



Universidad  
Carlos III de Madrid  
[www.uc3m.es](http://www.uc3m.es)

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

# “DISEÑO, MODELADO Y FABRICACIÓN DE ROBOTS BLANDOS”

Autor: Eduardo Gómez Suárez

Tutor: José Medina Hernández

GRADO EN

INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

(2014-2015)

LEGANÉS, MADRID

JUNIO 2015



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

El tribunal aprueba la tesis de Grado titulada “DISEÑO, MODELADO Y FABRICACIÓN DE ROBOTS BLANDOS” realizada por Eduardo Gómez Suárez.

Fecha: Junio 2015

Tribunal:

---

Dr. Juan Manuel Alonso Weber

---

Dr. Jose Luis Mira Peidro

---

Dr. Álvaro Castro González

---

Dr. Luis Santiago Garrido Bullón



# Índice general

Índice de tablas.....	vii
Índice de figuras.....	viii
Resumen.....	xvi
Abstract.....	xviii
1. Planteamiento.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Motivación.....	1
1.3. Objetivos.....	2
1.4. Estructura.....	2
2. Estado del arte de la robótica blanda o suave.....	4
2.1. Introducción.....	4
2.2. Inspiración biológica.....	5
2.3. Primeros pasos de la robótica blanda o suave.....	8
2.4. Tecnología tras los robots blandos.....	8
2.4.1. Actuadores.....	8
2.4.2. Sensores.....	13
2.5. Desafíos de la robótica blanda.....	14
2.6. Conclusiones.....	16
3. Conceptos fundamentales para el desarrollo de robots suaves.....	17
3.1. Elementos finitos.....	17
3.2. Modelado CAD.....	20
3.3. Materiales.....	23
3.4. Maqueta.....	24
4. Diseño y modelado de actuadores neumáticos blandos.....	26
4.1. Diseño de actuadores “PneuNet”.....	26
4.1.1. Materiales.....	26
4.1.2. Morfología.....	28
4.2. Modelado de actuadores “PneuNet”.....	30
4.2.1. Sistema de unidades utilizado.....	30
4.2.2. Explicación del modelado del Elastosil M4601 cómo material hiperelástico.....	31
4.2.3. Características generales del análisis realizado en cada prototipo.....	31

4.2.4.	Componentes del análisis .....	31
4.2.5.	Pasos generales del modelado realizado (ver Anexo 3).....	32
4.2.6.	Resultados del modelado .....	34
5.	Fabricación y ensayo de actuador neumático blando .....	42
5.1.	Fabricación de actuadores “PneuNet” .....	42
5.1.1.	Equipos y herramientas utilizados para la fabricación.....	42
5.1.2.	Fabricación paso por paso .....	43
5.2.	Ensayos del actuador “PneuNet” .....	48
5.2.1.	Resultados experimentales del desplazamiento del actuador en los ejes X-Y.....	49
5.2.2.	Resultados experimentales del desplazamiento del actuador en los ejes X-Y.....	52
6.	Conclusiones .....	53
	Anexos .....	55
I.	Anexo 1: Molde del actuador con altura de cámara de 15mm.....	55
II.	Anexo 2: Planos de los prototipos y de uno de los moldes. ....	57
III.	Anexo 3: Guía para modelado de los actuadores blandos “PneuNet” en Abaqus. .61	
IV.	Anexo 4: Ver desplazamiento en X e Y del punto más lejano.....	114
V.	Anexo 5: Análisis FEM de la fuerza que ejerce el actuador.....	118
	Referencias .....	134

# Índice de tablas

<b>Tabla 2.1:</b> Clasificación de polímeros electroactivos .....	9
<b>Tabla 3.1:</b> Propiedades de los diferentes Elastómeros que pueden ser utilizados. ....	23
<b>Tabla 4.1:</b> Materiales principales para la fabricación del actuador. ....	27
<b>Tabla 4.2:</b> Alternativas al uso del Elastosil M4601 .....	28
<b>Tabla 4.3:</b> Desplazamiento en X-Y del actuador con altura de cámaras de 15mm.....	34
<b>Tabla 4.4:</b> Desplazamiento en X-Y del actuador con altura de cámaras de 13mm.....	34
<b>Tabla 4.5:</b> Desplazamiento en X-Y del actuador con 5 cámaras.....	35
<b>Tabla 4.6:</b> Desplazamiento en X-Y del actuador con 10 cámaras.....	36
<b>Tabla 4.7:</b> Desplazamiento en X-Y del actuador con espesor de pared de 1mm.....	37
<b>Tabla 4.8:</b> Desplazamiento en X-Y del actuador con espesor de pared de 3mm.....	37

# Índice de figuras

<b>Figura 2.1:</b> Robots inspirados en animales de cuerpo blando .....	5
<b>Figura 2.2:</b> Nuevas tecnologías para el desarrollo de robots bioinspirados.....	7
<b>Figura 2.3:</b> Mano SDM cogiendo varios objetos cotidianos.....	10
<b>Figura 2.4:</b> “PneuNet Bending Actuator” .....	11
<b>Figura 2.5:</b> Actuador “Fiber Reinforced Actuator” .....	12
<b>Figura 2.6:</b> Músculo artificial neumático .....	12
<b>Figura 2.7:</b> Sensores flexibles .....	13
<b>Figura 2.8:</b> Principios de diseño .....	15
<b>Figura 3.1:</b> Diferentes módulos para definir el modelo .....	19
<b>Figura 3.2:</b> Interfaz de usuario SolidWorks .....	22
<b>Figura 3.3:</b> Barra de herramientas.....	23
<b>Figura 3.4:</b> Placa de control.....	25
<b>Figura 4.1:</b> Gráficas de presión-volumen de actuadores “PneuNets” fabricados con siliconas con diferente rigidez.....	27
<b>Figura 4.2:</b> Morfología del actuador .....	28
<b>Figura 4.3:</b> Modelado del actuador .....	33
<b>Figura 4.4:</b> Punto en el que se mide el desplazamiento .....	34
<b>Figura 4.5:</b> Gráfica del desplazamiento en X y en Y para diferentes presiones interiores de los dos actuadores que son usados para comparar cómo depende el rendimiento de la altura de las cámaras.....	35
<b>Figura 4.6:</b> Gráfica del desplazamiento en X y en Y para diferentes presiones interiores de los dos actuadores que son usados para comparar cómo depende el rendimiento del número de cámaras.....	36
<b>Figura 4.7:</b> Gráfica del desplazamiento en X y en Y para diferentes presiones interiores de los dos actuadores que son usados para comparar cómo depende el rendimiento del espesor de pared .....	37
<b>Figura 4.8:</b> Análisis de la fuerza que ejerce el actuador sobre el bloque.....	38
<b>Figura 4.9:</b> Superficie donde se mide la fuerza .....	39
<b>Figura 4.10:</b> Fuerzas de contacto en los nodos inferiores del actuador con 5 cámaras....	39



<b>Figura 4.11:</b> Fuerzas de contacto en los nodos inferiores del actuador con 10 cámaras.	40
<b>Figura 4.12:</b> Fuerzas de contacto en los nodos inferiores del actuador con espesor de pared 1mm .....	41
<b>Figura 4.13:</b> Fuerzas de contacto en los nodos inferiores del actuador con espesor de pared 3mm .....	41
<b>Figura 5.1:</b> Impresión 3D de los moldes.....	43
<b>Figura 5.2:</b> Preparar el Elastosil y los moldes.....	44
<b>Figura 5.3:</b> Rellenar el molde principal de Elastosil.....	44
<b>Figura 5.4:</b> Moldes en la cámara de vacío.....	45
<b>Figura 5.5:</b> Retirar las burbujas.....	45
<b>Figura 5.6:</b> Introducir moldes en el horno durante 10 minutos.....	45
<b>Figura 5.7:</b> Ensamblado de las diferentes partes.....	46
<b>Figura 5.8:</b> Forma adecuada de realizar el agujero.....	47
<b>Figura 5.9:</b> Comprobar funcionamiento adecuado.....	47
<b>Figura 5.10:</b> Movimiento completo del actuador.....	49
<b>Figura 5.11:</b> Pasos realizados para la detección del movimiento del objeto.....	50
<b>Figura 5.12:</b> Instrumentos para el preprocesamiento de la imagen.....	50
<b>Figura 4.13:</b> Instrumentos para procesar la imagen.....	51
<b>Figura 4.14:</b> Comparación de los datos experimentales del actuador fabricado con los datos del modelado mediante el método de elementos finitos .....	51
<b>Figura 6.1:</b> Burbujas interiores en el actuador.....	53
<b>Figura A1.1:</b> Parte de abajo del molde del cuerpo principal del actuador.....	55
<b>Figura A1.2:</b> Parte de abajo del molde del cuerpo principal del actuador.....	56
<b>Figura A1.3:</b> Parte de abajo del molde del cuerpo principal del actuador.....	56
<b>Figura A2.1:</b> Planos de actuador con altura de cámara de 15mm .....	57
<b>Figura A2.2:</b> Planos de actuador con altura de cámara de 15mm .....	58
<b>Figura A2.3:</b> Planos de actuador con 10 cámaras.....	58
<b>Figura A2.4:</b> Planos de actuador con 5 cámaras.....	59

