety coating around the robotic arm are added and studied its benefits.

Agradecimientos

El auténtico sentido de este Trabajo Fin de Grado, es para mí terminar poniéndole el colofón a un episodio académico que finaliza en la Universidad Carlos III. Durante este tiempo he aprendido, me he desarrollado como persona, y me he formado para poder ser un profesional que merezca la pena para mi porvenir.

Quisiera agradecer por tanto a quienes han hecho posible todo esto, no solo este trabajo:

Muchas Gracias a mi padre, Carlos Javier, quien siempre ha estado ahí, que ha dado la vida por mí y por mi hermano para que esto fuera algún día posible.

Muchas gracias a mi hermano, Arturo, que hoy en día ya es un hombre y me ha aportado siempre buenos ratos y con el que siempre he podido contar para apoyarnos el uno en el otro.

Muchas gracias a mis amigos, que han hecho todo más fácil. Muchos de ellos compañeros en la universidad, otros amigos de toda la vida. Sin querer destacar a nadie, decir que son unas personas que no me hubiera gustado cambiar, porque tal cual son magníficas. Con ellos he atravesado este periodo como un equipo, acabando siempre con una sonrisa en la cara todos, a pesar de cualquier zozobra.

Y muchas gracias a Elia, mi compañera, mi amiga y mi amor. Todo el apoyo que me ha aportado en absolutamente todos los aspectos es muy difícil de expresar en unas líneas.

En particular en este trabajo, muchas gracias a Jose, mi tutor, quien ojalá se hubiera cruzado antes en mi camino. Me ha enseñado que es la profesionalidad, haciendo mucho más fácil la tarea, por mucho trabajo que hubiera que dedicar a la labor. Espero que gracias a su desempeño haya llevado al mejor puerto posible este trabajo.

Para terminar muchas gracias a la Universidad Carlos III y a todos los que la componen. Por hacer esto posible para mucha gente, que portaremos una esencia característica dentro de nosotros al haber pasado por esta universidad.

Capítulo I. Planteamiento del Problema y Motivación

a. Introducción

La robótica se origina no hace mucho tiempo, aproximadamente en 1959 se pone en marcha el primer **robot industrial**. Antes se habían manejado conceptos de máquinas complejas, pero no se podrían considerar robots hasta entonces. La ISO 8373:2012^[54] define a los robots como: *“Un manipulador programable, automático, controlado, reprogramable y multipropósito, que trabaja en tres o más ejes, los cuales pueden estar bien fijados o bien ser móviles para uso industrial en aplicaciones automáticas.”* Bajo este concepto, se puede afirmar que la primera patente robótica data de 1961, y llevó a la construcción del primer robot industrial conocido con el nombre de “Unimation”.

En estos más de 50 años, la robótica industrial se ha ido fortaleciendo y su desarrollo ha contribuido al progreso de sectores tan importantes hoy en día como el automovilístico y de telefonía móvil. En las fábricas estos robots, aislados mediante fuertes medidas de seguridad de los operarios humanos, dispusieron de un entorno estructurado acorde a su programación.

El progreso de la robótica y la aparición de nuevas necesidades de uso, ha permitido en los últimos años dar a conocer a un nuevo tipo de robots llamados **robots de servicio**. Estos robots han sido construidos con la idea de poder compartir el mismo espacio del ser humano. Surge entonces una nueva área de investigación en la que se analizan conceptos como: el entorno de trabajo no predeterminado, planificación de trayectorias, sensores de contacto y programación de reacciones ante choques. La intención o el objetivo fundamental es buscar un alto grado de autonomía en el desarrollo de sus tareas mientras conviven con los humanos.

La principal diferencia entre la robótica industrial y la robótica interactiva o de servicio, es el compartir un mismo espacio físico con un robot. Este hecho unido a la gran complejidad de sus sistemas de control -debido a su rango de fuerzas y grados de libertad de movimiento- lo convierte en una tarea de gran envergadura.

Por el contrario, en la robótica industrial la separación física es total y no se producen prácticamente accidentes con el robot en funcionamiento, la mayor parte suceden en los mantenimientos y programaciones del robot.

Todo ello acaba englobando un término acuñado como HRI o Human Robot Interaction en inglés. Esto se refiere a la interacción entre humanos y robots:

Por un lado existe la interacción física pHRI (physical Human Robot Interaction) donde al tener que compartir el espacio, tienen lugar contactos entre el humano y el robot. Y por otro la cognitiva cHRI (cognitive Human Robot Interaction) que se refiere a cómo los robots pueden entender, comunicarse hablando, aprender o mostrar sentimientos con los seres humanos.

b. Motivación

La nueva formulación de la robótica de servicio propone que la ciencia de la robótica se extienda y llegue a todos, ya que desde los inicios de la robótica las grandes beneficiadas han sido las grandes empresas. Se pretende que sirva también a PYME's (Pequeña y mediana empresa) que puedan sacar provecho de inversiones en robots pequeños y multipropósito, con los que realizar una actividad interactiva de desarrollo económico.

Hoy en día ya existen consideraciones en la reglamentación hacia la robótica interactiva. La ISO 10218:2012^[51] delimita parámetros de diseño sobre los robots que vayan a compartir espacio de trabajo con un ser humano.

Abarca conceptos, como son la potencia, la velocidad o la fuerza, restringiéndolos hasta unas determinadas magnitudes. El problema radica en que estas medidas se consideran muy estrictas y de escasa aplicación práctica. Además, no representan una métrica de lesión, es decir, un estudio de parámetros que permita saber cuantitativamente que efectos van a producirse con según qué magnitudes. Se necesita un análisis científico del impacto humano-robot, para obtener una métrica de seguridad más allá de los límites básicos marcados por la ISO 10218:2012^[26].

Para realizar este análisis es necesario disponer de la potencia de cálculo computacional así como la posibilidad de modificar variables de forma fácil y mostrar distintos resultados.

Para ello existen **programas de elementos finitos** (EF) que disponen de características de análisis de modelos estructurales, de fluidos, magnetismo, etc. Y otras áreas de la física donde podemos diseñar un modelo, elegir las condiciones y procesarlo para después mostrar los resultados.

Este trabajo pretende realizar un estudio de la **colisión humano-robot**. Para ello primero se desarrolla un modelo de contacto analítico, sobre el que validar y

contrastar los resultados de elementos finitos. Con esto se busca racionalizar los límites de la ISO 10218:2012^[26] que rige y regula actualmente la pHRI. Además de arrojar luz en cuanto a las distintas posibilidades de diseño para tener un robot que ofrezca una HRI segura.

Además, este trabajo está especialmente dedicado al ámbito de coberturas de seguridad. Dichas coberturas son recubrimientos de polímeros, materiales suaves y/o elásticos. Estos materiales se colocan alrededor de los eslabones (cada uno de los elementos rígidos que forman el brazo robótico) para ofrecer una absorción del impacto en caso de colisión. Resultan muy importantes dado que representan el último recurso de seguridad, que actúa aún en las peores situaciones: como un fallo catastrófico en el suministro eléctrico o en el sistema de control.

c. Objetivos

De acuerdo a la motivación, los objetivos planteados están encaminados a fijar las directrices del trabajo así como servir de guía para las acciones desarrolladas. Estos son los principales:

- 1. Estudio y análisis de la colisión humano-robot aplicando las teorías de contacto, definiendo unas condiciones de trabajo y construyendo con ello el modelo analítico.**

En este objetivo se parte de analizar históricamente el desarrollo de la robótica. Analizando y comprendiendo los contextos y problemas que se han tenido que tratar, avanzar hasta hoy día y plantear el contexto y las nuevas necesidades.

Realizar a un análisis científico las condiciones del estudio: el entorno, que alternativas se podrían plantear bajo qué condiciones, y las simplificaciones e hipótesis para poder realizar el modelo.

Con ello plantear un modelo analítico que se utilice las ecuaciones de la mecánica de contacto, y de desarrollar unas condiciones de trabajo que definan el entorno. Evaluar su validez en las condiciones descritas.

- 2. Modelo de Elementos Finitos de análisis del impacto, contrastado con modelo analítico.**

Realizar un modelo de EF en COMSOL Multiphysics® con las mismas condiciones de trabajo que en modelo analítico anterior. Para ello, estudiar el funcionamiento de los EF, entender cómo actúan los principales métodos de contacto

y calibrar el modelo para producir las mejores soluciones con el mínimo error posible. Comparar con los resultados del modelo analítico para verificar su fiabilidad.

3. Barridos de parámetros mediante el modelo de Elementos Finitos para analizar parámetros de forma y propiedades mecánicas del material.

Realizar estudios cambiando los parámetros de diseño del robot (la forma del robot y las propiedades de su material). Alcanzar un conjunto de parámetros de diseño sobre los que orientar el diseño de robots seguros. Entender y explicar cuáles pueden resultar críticos y cuáles desestimables.

4. Estudio del robot con recubrimiento de material con capacidad de absorción de energía mecánica, aplicación a la lesión leve.

Realizar un estudio computacional añadiendo la cobertura al robot, recurrir a la literatura para comparar el caso y valorar los resultados. Comprender y explicar que aporta a la pHRI la adición de coberturas a los robots.

d. Estructura

El trabajo se plantea en cinco capítulos. Cada uno de estos intenta, de manera simple y diferenciada, ir desarrollando paso a paso el contenido de este trabajo.

En el primer capítulo: *10 Planteamiento del Problema y Motivación*, trata en sus apartados de introducir al lector en conceptos básicos y del propósito del trabajo.

En el segundo capítulo, *Estado del arte de brazos robóticos para la interacción física Humano-Robot*, se presenta una introducción acerca de la situación actual de la robótica y los avances en la robótica de servicio, dando particular interés a la interacción física entre humanos y robots.

En el tercer capítulo: *Colisión Humano-Robot*, se expone el desarrollo de los estudios de mecánica de colisiones mediante MEF y contacto Hertziano. Se justifica mediante diferentes conceptos las características del modelo, para después plantear cada uno de los análisis.

A continuación se presenta en el cuarto capítulo *Resultados del modelo*, donde se muestran los resultados obtenidos en los estudios y comparativa entre ellos. Tras el análisis de los modelos se estudian dichos resultados en busca de tendencias que nos indiquen que parámetros resultan beneficiosos para disminuir la presión del choque.

Para finalizar en el último capítulo *Conclusiones*: donde se realizará una valoración del estudio elaborado, analizando los resultados obtenidos y los futuros trabajos que se pudieran desarrollar a raíz de los resultados obtenidos en este trabajo.

e. Planificación y presupuesto

Para realizar la planificación de este Trabajo Fin de Grado (TFG) se ha utilizado la herramienta informática **Microsoft Project**[®]. Con ella se han definido las distintas tareas de las que está compuesto el proyecto y se han asignado los plazos y recursos necesarios para cada actividad. Esta herramienta permite programar un proyecto mediante un desglose de tareas.

Al plantear el proyecto se desglosó cada apartado para poder introducirlo por separado y se realizó una secuencia entre tareas para que al colocarlas se dispusieran un orden determinado. Tras ello se deben asignar unos recursos que cubran los costes que marcan el presupuesto del proyecto de realizarse como actividad económica.

Los recursos que se han utilizado para la realización del TFG, y que se han definido en la herramienta de planificación con sus correspondientes cargas de trabajo, son:

- Director de Proyecto (DP) con un coste estimado por hora de 8 €.
- Tutor: Ingeniero supervisor del proyecto en la universidad. Coste estimado por hora de 25 €.
- Catedrático: Profesor de los cursos realizados al inicio del trabajo. Coste estimado por hora de 35 €.

Estos costes son los utilizados, junto con las tareas para elaborar el presupuesto del proyecto. Las actividades se han dividido en cinco bloques principales que corresponden a los hitos más importantes de los que se compone este trabajo, como se muestra en la Figura I.1:

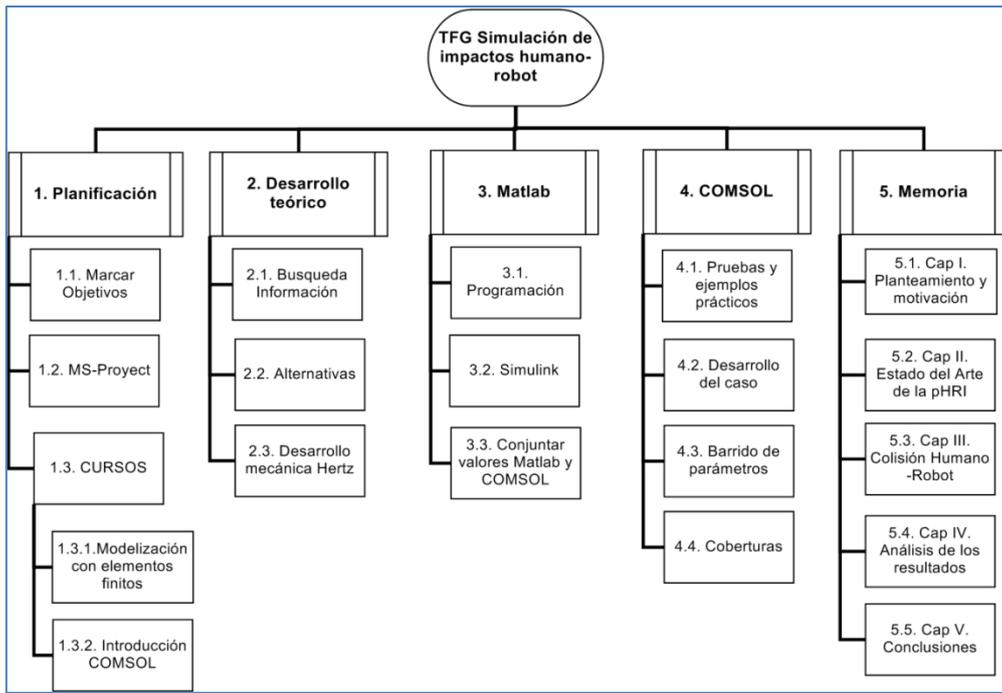


Figura I.1 Desglose de la planificación. Elaboración propia.

A continuación se muestra el listado de tareas del proyecto con sus fechas de inicio y fin, relaciones entre tareas y recursos asignados a cada una de ellas. Además se incluye el diagrama de Gantt del proyecto (Figura I.2 y Figura I.3).

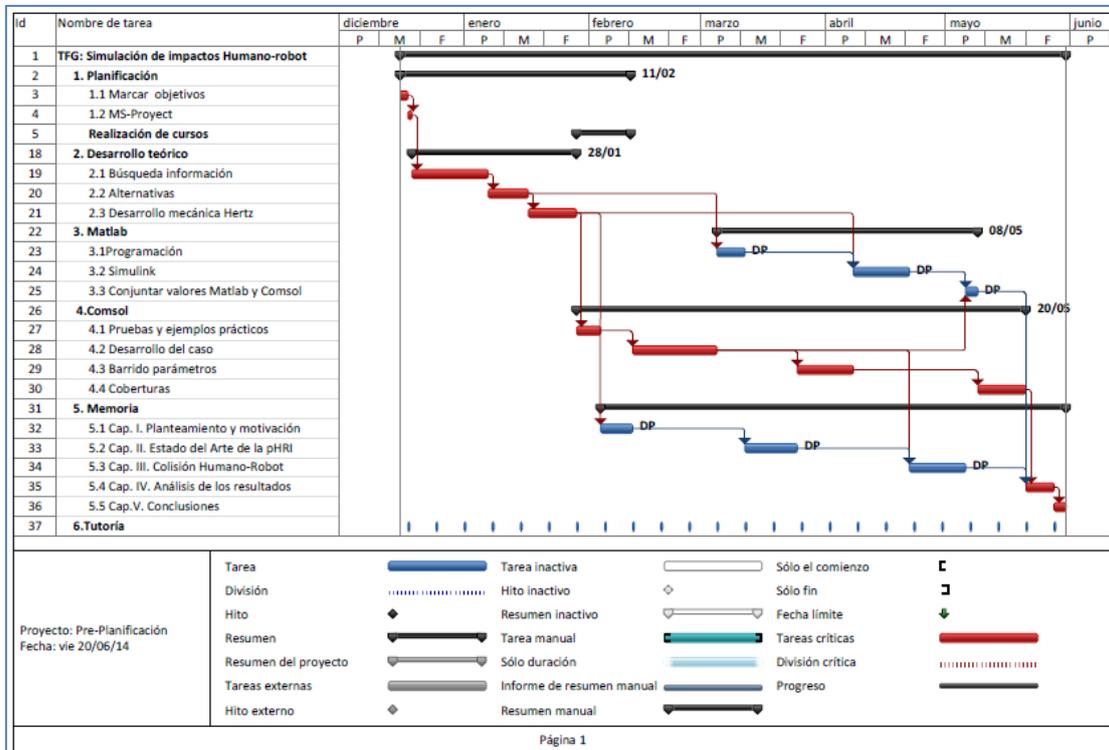


Figura I.2 Diagrama de Gantt correspondiente a las tareas del proyecto. Elaboración propia.

Cabe destacar que MS-Proyect® permite mostrar, como aparece en la Figura I.2 marcadas en rojo, las tareas críticas. Es decir, las tareas que provocan que este proyecto acabe en la fecha indicada y no antes ni después. Esto es fundamental para conocer que tareas resultan más importantes para culminar el proyecto en la fecha prevista, y sobre las que no se podía tener ninguna dilación.

	Nombre de tarea	Trabajo normal	Comienzo	Fin	Costo	Duración	Predecesoras
1	TFG: Simulación de impactos Humano-robot	1.004 horas	lun 16/12/13	vie 30/05/14	8.980,00 €	960 horas	
2	1. Planificación	44 horas	lun 16/12/13	mar 11/02/14	892,00 €	330 horas	
3	1.1 Marcar objetivos	16 horas	lun 16/12/13	mar 17/12/13	128,00 €	2 días	
4	1.2 MS-Proyect	8 horas	mié 18/12/13	mié 18/12/13	64,00 €	1 día	3
5	Realización de cursos	20 horas	mié 29/01/14	mar 11/02/14	700,00 €	74 horas	
18	2. Desarrollo teórico	232 horas	jue 19/12/13	mar 28/01/14	1.856,00 €	232 horas	
19	2.1 Búsqueda información	104 horas	jue 19/12/13	lun 06/01/14	832,00 €	13 días	4
20	2.2 Alternativas	64 horas	mar 07/01/14	jue 16/01/14	512,00 €	8 días	19
21	2.3 Desarrollo mecánica Hertz	64 horas	vie 17/01/14	mar 28/01/14	512,00 €	8 días	20
22	3. Matlab	144 horas	mié 05/03/14	jue 08/05/14	1.152,00 €	376 horas	
23	3.1 Programación	40 horas	mié 05/03/14	mar 11/03/14	320,00 €	5 días	20
24	3.2 Simulink	80 horas	mar 08/04/14	lun 21/04/14	640,00 €	10 días	21,23
25	3.3 Conjuntar valores Matlab y Comsol	24 horas	mar 06/05/14	jue 08/05/14	192,00 €	3 días	24,28
26	4. Comsol	296 horas	mié 29/01/14	mar 20/05/14	2.368,00 €	640 horas	
27	4.1 Pruebas y ejemplos prácticos	32 horas	mié 29/01/14	lun 03/02/14	256,00 €	4 días	21
28	4.2 Desarrollo del caso	120 horas	mié 12/02/14	mar 04/03/14	960,00 €	15 días	27
29	4.3 Barrido parámetros	80 horas	mar 25/03/14	lun 07/04/14	640,00 €	10 días	28
30	4.4 Coberturas	64 horas	vie 09/05/14	mar 20/05/14	512,00 €	8 días	29
31	5. Memoria	264 horas	mar 04/02/14	vie 30/05/14	2.112,00 €	672 horas	
32	5.1 Cap. I. Planteamiento y motivación	48 horas	mar 04/02/14	mar 11/02/14	384,00 €	6 días	21
33	5.2 Cap. II. Estado del Arte de la pHRI	72 horas	mié 12/03/14	lun 24/03/14	576,00 €	9 días	32
34	5.3 Cap. III. Colisión Humano-Robot	80 horas	mar 22/04/14	lun 05/05/14	640,00 €	10 días	28;33
35	5.4 Cap. IV. Análisis de los resultados	40 horas	mié 21/05/14	mar 27/05/14	320,00 €	5 días	30;34;25
36	5.5 Cap.V. Conclusiones	24 horas	mié 28/05/14	vie 30/05/14	192,00 €	3 días	35
37	6. Tutoría	24 horas	mié 18/12/13	mié 28/05/14	600,00 €	921 horas	

Figura I.3 Tabla del diagrama de Gantt planteado en MS-Proyect. Elaboración propia.

Para llevar a cabo el presupuesto del TFG se le han asignado los costes definidos a cada recurso humano y se han fijado las cargas de trabajo correspondientes a cada tarea. El calendario laboral utilizado consta de ocho horas laborables diarias y los fines de semana se cuentan como no laborables.

Con esto, los costes de realización del proyecto en cuanto a utilización de recursos, se distribuyen de la manera que se muestra en la tabla de la Figura I.3 y ascienden a un total de 8.980,00€.

La fecha de fin del proyecto es el viernes 30 de Mayo del 2014. Para cuantificar realmente el presupuesto se realiza el ajuste en la Tabla I.1.

Todo esto supondría un total de 12.104,50€. Para realizar el presupuesto de esta manera se presumieron unas condiciones normales en cuanto a gastos generales y al beneficio industrial.

Presupuesto de ejecución	8.980,00€
Gastos Generales (5,4%)	484,92€
Beneficio Industrial (6%)	538,8€
Base Imponible	10.003,72€
I.V.A (21%)	2.100,78€
Total Facturable	12.104,50€

Tabla I.1 Cálculo total del presupuesto. Elaboración propia.

Los gastos generales suelen suponer un porcentaje menor que el beneficio industrial de entorno al 5% dependiendo de la actividad, y el beneficio industrial que surge por desarrollar la actividad se utilizó al 6% ya que se considera la tasa más común.

Capítulo II. Estado del arte de brazos robóticos para la interacción física Humano-Robot

a. Introducción

La seguridad se vuelve muy difícil de garantizar en el caso de que un robot comparta su espacio de trabajo y movimiento con un ser humano. En el contexto actual donde aún impera la robótica industrial, los métodos de seguridad aplicados consisten en la separación física entre el humano y el robot, impidiendo cualquier accidente. Las líneas de montaje automatizadas donde trabajan estos robots no permiten el acceso al recinto a menos que se cumplan parámetros de seguridad que en general suponen la detención total y absoluta del robot.

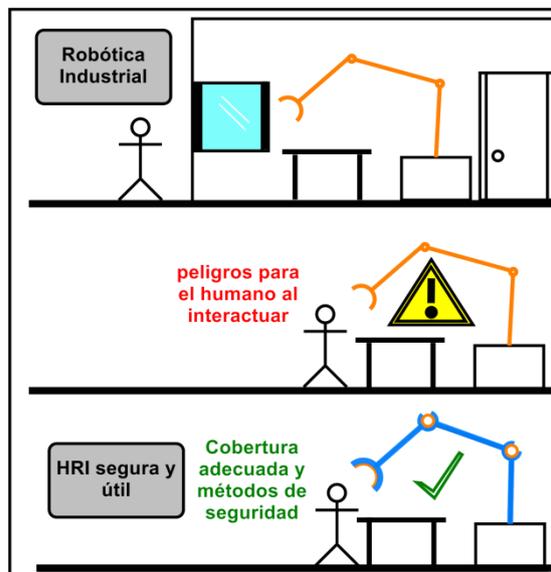


Figura II.1 De la robótica industrial a la HRI segura. Elaboración propia.

de la cadena de producción (Figura II.1).

Se puede imaginar una industria alternativa, donde los robots y los seres humanos desarrollen una actividad productiva compartiendo el mismo espacio de trabajo. La idea, es mejorar la productividad, haciendo a la empresa más competitiva y permitiéndole recuperar su inversión en un plazo asumible. Para ello, estos robots no requerirán unas características de velocidad y precisión tan elevadas como las que se conocen hoy en día en la robótica industrial. Sino por el contrario se trata de un robot que potencie y complemente las habilidades del ser humano como elemento principal

En una pequeña o mediana empresa como se ha planteado, de tipo taller o célula de fabricación, se podrían utilizar robots para el transporte de célula a célula o ayudar al montaje. Esta solución sería idónea, dado que estas empresas suelen depender mucho del trabajo contra pedido, es decir, según se lo indique el cliente comienzan a fabricarlo. Esto provoca que tengan gran variedad de necesidades que imponen una gran adaptación a las circunstancias del trabajo. Si se tratase de resolver mediante la robótica tradicional esta situación, generaría unos costes y rigidez inadecuados, pero un **robot multitarea** supondría la solución de flexibilidad y precio.

Esta convivencia no resulta una tarea trivial, dado que necesita garantizar la seguridad y el confort de los trabajadores dentro de un espacio compartido con robots. A su vez, estos robots requieren de un nivel de desempeño y de una flexibilidad de programación que supongan una mejora frente a los sistemas productivos actuales. Estos nuevos diseños necesitarán comprender mejor la forma de dimensionar dichos robots, con una métrica de seguridad, para conseguir unos resultados eficientes en cuanto al balance entre la seguridad y desempeño.

Los parámetros a tener en cuenta para desarrollar un robot con estas características son los siguientes ^[11,32]:

- **Precisión y velocidad:** En la ejecución de la tarea, como se ha planteado para el caso de PYME's de trabajos de taller o transporte dentro de una fábrica, se ha de mantener unos estándares de desempeño que garanticen una productividad para competir en el mercado. Un punto importante a tener en cuenta es que las velocidades de la mayoría de aplicaciones en las que se vería involucrado no necesitarían superar los 2m/s ^[29].

Esto es asumible para prácticamente cualquier robot hoy en día, Sin embargo, es necesario un análisis exhaustivo del riesgo y nivel de lesión que puede ocasionar una colisión inesperada a esta velocidad. La precisión de estos robots, estará estrechamente vinculada a la actividad que desarrolle, y estará siempre subordinada a la seguridad.

- **Seguridad:** La actuación de un robot sin los adecuados sistemas de seguridad compromete la integridad física de quienes se encuentran en su espacio de trabajo. Estos robots tendrán que disponer de diferentes estrategias de seguridad, que probablemente redunden en la evasión o reducción de la fuerza de impacto.
- **Flexibilidad y programación intuitiva:** Es primordial que este tipo de aplicaciones se desarrollen de acuerdo a un alto grado de variabilidad de situaciones a las que se pueda adaptar, puesto que es de donde se obtiene la ventaja fundamental de la robótica. Se necesita además que el robot disponga de una forma de programación intuitiva y que permita que este ejecute distintas tareas que promuevan esa flexibilidad (sin incurrir en dificultades al personal con el que trabaja).
- **Consumo:** Además es importante no obviar la eficiencia energética para que no vaya en detrimento de la actividad económica y el desarrollo sostenible.

b. Seguridad en la interacción física humano-robot (pHRI).

La interacción física implica el contacto, eventual o permanente con un robot en movimiento. Garantizar la seguridad del ser humano en esta interacción pasa por un correcto análisis de los **fallos de software, fallos eléctricos, desgaste de mecanismos, además de errores humanos e impredecibilidad como humanos**. Sin embargo, este trabajo se centra en analizar los daños que pueden ocurrir cuando un eslabón del brazo robótico impacta eventualmente sobre un ser humano.

En la actualidad hay muchos métodos ya desarrollados para intentar evitar las colisiones o disminuir sus efectos, pero no siempre estos sistemas por sí solos han de funcionar a la perfección. Por lo que muchas líneas de investigación se afanan en lograr que los brazos robóticos posean distintas capacidades que permitan evitar colisiones o minimizar los daños si esta se produce.

Los métodos de seguridad pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios. En otros trabajos se divide en dos fases, por un lado **pre-colisión**, y por otro **post-colisión**, dependiendo de si las medidas entran en juego antes o después del choque. Aunque algunas estrategias pueden actuar en ambos instantes ^[49]. En este trabajo se pretende por tanto delimitar más esos campos. La Tabla II.1 muestra una clasificación más amplia, donde se diferencia entre estrategias de control y diseño del robot por un lado. Y por otro lado se distingue por la función de los métodos: evitar la colisión, minimizar la fuerza de impacto, y finalmente atenuar los daños. Después, se define y desarrolla cada uno de ellos.

Momento de actuación	Función	Estrategia de control	Diseño
Pre-colisión	Evitar la colisión	<ul style="list-style-type: none"> • Ajustes de trayectoria 	
	Minimizar la fuerza de impacto	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de la velocidad • Ajuste posicional • Ajuste de rigidez 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño ligero y reducción de momento de inercia
Post-Colisión	Atenuación de los daños	<ul style="list-style-type: none"> • Desconexión de potencia de los motores • Movimientos de acto reflejo 	<ul style="list-style-type: none"> • Desacople elástico entre motor y eslabones • Recubrimientos para absorción de colisiones • Superficie y forma

Tabla II.1 Métodos de seguridad HRI. Elaboración propia.

I. Estrategias de control.

La seguridad mediante estrategias de control consiste en la programación de reacciones a partir de sistemas de visión o reconocimiento del entorno. Primero se encuentran los que actúan intentando evitar dicha colisión:

- Realizando primero una previsión mediante sistemas de visión o detección y algoritmos de posibles trayectorias ^[11]. Para crear o adecuar la trayectoria del robot a partir de los datos y así evitar el choque o minimizar sus efectos ^[34].

Por otro lado, se tienen sistemas que una vez se demuestra inevitable la colisión mediante el análisis de los datos obtenidos por los sistemas de visión ^[37], se ajusta el posicionamiento y rigidez del robot para evitar graves daños:

- Reprogramar movimientos con un menor grado de peligrosidad, y reducir la velocidad ante la incertidumbre de tener a una persona u operario cerca ^[34].
- Ajuste de la rigidez del brazo permitiendo una mayor flexibilidad de los eslabones al impactar contra algún objeto ^[32].

Los robots en ambientes de interacción pueden superar todas estas barreras pre-colisión, puesto que no es fácil prever todas y cada una de las interacciones generadas. Así finalmente se tienen las estrategias de control que actúan post-colisión que ajustan la reacción del robot ante la colisión y consiguen minimizar el daño causado.

- Detección de la colisión, mediante sensores de momento torsor en las articulaciones ^[38].
- Reacción a la colisión, con sistemas como la “gravedad cero” que compensan la gravedad para disminuir la fuerza de impacto ^[28].
- Reflex-motion o movimientos de acto reflejo ^[43].
- Sensores de control de fuerza y control de impedancia ^[28]. En el estado del arte de dichos sensores se presentan: actuación paralela distribuida ^[4], actuación antagonística ^[5], y otros ^[8]. Casi todos los casos presentados son aún muy pesados o complejos.