<b>Figura A2.5:</b> Planos de actuador con espesor de pared de 1mm .....	59
<b>Figura A2.6:</b> Planos de actuador con espesor de pared de 1mm. ....	60
<b>Figura A2.7:</b> Plano de las dos placas idénticas de la base inferior del actuador.....	60
<b>Figura A3.1:</b> Importar partes.....	61
<b>Figura A3.2:</b> Seleccionar tipo de archivo .step .....	61
<b>Figura A3.3:</b> Nombrar la parte importada.....	62
<b>Figura A3.4:</b> Crear superficie.....	63
<b>Figura A3.5:</b> Seleccionar superficie .....	63
<b>Figura A3.6:</b> Especificar la densidad del material .....	64
<b>Figura A3.7:</b> Densidad especificada.....	65
<b>Figura A3.8:</b> Especificar la hiperelasticidad del Elastosil .....	65
<b>Figura A3.9:</b> Introducir parámetros necesarios para definir la hiperelasticidad del Elastosil.....	65
<b>Figura A3.10:</b> Introducir la elasticidad de la lámina de papel.....	66
<b>Figura A3.11:</b> Introducir parámetros necesarios para definir la elasticidad del papel. ...	67
<b>Figura A3.12:</b> Crear la sección sólida de Elastosil .....	67
<b>Figura A3.13:</b> Seleccionar Elastosil cómo material de la sección. ....	68
<b>Figura A3.14:</b> Crear sección tipo membrana de Papel.....	68
<b>Figura A3.15:</b> Seleccionar papel cómo material de la sección.....	69
<b>Figura A3.16:</b> Seleccionar el sólido al que se le va a aplicar la sección.....	69
<b>Figura A3.17:</b> Seleccionar la sección.....	70
<b>Figura A3.18:</b> Seleccionar las diferentes partes.....	70
<b>Figura A3.19:</b> Crear restricciones de posición entre caras. ....	71
<b>Figura A3.20:</b> Seleccionar la superficie del sólido que se quiere desplazar. ....	71
<b>Figura A3.21:</b> Seleccionar la segunda superficie.....	72
<b>Figura A3.22:</b> Crear una nueva “Part” ensamblando las otras partes .....	73
<b>Figura A3.23:</b> Seleccionar la superficie. ....	73
<b>Figura A3.24:</b> Permite elegir sólo la visualización de un grupo de elementos.....	74
<b>Figura A3.25:</b> Seleccionar la superficie que se quiere ver sola.....	74

<b>Figura A3.26:</b> Crear la “Skin” .....	75
<b>Figura A3.27:</b> Asignar sección a la superficie.....	75
<b>Figura A3.28:</b> Seleccionar la sección.....	76
<b>Figura A3.29:</b> Crear superficie interior. ....	76
<b>Figura A3.30:</b> Seleccionar el asistente para ver creando cortes en la pieza “View Cut”...77	
<b>Figura A3.31:</b> Seleccionar el corte para ver las superficies internas. ....	77
<b>Figura A3.32:</b> Seleccionar el corte para ver las superficies internas. ....	78
<b>Figura A3.33:</b> Seleccionar la superficie que queda. ....	78
<b>Figura A3.34:</b> Crear el “Step” en el que se va a aplicar la carga gravitatoria.....	78
<b>Figura A3.35:</b> Activar las no linealidades geométricas para hacer un análisis no lineal. 79	
<b>Figura A3.36:</b> Crear carga gravitatoria. ....	80
<b>Figura A3.37:</b> Dar valor y dirección a la carga. ....	80
<b>Figura A3.38:</b> Seleccionar el tipo de condición de contorno que se quiere aplicar.....	81
<b>Figura A3.39:</b> Seleccionar la superficie donde se aplica la superficie de contorno. ....	81
<b>Figura A3.40:</b> Seleccionar el la condición de contorno.....	82
<b>Figura A3.41:</b> Crear el “Step” donde se aplica la presión interior. ....	82
<b>Figura A3.42:</b> Ver que están activadas las no linealidades geométricas “Nlgeom” .....	83
<b>Figura A3.43:</b> Crear la presión interna .....	83
<b>Figura A3.44:</b> Asignar la superficie en la que se quiere aplicar la presión.....	84
<b>Figura A3.45:</b> Seleccionar “Superficie Interior”. ....	84
<b>Figura A3.46:</b> Especificar el valor numérico de la presión .....	84
<b>Figura A3.47:</b> Definir contacto.....	85
<b>Figura A3.48:</b> Seleccionar contacto tangencial.....	85
<b>Figura A3.49:</b> Seleccionar contacto sin fricción. ....	85
<b>Figura A3.50:</b> Seleccionar contacto normal.....	86
<b>Figura A3.51:</b> Dejar las opciones por defectos.....	86
<b>Figura A3.52:</b> Seleccionar contacto superficie con superficie.....	86
<b>Figura A3.53:</b> Se selecciona la primera superficie. ....	87

<b>Figura A3.54:</b> Se define el tipo de contacto. ....	87
<b>Figura A3.55:</b> Se selecciona la otra superficie. ....	87
<b>Figura A3.56:</b> Seleccionar el tipo de contacto. ....	88
<b>Figura A3.57:</b> Se selecciona el tipo de mallado tetraédrico .....	89
<b>Figura A3.58:</b> Se selecciona el tamaño de mallado .....	89
<b>Figura A3.59:</b> Mallado de la pieza. ....	90
<b>Figura A3.60:</b> Pieza mallada.....	90
<b>Figura A3.61:</b> Seleccionar el tipo de los elementos. ....	91
<b>Figura A3.62:</b> Seleccionar elementos híbridos. ....	91
<b>Figura A3.63:</b> Seleccionar la "Skin" .....	92
<b>Figura A3.64:</b> Seleccionar geometría cuadrática. ....	93
<b>Figura A3.65:</b> Crear "Job". ....	94
<b>Figura A3.66:</b> Cambiar el porcentaje de uso del procesador.....	94
<b>Figura A3.67:</b> Usar múltiples procesadores.....	95
<b>Figura A3.68:</b> " Submit Job" .....	95
<b>Figura A3.69:</b> "Job" en ejecución.....	96
<b>Figura A3.70:</b> Utilizar "Monitor..." .....	96
<b>Figura A3.71:</b> "Monitor..." .....	97
<b>Figura A3.72:</b> Ver resultados.....	97
<b>Figura A3.73:</b> Ver resultados.....	98
<b>Figura A3.74:</b> Editar la apariencia del modelo.....	98
<b>Figura A3.75:</b> "Wireframe" .....	98
<b>Figura A3.76:</b> Pieza deformada. ....	99
<b>Figura A3.77:</b> Ver los dos estados. ....	99
<b>Figura A3.78:</b> Cambiar la escala de colores.....	100
<b>Figura A3.79:</b> Pieza con código de colores cambiado.....	100
<b>Figura A3.80:</b> Código de colores cambiado. ....	101
<b>Figura A3.81:</b> Ver interior de la pieza. ....	101

<b>Figura A3.82:</b> Ver corte. ....	101
<b>Figura A3.83:</b> Crear “Step” dinámico. ....	102
<b>Figura A3.84:</b> Activar “Nlgeom”. ....	103
<b>Figura A3.85:</b> Crear carga gravitatoria. ....	103
<b>Figura A3.86:</b> Especificar valor y dirección del campo gravitatorio. ....	104
<b>Figura A3.87:</b> Crear Encastre. ....	104
<b>Figura A3.88:</b> Seleccionar la superficie. ....	105
<b>Figura A3.89:</b> Seleccionar “ENCASTRE”. ....	105
<b>Figura A3.90:</b> Crear “Step” dinámico donde se aplica la presión interna. ....	106
<b>Figura A3.91:</b> Ver que las no linealidades geométricas “Nlgeom” se encuentran activadas .....	106
<b>Figura A3.92:</b> Crear presión. ....	107
<b>Figura A3.93:</b> Seleccionar la superficie. ....	107
<b>Figura A3.94:</b> Seleccionar “Superficie Interior” ....	107
<b>Figura A3.95:</b> Especificar el valor de la presión. ....	108
<b>Figura A3.96:</b> Especificar que la malla es tetraédrica. ....	108
<b>Figura A3.97:</b> Seleccionar tamaño de la malla. ....	109
<b>Figura A3.98:</b> Mellar la pieza. ....	109
<b>Figura A3.99:</b> Pieza mellarada. ....	110
<b>Figura A3.100:</b> Seleccionar el tipo de elemento de la malla. ....	110
<b>Figura A3.101:</b> Seleccionar el siguiente cuadro de esta forma. ....	111
<b>Figura A3.102:</b> Seleccionar la Superficie de la lámina ....	112
<b>Figura A3.103:</b> Seleccionar los controles del tipo de elemento de la siguiente forma... 113	113
<b>Figura A4.1:</b> Abrir “XY Data Manager” ....	114
<b>Figura A4.2:</b> Crear datos ....	114
<b>Figura A4.3:</b> Seleccionar “ODB field output” ....	115
<b>Figura A4.4:</b> Seleccionar el desplazamiento (U). ....	115
<b>Figura A4.5:</b> Seleccionar nodo. ....	116
<b>Figura A4.6:</b> Desplazamiento (U) del nodo. ....	116

<b>Figura A4.7:</b> Código de colores .....	116
<b>Figura A4.8:</b> Desplazamiento (U) del nodo.....	117
<b>Figura A4.9:</b> Código de colores. ....	117
<b>Figura A5.1:</b> Crear bloque para el contacto.....	118
<b>Figura A5.2:</b> Crear rectángulo (30x15mm).....	119
<b>Figura A5.3:</b> Extruir en bloque.....	119
<b>Figura A5.4:</b> Asignar sección.....	120
<b>Figura A5.5:</b> Colocar la nueva pieza para el contacto. ....	120
<b>Figura A5.6:</b> Colocación final. ....	121
<b>Figura A5.7:</b> Colocación final. ....	121
<b>Figura A5.8:</b> Se especifica la presión.....	122
<b>Figura A5.9:</b> Crear condición de contorno. ....	123
<b>Figura A5.10:</b> Seleccionar superficie. ....	122
<b>Figura A5.11:</b> Seleccionar encastre. ....	123
<b>Figura A5.12:</b> Especificar el encastre en el Nuevo bloque.....	123
<b>Figura A5.13:</b> Crear “Hystory Output” .....	124
<b>Figura A5.14:</b> Seleccionar parámetros por defecto.....	124
<b>Figura A5.15:</b> Seleccionar parámetros por defecto.....	125
<b>Figura A5.16:</b> Seleccionar contacto superficie con superficie.....	125
<b>Figura A5.17:</b> Seleccionar las dos superficies. ....	126
<b>Figura A5.18:</b> Definir contacto.....	127
<b>Figura A5.19:</b> Crear malla tetraédrica.....	127
<b>Figura A5.20:</b> Definir el tamaño del mallado.....	128
<b>Figura A5.21:</b> Mallar la pieza.....	128
<b>Figura A5.22:</b> Activar “Hybrid Formulation”.....	128
<b>Figura A5.23:</b> Crear Nuevo “Job” .....	129
<b>Figura A5.24:</b> Seleccionar número de procesadores. ....	129
<b>Figura A5.25:</b> Empezar el análisis.....	130

<b>Figura A5.26:</b> Ver resultados.....	130
<b>Figura A5.27:</b> Seleccionar Fuerza de contacto.....	131
<b>Figura A5.28:</b> Seleccionar fuerza de contacto. Fuerza en Newton, tiempo en segundos.	131
<b>Figura A5.29:</b> Exportar datos a Excel. ....	132
<b>Figura A5.30:</b> Exportar datos a Excel. ....	132
<b>Figura A5.31:</b> Valor de la fuerza de contacto .....	133

# Resumen

Con el objetivo de mejorar la interacción entre los robots y las personas, se ha desarrollado un actuador robótico blando basado en un sistema de fuelles. El cuerpo principal del actuador está constituido por un material elastómero. El movimiento es realizado por una actuación neumática, al introducir aire a presión en su interior el actuador se enrolla sobre sí mismo. La naturaleza de este movimiento permite que combinando varios actuadores se puedan coger objetos con distintas formas. También es usado para la recuperación de movilidad en los dedos de las manos.

Las características más destacables de este actuador es que es capaz de adaptarse a la forma de los objetos y su capacidad para manipular objetos delicados debido a que ejerce una fuerza de alrededor de 1N sobre los objetos con los que contacta. Está pensado para crear una herramienta combinando varios actuadores para permitir el agarre de distintos objetos por un brazo robótico. La aplicación de materiales blandos en robótica no sólo se debe a su capacidad de adaptarse a entornos desconocidos y cambiantes, sino a que permiten una interacción segura entre robots y humanos. En los brazos robóticos los componentes más peligrosos son los extremos de los brazos robóticos debido a que alcanzan una mayor velocidad lineal cuando se produce el movimiento del brazo. Al introducir componentes blandos en los extremos de los brazos robóticos se puede mejorar la seguridad en caso de impacto.

En este trabajo se realizó el diseño, modelado y fabricación de distintos prototipos de este actuador blando llamado "PneuNet". Los objetivos son conocer que características morfológicas deben ser utilizadas en el diseño de estos actuadores y cómo mejorar el proceso de fabricación. El diseño ha sido realizado mediante el paquete de software de diseño asistido por ordenador, SolidWorks. El modelado ha sido realizado mediante el paquete de software de simulación basado en el método de elementos finitos, Abaqus.

Los resultados obtenidos a partir del modelado y la fabricación del actuador permiten llegar a diferentes conclusiones sobre cómo mejorar su rendimiento. El moldeado de diferentes tipos de actuador permitió llegar a la conclusión de cómo afectan ciertas propiedades morfológicas al rendimiento del actuador. Una mayor altura de las cámaras, un mayor número de cámaras y un menor espesor de muro hacen que el actuador necesite una menor presión para realizar una actuación completa. En el proceso de fabricación encontramos varios detalles que se deben mejorar. Se requiere una impresora más precisa para lograr que las paredes de las cámaras tengan exactamente 1mm. de espesor. Por lo que debe usarse un espesor de muro de 2mm preferiblemente. Además a pesar de utilizar una cámara de vacío para que las burbujas interiores asciendan a la superficie del molde, se pueden observar burbujas en el cuerpo del actuador. Esto provoca que las paredes tengan puntos más débiles por donde se pueden producir roturas. Las soluciones que se han encontrado a este problema son dos. En primer lugar se debe aumentar la presión de la cámara de vacío. En segundo lugar una vez mezcladas los dos componentes del elastómero se debe verter en el molde e introducir en la cámara de vacío tan rápido como sea posible. De esta forma se evita que el elastómero empiece a curarse y se vuelva más denso, lo que provoca que las burbujas no puedan salir a la superficie.





# Abstract

In order to improve interaction between robots and people, it has developed a robotic soft actuator based on bellows. The main actuator body is constituted by an elastomeric material. The movement is performed by a pneumatic action, introducing compressed air inside the actuator, it wound on itself. The nature of this movement allows that combining several actuators a tool can pick up objects with different shapes. It is also used for the recovery of mobility in human fingers.

The main features of this actuator is that it is able to adapt to the shape of objects and also their ability to handle delicate objects because it exerts a force of about 1N to the objects that contact. It is designed to create a tool combining several actuators to allow grip different objects by a robotic arm. The application of soft materials in robotics is not only its ability to adapt to unknown and changing environments, also they allow for secure interaction between robots and humans. Robotic arms in the most dangerous parts are the ends of the robotic arms due to reaching greater linear velocity when movement of the arm occurs. By introducing soft components at the ends of the robotic arms, safety can improve in case of impact.

In this work the design, modeling and manufacturing of different prototypes of the soft actuator called "PneuNet" was held. The objectives are to know the morphological characteristics that should be used in the design of these actuators and to improve the manufacturing process. The design has been performed using the software package Computer-aided design, SolidWorks. The modeling was performed using the simulation software package based on the finite element method, Abaqus.

The results obtained from the modeling and fabrication of the actuator allows to reach different conclusions on how to improve their performance. The molding of different types of actuator allowed to conclude how certain morphological affect actuator performance properties. A height greater than the chambers, a greater number of chambers and a lower wall thickness cause the actuator require a lower pressure for a full performance. In the manufacturing process are many details that need improvement. A more precisely printer is required to ensure that the walls of the chambers have exactly 1mm. thick. So a wall thickness of 2 mm should preferably be used. Furthermore despite using a vacuum chamber so that the bubbles flow from the inside to the mold surface, bubbles can be observed in the actuator body. Because of that, the walls have weak points where breakage can occur. The solutions we found to this problem are twofold. First you should increase the pressure of the vacuum chamber. Secondly once mixed the two elastomer components, the mixture should be poured into the mold and introduced into the vacuum chamber as quickly as possible. Thus prevents the elastomer begins to heal and become more dense, causing the bubbles can not rise to the surface.



# 1. Planteamiento

## 1.1.Introducción

La industria robótica ha crecido de forma continuada durante los últimos 20 años según datos publicados en la página web de la “International Federation of Robotics”. A lo largo de estos últimos años se han desarrollado una gran cantidad de avances que han llevado a que los robots actuales sean robustos, rápidos y preciosos. Estos avances se han fundamentado en el concepto de que un robot está compuesto por eslabones rígidos unidos por articulaciones. Las mejoras en materiales blandos, mecanismos inteligentes y modelado no lineal han dado lugar a la inclusión del uso de materiales blandos en robótica. Esto se debe también a determinados requisitos en aplicaciones que requieren que el robot interactúe en entornos reales[1].

El uso de materiales blandos está inspirado por los numerosos ejemplos de sistemas animales y vegetales. Las estructuras rígidas como esqueletos o exoesqueletos a menudo se encuentran acompañadas por tejidos blandos. Estos tejidos permiten a los seres vivos generar movimientos (músculos) o detectar contactos con elementos exteriores (piel) [2].