II. Diseño.

La seguridad no es solo parte de los sistemas de control, el realizar un buen diseño del robot limita las fuerzas y disminuye los daños provocados por el contacto con una persona u objeto, aparte de que al poder darse fallos de suministro eléctrico o de software se necesitan recursos que no estén ligados a dichos términos. Primero se tienen los métodos de atenuación de la fuerza de impacto:

- Diseño ligero y la denominada “pasive compliance” (término con el que se refieren a flexibilidad controlada) ^[14].

Y también los que actúan post-colisión reduciendo el daño causado:

- Absorción de colisiones mediante el recubrimiento de los miembros y herramientas del robot ^[29].
- Conceptos de acople elástico entre el motor y los eslabones ^[36].

Este desglose sirve para desentramar los diferentes cauces de la seguridad en los robots.

c. Diseño morfológico seguro

De la evolución de las estrategias de seguridad por diseño (pre y post colisión), y debido a la importancia que tiene un diseño intrínsecamente seguro, en los últimos años se ha visto un desarrollo significativo en ciertos apartados de los diseños. Para afrontar el diseño de los robots seguros, es necesario primero atender el desarrollo de los progresos anteriores al enfrentarse a este problema. Se han de recopilar los distintos enfoques a lo largo de la historia de la robótica más reciente, estudiando el estado del arte más moderno en último término, y proceder a analizar conclusiones de todo ello.

I. Robótica industrial (restricciones, dispositivos y control)

Empezando con la robótica industrial, la solución al problema de afrontar cualquier interacción con un humano, fue la de evitarla completamente. Dado que tenía la necesidad de trabajar en entornos deterministas, donde prácticamente funcionaban sin sensores con los que percibir cambios a su alrededor. Eran prácticamente actuadores mecánicos que realizan tareas repetitivas en un entorno muy controlado ^[3]. Las grandes velocidades de trabajo y fuerzas desarrolladas por

estos robots, tendría consecuencias catastróficas en cualquier colisión con un humano, y es por esto que se evitaran a toda costa.

En los ambientes controlados se imposibilitaba cualquier acceso a las zonas de trabajo mediante barreras físicas como jaulas o mamparas, o controlando mediante sensores que detectasen si algún humano u objeto extraño penetraba el recinto, desactivando por completo o parando la actividad del robot. Los accidentes en general se han producido en su mayoría en procesos de mantenimiento y calibraciones de los robots, o mientras se enseñaba al robot a realizar las tareas, donde aún no se tiene del todo controlado el comportamiento del mismo y se permitía la entrada en su zona de trabajo.

II. Robótica ligera

El primer paso hacia el aumento de seguridad humano robot ha sido el de reducir el peso de la estructura de este, con lo que se redujeran los parámetros inerciales. Esto se ha conseguido mediante la aplicación de aleaciones ligeras y materiales compuestos como la fibra de carbono. Por ejemplo en los robots LWR-III como el de la Figura II.2, se han empleado reductores de gran relación de transmisión y eficiencia.



Figura II.2 Componentes de eslabones del LWR-III [29]

Lo que hace que, a pesar de su escaso peso, pueda mover cargas incluso más pesadas que él. Otra medida que se ha empleado, es la de aproximar a la base del robot los actuadores, y llevar hasta los extremos mediante mecanismos la transmisión mecánica.

III. Robótica Flexible

El término robótica flexible se refiere por un lado a los desarrollos en flexibilidad estructural de los robots. Estos diseños ligeros y no tan rígidos presentan pequeñas dificultades en cuanto a posicionamiento, pero han desarrollado ventajas tales como menor consumo energético, coste, y mayor relación capacidad-peso (capacidad de trabajo y peso propio), rango de trabajo y grado de seguridad. Estas condiciones vienen dadas por la menor inercia del robot y mayor flexibilidad en la estructura. Ejemplos de estructura flexible se pueden encontrar en ^[30,31].

Por otro lado también existe la flexibilidad articular. Esto consiste en la transmisión de potencia a través de mecanismos (cables, correas y principalmente reductoras). En este caso se utilizan los llamados actuadores de rigidez variable (ARV), como el que se muestra en la Figura II.3. Consisten en un mecanismo que dependiendo de la tarea o movimiento a realizar, son capaces de relajar la tensión con la que se está sosteniendo la articulación: más rígido en aproximaciones precisas, y más flexible para movimientos rápidos que necesiten gran desplazamiento y por tanto riesgo de colisión.

Ambos tipos de flexibilidad han reducido el daño en caso de impacto ^[33,34]. Pero es necesario una más profunda evaluación de cómo afectan estas medidas y la relación entre la flexibilidad del robot y el daño potencial.

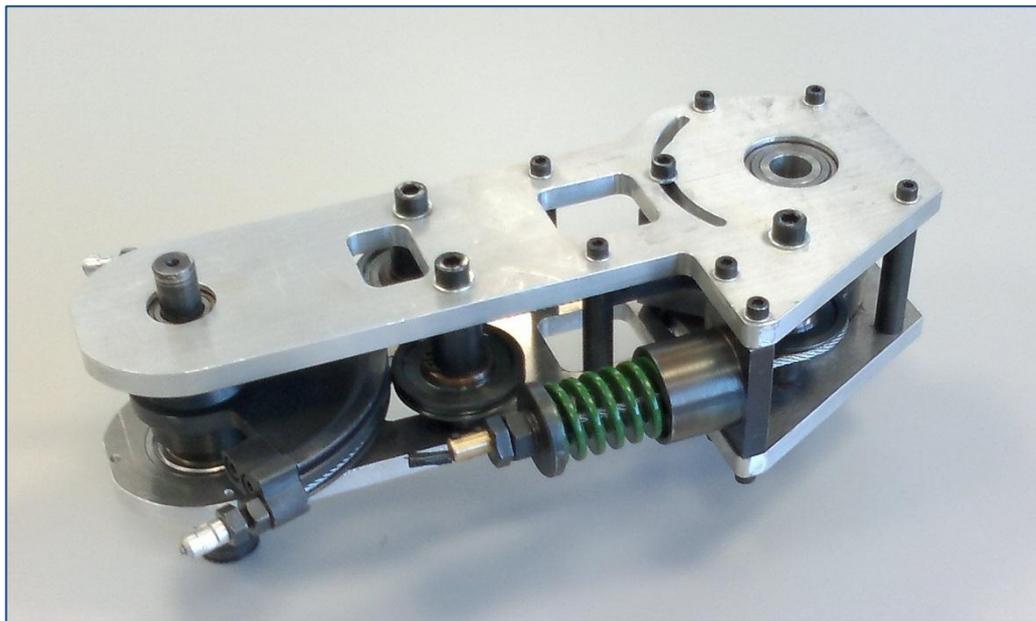


Figura II.3 Actuador de rigidez variable UAL. [32]

IV. Robótica Blanda

Por último se ve el desarrollo de la denominada robótica blanda, que engloba varios conceptos muy novedosos. Consiste en dejar de pensar en la robótica como algo no solo ya flexible; sino, yendo más allá, conseguir pasar de un conjunto de cuerpos rígidos articulados entre sí a materiales mucho más suaves y delicados ^[10].

Como ejemplos se tienen los robots de polímeros con forma de pulpo desarrollados por la *Scuola Superiore Sant'Anna*, (donde los materiales suaves recubriendo una transmisión por cables permitiendo capacidades de manipulación y locomoción ^[23]).

Esta combinación de materiales suaves con actuadores ligeros, o alternativos, pueden ser usados para la locomoción, “*grasping*” (agarre de objetos) o manipulación [12,3]. Ejemplo, la pinza multipropósito de la Figura II.4, que consiste en una goma rellena de un material hecho de gránulos como la arena, que al realizar el vacío dentro de la pinza se rigidiza hasta el punto de que se queda fijo en la posición que se encontraba, y es así como asegura la sujeción de casi cualquier objeto con distintas formas y tamaños [51].



Figura II.4 Grasping hand [51]

Esta nueva forma de diseño de robots explota las propiedades de los materiales -plásticos principalmente- para con sus capacidades interactuar con el entorno que les rodea [20,21]. Los robots de cuerpos suaves son capaces de actuar bajo largas deformaciones en

condiciones de carga normales y pueden aprovechar estas cargas para mediante ellas ajustarse al entorno y aprovechar o economizar energía [22]. Además las tareas donde la robótica clásica se tendría que controlar mediante un sistema de control, pueden hacerse de manera parcialmente redundante mediante las propiedades mecánicas de estos materiales [6].

d. Métrica de seguridad.

Actualmente la ISO 10218:2012 [26] rige la: “operación colaborativa - estado en el cual los robots trabajan en directa cooperación con un humano en un espacio de trabajo definido”. Y marca los siguientes límites de opción para garantizar la seguridad de los seres humanos:

- $TCP/flange\ velocity \leq 0.25\ m/s$. (velocidad de la herramienta)
- $Maximum\ dynamic\ power \leq 80\ W$. (máxima potencia)
- $Maximum\ static\ force \leq 150\ N$. (máxima fuerza estática)

Esta norma para robots colaborativos está concebida para evitar roturas de huesos y laceraciones. Se ha comprobado que para aplicaciones rápidas las potencias de 80 W o una fuerza estática de máximo 150 N constituyen unos límites de operación

más que seguros ^[26], pero no son más que meros límites, no una auténtica métrica de seguridad. Para ello es necesario un estudio de los parámetros que establecen la seguridad en la robótica para cuantificarlo con valores numéricos. Además, una velocidad de trabajo de 0.25 m/s no resulta en absoluto útil.

Tradicionalmente, la manera de cuantificar el nivel de seguridad en la robótica es a través del índice conocido como HIC (Head Injury Criterion) ^[16], heredado de la industria automovilística. Este índice mide la seguridad en impactos craneales, dado que se considera la parte más importante y vulnerable del ser humano. Para los robots convencionales, el fijarse en los daños severos que pueden producirse en la cabeza tiene sentido. Pero si lo que se pretende es la pHRI, este criterio resulta desproporcionado, puesto que los robots ligeros/suaves apuntan mucho más alto que esos límites tan básicos del HIC.

El objetivo siguiente es minimizar el daño de las contusiones o laceraciones leves para que los impactados por un robot no sufran dolor por el golpe. En contra de la seguridad, que puede ser definida como prevención de lesiones y desperfectos, el dolor es una medida muy subjetiva para medirla. Aun así, es muy importante para estas aplicaciones el tener en cuenta de alguna manera estos límites.

Los umbrales del dolor pueden ser utilizados como límites de presión para el caso dinámico y estático. Para el caso de presión estática el límite se encuentra en 150 kN/m² y una máxima presión dinámica de 250 kN/m² de acuerdo a la literatura ^[9,27].

En un extenso estudio en seguridad de brazos robóticos ^[21] las colisiones libres sin restricciones de movimiento no son problemáticas mientras se asuman los requisitos asumidos anteriormente, incluso con robots muy pesados. Sin embargo, el realizar los mismos impactos de manera que existieran tales restricciones llegaría a ser extremadamente más peligroso. Para tales impactos es importante una detección y reacción a la colisión como se ve en ^[7]. Para ampliar la métrica y estudiar este caso es necesario establecer un estudio muy centrado y exhaustivo.

Un estudio para evaluar la tensión que soporta la piel en un impacto romo, sin extremo cortante o punzante, dependiendo de la forma y las propiedades del material fue propuesto en ^[15]. Se presentó un análisis detallado de un modelo real de colisión de un robot con cobertura blanda y una cabeza humana con estructura multicapa ^[29]. Para evaluar el peligro de las contusiones de máximo 2.52 MJ/m³ y para laceraciones una tensión tangencial a la superficie de 1 MPa fueron los parámetros sobre los que se calcularon.

e. Conclusiones

Para el diseño de un robot seguro hoy día, tras lo analizado en cuanto a estado del arte se refiere, se habrá de incluir:

Unas estrategias de control que permitan abordar los diferentes métodos **pre y post-colisión** detallados anteriormente, sin comprometer el desarrollo de su funcionamiento a unas velocidades de trabajo aceptables para sacar adelante producciones de manera competitiva.

Un **diseño mecánico** novedoso que permita incluir métodos de desacoplamiento ante choques, reducción de peso e inercia de los eslabones del brazo como los diseños ligeros, y cubiertas suaves, delgadas y ligeras que disiparan toda la energía posible en el impacto. Debería también incluir sensores de proximidad que permitan una buena actuación del sistema de control pre-colisión y de las reacciones post-colisión.

Nuevos **actuadores** que permitirán prescindir de los sistemas reductores, gracias a su alto par, considerable velocidad y bajo consumo energético.

Materiales para los eslabones, que permitan crear estructuras livianas, rígidas (para evitar las vibraciones y soportar peso), pero a la vez no muy rígidas ante los impactos laterales (a alta frecuencia). Son claves para manipuladores asistenciales que compartan espacio con los seres humanos.

La **flexibilidad articular** tiene un rol importante en la mejora de las capacidades de robot para tratar con entornos desconocidos y múltiples posibilidades impredecibles de actuación de los humanos.

En general, se sugiere cambiar el enfoque de la articulación intrínsecamente flexible para garantizar la seguridad del ser humano, además de la utilización de la flexibilidad para la protección de las articulaciones y mejora el rendimiento en los propios robots.

Diferentes **actuadores de rigidez** variable se han desarrollado hasta el momento, y estos diseños responden en muchos casos a la necesidad de aplicaciones diferentes a la seguridad. Muchos son aprovechados por su capacidad de reducir la energía necesaria para el movimiento, y proteger los mecanismos. Aunque ninguno de los mecanismos de ajuste de rigidez desarrollado puede abordar todos criterios óptimos de seguridad y eficiencia. Los actuadores de rigidez variable moverán los robots del futuro.

Capítulo III. Colisión Humano-Robot

a. Introducción

Los robots asistenciales, de servicio o de colaboración, frecuentemente operan en entornos donde las personas están presentes. En algunos casos se contempla un contacto directo entre el robot y el ser humano.

En otros casos, si bien el contacto no forma parte de la actividad del robot, bajo alguna situación no prevista, este puede ocurrir. Cuando este contacto sucede con una magnitud de fuerza o presión en el contacto.

Es por ello que se debe de analizar el efecto de los impactos que pueden producir entre el humano y el robot.

Teniendo en cuenta las características particulares de estos choques, en este capítulo se describen los diferentes escenarios de impacto posible entre el humano y el robot, se desarrolla un modelo de contacto basado en el conocido **modelo de contacto de Hertz**, y el modelo de Elementos Finitos en **COMSOL Multiphysics®**. De esta manera, se puede validar el estudio más adecuado en EF y permite tener un modelo válido para el posterior estudio de parámetros.

b. Escenarios de impacto

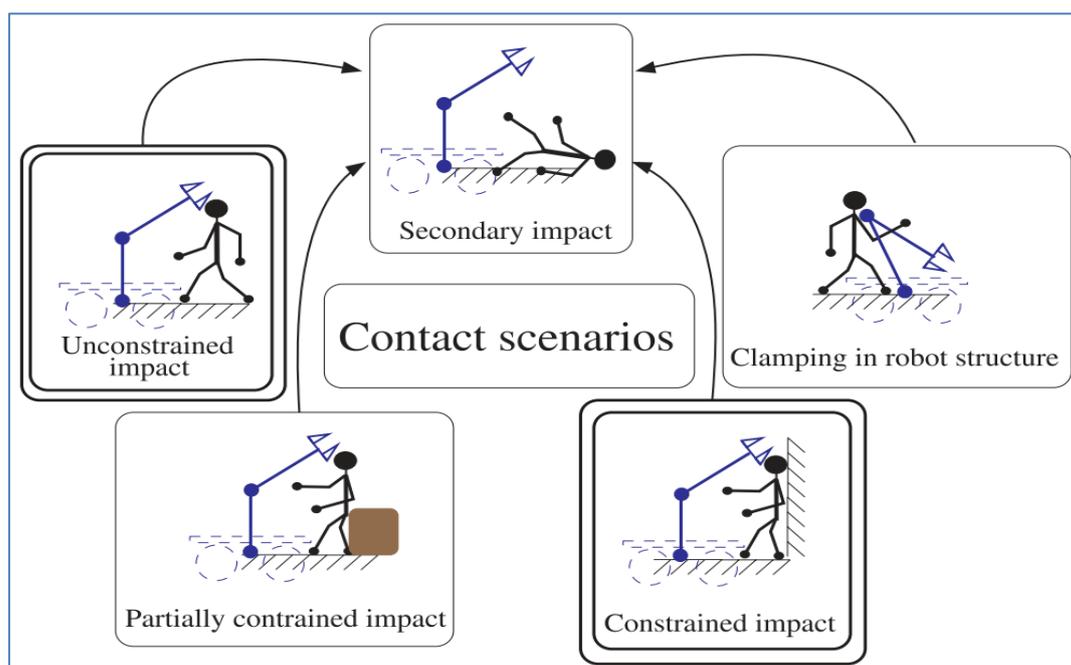


Figura III.1 Escenarios de contacto [28].

La interacción física humano robot tiene un amplio campo de aplicación, y por lo tanto diferentes grados de interacción y diferentes niveles de peligro. Algunas tareas requieren un contacto muy cercano o permanente, mientras que en otras el contacto no es necesario o solo ocurre de forma eventual.

En ambos casos los movimientos y el espacio de trabajo del robot y el humano pueden solaparse, lo cual incrementa la posibilidad de que ocurra un contacto inesperado que cause dolor o lesión.

Haddadin ^[28] plantea una clasificación de los diferentes casos de impacto posibles entre un robot y el ser humano (Figura III.1).

Se pueden ver los distintos tipos de impacto que se presentan: el impacto sin restricciones (*Unconstrained impact*), donde un eslabón impacta sobre el humano sin que este tenga restringido el movimiento. Impactos parcialmente o totalmente restringidos (*Partially constrained impact* y *constrained impact*) se refieren a cuando se encuentran apoyados contra una superficie que impide al cuerpo atravesarla o que condiciona el choque. Y además, el aprisionamiento con la estructura del robot (*clamping in robot structure*), ocurre cuando un miembro queda atrapado entre dos o más eslabones del robot. Además, en ocasiones se produce un impacto secundario (*Secondary impact*) aparte del choque con el robot, producto de un impacto contra el suelo o algún otro objeto.

En todos estos escenarios el humano sufre algún impacto o aprisionamiento, lo cual da lugar a una cantidad de energía o fuerzas que el cuerpo humano ha de soportar.

En este trabajo se analizará el impacto sin restricciones, dado que el entorno de trabajo puede ser ajustado para evitar la presencia de objetos que puedan causar un peligro aún mayor.

El tipo y la gravedad de lesión están condicionados a la parte del cuerpo que entra en contacto. La cabeza, de entre todas las partes del cuerpo es una de las partes más críticas, como se intuye, dado que los traumatismos sobre ella son la principal causa de muerte y discapacidad, por lo que es vital protegerla de cualquier impacto. Es por ello, que en este trabajo se analizará la cabeza como parte del cuerpo representativa del ser humano en el estudio del choque.

Las líneas de investigación han tenido siempre como prioridad esta parte del cuerpo, y han utilizado distintos criterios para certificar la seguridad. Un criterio clásico es el HIC (*Head Injury criterion*) utilizado en los test de automóviles ^[3,36, 11, 19]. A pesar

de su amplio uso, resulta poco adecuado para el análisis que hay que realizar, pues carece de precisión para calibrar lesiones de bajo nivel. Es debido a las muy bajas velocidades y aceleraciones de trabajo, comparado con los niveles que se evalúan en los crash-test de automóviles.

La fractura de huesos faciales y craneales, y criterios de compresión para el pecho, fueron ya sugeridos para analizar mejor estas lesiones. Las propiedades del impacto como fueron estudiadas aplicando índices biomecánicos de lesión, con lo que sirven de base para el análisis lesión humana en robótica ^[23, 17].

c. Modelo de impacto entre el robot y la cabeza.

Para realizar el análisis del choque se ha de considerar tanto la forma de a los cuerpos del choque como sus propiedades.

El impacto entre un eslabón como del robot y cualquier parte del cuerpo produce una superficie de contacto elíptica al amoldarse la piel al cuerpo que choca ^[58]. Es por ello que el modelo simplificado propuesto y analizado en este trabajo propone que la cabeza y un brazo robótico tomen una forma simplificada, esto consiste en considerar la cabeza como una esfera y el eslabón del robot también, considerando además ambos cuerpos con un comportamiento completamente elástico (Figura III.2).

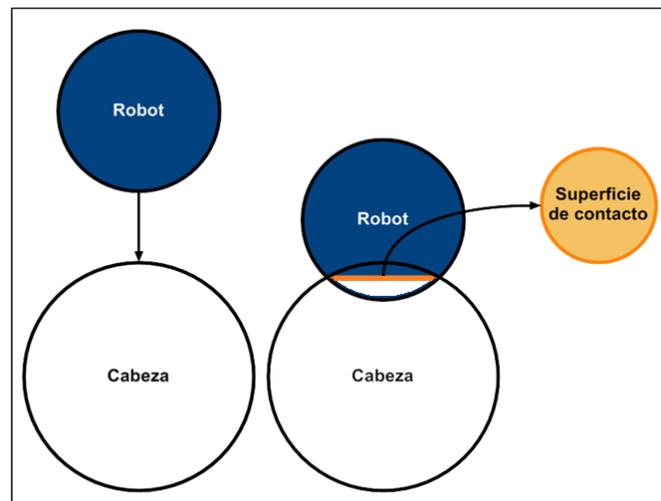


Figura III.2 Representación de la cabeza y el robot. Elaboración propia.

El eslabón también se simplifica dado que al chocar ambos cuerpos la superficie de contacto se reduce a un círculo (una forma de elipse) cumpliendo con lo presentado anteriormente.

El brazo robótico porta una inercia que tiene un equivalente en masa y esto es lo que se representará en este modelo. Esta inercia que porta toda la cadena de eslabones tiene un máximo valor que se puede hacer equivalente a una masa.

De esta manera se simplificó y se añadió esta propiedad de inercia como masa de la esfera del robot en el impacto ^[29].

La **cinemática de la colisión** viene marcada por las características de movimiento de los robots. Durante el estudio, el movimiento del robot se considera a velocidad constante. Esto es debido a que los cambios de velocidad, tanto para pasar de un estado estático a movimiento, como una vez moviéndose detenerse, se realizan rápidamente con grandes ajustes de aceleración en relativamente poco tiempo ^[2].

Además, se considera que la estrategia de reacción frente a la colisión garantizará una desconexión de todo el sistema de actuación del robot mediante los sistemas de seguridad de “gravedad cero” -como ya se ha comentado en *Estrategias de control*.- provocan que al detectar la colisión los robots queden desconectados de toda potencia externa y simplemente actúa la velocidad inicial como se acaba de postular.

Esto determina que el choque se inicie con el robot a velocidad constante y aceleración nula, y la cabeza totalmente estática y sin restricciones, con velocidad y aceleración nulas.

En cuanto a los materiales, la cabeza se compone de varias capas que van desde la superficie externa de la piel hasta las meninges y después el cerebro.

La simplificación para realizar el primer experimento será considerar una esfera con las propiedades del hueso del cráneo maciza ^[24]. En la siguiente tabla (Tabla III.1) se especifican las propiedades:

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción
Eh	6,5	[GPa]	M. de Young
Vh	0,22	-	Coef. Poisson
Rh	0,077	[m]	Radio
Volh	$(4 \cdot \pi \cdot (Rh^3))/3$	[m ³]	Volumen
Mh	4,5	[kg]	Masa
Dh	Mh/Volh	[kg/m ³]	Densidad

Tabla III.1 Datos del material de la cabeza [29]

Las propiedades consideradas para la representación del robot, atienden al marco que se ha delimitado previamente: un robot multipropósito cuya velocidad de trabajo no supera los 2 m/s, que puede colisionar contra un trabajador dado que comparten espacio de trabajo. Varios investigadores han realizado estudios de seguridad para evaluar el peligro para el humano de una serie de brazos robóticos teniendo en cuenta estos términos o parecidos ^[23, 36, 50, 30, 38, 6, 42]. El robot se realizará adoptando los parámetros de uno de estos robots, el LWR-III ^[29]. En Tabla III.2 se desglosa la caracterización:

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción
Er	70	[GPa]	M. de Young
Vr	0,3	-	Coef. Poisson
Rro	0,015	[m]	Radio
Volr	$(4 \cdot \pi \cdot (Rro^3))/3$	[m ³]	Volumen
Mr	10	[kg]	Masa
Dr	Mr/Volr	[kg/m ³]	Densidad

Tabla III.2 Propiedades material del robot [29]

d. Análisis de impacto Humano-Robot

Una vez caracterizados los modelos, se analiza la colisión entre el cuerpo humano y un brazo robótico en movimiento.

Los parámetros sobre los que trabajar son dos esferas macizas de distintos materiales.

El modelo analítico se desarrolla basado en las hipótesis de la teoría de contacto de Hertz, en concreto del contacto entre dos esferas. Para evaluar los resultados se comparará el choque según los postulados de Hertz y la simulación computacional mediante elementos finitos.

I. Modelo analítico simplificado

El sistema a analizar parte de los modelos descritos anteriormente, el robot con 2m/s como velocidad inicial, y la cabeza en reposo. Ambos cuerpos con dos grados de libertad y sus centros de masas alineados en el mismo eje de movimiento. Determinado así el estado inicial, se realiza el choque entre ambos partiendo de las condiciones del contacto hertziano ^[4] (Figura III.3).

Cuando dos cuerpos curvados de diferentes radios de curvatura se ponen en contacto tocarán inicialmente en un punto o en una línea. Con la aplicación de la más pequeña carga, se produce una deformación elástica que genera unas áreas de contacto,

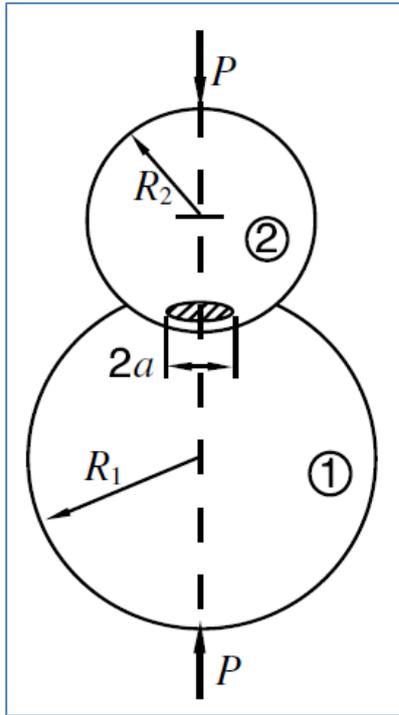


Figura III.3 Contacto Hertziano: Choque entre dos esferas con una fuerza aplicada P [4]

a través del cual las cargas se distribuyen como presiones. El primer análisis de esta situación fue presentada por Heinrich Hertz en 1881 y se basa en los siguientes supuestos:

i. Las superficies de contacto son continuas, lisas, no conformes¹ y sin fricción.

ii. El tamaño del área de contacto es pequeña en comparación con el tamaño de los cuerpos.

iii. Cada sólido se puede considerar como un medio elástico en la proximidad de la zona de contacto.

iv. La brecha h entre las superficies no deformadas puede aproximarse por una expresión de la forma:

$$h = Ax + By \quad (1)$$

Donde A y B son constantes, y x e y son las coordenadas ortogonales que yacen en el plano tangente común a las dos superficies.²

Cumpliendo todo lo anterior, se tiene que para el caso de un contacto entre dos esferas (Figura III.3), dada una fuerza P , se produce a , el radio de contacto:

$$a = \left(\frac{3PR^*}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

Donde E^* Es el modulo conjugado y R^* , el radio conjugado, que se definen como:

¹ Si los cuerpos se están tocando, pero no actúa ninguna fuerza sobre ellos, solamente se tocan en un punto o una línea de puntos.

² En sentido estricto, la idealización (iv) requiere perfiles de la superficie parabólica, pero por implicación, el análisis de Hertz es relevante para el contacto de esferas, cilindros y elipsoides.

$$E^* = \frac{1}{\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}} \quad (3)$$

$$R^* = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (4)$$

ν_1 y ν_2 son los coeficientes de Poisson. E_1 y E_2 los módulo de elasticidad de cada material. La resultante distribución de presión $p(r)$ es semi-elíptica como se muestra en la Figura III.4.

$$p(r) = p_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

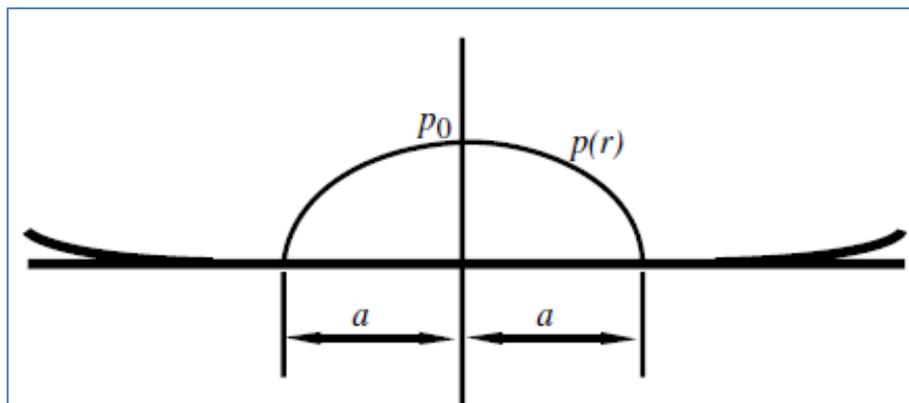


Figura III.4 Contacto Hertziano: distribución de la presión de contacto [4]

Donde r , el radio dentro de la zona que soporta la presión (Figura III.4):

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (6)$$

x e y son los semiejes de la elipse que se dibuja en el contacto. En el caso de la circunferencia son iguales y r es el radio de la circunferencia. Esta distribución es característica del contacto hertziano.

Y la presión máxima p_0 resulta:

$$p_0 = \frac{3K_{rh}\delta^{n_{rh}}}{2} \quad (7)$$

n_{rh} es un valor determinado experimentalmente, y depende del tipo de material, en este caso 1.5, y K_{rh} la rigidez que suponen los dos cuerpos^[29]:

$$K_{rh} = \frac{4}{3} \left(\frac{1-\nu_r^2}{E_r} \right)^{-1} \left(\frac{1-\nu_h^2}{E_h} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

La presión máxima p_0 ocurre en el eje de simetría. La presión media p_m viene dada como:

$$p_m = \frac{2}{3} p_0 \quad (9)$$

Como se ha mencionado, partimos de una velocidad inicial del robot, típica del comportamiento de los robots de servicio. Es por eso que se debe transformar la aplicación de la ley de Hertz y cambiar de una fuerza aplicada P , a una velocidad, derivada de la magnitud de la penetración δ .