Debido al uso de materiales blandos se consiguen aprovechar las propiedades de los materiales que componen el robot y mejorar considerablemente la capacidad del robot para interactuar con el medio ambiente[3, 4]. Los robots blandos son capaces de soportar grandes deformaciones y con estas deformaciones pasivas del cuerpo lograr adaptarse a entornos indefinidos[5].

En este proyecto se ha realizado el diseño, modelado y fabricación de diferentes prototipos de un actuador blando. Este actuador está compuesto por una serie de cámaras y canales interiores en un cuerpo elastomérico. Estos canales cuando son presurizados producen que al actuador se enrolle sobre si mismo. El movimiento del actuador depende de la morfología y de los materiales con los que está construido.

## 1.2.Motivación

La población mundial actualmente está envejeciendo, por lo que en el futuro se espera que la demanda de robots de asistencia a personas se vea incrementada. Se necesita crear robots capaces de interactuar con personas de forma segura, para lo que es preciso desarrollar robots basados en tecnologías blandas.

Actualmente la robótica suave presenta un desafío para investigadores de diversos campos científicos. Para desarrollar nuevos avances que ayuden al progreso de la robótica suave se necesita investigar desde diferentes áreas de conocimiento y cooperar en la integración de tecnologías para el desarrollo de sensores, actuadores, materiales y

recursos computacionales de los robots blandos. Por lo tanto no hace falta ser un especialista en automática para aportar un avance útil para la robótica suave.

### **1.3.Objetivos**

Este proyecto tiene como principal objetivo el desarrollo de un tipo de actuador blando construido principalmente con silicona. Este actuador ha sido desarrollado previamente por investigadores de la universidad de Harvard, por lo que podemos encontrar información en artículos previos. Además la universidad de Harvard ha creado una página web “opensource” donde diferentes personas pueden colaborar libremente incluyendo información relacionada con el desarrollo de robots blandos ([www.softroboticstoolkit.com](http://www.softroboticstoolkit.com)).

Para el desarrollo de los actuadores blandos es necesario pasar por diferentes etapas: diseño, modelado y fabricación de diferentes prototipos. Por ello las metas planteadas son las siguientes

- Realizar un estudio del estado del arte de los robots blandos, centrado en la inspiración biológica, las características generales, tecnologías disponibles (actuadores y sensores), y desafíos de la robótica suave.
- Diseñar actuadores blandos y moldes necesarios para la fabricación mediante el paquete de software de diseño asistido por ordenador SolidWorks.
- Modelar diferentes prototipos de actuadores y estudiar el desplazamiento en función de la presión de cada actuador.
- Fabricar diferentes prototipos utilizando los moldes diseñados anteriormente.
- Comparar diferentes características de los prototipos para ver cómo afectan diferentes cambios morfológicos al rendimiento del actuador.

### **1.4.Estructura**

Este documento está organizado de la siguiente forma:

En este primer capítulo (Capítulo 1), se realiza una introducción a la nueva tendencia de uso de materiales blandos en robótica, se destaca la capacidad que proporcionan los materiales blandos de interactuar con entornos desconocidos, se mencionan los motivos que llevaron a plantear este tema como trabajo de fin de grado y finalmente se enumeran los objetivos de este trabajo.

En el segundo capítulo (Capítulo 2), se realiza un estudio del estado del arte de la robótica suave donde se introducen los principales conceptos, la inspiración biológica, tecnologías disponibles y desafíos de la robótica suave.

En el tercer capítulo (Capítulo 3), se introducen los conceptos que han sido fundamentales para el desarrollo del trabajo. Estos son el método de elementos finitos utilizado en el modelado de los actuadores, el diseño asistido por ordenador utilizado para diseñar los actuadores y los moldes, un estudio de los materiales blandos con los que se pueden fabricar los actuadores blandos y por último una breve explicación de la placa de control utilizada para la manipular los actuadores.

En el cuarto capítulo (Capítulo 4), se desarrolla el cuerpo central del trabajo donde explica cómo se ha realizado el diseño, la fabricación y el modelado de los diferentes prototipos de actuadores neumáticos blandos.

## 2. Estado del arte de la robótica blanda o suave

### 2.1. Introducción

Un robot es considerado “blando” si los materiales por los que está compuesto tienen un módulo de Young entre  $10^2 - 10^6$  Pa lo que significa que debe estar construido por materiales blandos y deformables. Un robot blando debe tener un movimiento más parecido al humano que al de un robot, lo que requiere que se utilicen materiales flexibles para músculos y tendones. Estos robots deben interactuar con personas de forma suave, con movimientos y comportamientos que son amables y naturales. La razón por qué estos robots son importantes, es porque son más adaptables, más capaces y más seguros, especialmente en ambientes donde interactúan con personas [6].

Los animales utilizan estructuras blandas para moverse de forma compleja en entornos naturales. En el mundo animal los materiales blandos son más comunes que los materiales duros. Incluso los animales con duros endoesqueletos, están compuestos en su mayoría por líquidos y tejidos blandos [2]. Esto ha inspirado a los ingenieros para introducir tecnologías blandas en sus diseños. Debido a que los seres vivos se sirven de mecanismos blandos para interactuar con entornos imprevisibles el objetivo es crear robots inspirados en sistemas naturales que permitan la interacción con estos ambientes. Además introducir tecnologías blandas puede reducir la complejidad mecánica y algorítmica del diseño de robots sin olvidar que otra de las grandes ventajas es que los robots pueden interactuar de una forma segura con humanos. Las nuevas tecnologías blandas se pueden usar en tareas de servicio a seres humanos como medicina, asistencia a personas y respuesta a desastres.

El campo de la robótica suave es relativamente un nuevo área de investigación en comparación con la robótica rígida clásica. Los robots blandos surgen debido a la necesidad de interacción entre los robots y un espacio dinámico y desconocido, que requiere de nuevas características [7]. La robótica suave permite empezar a construir dispositivos más polivalentes y que el robot se adapte a distintos entornos. Anteriormente en la robótica clásica los robots estaban diseñados para trabajar en un espacio controlado y definido.

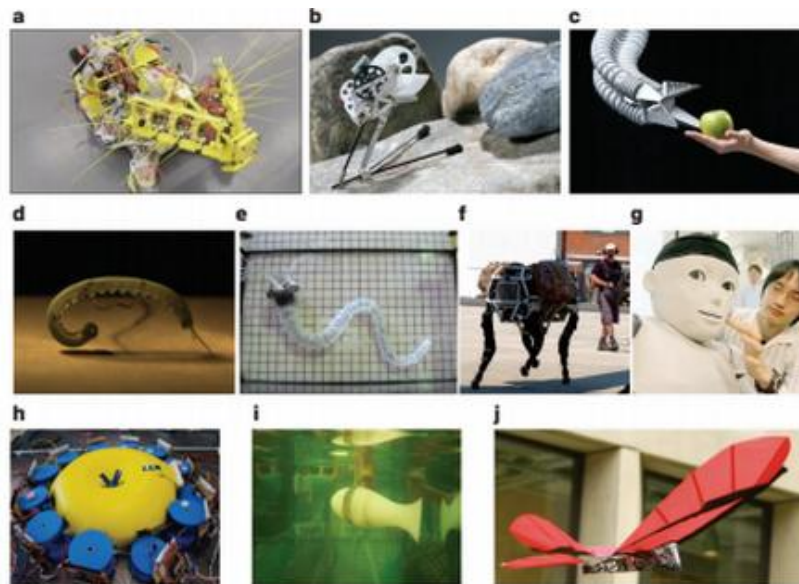
Mientras que los robots industriales necesitan ser rápidos, repetitivos y precisos, los requerimientos para robots de servicio son diferentes debido a la necesidad de interacción con humanos [2]. Por ello una nueva generación de robots no puede basarse en estructuras rígidas y en el control como único mecanismo de seguridad, que es actualmente el modelo de los robots industriales. Esta nueva generación debe basarse en factores como la morfología, las propiedades de los materiales y el entorno a la hora de realizar el diseño de robots que requieren versatilidad, adaptabilidad, eficiencia y seguridad [8].

Gran parte de las nuevas ventajas en el desarrollo de robots vienen dadas por el utilización de una dinámica pasiva en el diseño, inspirada en sistemas naturales en lugar de una mejora del sistema del control [4]. Un sistema clásico de control de un robot en este

caso no sería suficiente, debido a que este tipo funciona bien en ambientes controlados cómo fábricas. Hay que controlar los robots blandos para que puedan desenvolverse en entornos continuamente cambiantes y con interacciones que no se pueden predecir. El sistema de control debe ser obediente, reactivo y con el control dividido en sus subsistemas en lugar de centralizado. Por ejemplo, cuando nosotros agarramos un objeto, no necesitamos saber exactamente la forma, sólo aplicamos una determinada fuerza y nuestros dedos al ser blandos se adaptan a la forma y lo agarran. Por esto se necesita una nueva forma de control, para estos robots blandos.

## 2.2. Inspiración biológica

Los animales utilizan estructuras blandas para moverse de forma eficiente en entornos naturales, esto ha inspirado a los ingenieros para utilizar tecnologías blandas en el desarrollo de sus diseños [2]. Existen alrededor dos millones de especies poblando la Tierra. Esta gran variedad de formas de vida es una gran inspiración para científicos e ingenieros [9]. La siguiente imagen (ver Figura 2.1) muestra robots que incorporan tecnologías blandas y han sido diseñados inspirados en animales de cuerpo blando.



**Figura 2.1:** Robots inspirados en animales de cuerpo blando [9]. (a) Scratchbot[10]. (b) Robot Saltador[11]. (c) “Festo Bionic Handling Assistant”[12]. (d) GoQBot[13]. (e) Brazo inspirado en un tentáculo de un pulpo[14]. (f) BigDog[15]. (g) El robot humanoide CB[16]. (h) Slimy II[17]. (i) FILOSE[18]. (j) Phoenix[19].

A continuación está explicado que tecnologías blandas utiliza cada uno de los diseños de la Figura 2.1:

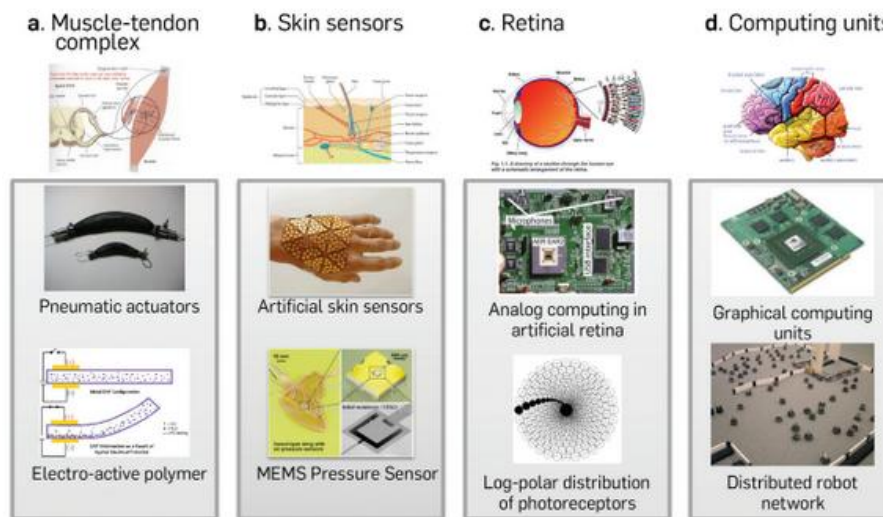
- a) Scratchbot (ver Figura 2.1(a)), tiene el objetivo de implementar robóticamente el sistema sensorial de los bigotes de roedores. Imita el sistema de recepción sensorial, y la estructura neuronal que genera un mapeado de los estímulos recibidos [10].



- b) Es un robot que imita a un saltamontes (ver Figura 2.1(b)), es capaz de saltar en una dirección determinada aterrizar y volver a saltar. Pesa 14 gramos, mide 18 cm y puede saltar hasta 62 centímetros. Para el desarrollo de saltos se carga un elemento elástico y después se utilizan las piernas como catapulta para saltar [11].
- c) “Festo Bionic Handling Assistant” (ver Figura 2.1(c)), está inspirado en la trompa de un elefante. Debido a su diseño puede interactuar de forma segura con humanos de forma segura. Se mueve gracias a un sistema neumático, con cámaras internas. Para el control, dispone de un sistema capaz de entrenar brazos robóticos basado en la manera en que los bebés aprenden a moverse [12].
- d) GoQBot (ver Figura 2.1(d)), es un robot compuesto por materiales blandos con la capacidad de poder enrollar su cuerpo en una estructura con forma de rueda para tener una locomoción de rodadura. Está inspirado en orugas [13].
- e) Es un brazo inspirado en un tentáculo de un pulpo (ver Figura 2.1(e)), es suave flexible y continuo. En el interior de este brazo hay alojados 18 actuadores transversales (SMA). Esto permite al brazo alargarse, acortarse, doblarse en cualquier dirección y volverse rígido en algunas partes [14].
- f) BigDog (ver Figura 2.1(f)) [15] es un robot inspirado en la locomoción canina, se mueve gracias a cuatro piernas y es dinámicamente estable. Alcanza una velocidad de 6.5 km/h y puede cargar con 150 kg.
- g) El robot humanoide CB (ver Figura 2.1(g)) [16] está diseñado para realizar estudios sobre el aprendizaje robótico, el desarrollo y la interacción entre robots y humanos [20, 21]. Está cubierto por una piel llena de sensores, dispone de uniones flexibles y es accionado por 51 cilindros neumáticos.
- h) Slimy II (ver Figura 2.1(h)), es un sistema de organización modular que se mueve a través de interacciones físicas locales [17]. Aunque ningún módulo puede moverse por sí mismo, mediante el uso de osciladores neurales como controladores para los accionadores y a través de acoplamiento físico entre las unidades se puede conseguir inducir la actuación. Esto lleva a un movimiento del robot aunque no haya un control global.
- i) El robot FILOSE (ver Figura 2.1(i)), se ha desarrollado para entender mejor los principios de locomoción y sensoriales de los peces. Imita la locomoción que los peces realizan mediante movimientos ondulatorios gracias a la utilización de materiales elásticos. Se conducen sólo algunas articulaciones, y otras se dejan pasivas, los movimientos ondulatorios se transmiten a las partes pasivas generando un movimiento parecido al real de un pez. Esto se debe a la morfología del diseño y a una correcta elección de los materiales [18].

j)Phoenix (ver Figura 2.1(j)), es un robot basado en un pájaro totalmente informatizado y con alas pasivamente adaptables. Tiene una envergadura de 2 metros, su peso es de 1 kilogramo y tiene la capacidad de posarse [9, 19].

Al igual que surgen robots basados en seres vivos, también surgen robots antropomórficos que incorporan tecnologías blandas en sus diseños. Por ejemplo el robot antropomórfico ECCE [22] incorpora un amplio rango de tecnologías, que deben ser integradas y deben cooperar para conseguir comportamientos deseados: sensores, actuadores, materiales y recursos computacionales [9]. Las propiedades físicas del cuerpo, cómo la elasticidad de los actuadores y la capacidad de deformación de la superficie de las manos y los pies sirven para amortiguar el impacto al caminar. En la siguiente imagen se pueden observar el desarrollo de nuevas tecnologías que permiten el desarrollo de robots bioinspirados (ver Figura2.2).



**Figura 2.2:** Nuevas tecnologías para el desarrollo de robots bioinspirados[9]. (a) Músculos y tendones artificiales. (b) Sensores táctiles. (c) Sensores visuales. (d) Computación distribuida.

Los músculos artificiales en robótica pueden ser desarrollados mediante actuadores neumáticos o polímeros eléctricamente activos (ver Figura 2.2(a)). Para darles sentido del tacto a los robots se han desarrollado sensores MEMS de presión y resoluciones espaciales(ver Figura 2.2(b)). Se han perfeccionado también sensores visuales con diferentes densidades de fotorreceptores, imitando un ojo de un ser vivo (ver Figura 2.2(c)). También se han conseguido avances en el campo de la computación distribuida creando redes de sensores y un control distribuido para un sistema que compone un gran número de robots (ver Figura 2.2(d)) [9].

## **2.3. Primeros pasos de la robótica blanda o suave**

Los primeros ejemplos de robots que empezaron a utilizar tecnologías blandas, fueron robots que compartían espacio de trabajo con personas y necesitaban ser seguros. Para solucionar este problema se desarrollaron diferentes soluciones:

- Recubrir el robot de materiales blandos [23, 24].
- Utilizar manipuladores de bajo peso actuados por módulos [25].
- Utilizar manipuladores actuados por tendones [26].
- Utilizar actuadores flexibles en serie [27] o variables [28].

## **2.4. Tecnología tras los robots blandos**

### **2.4.1. Actuadores**

Un actuador se considera un elemento capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en una salida generalmente mecánica que puede provocar un efecto sobre un proceso automatizado.

#### **2.4.1.1. Actuadores eléctricos blandos**

- **Polímeros eléctricamente activos (EAP)**

Los polímeros electroactivos son polímeros que presentan una respuesta al ser estimulados por un campo eléctrico. Estos materiales se consideran materiales “inteligentes” porque sufren cambios de forma o tamaño en relación con el campo eléctrico aplicado. Los polímeros electroactivos son fáciles de fabricar debido a la facilidad de procesamiento de estos polímeros. Se pueden incluir en sistemas electromecánicos para producir actuadores inteligentes [29] (ver Tabla 2.1).