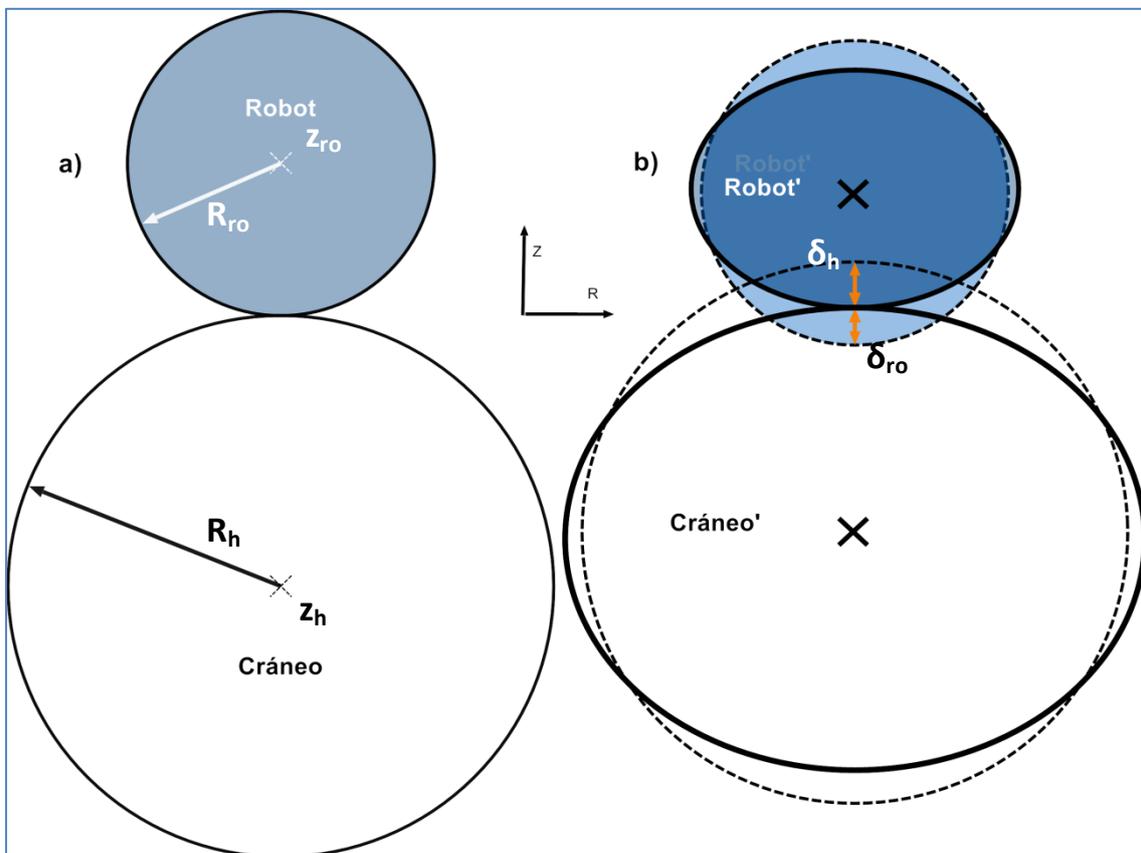


Figura III.5 Penetración: a) Justo antes del impacto y b) Durante e impacto, de formadas y sin deformar. Elaboración propia.

La magnitud de la penetración δ viene dada por la suma de las penetraciones δ_{ro} y δ_h que significan la penetración en cada uno de los materiales como se puede ver en la Figura III.5. La penetración total resulta:

$$\delta = (z_{ro} - z_h) - (R_{ro} + R_h) \quad \text{si } \delta \geq 0 \quad (10)$$

Donde R_{ro} y R_h representan los radios de las dos esferas en contacto sin deformarse, que sumados representan la distancia entre centros inicial. Mientras que z_{ro} y z_h son las coordenadas espaciales de los centros sobre el eje Z. Esta fórmula solo se utiliza para el estudio computacional.

Los cuerpos entran en contacto desde que su distancia relativa ((10) se hace cero, consecuencia de lo cual se origina la fuerza de contacto que acelera los cuerpos en dirección contraria a la penetración. Ella es válida sólo si los esfuerzos en la zona del impacto son menores que el esfuerzo de fluencia³.

$$F(\delta) = \delta^{n_{rh}} K_{rh} \quad (11)$$

A su vez por la segunda ley de Newton:

$$F(\ddot{\delta}) = \ddot{\delta} m^* \quad (12)$$

Donde m^* es el radio conjugado expresado como:

$$m^* = \frac{1}{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}} \quad (13)$$

Con el modelo ya completamente definido, como se muestra en la Figura III.6, se procede a su implementación en Matlab Simulink®, que permite aprovechar su capacidad de cálculo para realizar el estudio temporal.

³ Magnitud a partir de la cual se dejaría de considerar sólido elástico lineal.

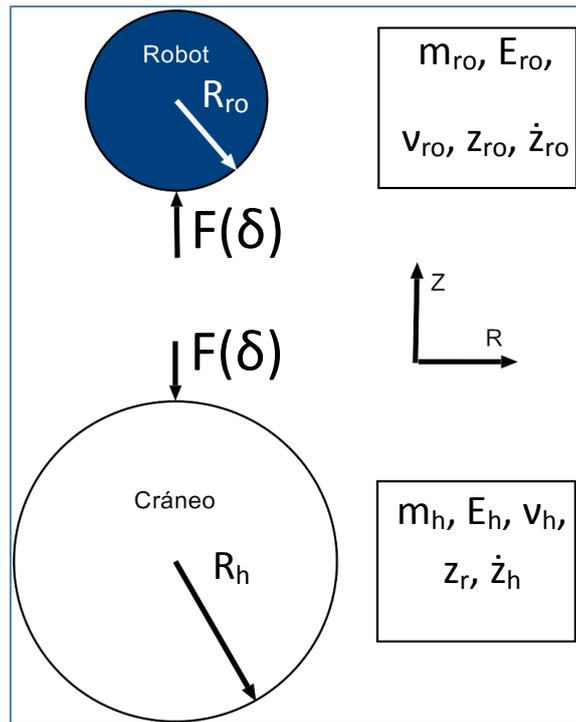


Figura III.6 Choque de estudio. Elaboración propia.

En primer lugar, se crea un archivo que utilizar para guardar los datos de los materiales y demás definiciones, que utilizar para inicializar el modelo. Este tipo de archivos Matlab® los denomina *script*. Posteriormente, se utiliza que se utilice dicho archivo como inicialización para realizar la simulación.

Primeramente, se definen todos los valores de inicialización en Simulink®. Se modela lo que sería una ecuación en derivadas parciales, como una función de transferencia a base de bloques de función. En la Figura III.7 se puede ver el modelado por bloques:

- los bloques amarillos representan función.
- Los bloques verdes ganancia (multiplicar por una magnitud constante).
- Los bloques azules integradores.
- El bloque gris satura el valor para que la penetración sea mayor que 0.
- Los bloques blancos son etiquetas para muestrear los datos de salida.

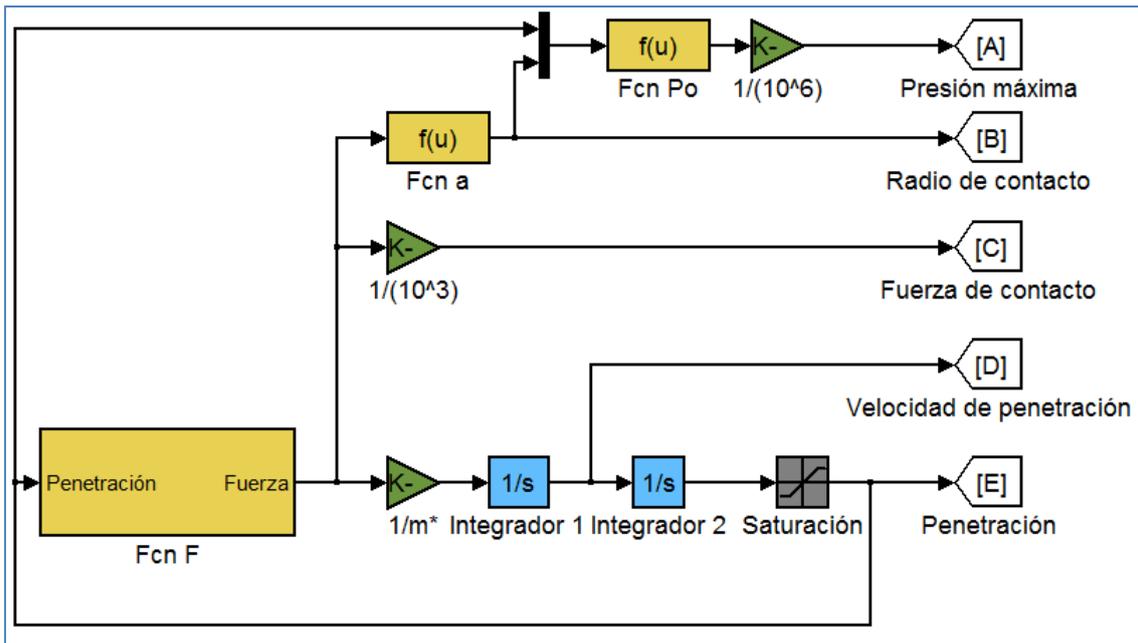


Figura III.7 Diagrama de bloques en Matlab Simulink. Elaboración propia.

Realizando un bucle en el cual se coloque la ecuación $F(\delta) = \delta^{n_{rh}} K_{rh}$ (11) **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** como el bloque Fcn F, obteniendo a su salida la fuerza de contacto. Esta se recoge en kN dividiendo su magnitud por una ganancia.

A continuación mediante la (12) se ajusta la ganancia para transformar la fuerza en aceleración de la penetración, o su segunda derivada que es lo mismo. Después integrándola, obtenemos la velocidad de penetración. Esta magnitud también se recoge para tener sus valores.

Después integrándola de nuevo se consigue la penetración. Se añade un saturador para evitar que la magnitud sobrepase como límite inferior 0, dado que cuando se separan los dos cuerpos simplemente deja de existir contacto. A continuación se almacena la variable.

Con el bucle ya cerrado conectando la penetración con el bloque Fcn F, se procede a obtener el radio de contacto mediante la (2). Colocando esta ecuación como Fcn a, permite que se recoja la información directamente.

Por último es necesario recabar los datos de la presión máxima, para lo cual se emplea la (7) en la que se introduce la penetración y el radio de contacto.

II. Modelo computacional

Mediante el método de los elementos finitos o MEF, resulta posible estudiar problemas complejos en multitud de disciplinas gracias a la potente herramienta que representan.

El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio, sobre el que están definidas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral dando lugar a ecuaciones tratables mediante los métodos del álgebra lineal sobre un espacio vectorial de dimensión infinita o espacio funcional. Esto caracteriza el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí denominados **elementos finitos** ^[55].

Estos elementos finitos forman una partición del dominio también llamada **discretización**.

Dentro de los elementos se distinguen unos puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito. Los nodos sobre la frontera de un elemento pueden pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos se llama malla.

Los cálculos se realizan sobre esta malla, generada por el programa, en una etapa previa a los cálculos llamada **pre-proceso**. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas, definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable que hay entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama **matriz de rigidez del sistema**. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

El análisis de los elementos finitos se programa para calcular **el campo de desplazamientos** y a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente para analizar los resultados.

El método de los elementos finitos es muy utilizado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones), además el método es fácilmente adaptable a problemas de diferentes disciplinas. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, es un método cada vez más extendido para realizar estudios como este.

Para el estudio del contacto, hay diferentes métodos de resolución en la mecánica computacional. Partiendo de las bases de la mecánica de contacto de la teoría de Hertz, se distinguen varios métodos, los dos principales que utiliza COMSOL® y muchos otros programas de EF son el método de **Multiplicadores de Lagrange** y el método de **Penalización** que vienen explicados en la literatura [57].

El método de Multiplicadores de Lagrange se rige por la actuación de un factor llamado de la misma manera, y añade de esa manera energía al sistema al tener lugar el contacto. Este término resulta igual que la fuerza de reacción, similar a la que se explica en las ecuaciones de este capítulo, que solo tiene lugar de existir contacto entre superficies.

El método de Penalización añade en su lugar un término que resulta similar a la actuación de un resorte cuando se inicia el contacto. En este caso se utiliza el método de la Penalización, que resulta más lento computacionalmente, pero por el contrario el método de Multiplicadores de Lagrange no mostraba convergencia para la mayoría de casos, por lo que quedó desestimado.

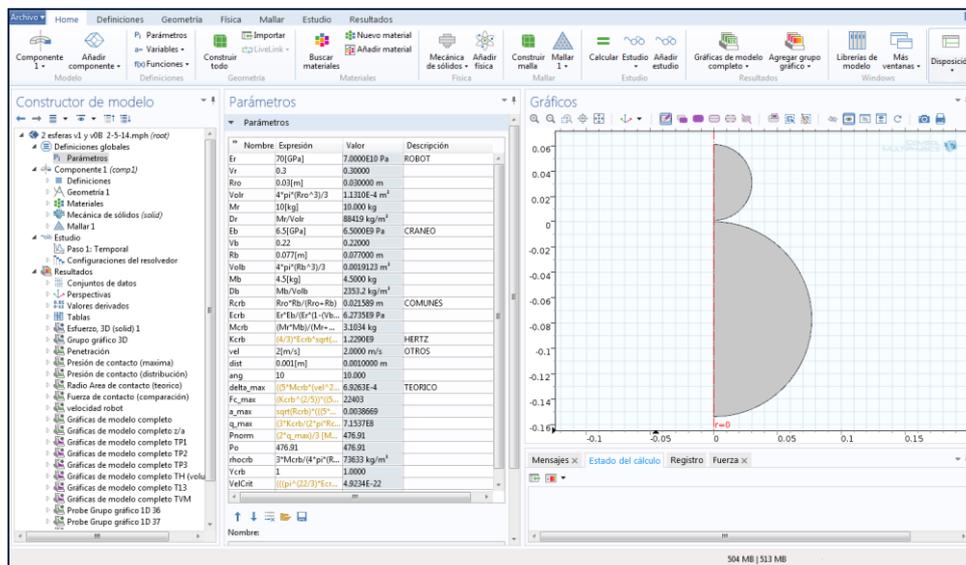


Figura III.8 Entorno de COMSOL Multiphysics 4.4 ®. Elaboración propia.

En COMSOL® se implementó el sistema de colisión que se planteó anteriormente, de tal manera que representara fielmente el choque.

COMSOL® es un programa de EF que permite desarrollar estudios en multitud de áreas de conocimiento distintas, con módulos multifísica que permiten estudiar efectos diversos asociados a varias de esas disciplinas. En la Figura III.8 se muestra el entorno de trabajo de la versión 4.4 del programa.

En la parte izquierda de la Figura III.8 se puede ver una columna donde se despliegan todas las opciones del constructor del modelo. Aquí es donde se ha de ir definiendo todos los apartados del modelo de elementos finitos. Lo primero que se ha de decidir es en qué dimensiones se modelará. En este caso se desarrolla en dos dimensiones y se revoluciona alrededor del eje central (Z), como se puede ver en la parte derecha de la figura.

Para comenzar se introducen los parámetros del modelo analítico en el apartado de parámetros globales. Se indican las magnitudes que figuran entre corchetes y, si se desea, se les puede añadir una descripción, estos se pueden ver en la tabla de la parte central de la Figura III.8 especificados. Después, hay de construir el modelo en las dimensiones especificadas. Para dar forma al modelo deseado hay que seguir los siguientes pasos:

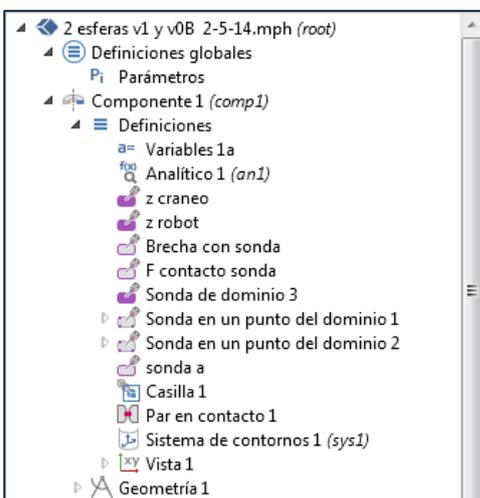


Figura III.9 Despliegue de las definiciones.
Elaboración propia

- **Definiciones:** Este apartado es el primer componente, en él, se incluyen las variables y funciones que utilizará el modelo (p.e. la penetración), las sondas (permiten medir en dominios, contornos o puntos concretos las magnitudes), los pares de contacto (muy importante en este caso para especificar donde se debe ejecutar el modelo de contacto), etc. En general son, como su propio nombre indica, definiciones útiles para el desarrollo del estudio de forma que resulte lo más ajustado a necesidades y útil para después post-procesarlo. En la Figura III.9 de la izquierda se puede ver el caso de este modelo.

- **Geometría:** Ahora mediante herramientas de diseño CAD se traza el modelo. En este caso solo es necesario dibujar dos semicírculos de manera muy simple que al rotar sobre el eje de revolución se convertirán en dos esferas que representarán la cabeza y el robot. Además se incluyen puntos que dividen el contorno curvo de la semicircunferencia de tal manera que limite el área de contacto. Por último pero no menos importante se realiza la conversión a sólido y el ensamble.

Estos dos últimos puntos son clave para conseguir que los elementos finitos asuman como cuerpos diferentes y sólidos ambos semicírculos

para mallarlo más adelante. El conjunto de lo expuesto se puede apreciar en la siguiente figura.

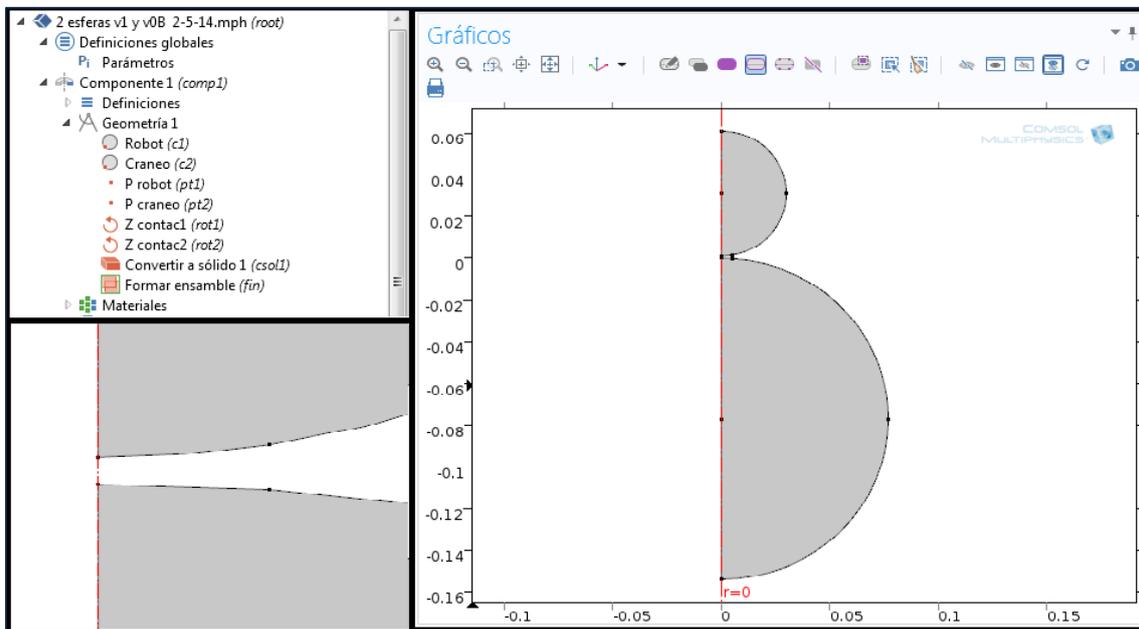


Figura III.10 Apartado Geometría. Elaboración propia.

- Materiales:** Se escogen los materiales y todas las características necesarias para definir el comportamiento de los elementos del choque. Se crearon dos materiales que en este caso se comportan como hueso y el LWR-III ^[29]. A continuación se selecciona el dominio de cada material, marcando con el ratón el dominio del robot y de la cabeza. las propiedades se eligen de todas las existentes en la base de datos, en este caso son la densidad, y las propiedades de material elástico lineal – módulo de Young y coeficiente de Poisson- y se introducen los valores de cada uno. De haber hecho el paso previo de tenerlos definidos en los parámetros es tan fácil como colocar el nombre de cada uno.
- Física:** Es necesario elegir la física que regirá el modelo, en este caso **mecánica de sólidos**. En la física de mecánica de sólidos es donde se procede a marcar como se ejecutará la física partiendo de distintos elementos como elegir si habrá inercia, colocar restricciones y valores iniciales de desplazamiento o velocidad a cada componente (Figura III.11). En este caso se definen ambos materiales con inercia, dado que se pretende que al aplicar cualquier condición física la masa de los cuerpos intervenga, de lo contrario los cuerpos se comportarían como cuerpos sin masa a los que al chocarse se desplazarían juntos a la misma

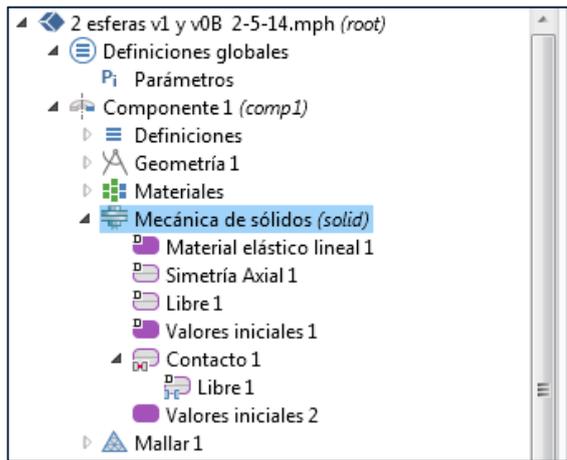


Figura III.11 Despliegue de la mecánica de sólidos.
Elaboración propia.

velocidad. Además, debido a las opciones anteriores ya elegidas, se incluye por defecto la simetría axial para tenerla en cuenta.

Se debe también elegir dar valores iniciales de desplazamiento y velocidad a los dos cuerpos, cada uno por separado. Y como condición fundamental añadir el contacto entre cuerpos, que permite elegir dos superficies que no van a poder traspasarse y sobre las que se originarán

fuerzas y otros efectos al colisionar. El resto de elementos no definidos son libres por defecto.

- **Mallado:** Para acabar de definir el modelo y acabar con el preprocesado, se ha de realizar el mallado. Este será definido por el usuario, aunque puede elegirse autodefinido por la física, pero resulta más interesante especificar la malla. Entonces como usuarios se define un tamaño general de malla, que permitirá que junto con el resto de parámetros, el programa de por sí solo ubique los nodos, en este caso se escogió el tipo normal. El programa entonces distribuirá por defecto los nodos separados en un intervalo de distancia definido por defecto, de tal manera que se creen los elementos finitos entre ellos con un tamaño determinado.

Además, se indicó que realizase el mallado con elementos finitos triangulares libres, a los cuales se les añadió una definición de tamaño. Esta definición se aplica solo en los contornos de contacto, para provocar una disminución de tamaño de elementos que provoque mayor definición en la solución. La Figura III.12 muestra como resulta la geometría tras el mallado.

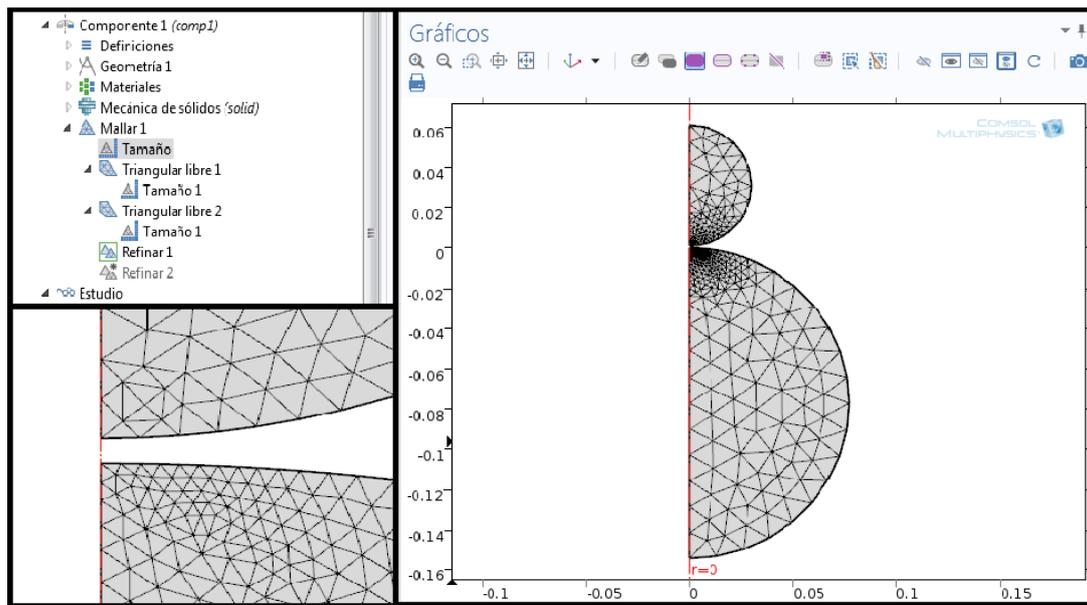


Figura III.12 Apartados Mallado. Elaboración propia.

- **Estudio:** Con todas las características del modelo ya definidas, se procede a añadir un estudio que sea acorde. Para este caso es necesario realizar un estudio temporal dado que se han de estudiar los efectos que produce el análisis dinámico sin estado estacionario, dado las características de movimiento anteriormente descritas. Se define un tiempo total y un paso temporal para mostrar los resultados en determinados instantes. El programa realizará para cada paso de tiempo iteraciones que le llevarán a la resolución de las matrices de modo que tras varias iteraciones los pasos vayan convergiendo avanzará la progresión total, permitiendo realizar el estudio. Es fundamental para mejorar el resultado y disminuir errores depurar la malla lo máximo posible, pero sin excederse, pues ralentiza el cálculo y llegan a aparecer errores por redundancia al haber demasiado refinamiento de la malla.
- **Resultados:** Esta parte se conoce como post-proceso. Tras realizar todos los pasos del estudio transcurrido un tiempo y habiendo convergido la solución, se obtienen los conjuntos de datos. Estos datos son almacenados a partir del estudio, provienen de las deformaciones de los nodos almacenadas en una matriz y de determinados añadidos preproceso, como por ejemplo, analizar una sonda en un contorno, que dará lugar a unos resultados referidos a ella. Esto permite que mostremos mediante cálculos postproceso sobre dichos datos, toda clase de gráficas en 1, 2 y 3 dimensiones, y realizar videos con secuencias de resultados temporales por ejemplo entre otras muchas opciones. También permite trabajar con valores derivados y tablas.

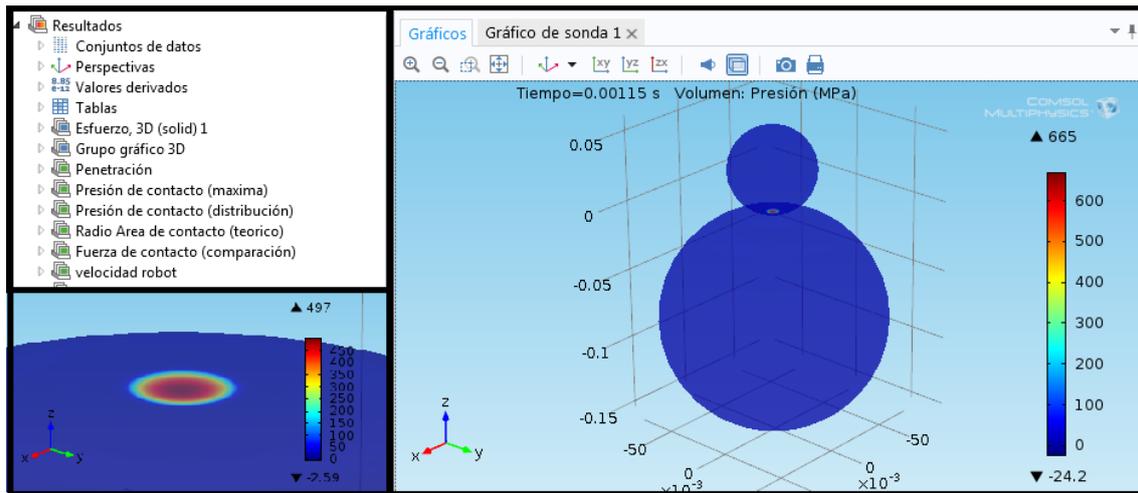


Figura III.13 Apartado resultados. Elaboración propia.

Una vez acabado el modelo se han de analizar los resultados, para comparar posteriormente con la teoría de contacto. Se han estudiado varios parámetros fundamentales que se explican en el próximo capítulo.

e. Conclusiones

En este capítulo se ha desarrollado el cómo **plantear los estudios de colisiones humano-robot**.

Para ello se han **planteado** primeramente **los escenarios de impacto**, de manera que se ubicara la situación, y a partir de tratar todas las posibilidades, decidir cuál de ellas sería la elegida para enmarcar el estudio.

Después **crear el modelo de impacto**, simplificar la situación de tal manera que se obtuvieran los mejores resultados posibles mediante hipótesis corroboradas según datos de la literatura.

Y por último se plantearon los diferentes análisis expuestos en este capítulo, que mediante Matlab Simulink® en el caso analítico, y COMSOL Multiphysics® en el caso computacional, nos permitirán obtener resultados acerca de la colisión. Estos resultados se expusieron en gráficas que se muestran en el próximo capítulo.

Este desarrollo permite enfrentarse de manera científica al problema, analizando el entorno y la situación, planteando diferentes alternativas y decantándose por una de ellas para enfrentarse al problema. Finalmente para poder valorar los resultados realizando comparativas y sobre las que sacar conclusiones.

Capítulo IV. Resultados del modelo

a. Introducción

Hasta ahora se ha podido ver en qué consisten los métodos de análisis de colisión expuestos en el capítulo anterior. En este capítulo se trata de mostrar los datos obtenidos a partir de dichos modelos: un modelo analítico, a partir de las ecuaciones de Hertz, y un modelo computacional mediante EF.

La intención es que a partir de ellos se desarrolle el primer apartado: primero, comparar sus resultados y comprobar que el modelo realizado en COMSOL® efectivamente se asemeja a la teoría de contacto de Hertz.

Segundo, poder ilustrar algunos parámetros de la mecánica útiles en EF. Para terminar presentar los parámetros que rigen la lesión leve.