Tipo	Material	Referencia
EAPs Iónicos	“Polymergels”	(Tanaka, et al., 1982)[6]
	“Tonicpolymer – metalcomposites”	(Asaka & Oguro, 2000) [7]
	“Conjugatedpolymers”	(Baughman, 1996) [8]
	“Carbonnanotubes”	(Baughman, et al., 1999) [9]
EAPs Electrónicos	“Piezoelectric polymers”	(Nalwa, 1995) [10]
	“Electrostrictive polymers”	(Pelrine, et al., 2000) [11]
	“Dielectric elastomers”	(Lehmann, 2001) [12]
	“Liquid crystal elastomers”	(Aliev, 2009) [13]
	“Carbonnanotube aerogels”	(Kim, et al., 2009) [14]

**Tabla 2.1:** Clasificación de polímeros electroactivos [8].

En los polímeros electroactivos iónicos la actuación es causada por el desplazamiento de iones en el interior del polímero. Su principal característica es la capacidad de respuesta a voltajes muy bajos, sin embargo tienen dos características desfavorables, tienen un periodo corto de vida y un tiempo alto de respuesta. Estos inconvenientes se deben al proceso electroquímico de la energía del mecanismo, que producen una degradación del material y también una reducción de la velocidad de respuesta [30].

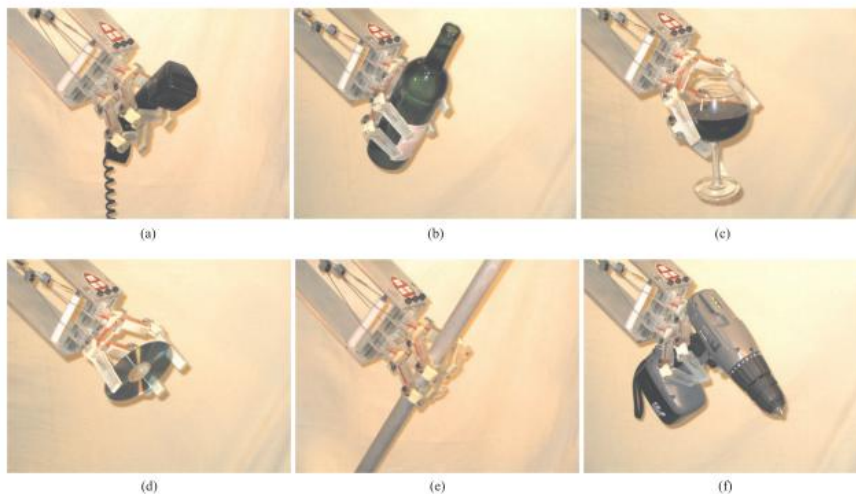
En los polímeros electroactivos Electrónicos la actuación es causada por fuerzas electroestáticas entre dos electrodos que aprietan el polímero. Su principal característica de estos materiales es que pueden lograr grandes fuerzas de actuación, un buen tiempo de respuesta y un largo periodo de vida. Por el contrario también presentan una principal inconveniente, necesitan una gran tensión de accionamiento para producir grandes campos eléctricos (del orden de 150MV/m). Estos altos campos eléctricos se deben a la naturaleza electroestática de los movimientos de activación. En el caso de la reducción del campo eléctrico necesario, que se puede conseguir aumentando la constante dieléctrica en el material, se podría conseguir una mayor aplicabilidad de estos actuadores que necesitan actualmente altos voltajes (del orden de 1KV). Presentan otros inconvenientes como la necesidad de mejora de los electrodos y la necesidad de un marco rígido donde el material pueda ser estirado [31].

- **Aleaciones metálicas con memoria**

Son aleaciones metálicas con memoria, tienen la característica de retener la forma previa a la deformación que han sido sometidos para después recuperar esa forma inicial, llegan a recuperar deformaciones permanentes de hasta un 10% y más. Además, son metales y poseen las características típicas de los metales como resistencia, rigidez y capacidad de trabajo. La combinación de todas estas propiedades hace que sea fácil de entender por qué estos materiales son atractivos para el campo de la ingeniería y dieron lugar a una nueva forma de pensar en el diseño de sistemas mecánicos [32]. Con respecto a sus características principales presentan una relación alta de resistencia-peso, facilidad para la miniaturización, bajo coste y son bio-compatibles. Los principales inconvenientes son la generación de fuerzas debidas a cambios de temperatura y el difícil control debido a la histéresis (alrededor del 1%) que se debe a que gran parte de la energía se transforma en calor causando degradación y fatiga[33].

Estos actuadores son creados mediante el proceso de prototipado SDM (“ShapeDepositionManufacturing”), cuyas principal ventaja es la posibilidad de incrustar sensores, motores o refuerzos estructurales. El proceso “Shape Deposition Manufacturing” consiste en la fabricación y ensamblado de mecanismos a través de pasos alternos de fresado y casting de forma simultánea [34].

En la siguiente imagen se puede apreciar cómo combinando varios dedos fabricados mediante SDM se puede conseguir un gran resultado a la hora de sujetar diferentes objetos (ver Figura 2.3).



**Figura 2.3:** Mano SDM cogiendo varios objetos cotidianos[35], (a) teléfono, (b) botella de vino, (c) vaso de vino, (d) CD ROM, (e) barra de hierro, (f) taladradora.

### 2.4.1.2. Actuadores neumáticos blandos

- **“PheuNets Bending Actuators”**

Este actuador blando ha sido desarrollado por el “Whitesides Research Group” de la universidad de Harvard. Es un actuador compuesto principalmente por elastómero que combinado con su morfología y una actuación neumática genera un movimiento de actuación que hace que el actuador se enrolle sobre sí mismo. Al estar compuesto de un material blando es capaz de adaptarse a formas de objetos sin ejercer grandes fuerzas sobre ellos.

La morfología del actuador está basada en un mecanismo de fuelles(ver Figura 2.4 (a)), al inyectar aire a presión en el interior del actuador las cámaras se expanden y las paredes exteriores chocan entre sí generan el movimiento. En la base se coloca una capa de un material que no es hiperelástico (ver Figura 2.4 (c)) que impide que el actuador se expanda en la parte inferior del diseño. Esta morfología genera que la parte de arriba del actuador se expanda mientras que la de abajo no, lo que provoca que el actuador se enrolle sobre si mismo cuando se introduce aire a presión en las cámaras interiores [36].



**Figura 2.4:**“PheuNetBending Actuador”[37].(a) “Main Body”. (b) “Elastomer Layer A”. (c) “Paper Layer”. (d) “Elastomer Layer B” [49].

Estos actuadores resultan muy interesantes porque pesan poco, se fabrican de forma sencilla, y proporcionan un movimiento no lineal [36]. El comportamiento del actuador dependerá de los materiales utilizados y de la forma de las cámaras. En este proyecto se ha realizado un estudio sobre cómo influye la morfología y materiales en las propiedades de estos actuadores que se puede ver más adelante.

- **“Fiber Reinforced Actuators”**

Fue desarrollado por Kevin Galloway en el “Wyss Institute for Biologically inspired Engineeringen Harvard”. Es un tipo de actuador blando que consiste en una pieza de forma semicilíndrica y elastomérica que se encuentra envuelta con refuerzos inextensibles que la impiden expandirse radialmente a la pieza cuando se le aplica aire a presión, sólo se permite el desplazamiento en el eje axial. De esta forma se produce un alargamiento de la pieza al introducir aire a presión [38]. Para conseguir que se enrolle sobre si mismo cómo el anterior actuador, se le añade una lámina de material inextensible en la parte de abajo. Al expandirse el actuador en la dirección axial cuando se inyecta aire a presión, y estar restringida la expansión en la cara inferior por una lámina de material inextensible, el actuador se enrolla sobre sí mismo (ver Figura 2.5).

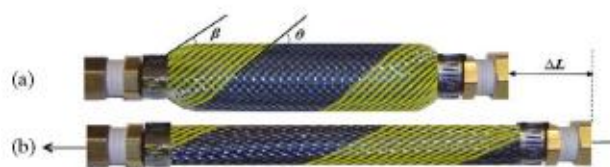


**Figura 2.5:** Actuador "Fiber Reinforced Actuator"[38].

Los actuadores reforzados con fibras tienen varias ventajas, pueden lograr una gama más amplia de movimientos que dependen de cómo estén enrollados los refuerzos inextensibles y también tienen menor riesgo de fallo por delaminación. Este menor riesgo a fracaso por delaminación se debe a que tiene menores uniones entre partes que los actuadores "PneuNets", sólo las tapas de los extremos. Sin embargo también tienen inconvenientes, su fabricación requiere mucho más tiempo.

- **Músculos artificiales neumáticos**

Los músculos artificiales neumáticos fueron inventados en la década de los 50 para utilizarlos en ortopedia, fueron desarrollados primero con el nombre de "McKibben Artificial Muscles". Estos actuadores consisten en una cámara de aire elastomérica cubierta por una malla trenzada, sujeta por los extremos. Cuando la cámara elastomérica interna es sometida a aire a presión esta se infla y tiende a incrementar su volumen. Debido a la poca elasticidad de la malla trenzada el actuador se contrae a la vez que su volumen aumenta(ver Figura 2.6(a))[39].



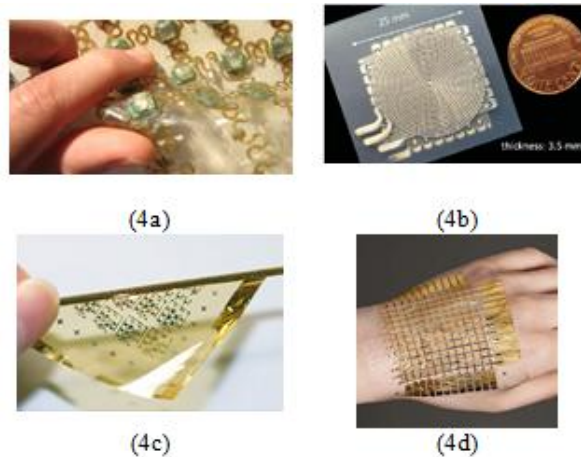
**Figura 2.6:** Músculo artificial neumático[40](a) Contracción provocada neumáticamente. (b) Estado de reposo.

Los músculos neumáticos artificiales tienen propiedades similares a las de un músculo orgánico[41], son ligeros, fáciles de fabricar, tienen una contracción máxima y curvas de carga y longitud similares al músculo humano[42]. Por lo tanto estos músculos artificiales

satisfacen la necesidad de seguridad, sencillez y ligereza que la interacción entre humanos y robots requiere. Por ello son utilizados en aplicaciones médicas y biorrobóticas[41].

## 2.4.2. Sensores

Los sensores flexibles son uno de los mayores desafíos que tienen los robots suaves. La mayoría de los robots tienen sensores rígidos de pequeño tamaño, que se encuentran incrustados en el cuerpo del robot o a lo largo de la superficie surface[8]. Existen varias alternativas disponibles dependiendo de los parámetros físicos que se desean medir y de la morfología del problema (ver Figura 2.7).



**Figura 2.7:** Sensores flexibles [8]. Soft sensors. (4a) MEMS distributed in a flexible array [59]. (4b) GaIn Sensors [44].(4c) Flexible organic transistors [45].(4d) Plastic and microlight electronic [46].

Los sistemas micro-electromecánicos (MEMS) (ver figura 2.7 (4a)) se consiguen fabricar gracias a la deposición de películas delgadas de materiales, esto permite crear sensores de tamaño reducido. Los sensores MEMS miden el estrés del material, se caracterizan por su bajo consumo y su pequeño tamaño [43].

El desarrollo de la piel artificial altamente deformable (ver Figura 2.7(4b)) permite medir fuerzas de contacto y tensiones. Los principios de detección de la piel artificial son simples. Los micro-canales en cuyo interior se encuentra una aleación eutéctica líquida de Galio e Indio producen un aumento medible en la resistencia al ser deformados por presión o estiramiento, esto es debido al cambio de forma del metal líquido [44].

Los sensores flexibles orgánicos(ver Figura 2.7(4c)) se usan para aplicaciones donde se necesita una alta flexibilidad. Estos sensores pueden ser enrollados con un radio muy pequeño o doblados sin que disminuya su funcionalidad electrónica. Estas propiedades se consiguen gracias a que el espesor es muy reducido [45].

Por último también destacan en este campo los sensores plásticos ultraligeros (ver Figura 2.7(4d)), son fabricados a partir de una capa de polímero de alrededor de  $1\mu\text{m}$  de espesor, son flexibles y se adaptan al entorno. Consiste en una matriz ultraligera de



sensores táctiles resistivos y se adaptan a formas arbitrarias cómo por ejemplo la de una mano humana [46].

## **2.5.Desafíos de la robótica blanda**

De acuerdo con las estimaciones de la “International Robotics Federation”, las ventas de robots de servicio para uso personal se verán aumentadas en el futuro. Demográficamente la población está envejeciendo, por lo que la tecnología debe desarrollarse para permitir a las personas ser autónomos el mayor tiempo posible.

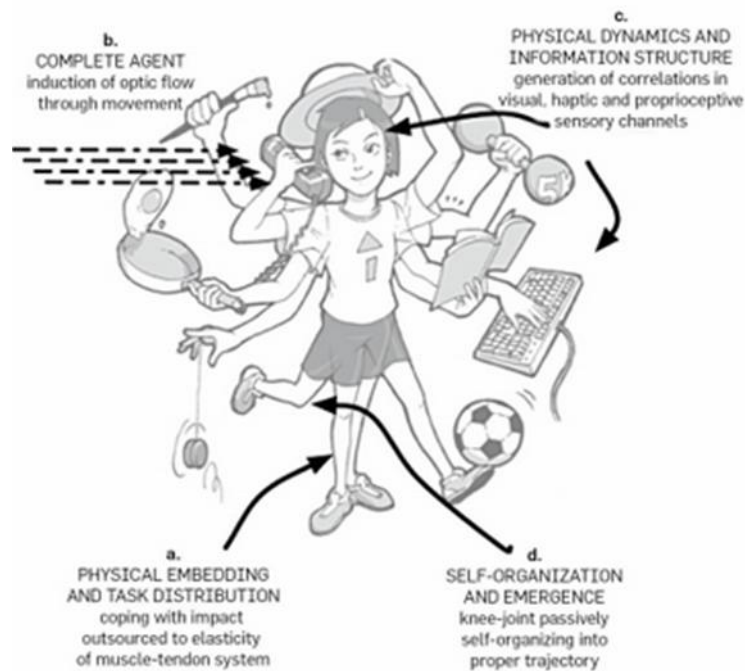
Este cambio demográfico sugiere dos posibles escenarios:

- Un robot capaz de desarrollar casi las mismas tareas que los humanos y ser capaz de tener conversaciones inteligentes como dar consejos médicos, financieros y de ocio.
- Muchos robots especializados en diferentes tareas y muy especializados en realizar cada una de estas tareas.

Cómo se ha adelantado en la introducción, para conseguir un robot versátil se necesita utilizar tecnologías suaves inspiradas en los cuerpos de seres vivos. El principal desafío de la robótica suave es entender los principios sobre los que se basan los comportamientos de humanos y animales para después transferirlos al desarrollo de robots. La naturaleza contiene un amplio conocimiento en algunas disciplinas cómo la neurociencia, biomecanismos y sistemas biológicos. El máximo de la robótica es crear un robot con las mismas habilidades que un ser humano [9].

Un progreso en la robótica bio-inspirada sólo se puede producir cuando varias tecnologías estén integradas y puedan cooperar para lograr comportamientos deseados. Esta intención de crear robots versátiles convierte a la robótica en uno de los campos más interdisciplinarios [9]. Las tecnologías que deben desarrollarse para conseguir un robot antropológicamente inspirado y versátil son la computación, los sensores, los actuadores y los materiales.

Principios de diseño: se pueden enumerar un número de principios de diseño que están empezando a ser reconocidos por la comunidad robótica [9].



**Figura 2.8:** Principios de diseño[9]. (a) “Physical Embedding and Task Distribution”,(b) “Complete Agent”,(c) “Physical Dynamics and Information Structure”,(d) “Self-Organization and Emergence”

- “Physical Embedding and Task Distribution”: (ver Figura 2.9(a)) El comportamiento del robot no se encuentra solamente supeditado a un control interno, sino que se encuentra supeditado a la morfología del robot y a las propiedades de los materiales[9].
- “Complete Agent”: (ver Figura 2.9(b)) Todos los componentes del robot se encuentran acoplados, y se encuentran interactuando continuamente, las capacidades de movimiento tienen que enlazar con los receptores sensoriales. Se debe entender cómo el comportamiento es “orquestrado” en vez de “controlado” [9].
- “Physical Dynamics and Information Structure”: (ver Figura 2.9(c)) La actividad sensorial-motora y la morfología del cuerpo inducen a regularidades estadísticas en las entradas sensoriales, lo que simplifica el procesamiento de la información por el cerebro[9].
- “Self-Organization and Emergence”: (ver Figura 2.9(d))Cómo estos robots están basados en el comportamiento humano, se puede hablar de conceptos cómo la propia organización de cada una de las partes del robot y la emergencia, en lugar de un control basado en un sistema con control centralizado [9].

## **2.6.Conclusiones**

Esta descripción de la robótica suave presenta las nuevas tecnologías utilizadas para diseñar y construir un robot blando como los actuadores sensores materiales, control y futuras aplicaciones de este nuevo campo. Los robots blandos presentan nuevas características, son flexibles, resistentes, robustos y versátiles, características que los robots clásicos no tienen. Esto les hace importantes a la hora de diseñar un sistema robótico donde se requiere flexibilidad y seguridad. Es importante continuar con el desarrollo de nuevos actuadores, sensores, materiales blandos y unidades de control para conseguir una mayor eficiencia. La robótica suave guía la robótica hacia nuevos diseños, nuevas formas de control, actuación y sensorización, esto incrementa los desafíos en el desarrollo de nuevos sistemas robóticos [8].

## 3. Conceptos fundamentales para el desarrollo de robots suaves.

### 3.1. Elementos finitos

El método de elementos finitos es un método numérico cuyos resultados se aproximan a las soluciones de ecuaciones diferenciales parciales. Es utilizado para resolver problemas de ingeniería y física con geometrías complicadas [47]. El método consiste en discretizar (de forma adecuada) un sistema continuo en pequeños elementos. En cada elemento se distinguen puntos representativos llamados nodos. Los cálculos son realizados en la malla de nodos (conjunto de nodos y sus relaciones de adyacencia), la generación de la malla de nodos suele ser realizada por programas especiales llamados generadores de malla. Dependiendo de las relaciones de adyacencia (dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito) se relacionan las variables incógnitas definidas en cada nodo. El conjunto de ecuaciones (lineales o no lineales) que surge al relacionar las variables incógnitas forma un sistema de ecuaciones cuya matriz es llamada matriz de rigidez del sistema. De esta forma se convierte un problema de cálculo diferencial en un problema de álgebra lineal [47].