Tercero, con el primer apartado desarrollado, se puede tomar el modelo computacional como caso general sobre el que desarrollar el estudio de parámetros. En este estudio se atiende a los parámetros de forma y caracterización de materiales. Con ellos se expone una variedad de posibilidades que permiten enfocar correctamente el diseño de un robot que promueva la pHRI.

Por último se realiza un modelo con capas. Este modelo se realiza de la misma manera que un ejemplo de la literatura que realiza el estudio analíticamente ^[29], solo que en este caso se estudiará mediante el método de los elementos finitos.

b. Resultados del modelo

Para este caso, que ha sido descrito como dos esferas con las características del cráneo y del robot, se puede ver los valores más importantes evaluados por cada uno de los métodos y comparados entre sí. Esto se realizará en el primer apartado acerca de las magnitudes fundamentales.

A continuación, se desarrollarán contenidos teóricos de la mecánica estructural para después aplicarlos a las teorías de fallo de materiales, y que utilidad pueden presentar estas en este estudio.

Por último plantear unos parámetros biomédicos que permiten plantear los límites de laceración y contusión.

I. Magnitudes fundamentales del modelo hertziano

Hay algunos parámetros que pueden ser estudiados en ambos modelos, tanto en el modelo analítico como en el computacional. Son la **penetración**, el **radio de contacto**, la **presión de contacto máxima**, la **fuerza de contacto** y la **velocidad de penetración**.

Dichos parámetros pueden por tanto ayudar a realizar una verificación del modelo computacional, y a estudiar sus diferencias de haberlas, para entender mejor que potencial se puede extraer y cuáles son los límites de este tipo de estudios.

- **Fuerza de contacto:** En la siguiente figura se puede ver cómo se desarrolla la fuerza de contacto en dirección Z. Esta magnitud resulta muy significativa a la hora de medir las fracturas o fisuras en los huesos faciales, como se puede observar en la Figura IV.2.

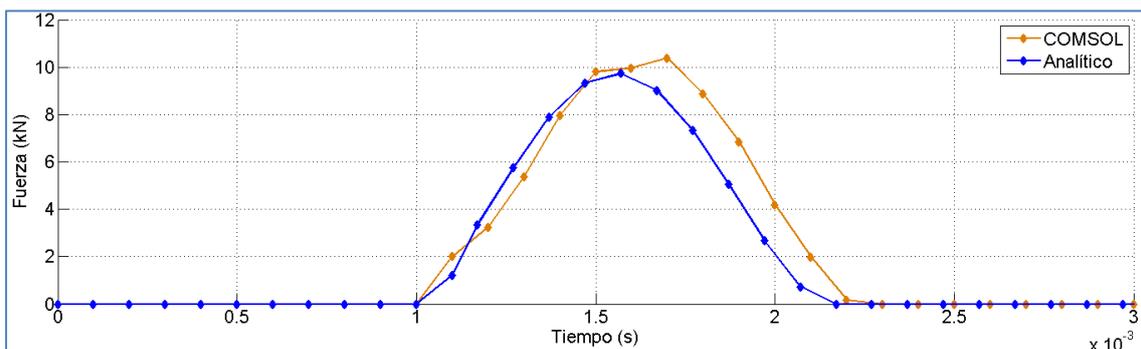
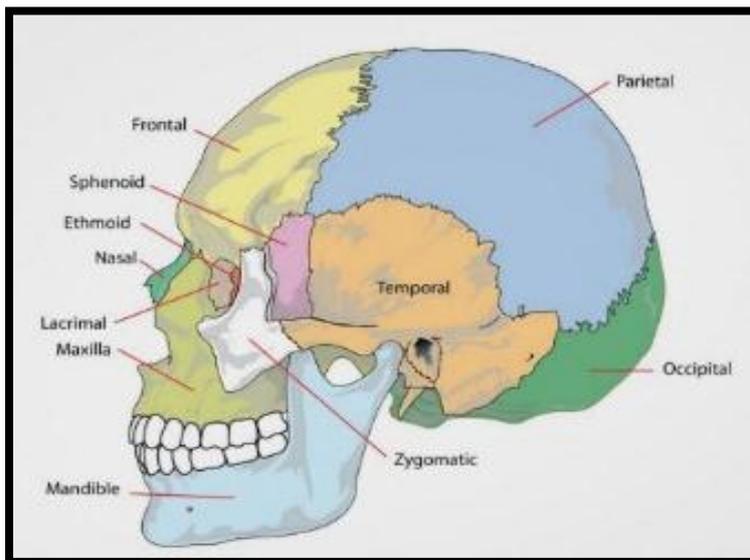


Figura IV.1 Fuerza de contacto. Elaboración propia.



Hueso	Fuerza KN
Maxilar	0,66
Mandíbula	1,78
Parietal	3,12
Frontal	4
Occipital	6,41

Figura IV.2 Sectores de la cabeza y varios de sus límites de fractura [52].

- Velocidades del robot y la cabeza:** En la Figura IV.3 se aprecia el cambio de velocidad producido por el choque en ambos cuerpos. Con las velocidades de entrada y salida de ambos cuerpos se puede obtener el **coeficiente de restitución**.

$$C_r = \frac{v_{salh} - v_{salro}}{v_{entro} - v_{enth}} \leq 1 \tag{14}$$

Donde v_{enth} y v_{salh} son las velocidades de entrada y salida de la cabeza respectivamente, y v_{entro} y v_{salro} son análogas para el robot. Este coeficiente sirve para calcular la energía perdida en el choque, cuyo valor máximo resulta 1.

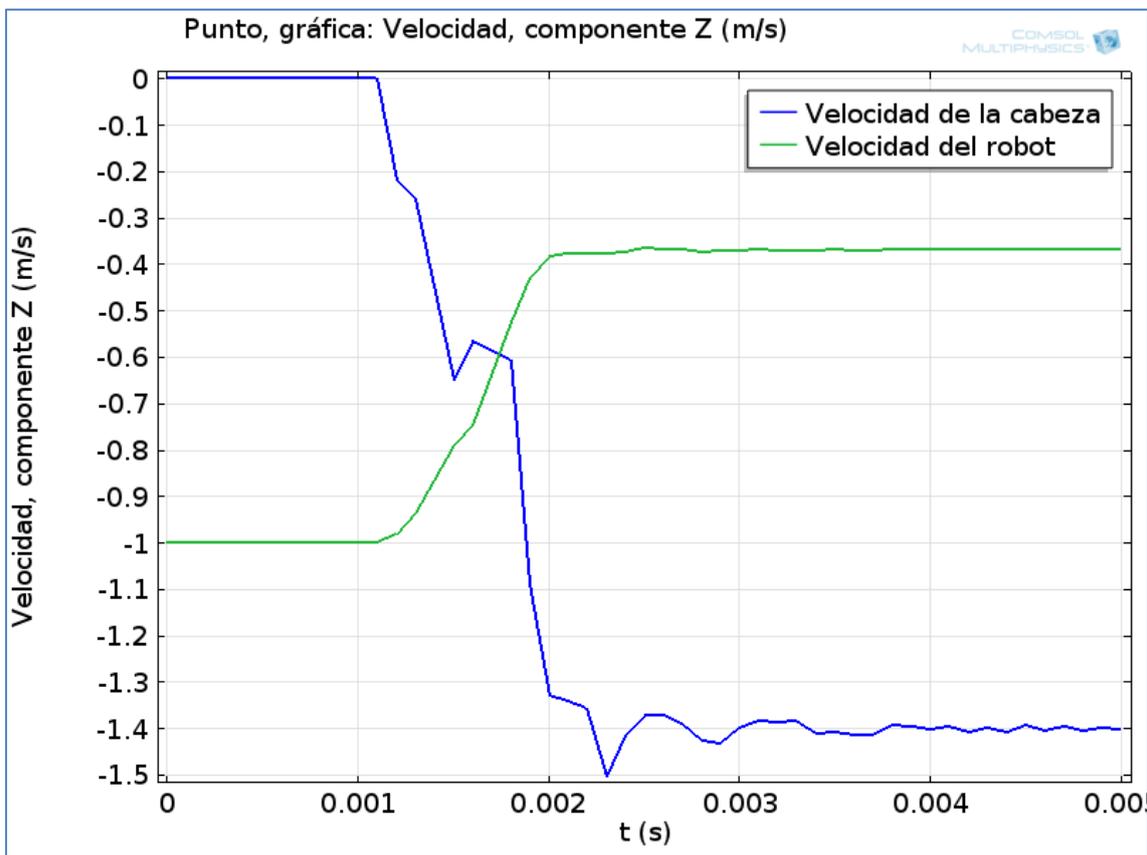


Figura IV.3 Velocidad del robot. Elaboración propia.

- Velocidad de Penetración:** Ahora se puede observar la velocidad de penetración, que no es más que la diferencia de velocidades. Esto está intrínsecamente relacionado con el coeficiente de restitución, debido a las siguientes ecuaciones:

$$\dot{\delta}_{ent} = \dot{z}_{entro} - \dot{z}_{enth} = v_{entro} - v_{enth} \tag{15}$$

$$\dot{\delta}_{sal} = \dot{z}_{salro} - \dot{z}_{salh} = v_{salro} - v_{salh} \quad (16)$$

Lo cual junto con la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** forma:

$$C_r = \frac{-\dot{\delta}_{sal}}{\dot{\delta}_{ent}} \leq 1 \quad (17)$$

Como se puede observar, el coeficiente entre entrada y salida tiene que ser menor que 1, por lo que la velocidad de penetración de la salida será igual o menor, pero de signo contrario al de la velocidad de entrada. Se puede apreciar ligeramente como los resultados con el COMSOL® superan ligeramente este límite, siendo menores que -1m/s. Se puede entender como un ligero error debido a que dichos resultados no dejan de ser una aproximación por utilizar los EF. Asimismo, esto explica porque la duración del choque es mayor y por tanto las gráficas coinciden en menor medida en la separación que en la primera parte del contacto.

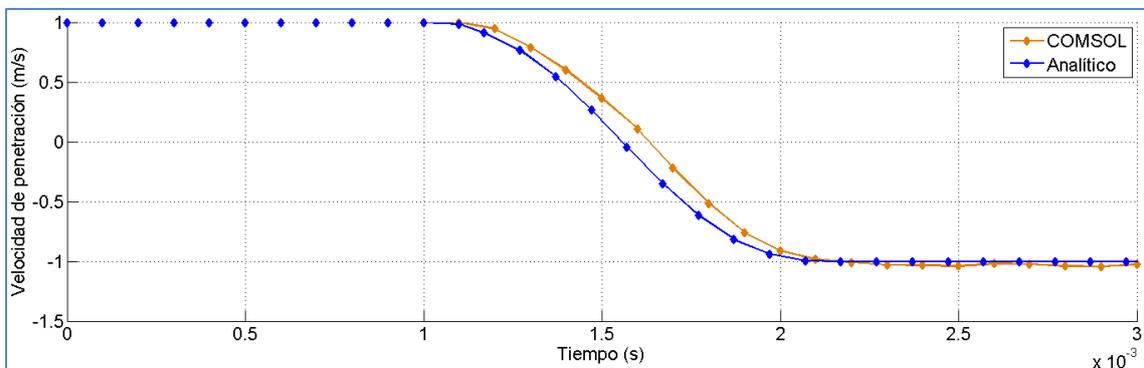


Figura IV.4 Velocidad de penetración. Elaboración propia.

- Radio de área de contacto:** El impacto se va desarrollando de manera que mientras sucede el contacto entre ambos cuerpos hay un área circular cuyo radio máximo se denomina radio de contacto. Se puede apreciar cómo se extiende la zona representada de color verde en las figuras de la Tabla IV.1, que representa la zona sensible al contacto que sufre presión por el impacto. La zona roja representa el resto de la zona que es sensible al contacto pero no contacta, que solo es una pequeña porción de la cabeza de 6 mm.

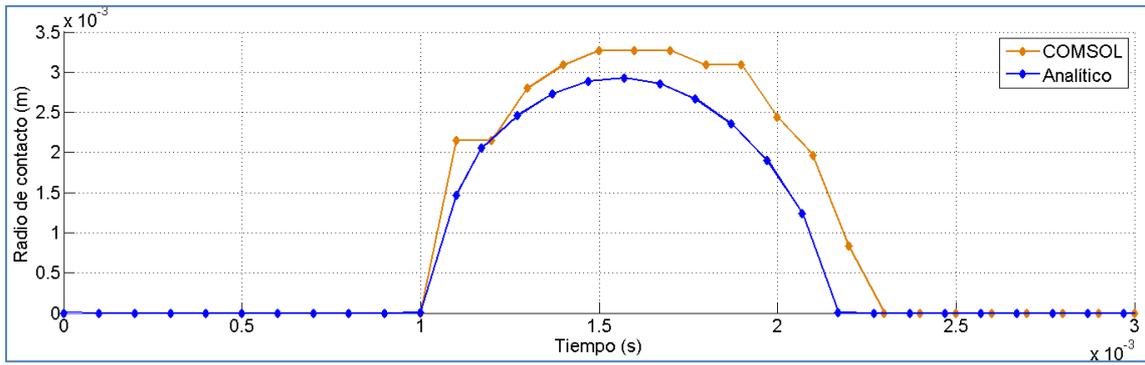


Figura IV.5 Radio de contacto. Elaboración propia.

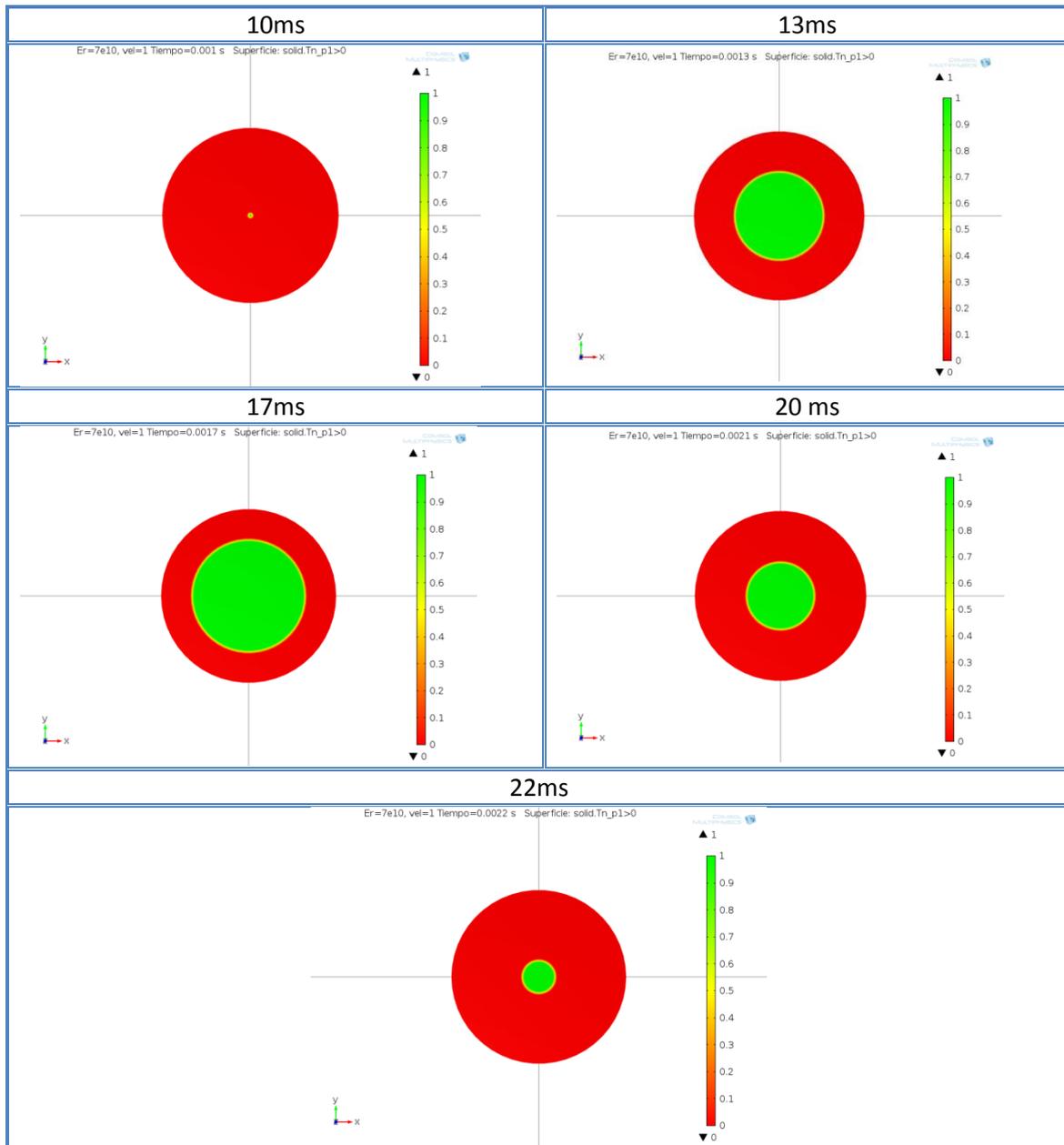


Tabla IV.1 Frontal del área de contacto desde 10ms hasta 0.22ms. Elaboración propia.

- Presión de contacto máxima:** A continuación se muestra la distribución de la presión de contacto. En la Figura IV.6 se puede ver la presión máxima en función del tiempo, y en la Figura IV.7 una serie de distribuciones de presión en función del radio de contacto. En esta última se puede ver que los máximos se producen en el eje central.

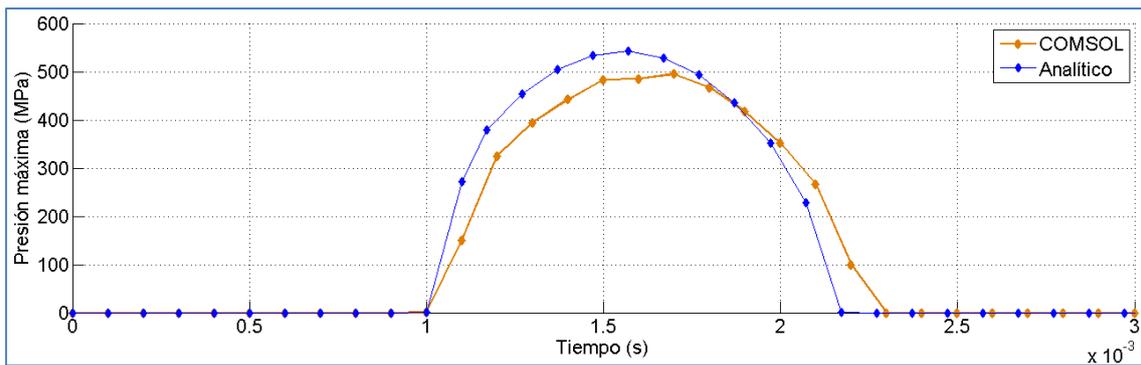


Figura IV.6 Presión de contacto. Elaboración propia.

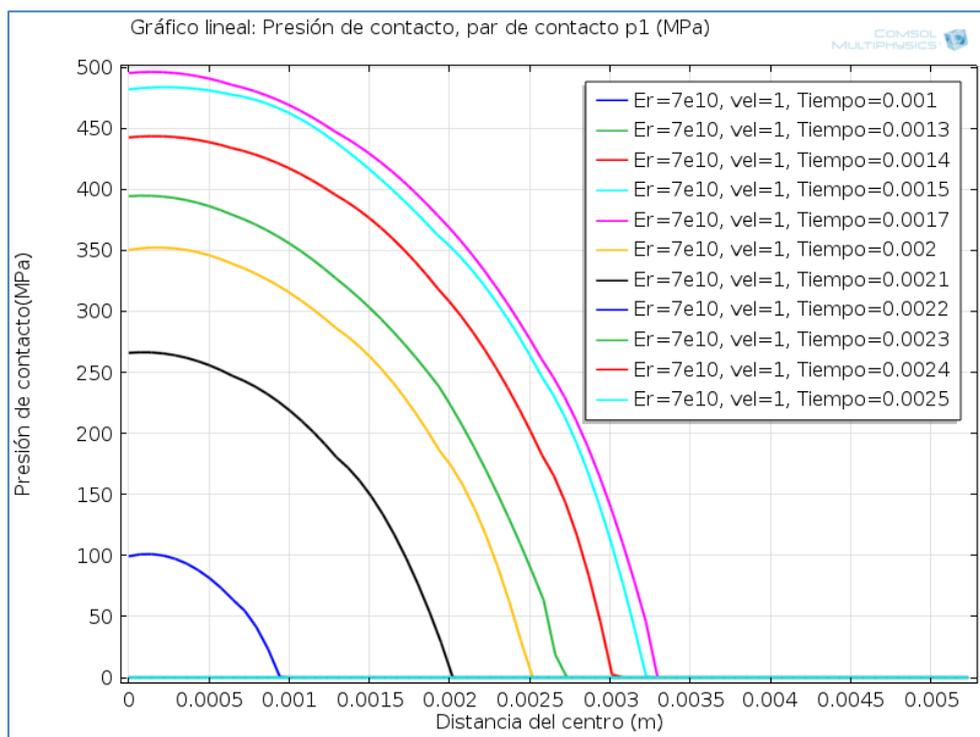


Figura IV.7 Distribución de presiones vs radio de contacto. Elaboración propia.

- Penetración:** La mecánica del choque implica que según Hertz al colisionar ambos objetos se producen presiones y otros efectos en el contacto. Estos dependen de la magnitud de la penetración. Para este caso se muestra, además de la gráfica de la penetración en función del tiempo, una secuencia de imágenes de las dos esferas durante el impacto. Se puede apreciar las marcas negras que indican la posición inicial donde comenzaron ambas esferas.

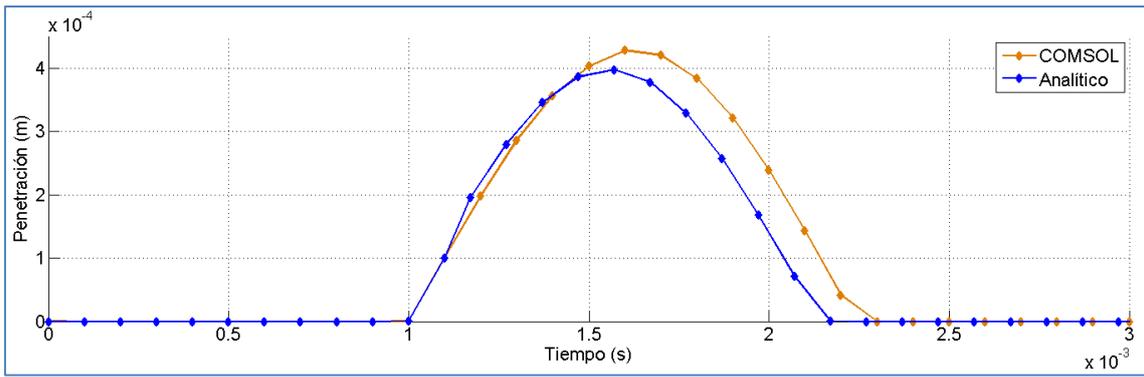


Figura IV.8 Penetración. Elaboración propia.

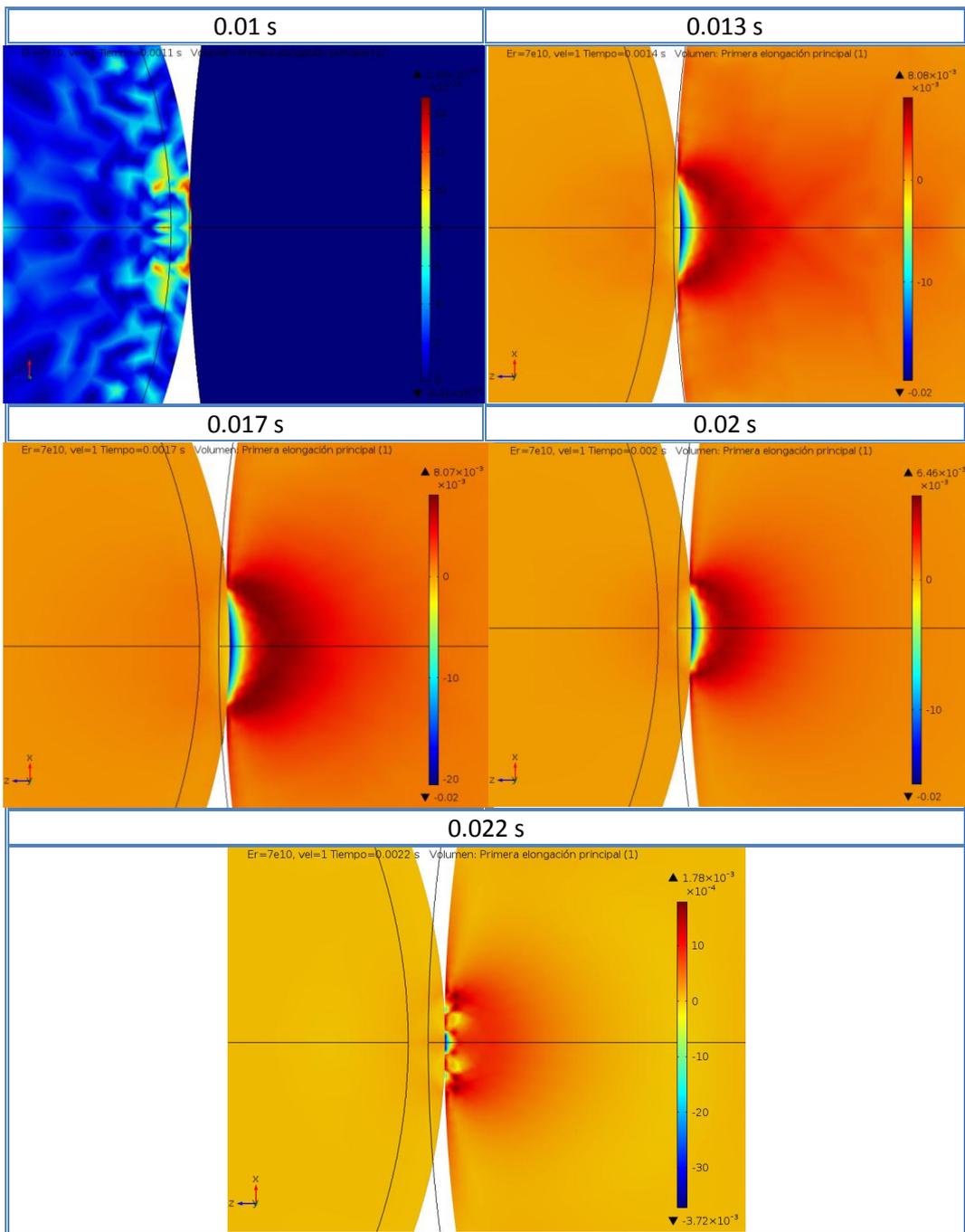


Tabla IV.2 Lateral del área de contacto de 10ms a 22ms. Elaboración propia.

II. Mecánica de contacto

La mecánica del contacto es de particular interés porque, aunque parecería intuitivo pensar que el daño se produce donde existe la presión máxima, es decir, en el punto central de la superficie, esto no resulta ser así. Los elementos que soportan más tensión del material no están en la superficie, sino ligeramente por debajo de esta, como se comprobará más adelante.

En el caso de dos esferas impactando, la presión en el contacto está dada por la ecuación (5) y las tensiones superficiales ($z=0$) vienen dadas en coordenadas polares dadas por las siguientes expresiones, cuando $r \leq a$ es decir, cuando medimos la distribución de tensiones en un radio r menor que el radio de contacto a , se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{rr}/p_0 = \frac{(1-2\nu)a^2}{3r^2} \left(1 - \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right) - \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$\sigma_{\theta\theta}/p_0 = \frac{(1-2\nu)a^2}{3r^2} \left(1 - \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right) - 2\nu \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

$$\sigma_{zz}/p_0 = \frac{-p(r)}{p_0} = - \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Y fuera de la zona de contacto ($r \geq a$) se tienen:

$$\sigma_{rr}/p_0 = -\sigma_{\theta\theta}/p_0 = \frac{(1-2\nu)a^2}{3r^2} \quad ; \quad \sigma_{zz}/p_0 = 0 \quad (21)$$

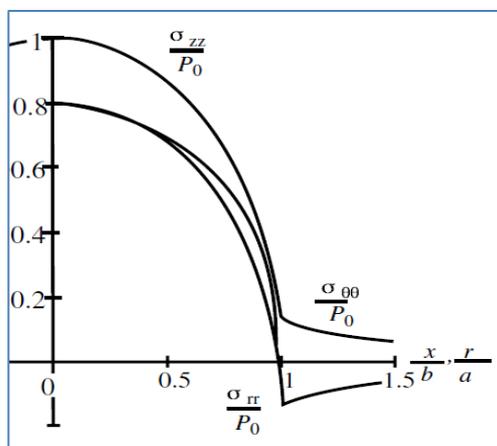


Figura IV.9 Distribución de tensiones superficiales para $\nu=0.3$ [4]

La forma de estas tensiones superficiales viene dado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** La tensión radial σ_{rr} es de tracción fuera de la zona del radio de contacto. En este punto se produce la mayor tensión de tracción del material y es responsable de las “grietas de anillo” en los materiales frágiles.

En el caso del análisis computacional, se puede observar cómo se forman estas curvas a partir de la tensión que soportan en cada una de sus componentes R, θ , Z normalizadas. Las tres componentes forman parábolas con su máximo en el eje central y un cambio de pendiente pronunciado a partir del radio de contacto. La componente R disminuye hasta alcanzar su mínimo en un valor negativo cercano a 0 y después se mantiene constante mientras que la tensión θ se mantiene en un valor positivo. Se puede comprobar la semejanza con la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** teórica.

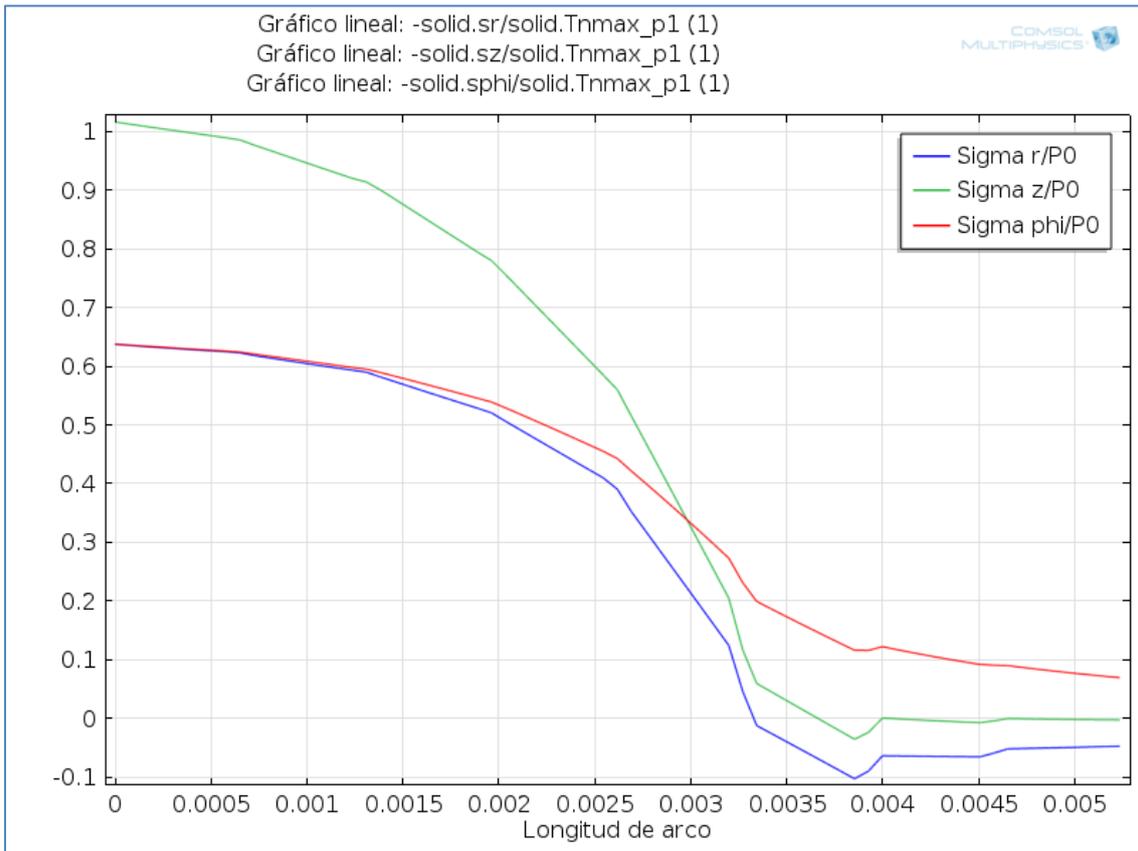


Figura IV.10 Tensiones superficiales. Elaboración propia.

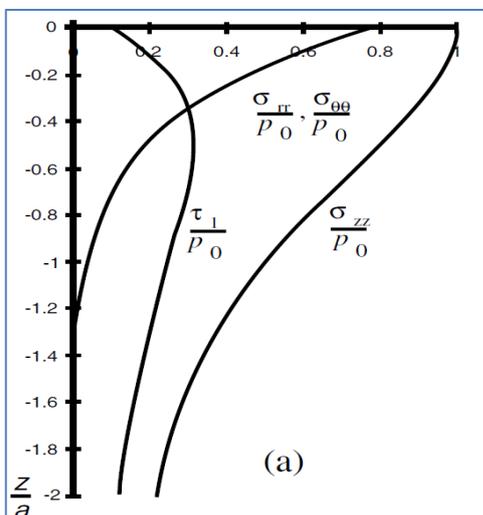


Figura IV.11 Distribución de tensiones subsuperficiales para $\nu=0.3$ [4]

La distribución de tensión para tensiones subsuperficiales sigue la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** En ella se puede ver como a lo largo del eje Z las tensiones principales σ_{zz} , σ_{rr} y $\sigma_{\theta\theta}$ y la **tensión tangencial 1**, la cual viene dada por:

$$\tau_1 = \frac{|\sigma_{zz} - \sigma_{rr}|}{2} \quad (22)$$

Como se puede ver, el máximo de τ_1 normalizado ocurre a una determinada profundidad, denominada tensión tangencial máxima: τ_{max}/p_0 ^[4]. Esto provoca que como se ha comentado, se den mayores tensiones totales en el interior que en la superficie. Este valor de profundidad está muy influenciado por el coeficiente de Poisson, como se muestra en la tabla siguiente.

ν	Material	τ_{max}/p_0	z/a
0.2	Vidrio	0.335	0.45
0.3	Acero	0.310	0.48
0.33	Aluminio	0.303	0.5
0.5	Goma	0.267	0.55

Tabla IV.3 Profundidad relacionada con ν . Elaboración propia.

En la Figura IV.12 se muestra de nuevo como con la gráfica teórica (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), donde se obtiene una tensión tangencial τ_1 que provoca que la suma de las tensiones subsuperficiales sea de una magnitud superior a la de la superficie exterior. En este caso los ejes aparecen intercambiados, el eje X de la figura teórica es la tensión y el eje Y es la profundidad, aunque se mantiene el valor de compresión como positivo.

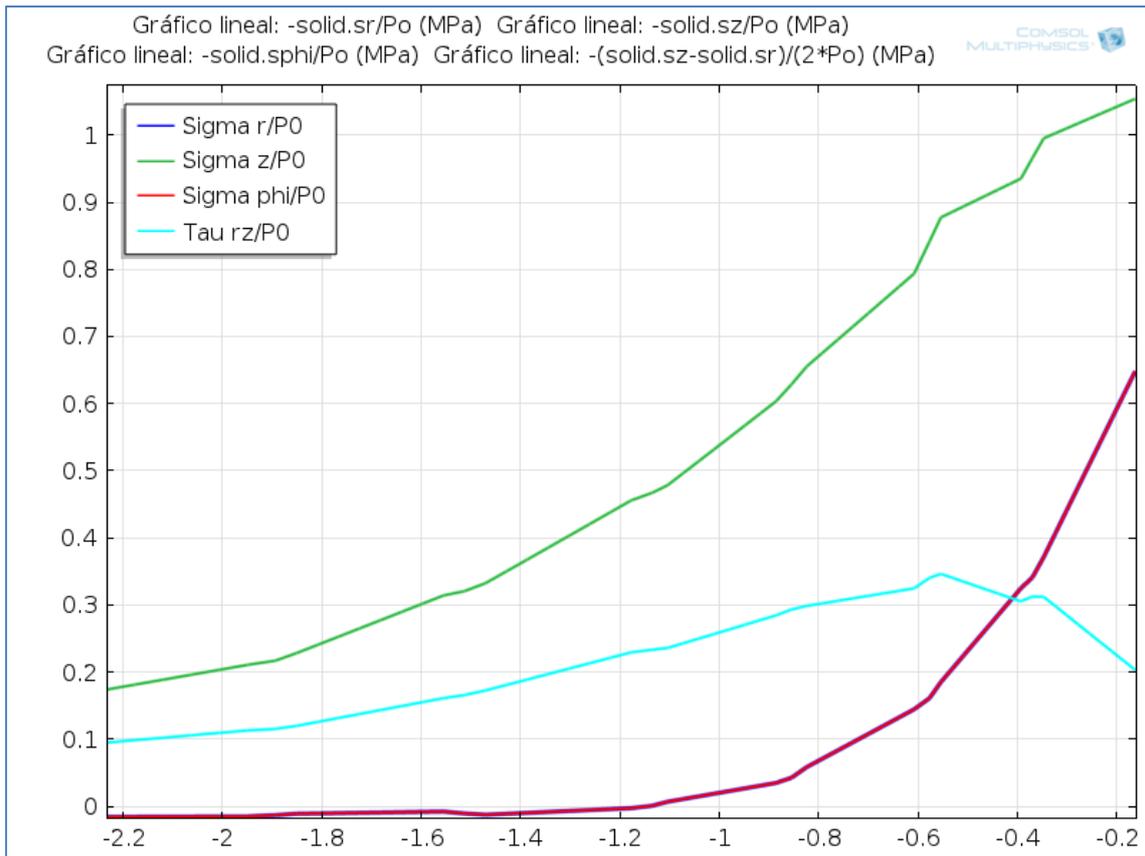


Figura IV.12 Tensiones subsuperficiales. Elaboración propia.

III. Teorías de fallo

Ya se han podido ver valores importantes para la mecánica estructural. Bajo la idea de aprovechar las magnitudes que brinda para en análisis de la colisión, también se quieren incluir las teorías de fallo. Estas teorías miden en conjunto las tensiones, para obtener unos criterios sobre dónde y a partir de que magnitud se producirá la plastificación del material. En este caso eso es importante dado que se parte de utilizar la ley de Hertz y en postulaciones acerca de que los materiales son elásticos lineales, y se deben tener en consideración estas magnitudes para evitar realizar análisis inadecuados.

Estas magnitudes están intrínsecamente relacionadas con los valores mostrados anteriormente en la *Mecánica de contacto*. Lo característico y común a estas teorías es que **el fallo o máxima tensión** se produce debajo de la superficie del material, no justo donde se produce el impacto. Además permite añadir al estudio puntos que no se tenían en cuenta en la mayoría de estudios de seguridad en robótica, pues donde se concentra la tensión puede suponer un foco de dolor.

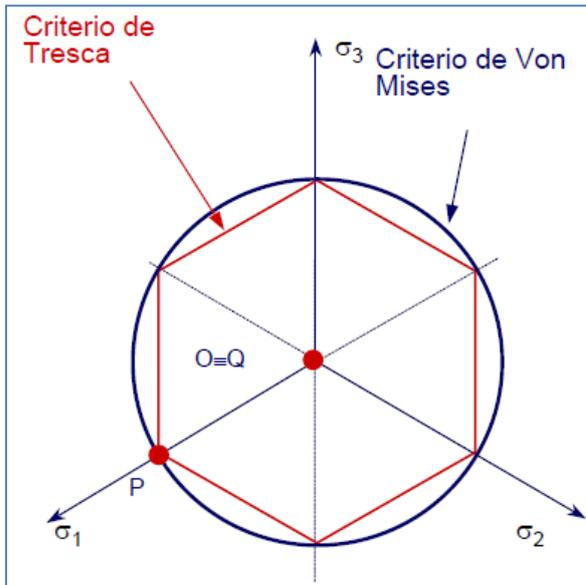


Figura IV.13 Diagrama de criterios de fallo en ejes principales. [56]

Dos de los criterios más importantes son el de la **tensión de Von Mises y de Tresca**, estos criterios plantean un lugar de plastificación.

El **lugar de plastificación** consiste en: determinar unos ejes de tensión llamados principales, sobre los cuales plantear el estado tensional, que resulta de ajustar las magnitudes en ejes R, θ , Z a dichos ejes. Sobre estos ejes, plantear un lugar geométrico de los puntos (un hexágono en el caso de Tresca, y un círculo en el caso de Mohr) que represente el límite de plastificación. De esta manera, los

puntos situados fuera de las formas geométricas de la Figura IV.13 soportan tensiones superiores a las de plastificación.

Para entender mejor dichas teorías primero se ha de explicar en qué consisten **las tensiones principales**, medida sobre la que se calculan.

σ_1, σ_2 y σ_3 son dichas tensiones principales del material. Estas tensiones vienen dadas por colocar la matriz de tensiones de acuerdo a tres direcciones recíprocamente perpendiculares, de tal manera que las que las tensiones de cortadura se anulen y por lo tanto, sólo existan tensiones normales. A esas tensiones se les llama tensiones principales y a las direcciones, direcciones principales. Dichas tensiones principales se analizaron por COMSOL® y se muestran en la Tabla IV.4. A partir de ellas se puede realizar tanto el estudio de VM (Von Mises) como el de Tresca.

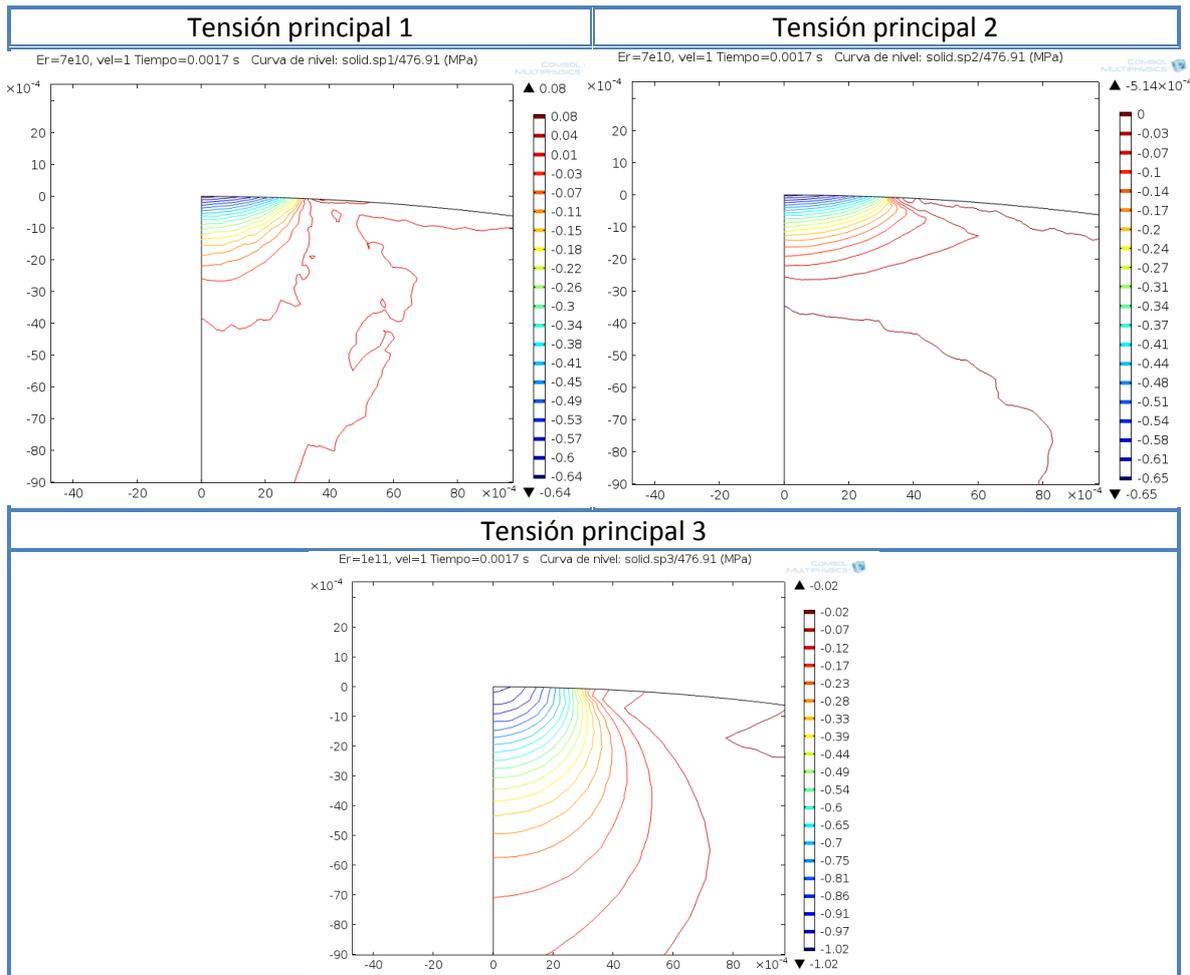


Tabla IV.4 Tensiones principales. Elaboración propia.

- **Tensión Tresca:** Esta teoría plantea que la plastificación se inicia cuando la tensión tangencial máxima del estado tensional considerado alcanza un valor crítico ^[56]. El criterio parte de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{Tresca} = |\sigma_1 - \sigma_3| \leq \sigma_y \quad (23)$$

$$\sigma_{Tresca} = |\sigma_1 - \sigma_2| \leq \sigma_y \quad (24)$$

$$\sigma_{Tresca} = |\sigma_2 - \sigma_3| \leq \sigma_y \quad (25)$$

Donde σ_y del límite de plastificación o *yield stress* en inglés. Como las tensiones se ordenan por su magnitud, la diferencia entre las tensiones 1 y la 3 es la mayor, por lo que es la más crítica. Se pueden observar como el rango de valores entre los que está asegurado que se mantiene en un sólido elástico lineal es el delimitado por el hexágono de la Figura IV.13. **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Posteriormente se muestra el resultado en COMSOL® en la Figura IV.15.

- **Tensión de Von Mises:** Es una magnitud física que en ingeniería estructural se usa en el contexto de las teorías de fallo, cuya ecuación es:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \leq \sigma_y \quad (26)$$

Esta teoría amplía el margen para el cual se mantiene en estado elástico lineal al círculo de la Figura IV.13. Se puede observar en la en la Figura IV.14 que representa la esfera seccionada y su distribución de tensiones normalizada, como el valor máximo se produce -como se indicó anteriormente- a una distancia de la superficie.

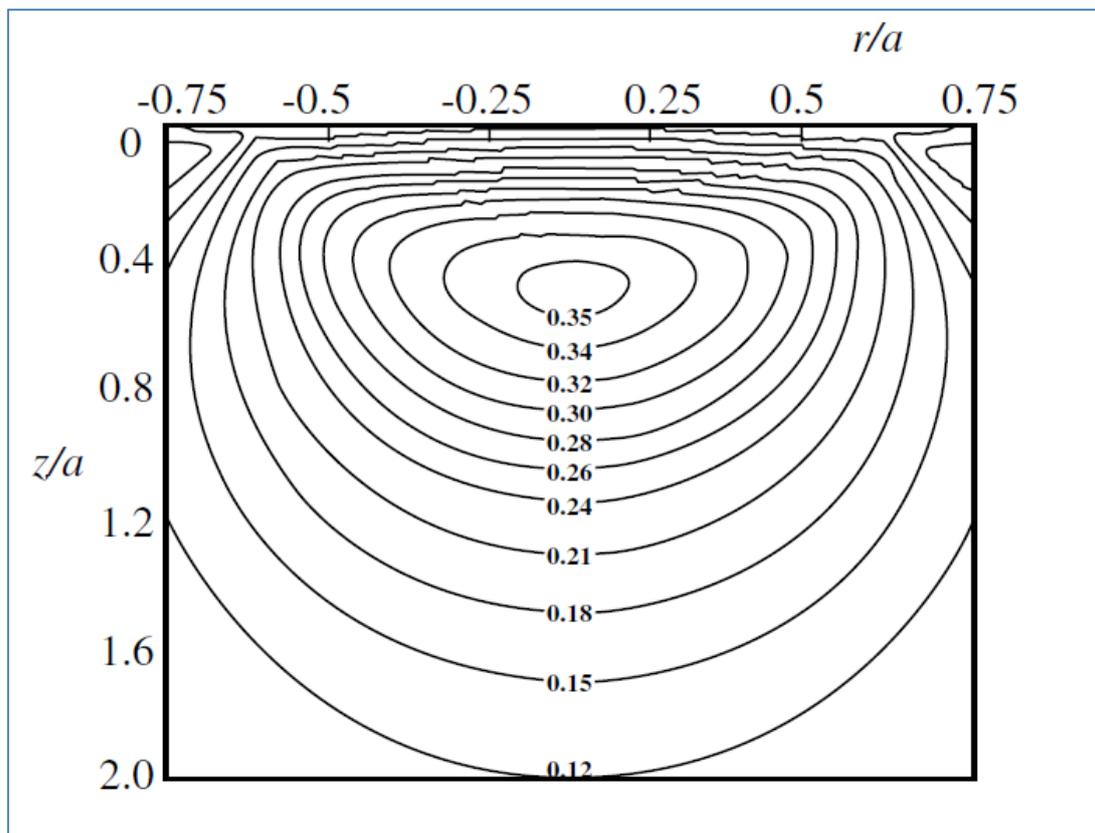


Figura IV.14 Distribución de la T.V.M. normalizada. Sección del corte de la esfera [4]

Resulta entonces que la tensión que va a soportar el material es máxima en la región a la distancia τ_{max}/p_0 ^[4]. Esto provoca que se originen las fracturas en los materiales en el interior y no en la superficie.

A continuación se muestra el resultado de dichas tensiones de fallo analizadas por COMSOL®. En ambas se puede comprobar que su valor máximo se encuentra en el interior, se puede ver esto en el caso de la tensión de VM (Figura IV.16) que se puede

comparar con la distribución teórica de la Figura IV.14. La tensión de Tresca se muestra en la Figura IV.15. En la literatura se utilizan estos valores para cuantificar lesiones cerebrales ^[19] pero dichos resultados exceden los límites de la lesión leve, por lo que no tienen lugar en este trabajo.

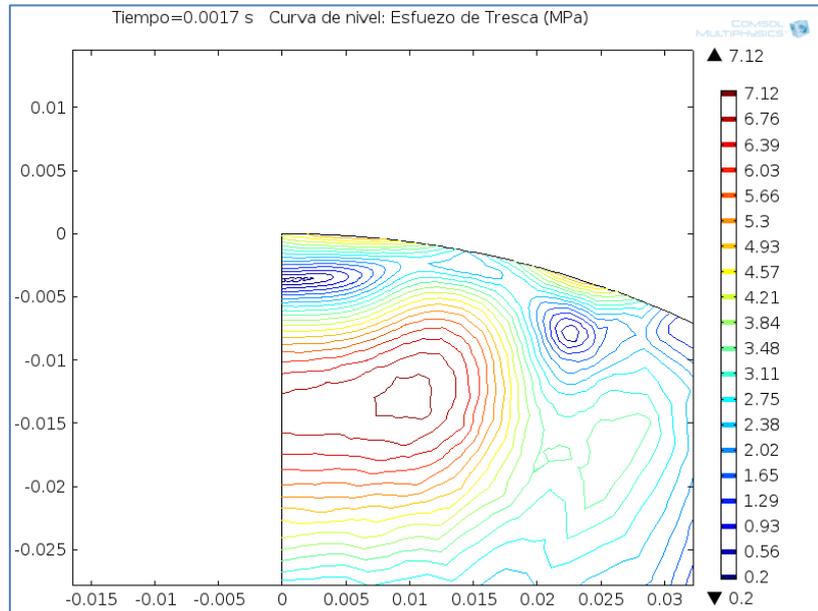


Figura IV.15 Tensión de Tresca. Elaboración propia.

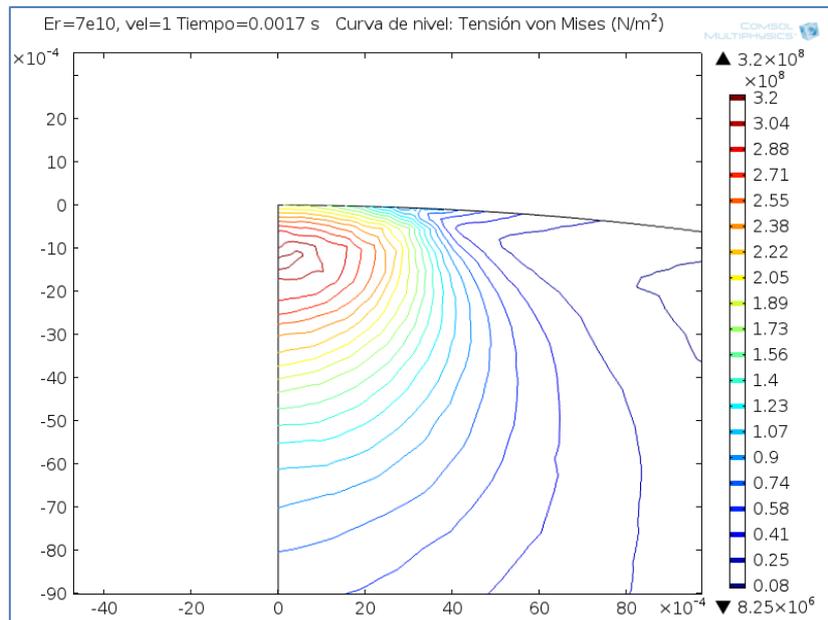


Figura IV.16 Tensión de Von Misses. Elaboración propia.

- **Tensión hidrostática:** La media de las tres tensiones principales da como resultado la tensión hidrostática. No provoca plastificación ^[56].

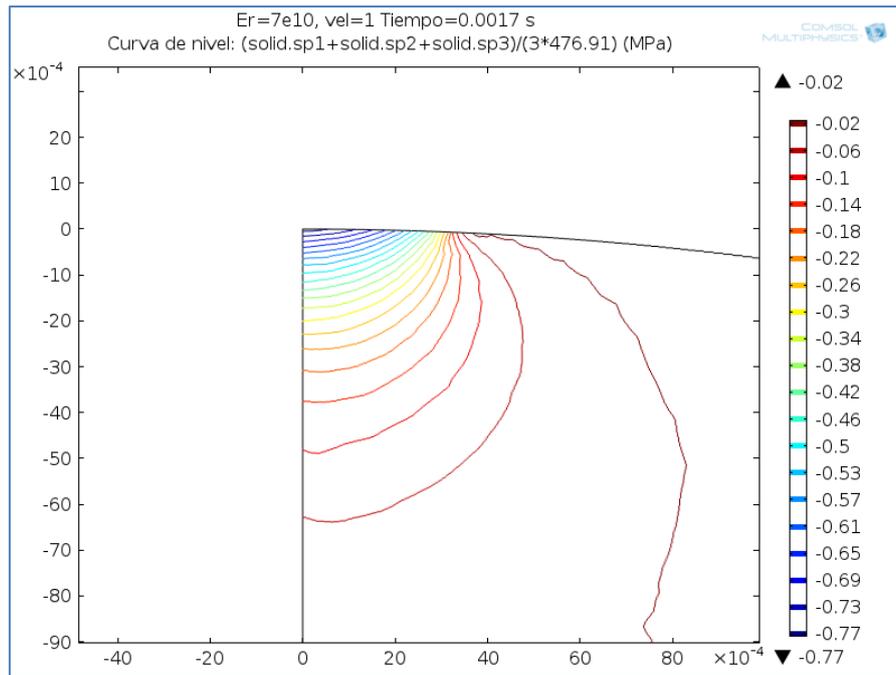


Figura IV.17 Tensión hidrostática o volumétrica. Elaboración propia.

Lo principal que aporta este apartado del estudio es conocer la potencialidad del COMSOL® así como otros métodos de EF. Estas magnitudes de fallo sirven sobre todo para tener controlada las tensiones de tal manera que no se produjera plastificación, arruinando las hipótesis del estudio. En este caso con estas magnitudes tan pequeñas de fuerza y velocidad, con los materiales escogidos, no superan las tensiones de fluencia y las hipótesis son correctas [29].

En el caso de los seres humanos, toda esta información da magnitudes con que se podría comparar para analizar los efectos que tienen las colisiones internamente, como son la ruptura de vasos sanguíneos provocando hematomas subcutáneos y que hemorragias internas. Es un potencial enorme el que desarrollar con el MEF para analizar con resultados gráficos acerca de múltiples magnitudes.

Resulta pues una lástima que no se encontraron valores de otros estudios de seguridad con los que comparar para contrastar los resultados, pero esto abre puertas para futuros estudios que se desarrollen.

IV. Magnitudes de seguridad pHRI

Para garantizar unos parámetros de seguridad que eviten no solo las lesiones graves y los golpes fatales. Es necesario que sea posible relacionarse con los robots de manera que no se sufra por sus golpes lesiones leves como norma. Para ello se ha de tratar los diferentes casos de lesión en tejido blando:

- **Abrasiones o excoりaciones:** una ablación de las partes de la epidermis toda la dermis.
- **Contusiones o hematomas:** un tipo de relativamente menor hematoma de tejido en el que los capilares son dañados por trauma, permitiendo que la sangre se filtre en el intersticial que rodea tejidos.
- **Laceración:** desgarro de los tejidos y cortes irregulares causados por un impacto contundente en el tejido blando que se encuentra sobre tejido duro. Es más ancho que profundo.
- **Punción:** una ruptura o una herida abertura en la piel causada por un borde afilado limpio, que por lo general se caracteriza por ser más profundo que ancho.

En este trabajo, se centra en la **laceración y contusión**. Las contusiones son una lesión relacionada con la densidad de energía de deformación elástica ^[59]. Sin embargo, hemos de tener en cuenta que la tolerancia lesión del hematoma está por debajo de este valor. Las laceraciones ocurren por lo general donde las capas delgadas de tejido blando están directamente ubicadas por encima de material duro como por ejemplo el cuero cabelludo. La aplicación de tensión de tracción, que supere la tensión de tracción máxima de la piel, potencialmente conduce a la fractura.

Se utilizan como límites de tensión última o de rotura, de tracción para la piel 1 MPa ^[60], y la densidad de energía máxima de 2,52 MJ/cm³ como la lesión umbrales de laceración y contusión, respectivamente.

Para realizar dichos cálculos se utilizan los resultados obtenidos de COMSOL® si bien en este caso el choque no está completamente modelizado teniendo en cuenta la piel, pero sirve para observar como resultan las magnitudes para compararlas con el desarrollo posterior.

- **Densidad de energía de deformación elástica:** La energía de deformación provoca contusiones y hematomas a partir del límite de 2,52 J/cm². En la Figura IV.18 se puede ver como en prácticamente todo el área de contacto se supera este límite, y tratándose del hueso, se tendría que de ver si se produce fractura dependiendo de la fuerza y en qué parte ocurre el impacto (ver Figura IV.2).

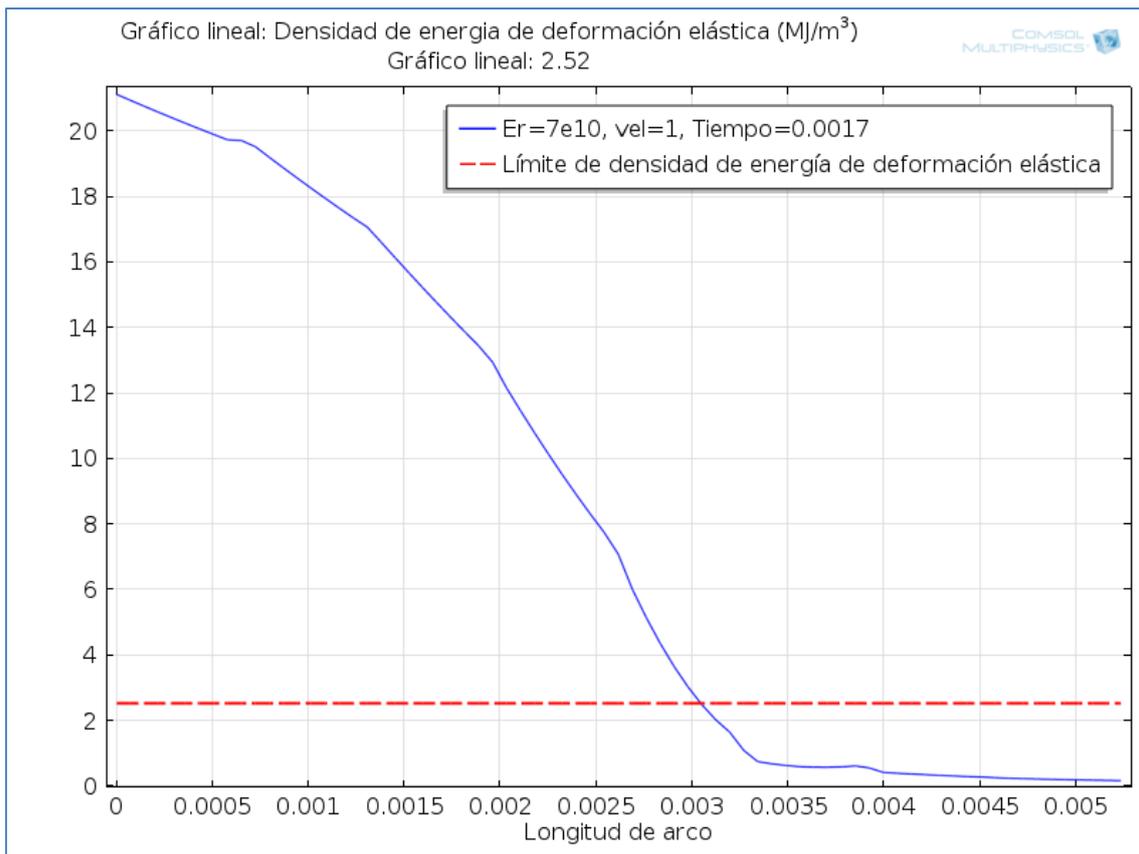


Figura IV.18 Densidad de energía de deformación elástica a lo largo de la superficie de contacto. Elaboración propia.

- Tracción en dirección tangencial:** Es la tensión que soporta el material en dirección circunferencial ^[29]. Como se puede observar en la Figura IV.19 Hay que referirse a la tensión que va en dirección radial según la figura, no la tensión radial del cráneo. Esta tracción tiene como límite 1 MPa y se supera con creces, pero para valorarlo es necesario modelizar la piel.

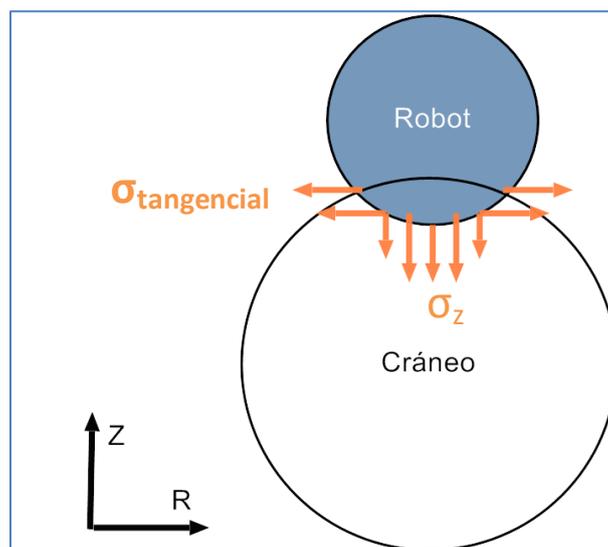


Figura IV.19 Tensiones en durante el choque. Elaboración propia.

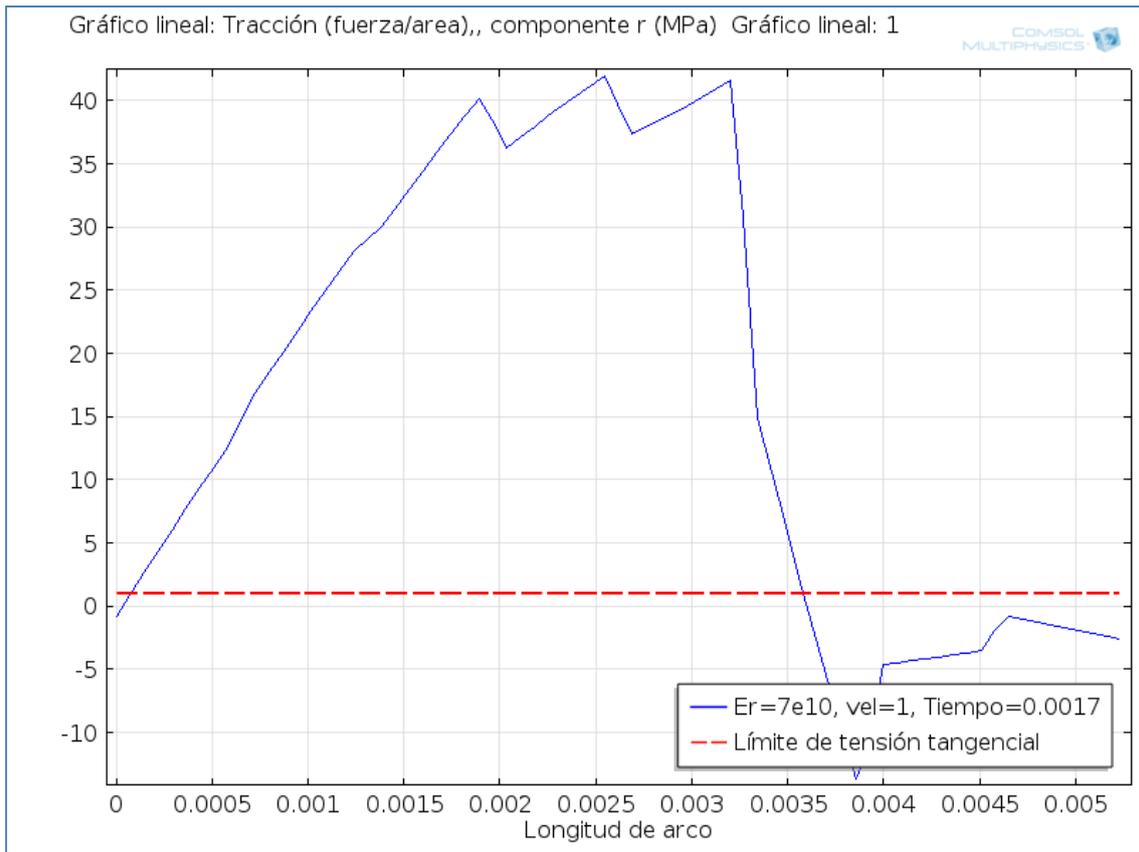


Figura IV.20 Tracción en dirección tangencial en la zona de contacto. Elaboración propia.

c. Variaciones del caso general:

Una vez realizado el caso previo, se ha planteado avanzar en el conocimiento de los parámetros de **diseño y forma del brazo robótico** y cómo afectan dichos valores a la pHRI. Para ello se ha de variar de manera independiente mediante un barrido (una secuencia de valores a intervalos regulares) de cada parámetro fundamental del impacto, de manera que se aprecie alguna tendencia o se pueda desestimar tal valor como característico del diseño.

Dado que del parámetro del cual se deriva la función de la presión, y por tanto los efectos dañinos del choque ^[29], es a partir de su máximo, se van a realizar los barridos de parámetros en función de la presión máxima para obtener las conclusiones.

I. Parámetros físicos del modelo

A continuación se desarrolla solo el concepto de **presión máxima total** cambiando los parámetros físicos y la forma del modelo, además de mostrar diferentes gráficas para distintas velocidades. De forma que se pueda estudiar el efecto que estos provocan en el diseño del robot.

Para obtener los siguientes resultados, se mantuvieron todos los parámetros del modelo anterior salvo la velocidad, que varía de 0.5 a 2 m/s, y otro parámetro físico cada vez, esto se conoce como barridos paramétricos.

- Módulo de Young:** El siguiente estudio se emprendió variando los parámetros típicos con el que se fabrican los robots tanto industriales como de servicio (como el aluminio 70 GPa). En este rango se encuentran la mayoría materiales típicos de los robots de servicio ^[14,29].

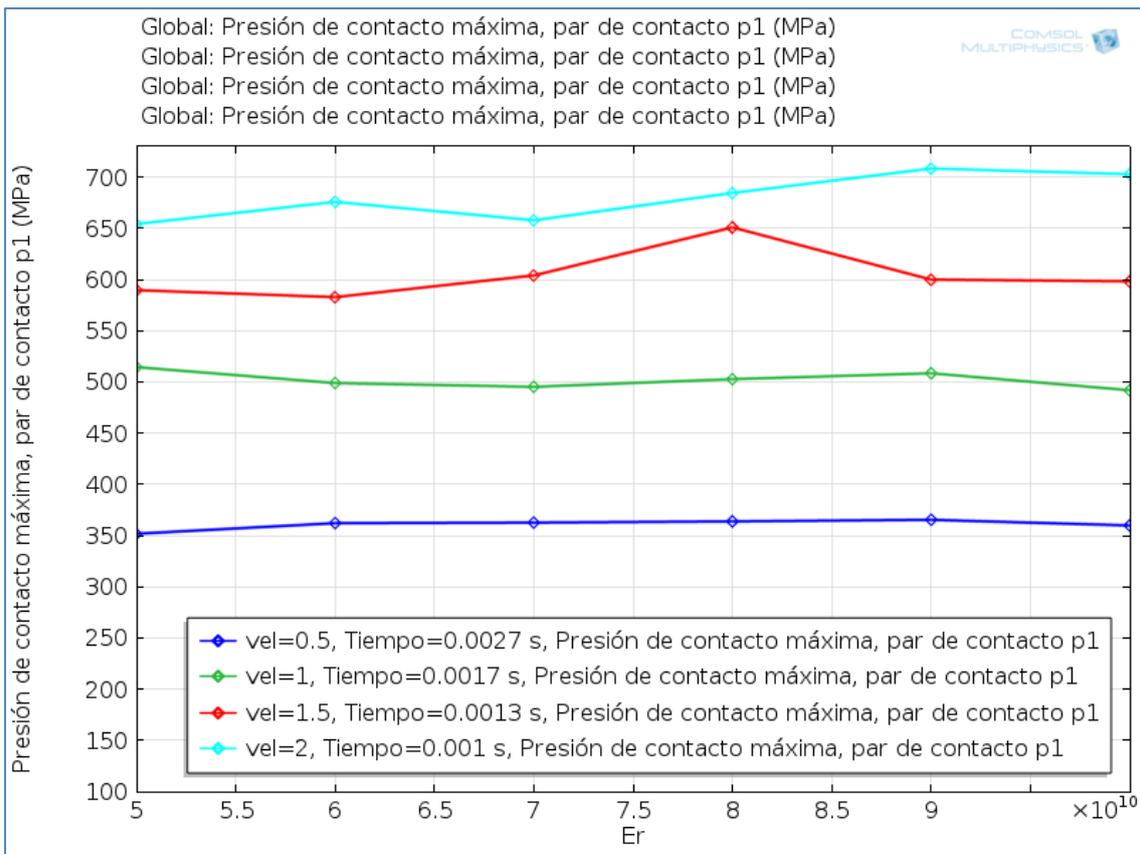


Figura IV.21 Presión máxima variando Er en Pa. Elaboración propia.

- Coefficiente de Poisson:** Este coeficiente relaciona mediante la ley de Hooke ^[56] cuando se produce la deformación en una dirección, esta magnitud relaciona la variación de deformación que sufren las direcciones perpendiculares. Como se muestra a continuación esta magnitud no resulta significativa en la mayoría de parámetros, como se puede observar en la Figura IV.22. (sus valores están acotados entre 0 y 0.5). La variación en tendencia es prácticamente nula, de hecho se aprecian más los errores por aproximación de los EF.

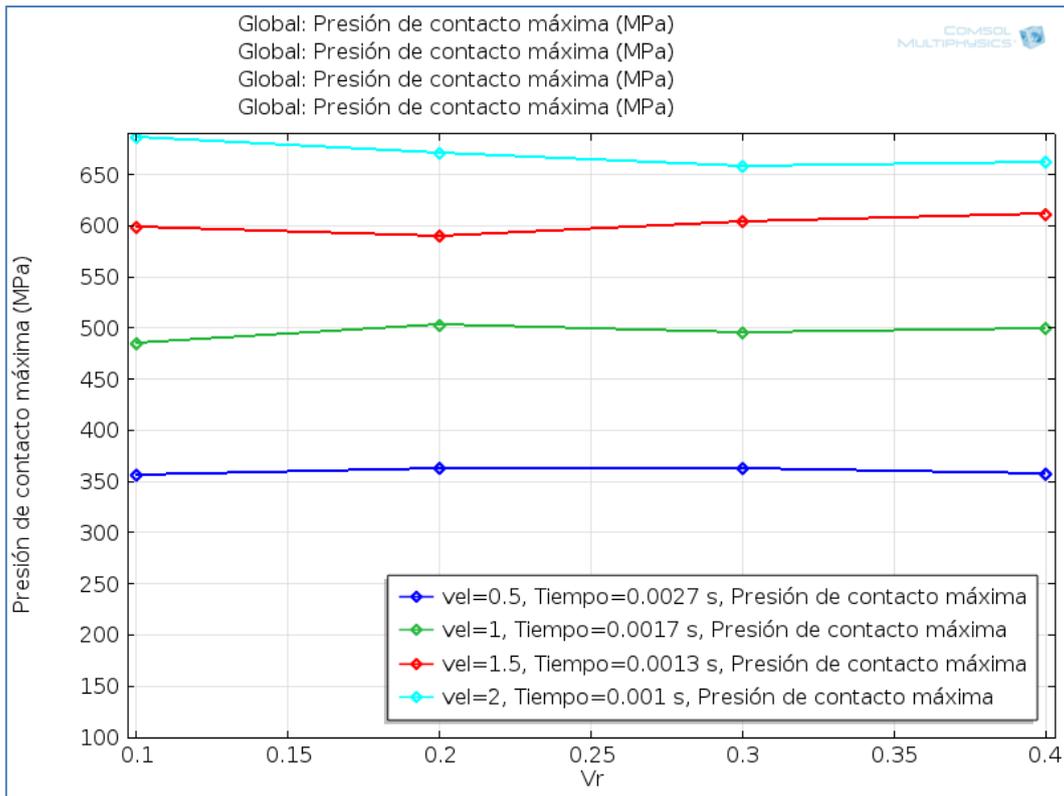


Figura IV.22 Presión máxima variando Vr. Elaboración propia.

- **Inercia reflejada (masa equivalente):** En este caso se aprecia una gran tendencia refrendada por los estudios de Hadaddin y cia. [29].

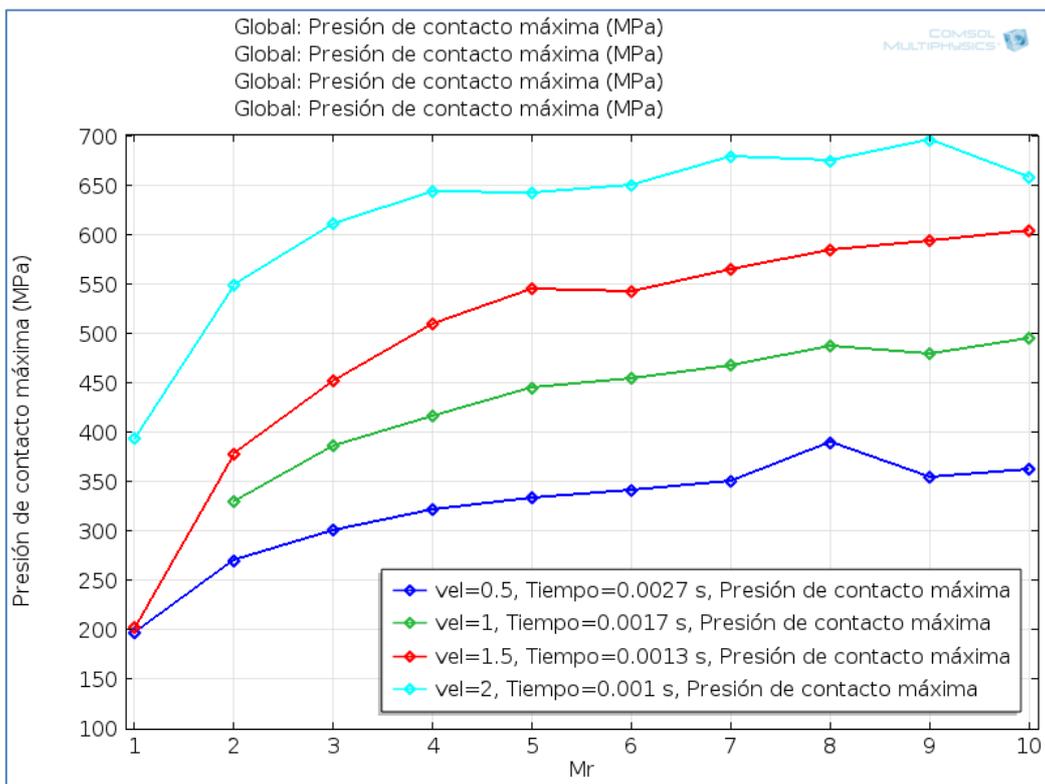


Figura IV.23 Presión máxima variando Mr en kg. Elaboración propia.

Los valores forman una curva ascendente partiendo desde 1kg. Sufren por tanto un aumento de presión mucho mayor en los **valores próximos a 1kg** por cada kilogramo añadido. Esta correlación desaparece a medida que van siendo mayores las magnitudes de Mr y deja de tratarse de un parámetro principal en la presión máxima.

II. Parámetros de forma

En estos casos de estudio, además de las velocidades, se varían ciertos parámetros de forma típicos de las zonas de contacto de los eslabones de los robots. Resulta igual o más fundamental que las características del material, pues la presión está directamente relacionada con la superficie que está realizando el contacto.

- Radio esférico:** Este barrido paramétrico trata de mostrar el efecto del incremento de radio de la esfera que representa al robot. Para ello el barrido abarca desde 2 cm hasta 10 cm realizando un estudio cada 2 cm. De esta forma abarcamos gran parte de los radios de las articulaciones de los robots de servicio hoy en día. Podemos observar como la presión aumenta en gran medida al reducir el radio por debajo de **3 cm**, pero a partir de este valor, la pendiente de las gráficas se vuelve mucho menor, y deja de ser un factor tan determinante un aumento de 2cm de radio.

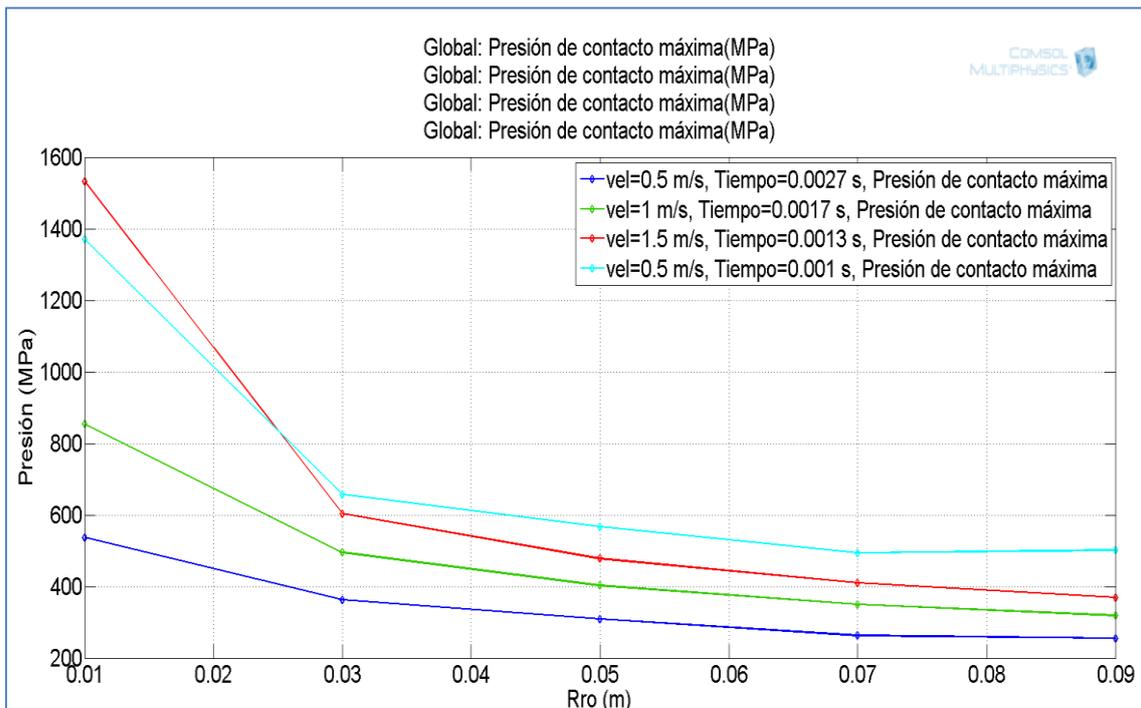


Figura IV.24 Presión máxima variando Rro. Elaboración propia.

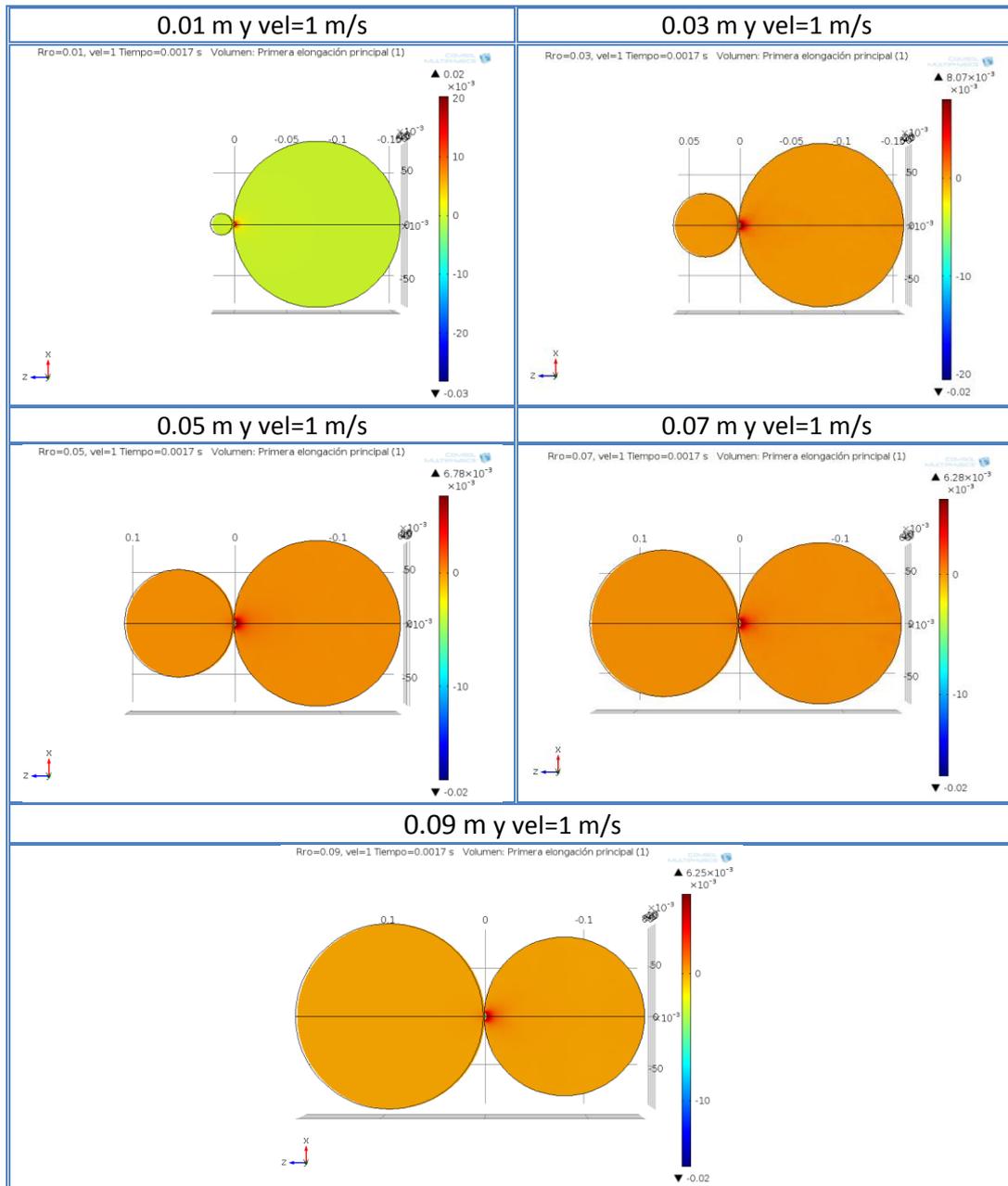


Tabla IV.5 Barrido de parámetros con circunferencias variando el radio. Elaboración propia.

- Diagonal mayor de un eslabón con forma de elipsoide:** Para cambiar de forma, y dado que los choques con el cuerpo humano producen contactos elípticos ^[58] se realiza este barrido que desde 0.015m a 0.06m varía la diagonal. Se aprecia el cambio de pendiente entre 1.5 y 3 cm, pero no resulta tan pronunciado como el caso anterior.

Esto permite analizar casos con una superficie de contacto muy pequeña, que inducen fuertes presiones. Esto complica obtener resultados más precisos y tener que ajustar los parámetros del

resolvedor y se necesita ajustar la malla para facilitar la obtención de los resultados correctos.

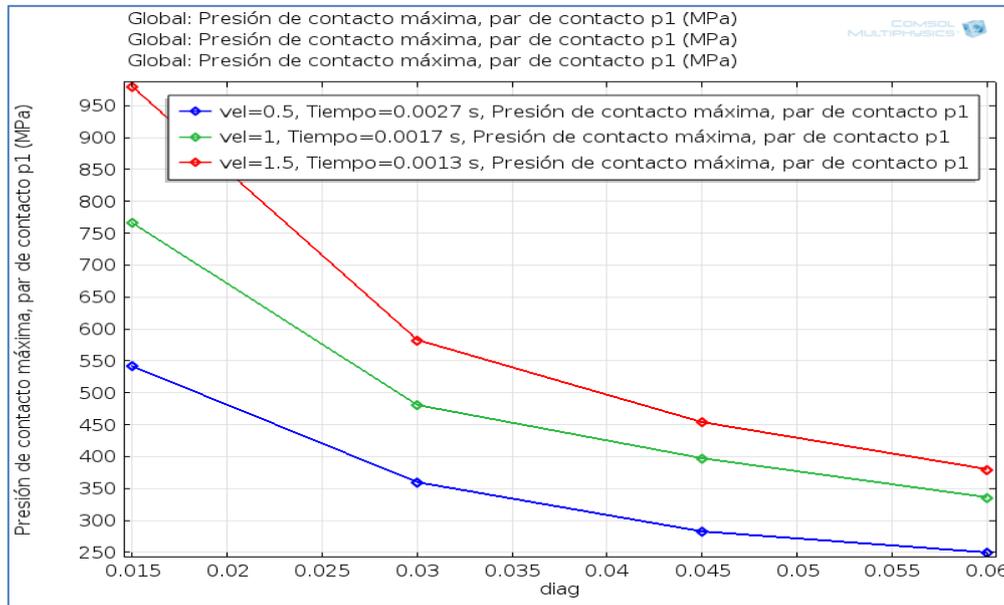


Figura IV.25 Presión máxima variando la diagonal mayor en una elipse en m. Elaboración propia.

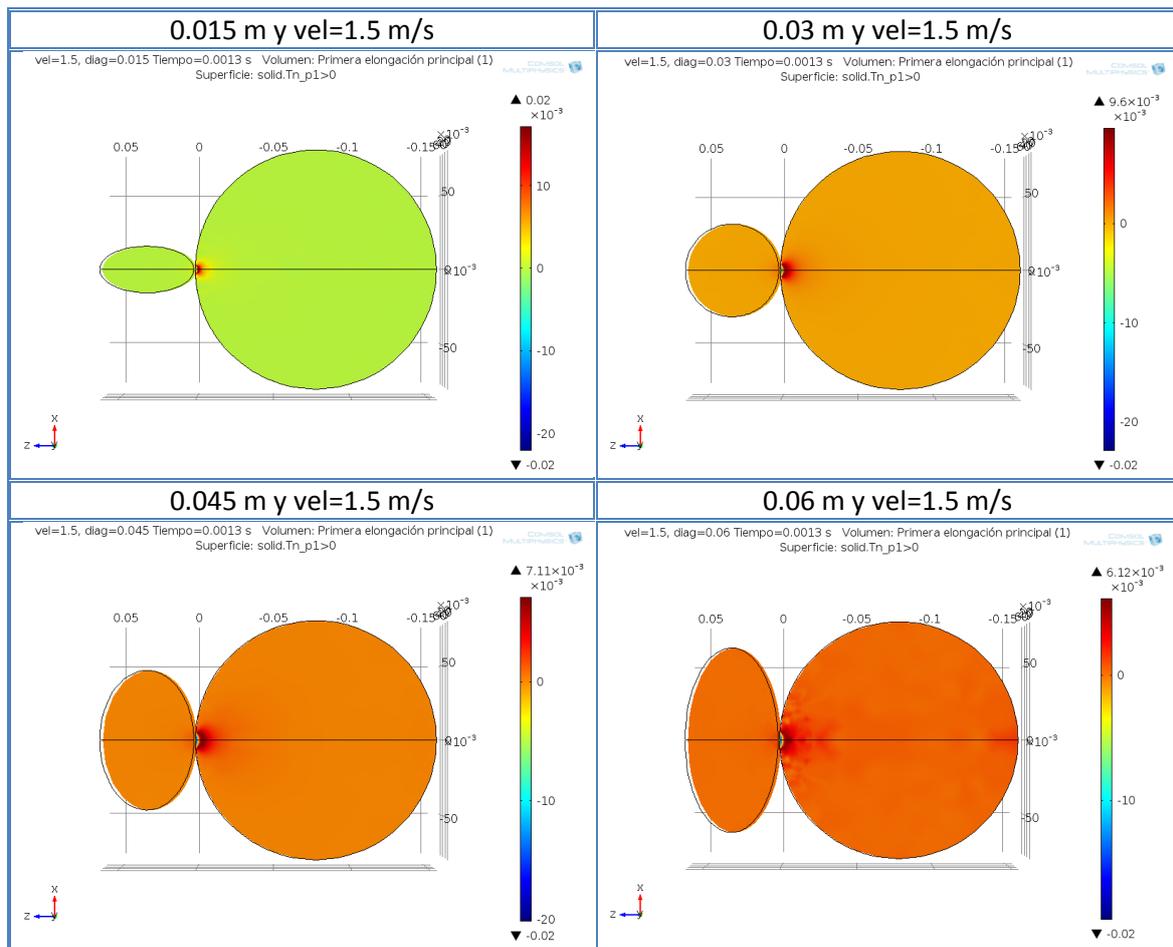


Tabla IV.6 Barrido de parámetros con elipsoides variando un eje. Elaboración propia.

- **Plano cilíndrico:** El caso del plano resulta el caso límite de aumentar la superficie de contacto en cualquiera de los casos anteriores. Para este caso pues solo se muestra una comparativa entre velocidades para la misma forma geométrica.

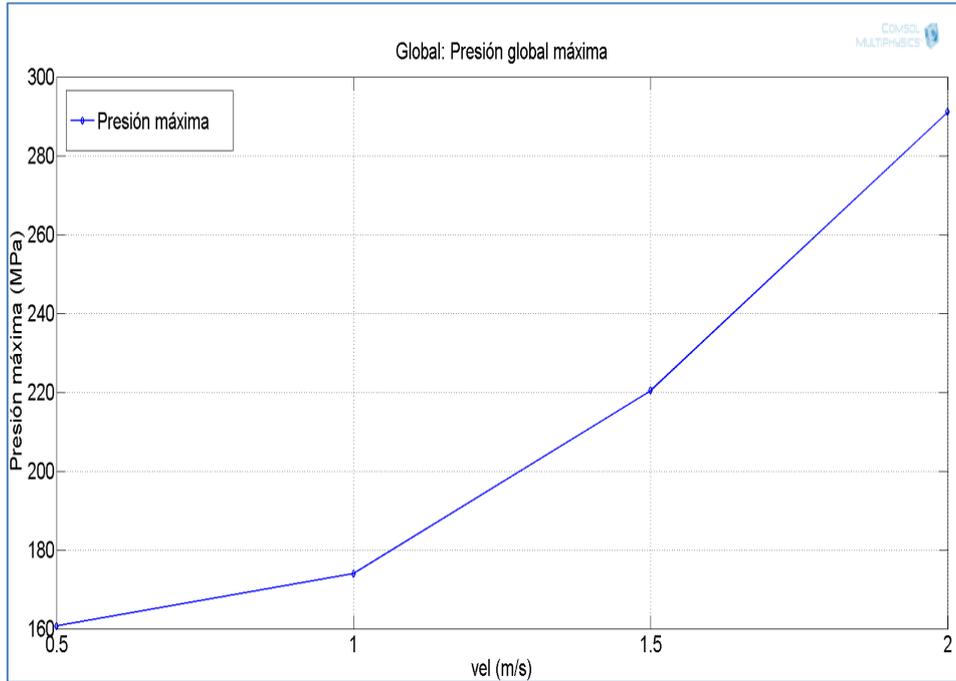


Figura IV.26 Presión máxima en función de la velocidad caso plano. Elaboración propia.

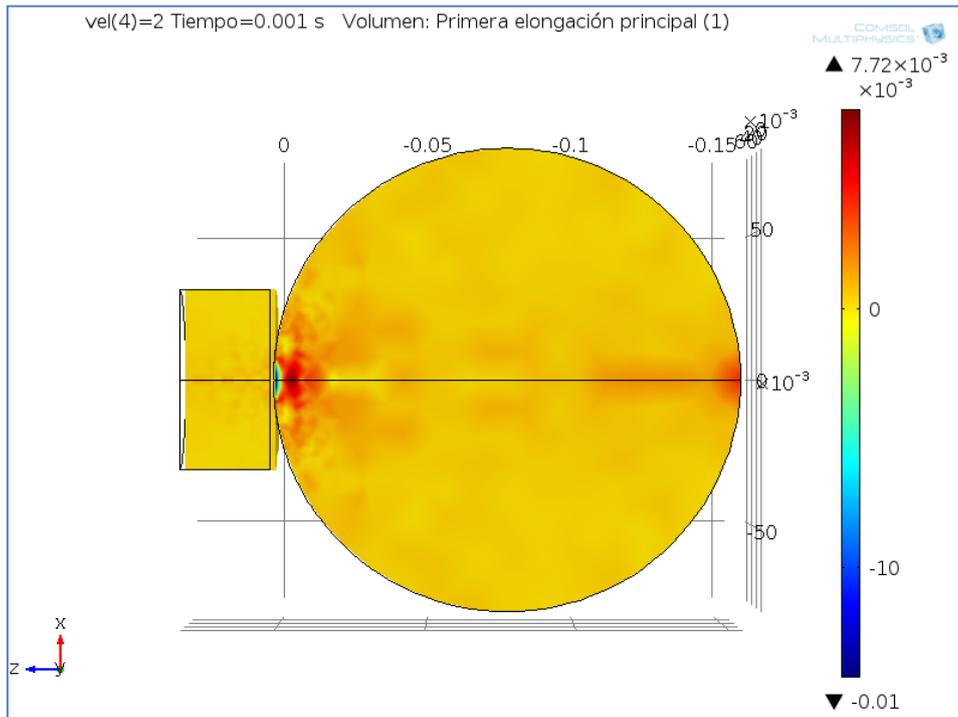


Figura IV.27 Choque de un cilindro plano con la cabeza. Elaboración propia.

d. Coberturas

Debido a todo por el análisis de métodos de seguridad en la robótica, la solución que aporta una cobertura de un material polimérico o algún otro tipo de material elástico de bajo módulo de elasticidad y densidad ayuda a atenuar los daños y lesiones que puede producir un robot trabajando en colaboración con un ser humano. Esto permitirá realizar una comparación con el estudio de Haddadin ^[29] que utilizó el modelo de Hertz con coberturas de manera analítica para el caso de 2 m/s.

A continuación se desarrolla todo el modelo computacional con capas que permite estudiar una modificación del caso anteriormente realizado, pero añadiendo capas para la piel y la cobertura del robot. De esta manera se podrá apreciar los cambios proporcionados por la añadidura de coberturas de seguridad y medir si efectivamente con ciertos parámetros se demuestra con COMSOL la seguridad de utilizar este método.

I. Modelo computacional con capas

En este modelo es necesario añadir una capa de grosor b_p y b_c para la piel y la cobertura de espuma de Poliestireno ^[29] respectivamente. Además, configurar dichos materiales y añadirles las propiedades de la Tabla IV.7.

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción
b_p	0,003	[m]	Grosor
E_p	16,7	[MPa]	M. de Young
ν_p	0,42	-	Coef. Poisson
D_p	1000	[kg/m ³]	Densidad
R_p	$R_h + b_p$	[m]	Radio
b_c	0,02	[m]	Grosor
E_c	27,6	[MPa]	M. de Young
ν_c	0,22	-	Coef. Poisson
D_c	50	[kg/m ³]	Densidad
R_c	$R_r + b_c$	[m]	Radio

Tabla IV.7 Propiedades de los materiales de las capas. Elaboración propia.

II. Parámetros del modelo

Al igual que con el modelo principal de cráneo y robot sin capas, el nuevo modelo presenta los mismos parámetros Hertzianos para el caso de 2m/s.

Se puede apreciar el aumento de magnitudes como la penetración y el radio de contacto, que tienen que ver con la deformación del material al absorber energía, y como el resto han disminuido debido a esto. En la Tabla IV.8 se muestran:

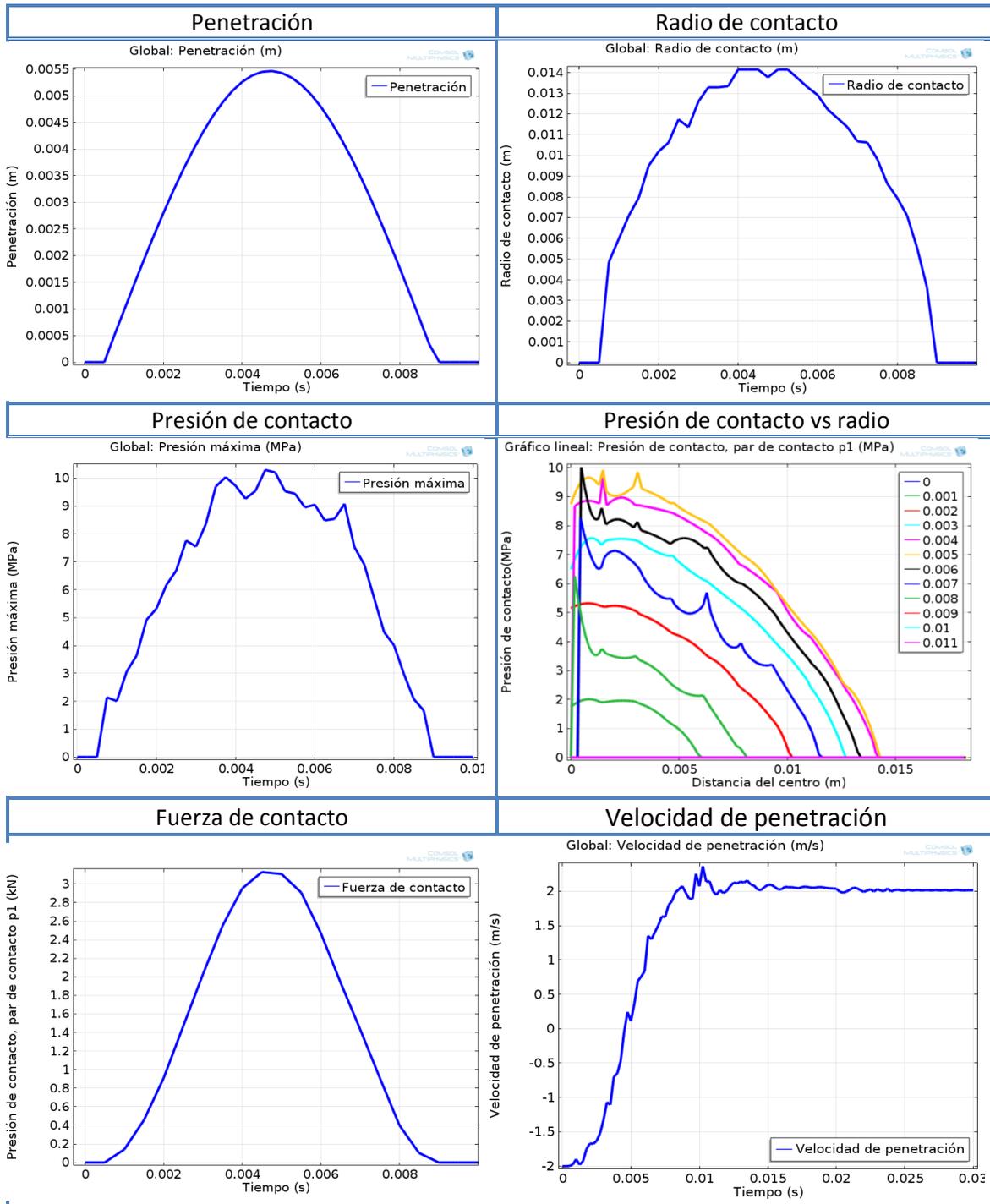


Tabla IV.8 Parámetros del contacto Hertziano. Elaboración propia.

III. Mecánica de contacto

En este apartado se trata de analizar y comparar los efectos que provocan las tensiones a través de la superficie y sobre la misma. Se extiende por tanto el estudio de la mecánica del contacto entre dos esferas anterior, y en este caso se añaden capas de diferentes materiales que provocarán cambios como discontinuidades a causa de tener diferentes propiedades.

- Tensiones vs radio de contacto:** En este caso la adición de capas resulta un fenómeno que cambia en gran medida el comportamiento. Se puede apreciar que la figura sufre de grandes alteraciones debido a la complejidad del estudio dinámico. Hay que recordar que se está tratando con 4 materiales de muy distintas propiedades y grosores de la capa más externa muy finos en el caso de la piel. Se puede identificar no obstante como la **tensión en dirección Z** es la máxima (Figura IV.28). También, que la **tensión circunferencial** y la **radial** comienzan en el mismo punto del eje y que divergen al final. Pero lo cierto es que no se pueden considerar como correctos los valores de dichas tensiones, sería necesario depurar dicho estudio para alcanzar unos valores que se pudieran dar por válidos.

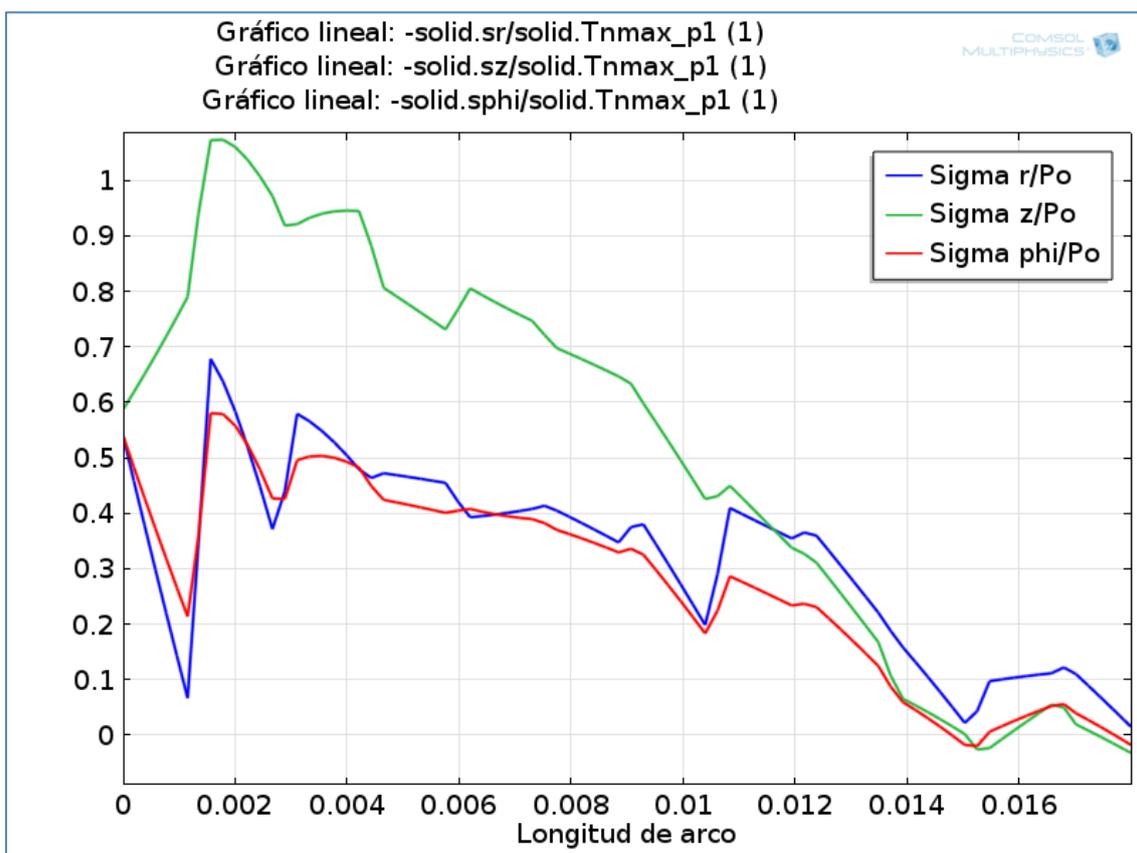


Figura IV.28 Tensiones superficiales con cobertura. Elaboración propia.

- Tensiones vs z/a:** Las tensiones en función de la profundidad también se ven muy influenciadas por la existencia de diferentes capas. Como se puede observar en la Figura IV.29 hay una discontinuidad muy grande entre la capa de piel y el cráneo. Dicha discontinuidad además marca una diferencia muy grande en cuanto a variabilidad entre los resultados de mayor profundidad (cráneo) y los de la superficie externa(piel). La piel pues soporta en un margen muy estrecho un contacto dinámico que no es fácil de resolver computacionalmente. Remitiendo a las ideas del caso de tensiones en la superficie, el caso de la piel es necesario revisarlo con una computación más ajustada.

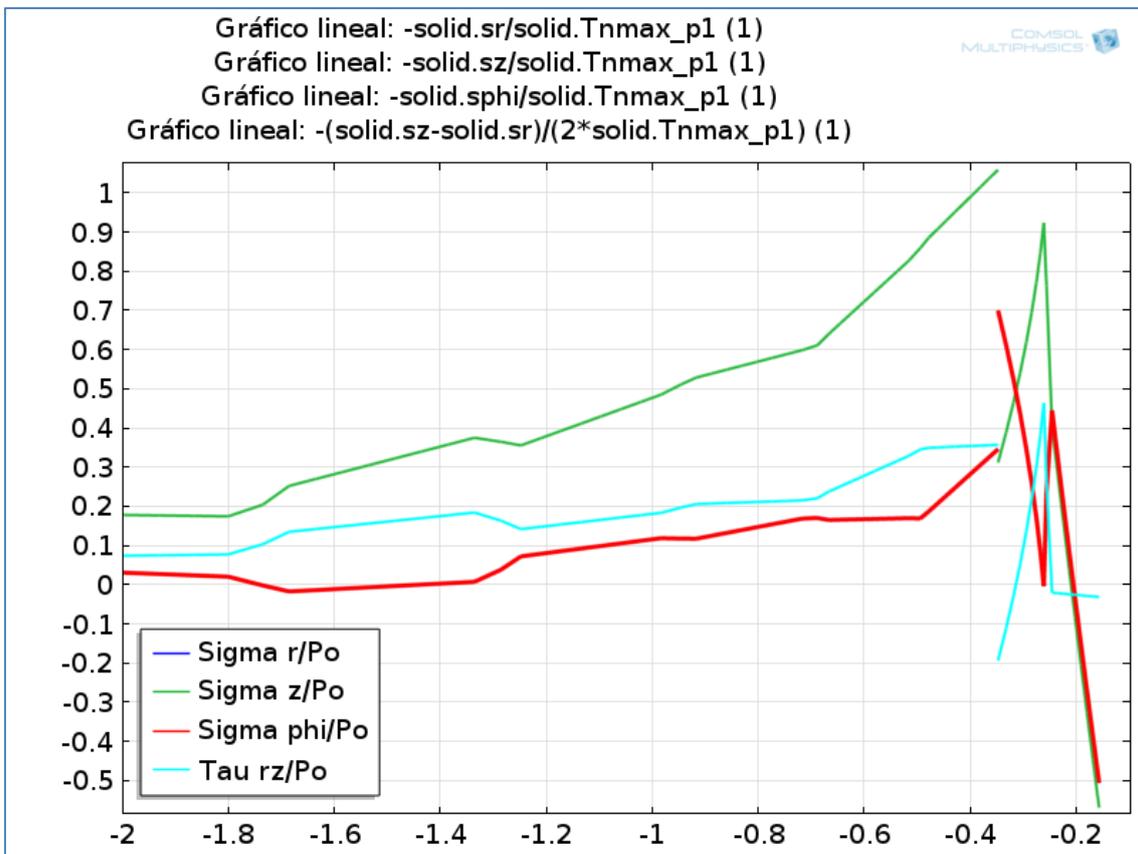


Figura IV.29 Tensiones subsuperficiales con cobertura. Elaboración propia.

IV. Teorías de fallo

Mediante el análisis del apartado previo, de las tensiones superficiales y subsuperficiales, se puede entender mejor que ocurre en el caso de calcular las teorías de fallo. No han resultado en este caso todo lo precisas que podría pretenderse, pero conservan los patrones fundamentales sobre los que se pueden plantear los resultados.

- Tensión de Tresca:** Según se observa en la Figura IV.30, existen varias zonas donde la tensión de Tresca alcanza su valor máximo. Dichos valores se alcanzan dentro de ambas capas pero muy cerca de la superficie. Para cada zona por tanto se debería analizar si supera o no el **límite de plasticidad o rotura** que supusiera un daño o el modelo Hertziano dejaría de ser el adecuado para su análisis.

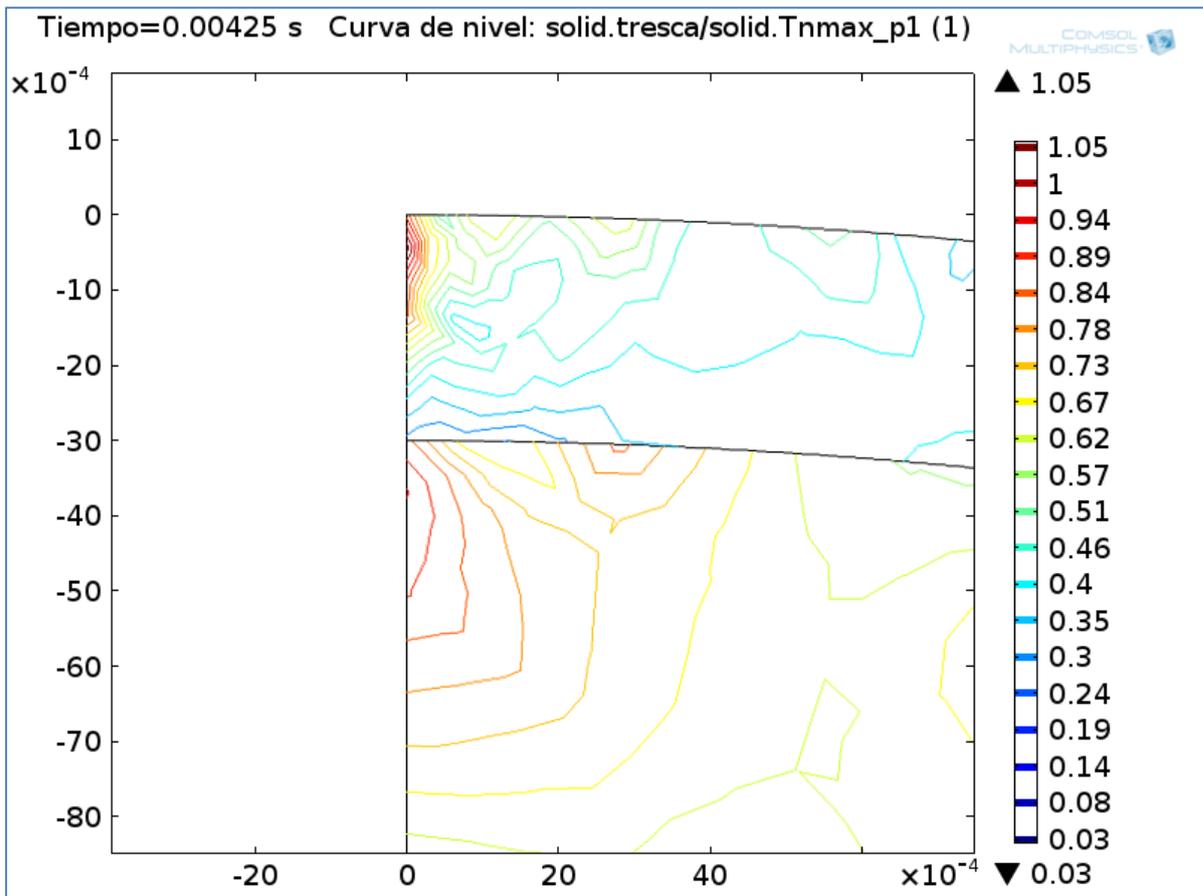


Figura IV.30 Tensión de Tresca con cobertura. Elaboración propia.

- Tensión de VM:** La tensión de Von Mises resulta similar a la de Tresca en este caso, y sus similitudes inducen a las mismas conclusiones anteriores: puntos de máxima tensión dentro del material, dos puntos diferentes ubicados en distintas capas, y para cada punto se debe analizar por separado.

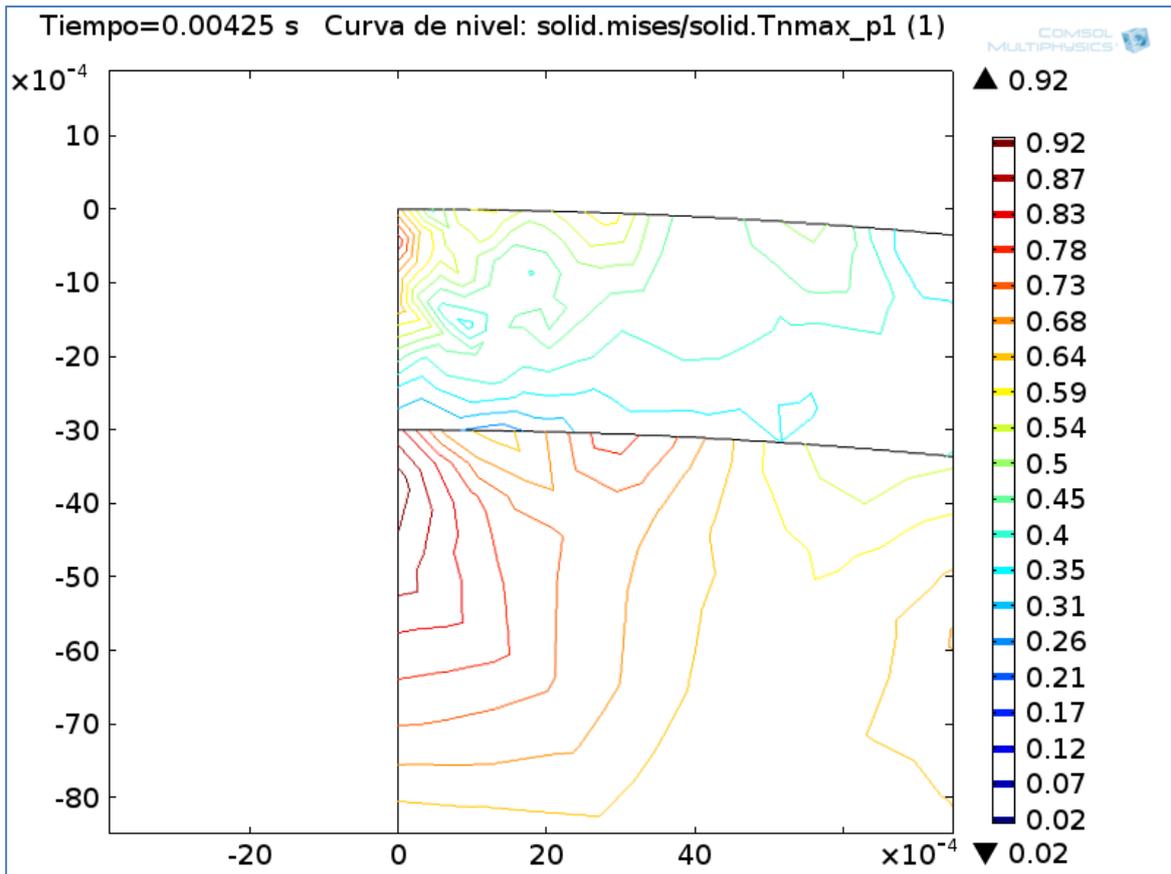


Figura IV.31 Tensión de Von Mises con cobertura. Elaboración propia.

V. Parámetros de seguridad

Como ya se ha enunciado ara el caso sin cobertura, los parámetros que se utilizarán para medir la seguridad de lesión leve son la contusión y la laceración. Los parámetros que rigen los límites a partir de los cuales se produce dichas lesiones leves se enunciaron para el caso del modelo general.

Ahora, que se han añadido las capas de piel y cobertura al modelo, cobra sentido pues hemos añadido las capas de piel y cobertura al modelo, y podemos comparar con Haddadin ^[29] que para este caso obtenía resultados satisfactorios.

- **Densidad de energía de deformación elástica:** Se puede identificar la posibilidad de contusión en la piel, tanto del cuero cabelludo como de la piel del rostro. Se cumple dicho límite de 2.52 MJ/m^3 por lo que se obtiene un resultado satisfactorio de la cobertura al igual que Haddadin ^[29].

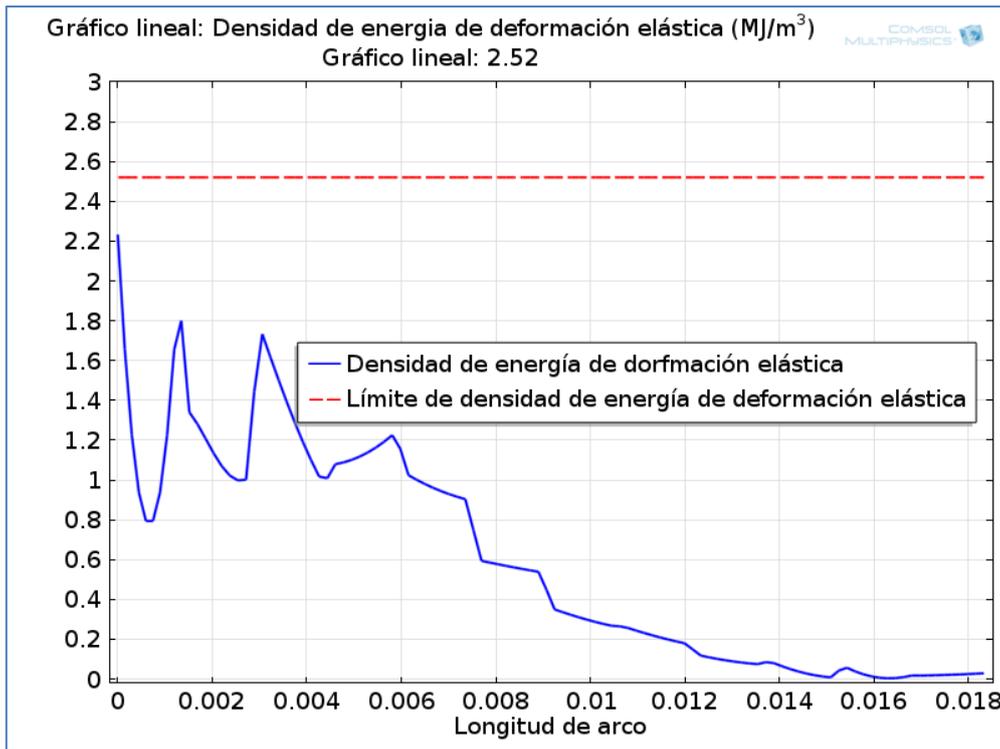


Figura IV.32 Densidad de energía de deformación elástica con cobertura. Elaboración propia.

- Tracción en dirección tangencial:** En este caso no se muestra favorable este estudio pues los resultados superan el límite marcado de 1 MPa, por lo que no se satisface el mismo criterio que Haddadin ^[29] aunque sea por relativamente poco.

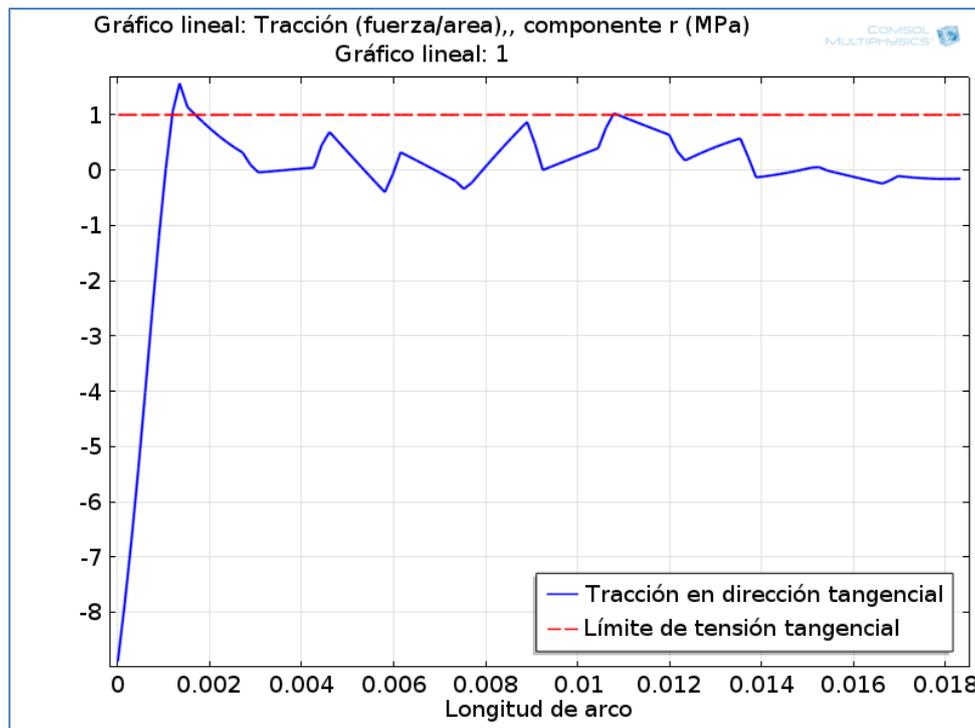


Figura IV.33 Tracción en dirección tangencial con cobertura. Elaboración propia.

e. Conclusiones

A lo largo de este capítulo se ha expuesto la totalidad de los resultados del Trabajo Fin de Grado, tanto del modelo computacional como del analítico calculado en Matlab® con las ecuaciones del contacto de Hertz.

Se han comparado los resultados de ambos modelos y se ha **obtenido una conclusión satisfactoria** para el caso de reproducir el choque mediante un estudio dinámico a 1 m/s. Las comparaciones resultaban lo suficientemente parejas como para seguir adelante pues se muestra como una potente herramienta el MEF en COMSOL®.

Después se añadieron los apartados de **tensiones superficiales y subsuperficiales** para poder explicar lo que ocurriría al tratar las **teorías de fallo** posteriormente. Dichas teorías resultan muy útiles para calcular parámetros de seguridad como posibles lesiones cerebrales, pero esto excede este estudio, pues solo se consideró la lesión débil.

Finalmente **se plantearon los límites de lesión** leve para dar una idea inicial de que suponen, pero su verdadero interés trascendía este apartado pues no son aplicables al cráneo sin piel.

Posteriormente se realizó un estudio de **parámetros, tanto de forma como de materiales**, para así añadir patrones que los diseños de robot puedan aprovechar para minimizar el daño post-colisión. Se observaban ciertas tendencias que analizar como conclusiones del estudio.

Finalmente se analizó el **caso con cobertura**, comparándolo con un estudio de los mismos parámetros realizado con el método analítico mediante las ecuaciones del contacto de Hertz. Esta comparativa se muestra interesante pues mediante los EF se puede diseñar coberturas de robots que permitan una pHRI segura, productiva y funcional.

Capítulo V. Conclusiones

a. Introducción

Una vez realizados todos los estudios del caso, tras haber planteado dos modelos, computacional y analítico, se espera haber obtenido un aumento tanto en el entendimiento de dichos modelos: qué dificultad entrañan, qué limitaciones, campo de aplicabilidad, etc. Como en el grado de conocimientos acerca de los parámetros del robot seguro.

A partir de ello, se han analizado qué características posee cada modelo: el modelo analítico y el computacional. También, cuál es la influencia de los parámetros del robot en la seguridad, y cuales permiten afrontar mejor un diseño seguro.

Además se ha estudiado un caso con capas, simulando la piel y una capa de espuma de poliestireno, para valorar el efecto de la colisión entre un robot con cobertura y el ser humano y estudiar las lesiones leves sobre la piel.

Después se concluirán como han resultado los objetivos del trabajo. Y por último trabajos futuros sobre los que poder desarrollar a raíz de este proyecto.

b. Modelo analítico-computacional

Se han estudiado dos modelos partiendo de las mismas condiciones de trabajo: en el primer modelo, mediante los conceptos extraídos de la literatura, como son las ecuaciones del contacto de Hertz, se desarrolló un **modelo analítico** que se compone de las características del choque dado una fuerza aplicada, y el comportamiento de los robots de servicio en movimiento, cuya característica es su velocidad constante.

Este modelo solo resulta válido en las condiciones de material elástico lineal, y de traspasarse el límite de fluencia, deberían aplicarse otros modelos que reflejaran este comportamiento. Circunstancia que está descartada, debido a que se trabaja bajo la premisa de estudiar la lesión leve, es decir que no se llegue a sufrir apenas molestia, laceración o contusión. Puesto que se considera fundamental convivir con los robots en estas circunstancias.

El modelo analítico se implementó en Matlab Simulink®. Mediante el planteamiento de un diagrama de bloques donde se incluyen las funciones, ganancias e integradores, se desarrolló el modelo analítico de donde se han extraído de manera

sencilla los parámetros fundamentales a partir de las ecuaciones teóricas del modelo de Hertz. De esta forma el modelo analítico se ejecutó de manera sencilla y **permitió comparar satisfactoriamente los resultados teóricos con el modelo computacional**.

En el segundo modelo se trabajó con COMSOL Multiphysics® para realizar un estudio mediante el **método de los elementos finitos**. Se ha descrito la realización del mismo de principio a fin, entendiendo primero en qué consisten los elementos finitos y a qué métodos de contacto se atienen para realizar el estudio del contacto.

Igualmente se ajustan los materiales a la hipótesis de elástico lineal por las mismas justificaciones y se procedió a realizar distintos estudios con el objetivo de caracterizar el comportamiento de la colisión humano-robot.

El estudio computacional, ha mostrado grandes resultados y el MEF es un referente hoy en día para el cálculo de muy diversas disciplinas físicas. Durante los cursos de elementos finitos realizados al comienzo, se practicó con fluidos y medidas térmicas. Para este análisis se necesita el estudio de contacto, dentro del módulo de la mecánica.

Los estudios realizados en este trabajo con COMSOL han progresado en la comprensión del resolvidor, la buena realización del mallado y la obtención de resultados entre otros muchos. Ha resultado una herramienta muy potente con la que estudiar la colisión. Para ello ha sido necesario entender el funcionamiento del programa y los métodos de contacto. Además, debido a las condiciones del experimento era necesario un estudio dinámico.

Estas características, en especial el estudio del contacto dinámico en EF, requieren que se deban ajustar con exactitud los parámetros del mallado y tener un conocimiento de cómo calibrar el estudio muy destacable para realizar un estudio válido y con márgenes de error pequeños.

Por otro lado permite plantear formas geométricas complejas, características del material sobre los que realizar un estudio de parámetros y obtener un valor óptimo, y realizar estudios dinámicos sobre los que se puede aplicar multifísica. Además de forma intuitiva, y analizando después los resultados según requiera el usuario, permitiendo mostrar gráficos en 3D y obtener vídeos o medir prácticamente cualquier parámetro y realizar complejas operaciones matemáticas en segundos.

Por ello el avance en esta línea de estudios de contacto para favorecer la pMRI resulta primordial, dado que si se necesitara estudiar una forma determinada de eslabón, o unas características de material, es muy fácil conjugar esto mediante

estudios realistas que eviten tener que realizar un enorme estudio analítico o un costoso experimento con deterioro o destrucción de los materiales ensayados.

Pero es necesaria una gran cantidad de trabajo y conocimientos para conseguir un correcto funcionamiento de la simulación, una importante inversión en tiempo de ensayo y error para ajustar el mallado si no es satisfactorio etc. Dependiendo de la complejidad puede que compense otra alternativa, pero para el estudio de la lesión leve, y con el objetivo de obtener unos parámetros que permitan utilizarse para conseguir un robot seguro y útil, se **concluye como muy adecuado** el uso de este método computacional como ha quedado demostrado en los análisis.

c. Influencia de los parámetros del robot en la seguridad

Sobre el modelo computacional realizado en COMSOL®, se consiguieron hallar los parámetros que caracterizan un robot seguro. Para ello se han realizado análisis de forma y de características del material por separado.

En el análisis de las propiedades del material, se han examinado el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y la masa a distintas velocidades (de 0.5 a 2m/s):

- El **módulo de Young** se analizó entre 50 GPa y 100 GPa, magnitudes usuales de los materiales utilizados para robots ligeros. Bajo este margen no se encontró apenas variabilidad en ningún caso, como una tendencia clara más importante que el posible error intrínseco a los resultados en EF.
- El **coeficiente de Poisson** fue abarcado de 0.1 a 0.4, valores que poseen la gran mayoría de materiales. En este caso, de la misma forma, no se observa apenas tendencia entre los valores que se tienen en cuenta.
- En el caso de la **masa** el intervalo de parámetros fue de 1 a 10 kg. En este caso si se puede apreciar una curva de tendencia que posee una pendiente muy pronunciada en las magnitudes de 1-2 kg y apenas se aprecia en los valores más altos aunque sigue afectando.

Esto lleva a pensar que: en el caso del **módulo de Young** puede que exista alguna tendencia más allá de los márgenes de este estudio, pero no pertenece al ámbito de robots flexibles como el LWR-III ^[29].

Para el **coeficiente del Poisson** no existe margen más allá de los parámetros de este estudio, pues el límite se encuentra en 0.5 y apenas hay materiales estructurales que lleguen a tales valores.

Por último la **masa**, que proviene de la **inercia del robot**, presenta una disminución de presión pronunciada con **valores próximos a 1kg**. Esto indica que se debe minimizar todo lo posible. Sin embargo, es difícil llegar a valores tan pequeños. Por tanto, la necesidad de reducir la masa depende de si se trata de magnitudes grandes, donde no provoca en gran medida una disminución de presión en el contacto, o magnitudes pequeñas donde cualquier esfuerzo reporta gran disminución.

Por otro lado se realizó el estudio de parámetros de forma, para los cuales se analizaron: un estudio con el robot en forma esférica, y con un aumento de radio, un estudio con el robot en forma de elipsoide, con un aumento en la diagonal, y finalmente un estudio con el robot como un cilindro impactando con su parte plana. Todos ellos analizados en diferentes velocidades:

- El estudio de **forma esférica**, se realizó entre 1 y 9 cm de radio del robot, magnitudes usuales en eslabones robóticos con radio cilíndrico. En este estudio se muestra una gran curva de caída de presiones a medida que se aumenta el radio. Esto es debido a la relación inversamente proporcional que existe entre la presión y la superficie. Al disminuir el radio del eslabón, disminuye con ello la superficie de contacto entre los cuerpos, y aumenta enormemente la presión.
- En el caso del **elipsoide**, su rango se situó entre 1.5 y 6 cm. La tendencia resulta muy similar dado que no deja de influir en la superficie de contacto.
- Por último se realizó un estudio con el eslabón en **forma cilíndrica** con su parte plana incidiendo sobre el cráneo. En este caso solo se realizó el mismo caso para 4 velocidades distintas, observándose una presión menor que en el resto de casos, provocada por el aumento de superficie.

De todos estos análisis se obtiene que para los parámetros de forma, **la principal influencia es por la superficie de contacto**. Esta, está directamente influida por el radio esférico y la diagonal del elipsoide. El caso plano puede considerarse como aumentar la magnitud del radio hasta el infinito. Esto indica que se debe aumentar el radio o la diagonal en el caso del elipsoide, y evitar zonas puntiagudas o de poca superficie, por lo que no se han estudiado casos como conos y filos, pues fácilmente provocarían cortaduras o laceraciones.

En valores superiores a **3 cm** la curva de presión tiene menor pendiente entre puntos y por tanto deja de ser un valor determinante, por lo que no resulta tan atractivo exagerar el radio del eslabón a partir de dicho punto. Además, realizar un eslabón con caras planas -p.e. un eslabón en forma de prisma cuadrangular- para disminuir la presión, existirían esquinas o zonas redondeadas entre caras planas, por lo que todo el esfuerzo resultaría en detrimento de disminuir la presión. Y lo que es más, todo aumento de radio provoca aumento de la inercia del brazo, aumentando la presión.

Este análisis mediante los EF permite variar las formas y las propiedades del material para indicar que parámetros del diseño pueden afectar en mayor o menor medida a la presión, que deriva en parámetros de daño que se debe minimizar para llevar a cabo una pHRI segura y útil.

d. Cubierta de material suave

Para realizar un robot de servicio que extendiera el HRI, no solo resulta necesario que deje de representar una amenaza letal, sino que además ha de evitar causar dolor y molestia al ser humano con el que comparta espacio. En este sentido se ha discutido acerca del diseño de las coberturas de los robots, esencialmente que grosor sería necesario para cumplir con los límites de lesión leve.

En este trabajo, se ha analizado el efecto de laceración y contusión que provoca una colisión, de tal manera que se pueda diseñar un revestimiento flexible de manera óptimamente segura. Obtuvimos las siguientes conclusiones:

- La fiabilidad del modelo de colisión propuesto fue verificado mediante la comparación de los resultados de la simulación con varios de los datos del análisis del modelo de contacto de Hertz. Esto conduce a un análisis fiable del impacto romo y a poder garantizar la potencia del MEF.
- Criterios de seguridad para las lesiones de tejidos blandos fueron introducidos para estimar lesiones en la piel debido a impactos romos en la cabeza. También se podía observar que para las condiciones dadas las laceraciones son generalmente acompañadas por contusiones.
- Con el fin de evitar lesiones en la piel por los golpes contundentes, se podría estudiar el módulo de elasticidad y el espesor apropiados de un revestimiento unido a un robot. Esta evaluación podría ser llevada a

cabo en la etapa de diseño de un manipulador, ahorrando considerable de tiempo, esfuerzo y coste.

Con esta herramienta es posible **diseñar robots más seguros** y determinar las **condiciones de explotación** por el hombre en el marco de la pHRI dadas las limitaciones de seguridad.

e. Cumplimiento de los objetivos

En este trabajo se marcaron unos objetivos inicialmente, sobre los cuales se planteó el desglose del trabajo con el que se realizó la planificación. A continuación se tratan cada uno de ellos y se valora cuán satisfechos resultaron.

1. Estudio y análisis de la colisión humano-robot aplicando las teorías de contacto, definiendo unas condiciones de trabajo y construyendo con ello el modelo analítico.

Este objetivo fue el abarcado partiendo del análisis del estado del arte, y de cómo se habían resuelto los problemas de la robótica anteriormente, que en la mayor parte de situaciones consistió en evitar el contacto.

En los últimos tiempos, hay mucha más información acerca de impactos entre humanos y robots, ensayos con cadáveres, mediciones con voluntarios etc. Con ello se podría entonces delimitar un caso de estudio sobre el que proponer el modelo. Tras ello se desarrollaron las características del modelo en base a literatura científica acerca de características del cuerpo humano y propiedades de los robots.

Después se realizó un extenso estudio acerca de la mecánica de contacto, sus diferentes aplicaciones, y Hertz resultó el elegido por tratar con materiales elásticos. Con toda la teoría desplegada se realizó un diagrama de Bloques en Matlab Simulink® que permitía recoger diferentes resultados de la simulación. Este objetivo se considera satisfecho enteramente.

2. Modelo de Elementos Finitos de análisis del impacto, contrastado con modelo analítico.

Se realizaron unos cursos en la Universidad Complutense de Madrid, en la facultad de matemáticas, acerca de los elementos finitos. Estos sirvieron de introducción y presentaron tanto la matemática detrás del poder computacional así como explicaciones y ejemplos acerca de modelización en COMSOL®.

Una vez caracterizada la colisión para el caso analítico, se diseñó un modelo con las mismas propiedades en COMSOL®, y mediante ensayos y ejercicios se logró alcanzar el objetivo de realizar el modelo computacionalmente. Tras esto, mediante un estudio dinámico (que no resulta simple en EF) se extrajeron los resultados para ser comparados con los obtenidos en Matlab Simulink®.

Como se puede ver en los resultados, la similitud es destacable y el mallado está lo suficientemente ajustado para disminuir el error. Se puede concluir que este resultado fue difícil de obtener por realizar un estudio dinámico, cosa que complica sobremanera el contacto. A pesar de ello, el objetivo se ve logrado y se pudieron ofrecer conclusiones al respecto.

3. Barridos de parámetros mediante el modelo de Elementos Finitos para analizar parámetros de forma y propiedades mecánicas del material.

Una vez se contrastó el modelo computacional, se realizaron diversos estudios cambiando los parámetros fundamentales de diseño del robot: se realizaron estudios con formas que reducían o aumentaban el área de contacto de diferentes maneras, o cambiando las propiedades fundamentales del material.

Con ello se alcanzaron unas conclusiones acerca de qué parámetros pueden ser utilizados para conseguir robots más seguros en caso de colisión.

Este objetivo se completó, tanto los barridos de forma como los de parámetros, y comparar los resultados con los de la literatura.

4. Estudio del robot con recubrimiento de material con capacidad de absorción de energía mecánica, aplicación a la lesión leve.

Para acabar se consiguió realizar un estudio con capas, permitiendo así tener en cuenta los parámetros de lesión leve que promueve la pHRI.

Se consiguió añadir las capas satisfactoriamente, y solo uno de los valores podía considerarse algo peligroso pues se superaba el límite de laceración. Se comparó el resultado con el estudio analítico de Haddadin ^[29] que resultaba favorable para este caso.

Se ha conseguido explicar a lo largo de este trabajo las características de la pHRI segura, y enmarcar este desarrollo en los límites de la lesión leve, por lo que se considera en su mayor parte conseguido este objetivo.

f. Trabajos futuros

Tras este trabajo se plantean varias líneas de desarrollo que abarcan unos ámbitos fundamentales: el análisis analítico con cubierta, análisis de la cubierta de protección óptima mediante elementos finitos.

Para el caso analítico, resulta posible, tras haber realizado el caso de dos esferas macizas, el de añadir capas y sus comportamientos. Esto lleva a las siguientes ecuaciones ^[29]:

$$\mathbf{F}(\delta) = \delta^{n_{cp}} \mathbf{K}_{cp} \quad \delta \leq \mathbf{b}_{pm} \quad (27)$$

$$\mathbf{F}(\delta) = (\delta - \mathbf{b}_{pm})^{n_{ch}} \mathbf{K}_{ch} + \mathbf{F}(\mathbf{b}_{pm}) \quad \mathbf{b}_{pm} \leq \delta \leq \mathbf{b}_{cm} \quad (28)$$

$$\mathbf{F}(\delta) = (\delta - \mathbf{b}_{cm})^{n_{rh}} \mathbf{K}_{rh} + \mathbf{F}(\mathbf{b}_{cm}) \quad \mathbf{b}_{cm} \leq \delta \quad (29)$$

Donde K_{cp} y K_{nh} y K_{rh} son los módulos de rigidez conjugados, y b_{pm} y b_{cm} los grosores totalmente comprimidos de las capas.

Es decir, a partir de que se consideren una capa totalmente comprimida, entraría en juego la siguiente ecuación del sistema, por lo que habría tres pendientes para la fuerza.

Lo interesante de este trabajo es hallar estos **límites de compresión de las capas**, que originan que se tenga en cuenta la rigidez de los demás componentes mediante el cálculo por EF. Esto plantearía una alternativa a la realización por EF.

Otro trabajo futuro podría ser el **análisis de la cubierta de protección óptima**, realizándose a través de un estudio profundo de los parámetros de la cubierta, de forma y material, al igual que se ha realizado para el caso del modelo sin capas. Esto permitiría ajustar la cubierta del robot a unas condiciones determinadas, proporcionando un método de seguridad pHRI fiable, simple y con actuación aun en fallo catastrófico de software o corte eléctrico.

Para seguir desarrollando la seguridad pHRI resultaría interesante encontrar valores para contrastar los resultados obtenidos de las tensiones de las teorías de fallo. Sobre los que mediante elementos finitos es posible calcular sus magnitudes pero no se tienen datos acerca del dolor o la lesión leve producidos con los que comparar.

Bibliografía

- [1] BARBERO POZUELO, E. Elasticidad y Resistencia de Materiales *Criterios De Fallo*.
- [2] BATURONE, A.O. *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*. Marcombo, 2001.
- [3]. BERMEJO SÁNCHEZ, S. *Desarrollo De Robots Basados En El Comportamiento*. 1st ed. Politext, 2004.
- [4]. BHUSHAN, B. *Modern Tribology Handbook, Two Volume Set*. CRC Press, 2010.
- [5]. BICCHI, A., et al. *Physical Human-Robot Interaction: Dependability, Safety, and Performance*. , 2008 DOI 10.1109/AMC.2008.4516033.
- [6]. BICCHI, A. and TONIETTI, G. Fast and "Soft-Arm" Tactics [Robot Arm Design]. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 2004, vol. 11, no. 2. pp. 22-33 ISSN 1070-9932. DOI 10.1109/MRA.2004.1310939.
- [7]. BROOKS, R.A. New Approaches to Robotics. *Science (New York, N.Y.)*, Sep 13, 1991, vol. 253, no. 5025. pp. 1227-1232 ISSN 0036-8075; 0036-8075. DOI 253/5025/1227 [pii].
- [8]. BROWN, E., et al. Universal Robotic Gripper Based on the Jamming of Granular Material. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, November 02, 2010, vol. 107, no. 44. pp. 18809-18814. Available from: <http://www.pnas.org/content/107/8/18809.abstract> DOI 10.1073/pnas.1003250107.
- [9]. BUCHANAN, H.M. and MIDGLEY, J.-. Evaluation of Pain Threshold using a Simple Pressure Algometer. *Clinical Rheumatology*, 12/01, 1987, vol. 6, no. 4. pp. 510-517 ISSN 0770-3198. DOI 10.1007/BF02330587.
- [10]. FELIÚ BATLLE, V. *Robots Flexibles: Hacia Una Generación De Robots Con Nuevas Prestaciones*. Comité Español de Autonomática (CEA-IFAC), 2006 Available from: <http://vufind.uniovi.es/Record/ir-ART0000126706>.
- [11]. FOLEY, J.F. Lending a Helping Hand. *Science Signaling*, 2010, vol. 3, no. 122. pp. ec148.
- [12]. GIORGIO SERCHI, F., ARIENTI, A. and LASCHI, C. Biomimetic Vortex Propulsion: Toward the New Paradigm of Soft Unmanned Underwater Vehicles. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 2013, vol. 18, no. 2. pp. 484-493.
- [13]. HADDADIN, S., ALBU-SCHÄFFER, A. and HIRZINGER, G. Robotics ResearchSpringer, 2011 *Safe Physical Human-Robot Interaction: Measurements, Analysis and New Insights*, pp. 395-407.
- [14]. HADDADIN, S., ALBU-SCHAFFER, A., DE LUCA, A. and HIRZINGER, G. *Collision Detection and Reaction: A Contribution to Safe Physical Human-Robot Interaction*. , 2008 DOI 10.1109/IROS.2008.4650764.
- [15]. HADDADIN, S., ALBU-SCHAFFER, A., EIBERGER, O. and HIRZINGER, G. *New Insights Concerning Intrinsic Joint Elasticity for Safety*. , 2010 ISBN 2153-0858. DOI 10.1109/IROS.2010.5652037.

- [16]. HADDADIN, S., ALBU-SCHAFFER, A., FROMMBERGER, M. and HIRZINGER, G. *The Role of the Robot Mass and Velocity in Physical Human-Robot Interaction - Part II: Constrained Blunt Impacts.* , 2008 ISBN 1050-4729. DOI 10.1109/ROBOT.2008.4543389.
- [17]. HADDADIN, S., et al. *The "DLR Crash Report": Towards a Standard Crash-Testing Protocol for Robot Safety - Part II: Discussions.* , 2009 ISBN 1050-4729. DOI 10.1109/ROBOT.2009.5152711.
- [18]. HADDADIN, S., et al. *The "DLR Crash Report": Towards a Standard Crash-Testing Protocol for Robot Safety - Part I: Results.* , 2009 ISBN 1050-4729. DOI 10.1109/ROBOT.2009.5152602.
- [19]. HADDADIN, S., ALBU-SCHAFFER, A. and HIRZINGER, G. *The Role of the Robot Mass and Velocity in Physical Human-Robot Interaction - Part I: Non-Constrained Blunt Impacts.* , 2008 ISBN 1050-4729. DOI 10.1109/ROBOT.2008.4543388.
- [20]. HADDADIN, S., ALBU-SCHAFFER, A. and HIRZINGER, G. *Soft-Tissue Injury in Robotics.* , 2010 ISBN 1050-4729. DOI 10.1109/ROBOT.2010.5509854.
- [21]. HADDADIN, S., ALBU-SCHÄFFER, A. and HIRZINGER, G. Requirements for Safe Robots: Measurements, Analysis and New Insights. *The International Journal of Robotics Research*, November 01, 2009, vol. 28, no. 11-12. pp. 1507-1527. Available from: <http://ijr.sagepub.com/content/28/11-12/1507.abstract> DOI 10.1177/0278364909343970.
- [22]. HAM, R., et al. Compliant Actuator Designs. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 2009, vol. 16, no. 3. pp. 81-94 ISSN 1070-9932. DOI 10.1109/MRA.2009.933629.
- [23]. HEINZMANN, J. and ZELINSKY, A. Quantitative Safety Guarantees for Physical Human-Robot Interaction. *The International Journal of Robotics Research*, July 01, 2003, vol. 22, no. 7-8. pp. 479-504. Available from: <http://ijr.sagepub.com/content/22/7-8/479.abstract> DOI 10.1177/02783649030227004.
- [24]. HERMAN, I.P. and KANE, S.A. Physics of the Human Body. *Physics Today*, 2008, vol. 61, no. 3. pp. 58.
- [25]. HIRZINGER, G., et al. *On a New Generation of Torque Controlled Light-Weight Robots.* , 2001 ISBN 1050-4729. DOI 10.1109/ROBOT.2001.933136.
- [26]. ISO 10218-1:2012. *Robots and Robotic Devices -- Safety Requirements for Industrial Robots -- Part 1: Robots.* , 09/05/2012.
- [27]. JENSEN, K., ANDERSEN, H.Ø., OLESEN, J. and LINDBLOM, U. Pressure-Pain Threshold in Human Temporal Region. Evaluation of a New Pressure Algometer. *Pain*, 6, 1986, vol. 25, no. 3. pp. 313-323. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304395986902356> ISSN 0304-3959. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3959\(86\)90235-6](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3959(86)90235-6).
- [28]. JIMÉNEZ, F., et al. *Sistema De Visión De Apoyo a La Navegación De Un Robot Movil En Invernaderos.*
- [29]. Jung-Jun Park, HADDADIN, S., Jae-Bok Song and ALBU-SCHAFFER, A. *Designing Optimally Safe Robot Surface Properties for Minimizing the Stress Characteristics of Human-Robot Collisions.* , 2011 ISBN 1050-4729. DOI 10.1109/ICRA.2011.5980282.
- [30]. Jung-Jun Park and Jae-Bok Song. *Collision Analysis and Evaluation of Collision Safety for Service Robots Working in Human Environments.* , 2009.

- [31]. LASCHI, C. and CIANCHETTI, M. Soft Robotics: New Perspectives for Robot Bodyware and Control. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2014, vol. 2 ISSN 2296-4185.
- [32]. LENS, T. Physical Human-Robot Interaction with a Lightweight, Elastic Tendon Driven Robotic Arm, 2012.
- [33]. LÓPEZ-MARTÍNEZ, J., et al. F. VIADERO and M. CECCARELLI eds., Springer Netherlands, 01/01, 2013 *Role of Link Flexibility and Variable Stiffness Actuator on Collision Safety for Service Robots*, pp. 499-507 ISBN 978-94-007-4901-6. DOI 10.1007/978-94-007-4902-3_53.
- [34]. MATHE, L., et al. Detection of Human-Robot Collision using Kinetic. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, 2013, vol. 11, no. 1. pp. 143-148 ISSN 1548-0992. DOI 10.1109/TLA.2013.6502793.
- [35]. MAZZOLAI, B., et al. Soft-Robotic Arm Inspired by the Octopus: II. from Artificial Requirements to Innovative Technological Solutions. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2012, vol. 7, no. 2. pp. 025005.
- [36]. MORITA, T. and SUGANO, S. *Development and Evaluation of Seven DOF MIA ARM.* , 1997 DOI 10.1109/ROBOT.1997.620080.
- [37]. PAPAPOPOULOS, E. and ABU-ABED, A. A Design Methodology for Zero Reaction Robots. *Transactions-Canadian Society for Mechanical Engineering*, 1995, vol. 19. pp. 197-197.
- [38]. PARK, J., KIM, B., SONG, J. and KIM, H. Safe Link Mechanism Based on Nonlinear Stiffness for Collision Safety. *Mechanism and Machine Theory*, 10, 2008, vol. 43, no. 10. pp. 1332-1348. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X07001577> ISSN 0094-114X. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2007.10.004>.
- [39]. PFEFFER, L.E., KHATIB, O. and HAKE, J. Joint Torque Sensory Feedback in the Control of a PUMA Manipulator. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 1989, vol. 5, no. 4. pp. 418-425 ISSN 1042-296X. DOI 10.1109/70.88056.
- [40]. PFEIFER, R., BONGARD, J. and GRAND, S. *How the Body Shapes the Way we Think: A New View of Intelligence*. MIT press, 2007.
- [41]. PRATT, G.A. and WILLIAMSON, M.M. *Series Elastic Actuators.* , 1995 DOI 10.1109/IROS.1995.525827.
- [42]. SCHIAVI, R., GRIOLI, G., SEN, S. and BICCHI, A. *VSA-II: A Novel Prototype of Variable Stiffness Actuator for Safe and Performing Robots Interacting with Humans.* , 2008 ISBN 1050-4729. DOI 10.1109/ROBOT.2008.4543528.
- [43]. STELTZ, E., et al. *Jamming as an Enabling Technology for Soft Robotics*. International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [44]. SUITA, K., et al. *A Failure-to-Safety "Kyozon" System with Simple Contact Detection and Stop Capabilities for Safe Human-Autonomous Robot Coexistence.* , 1995 ISBN 1050-4729. DOI 10.1109/ROBOT.1995.525724.
- [45]. TARLOCHAN, F. Finite Element (FE) Human Head Models/Literature Review. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2013, vol. 2, no. 7.
- [46]. VERSACE, J. *A Review of the Severity Index*, 1971.

- [47]. WASSINK, M. and STRAMIGIOLI, S. *Towards a Novel Safety Norm for Domestic Robotics.* , 2007 DOI 10.1109/IROS.2007.4399199.
- [48]. WRIGGERS, P. Computational Contact Mechanics. *Computational Mechanics*, 2012. pp. 1-1.
- [49]. YAMADA, H. and EVANS, F.G. *Strength of Biological Materials*, 1970.
- [50]. YAMADA, Y., HIRASAWA, Y., HUANG, S.Y. and UMETANI, Y. *Fail-Safe human/robot Contact in the Safety Space.* , 1996 DOI 10.1109/ROMAN.1996.568748.
- [51]. ZAIER, R. and NAGASHIMA, F. *Motion Pattern Generator and Reflex System for Humanoid Robots.* , 2006 DOI 10.1109/IROS.2006.281734.
- [52]. ZIENKIEWICZ, O.C. *El Método De Los Elementos Finitos.* Reverté, 1981.
- [53]. ZINN, M., KHATIB, O. and ROTH, B. *A New Actuation Approach for Human Friendly Robot Design.* , 2004 ISBN 1050-4729. DOI 10.1109/ROBOT.2004.1307159.
- [54]. ISO 10218-1:2012. *Robots and robotic devices — Vocabulary* , 09/05/2012.