Los problemas reales de elementos finitos pueden constar de millones de elementos y nodos, por lo que suelen ser resueltos en la práctica mediante el uso de paquetes de software disponibles en el mercado. Generalmente en primer lugar se realiza el cálculo del campo de desplazamientos y posteriormente a través de relaciones cinemáticas y constitutivas se obtienen las deformaciones y las tensiones [47]. Para llevar a cabo un cálculo mediante el método de elementos finitos es necesario seguir un proceso ordenado constituido por tres pasos.

Tareas necesarias para llevar a cabo el método de cálculo [47]:

1. Pre-procesamiento del modelo de elementos finitos: se define la geometría, las propiedades de los materiales, las condiciones de contorno, el mallado y otras propiedades necesarias para el modelo.
2. Procesado: si el problema es un sistema lineal y no dependiente del tiempo el resultado del pre-procesado define un sistema de ecuaciones lineales que pueden ser resueltas con un algoritmo de resolución de sistemas de ecuaciones. En caso de ser un problema no lineal o dependiente del tiempo las ecuaciones deben resolverse una a continuación de otra debido a que la entrada depende del paso anterior.
3. Post-procesado: se calculan los valores de las magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos. También ocasionalmente se realizan operaciones de suavizado, interpolación o determinación de errores de aproximación.

Para el modelado de los actuadores blandos, en este proyecto se ha utilizado el paquete de software Abaqus debido a su alta capacidad para resolver problemas no lineales. Por esta razón a continuación se ofrece una breve introducción específica a este programa.

### 3.1.1. Abaqus

Es un paquete de software de simulación diseñado para realizar un análisis basado en el método de elementos finitos, para realizar cálculos del tipo:

- Estructurales estáticos.
- Estructurales dinámicos.
- Térmicos.
- Acústico-estructurales.
- Mecánica de fluidos.
- y otros...

La principal diferencia entre análisis estáticos y dinámicos es que los análisis estáticos desprecian los efectos inerciales del problema. Los análisis realizados pueden ser de tipo lineal o no lineal, un análisis lineal asume que se cumple la ley de Hooke (esfuerzo-deformaciones) en el sistema analizado. Este paquete de software consta de cuatro productos, cada uno de ellos se encarga de diferentes tareas:

- Abaqus/CAE(“Complete Abaqus Environment”): permite definir el problema y analizar los resultados del análisis.
- Abaqus/CFD(“Computational Fluid Dynamics”): realiza el análisis computacional del comportamiento de fluidos.
- Abaqus/Standard: emplea un esquema de integración implícita.
- Abaqus/Explicit: emplea un esquema de integración explícita que sirve para resolver sistemas no lineales con contactos complejos.

Para el análisis se llevan a cabo las tres tareas especificadas en el punto anterior para realizar un cálculo numérico basado en el método de elementos finitos, para cada una de estas tareas se utiliza un producto específico contenido en el paquete de software Abaqus:

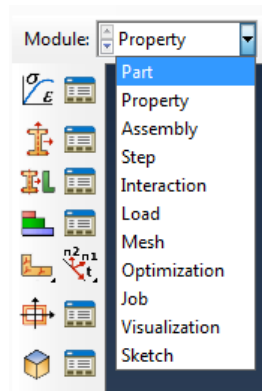
1. Preprocesado (Modelado): Abaqus/CAE
2. Procesado: Abaqus/Standard or Abaqus/Explicit
3. Postprocesado: Abaqus/CAE

Abaqus dispone de diferentes módulos que sirven para definir el modelo. Para definir un modelo (preprocesado) se deben los siguientes pasos para aplicar el método de elementos finitos en Abaqus, normalmente se sigue el orden preestablecido por el programa entre los diferentes módulos (ver Figura 3.1) [48]:

- Módulo “Part”: la geometría requerida por problema se define en el módulo “Part”. Primero se crea un perfil 2-D a partir del cual se crea una figura sólida 3-D a partir

de la extrusión. También se pueden importar las geometrías diseñadas en otros programas si estas han sido guardadas en un archivo tipo .step.

- Módulo “Property”: las propiedades de los materiales son definidas en este módulo .Se pueden crear secciones de diferentes tipos geométricos, con un material asignado. Estas secciones se signan a su vez a las diferentes partes de los elementos del modelo para definir las propiedades.
- Módulo “Assembly”: se pueden definir las relaciones de proximidad y posición entres los diferentes elementos que componen el modelo.
- Módulo “Step”: permite seleccionar el tipo de análisis que se va a realizar.
- Módulo “Interaction”: en este módulo se definen las interacciones entre elementos del modelo.
- Módulo “Load”: es donde se definen las cargas y las condiciones de contorno del modelo.
- Módulo “Mesh”: se encarga de controlar el mallado del modelo.
- Módulo “Job”: este módulo permite realizar el análisis (procesado) de elementos finitos al modelo.



**Figura 3.1:** Diferentes módulos para definir el modelo.

Abaqus/CAE es un entorno gráfico que permite definir el modelo de forma sencilla. El modelo queda definido en un archivo ASCII que luego es compilado (procesado) por Abaqus/Standard o Abaqus/Explicit para obtener los resultados. Los resultados se pueden visualizar una vez realizado el análisis en el entorno Abaqus/CAE.

### 3.1.2. Archivos de Abaqus

Un archivo de entrada ABAQUS es un archivo de datos ASCII que se pueden crear o editar con cualquier editor de texto. El archivo de entrada contiene dos conjuntos principales de datos: datos de modelo y datos de historia. Los datos de modelo definen los

elementos, nodos, las propiedades de los elementos, propiedades del material y cualquier otro dato que especifique el modelo en sí. En el módulo “Step” se define el tipo de análisis que se va a realizar. Todos los datos antes del paso “Step” son considerados datos del modelo. Los datos de historia definen lo que ocurre con el modelo de elementos finitos. Incluye información sobre las cargas del modelo, el tipo de respuesta esperada, condiciones de contorno... etc. [48].

- **Datos de modelo:**

Se debe definir la geometría del modelo y las definiciones de los materiales utilizados. También se pueden añadir datos opcionales [48]:

- La geometría puede ser dividida en partes “Parts” y luego realizar un ensamblado “Assembly”.
- Condiciones iniciales: se pueden especificar esfuerzos, temperaturas o velocidades iniciales.
- Interacciones de contacto entre las superficies o partes.
- Control de salida: Opciones para controlar la definición del modelo de salida hacia el archivo de datos.
- Análisis a continuación: es posible utilizar los resultados de un análisis previo y continuar el análisis con el nuevo modelo o datos de la historia.

- **Datos de historia:**

En los datos de historia las entradas están divididas por pasos. Cada paso empieza con el código opción \*STEP y termina con el código\*END STEP. Los pasos pueden ser lineales o no lineales. La respuesta de cada paso del análisis general contribuye a la historia global de la respuesta del modelo. Se deben definir [48]:

- Cargas: Pueden ser cargas concentradas, cargas distribuidas, cargas térmicas y de otros tipos.
- Condiciones de contorno
- Control de salida: tipos de resultados que se quieren obtener a partir del análisis.
- Eliminar o reactivar elemento o superficie en un paso determinado.

### **3.2. Modelado CAD**

El diseño asistido por ordenador consiste en la creación, modificación análisis y optimización de un diseño mediante la ayuda de un ordenador. Para realizar los diseños necesarios en este proyecto se ha elegido el paquete de software SolidWorks [49].

SolidWorks es uno de los paquetes de diseño asistido por ordenador más famosos en el mercado. Esto se debe a que es fácil de aprender y tiene un gran conjunto de herramientas, por ello es usado por muchas de las mejores grandes compañías para diseñar y documentar en una amplia variedad de campos [49].

En primer lugar se crea un croquis en 2-D cómo operación base. A partir de esta operación base se añaden operaciones cómo extrusión, revolución, extrusión de cortes o realizar cortes por barrido que adicionan o quitan material del diseño creando una pieza en 3-D (Solid Works bible). Una vez creados unos modelos de piezas individuales estos pueden ser usados para construir conjuntos que representen el modelo final ensamblando las diferentes piezas [49].

### 3.2.1. Interfaz de SolidWorks

Para una correcta utilización del programa es necesario conocer la interfaz y donde se localizan cada una de las herramientas que SolidWorks permite al usuario utilizar.

El lugar donde se llevan a cabo todas las acciones en SolidWorks es llamado área gráfica “Graphics Area” (ver Figura 3.1). Aquí es donde se crean los diseños y se ensamblan las diferentes partes [49].

Arriba del área gráfica se encuentra la barra de herramientas de selección de vista “Heads-up View Toolbar” (ver Figura 3.3).

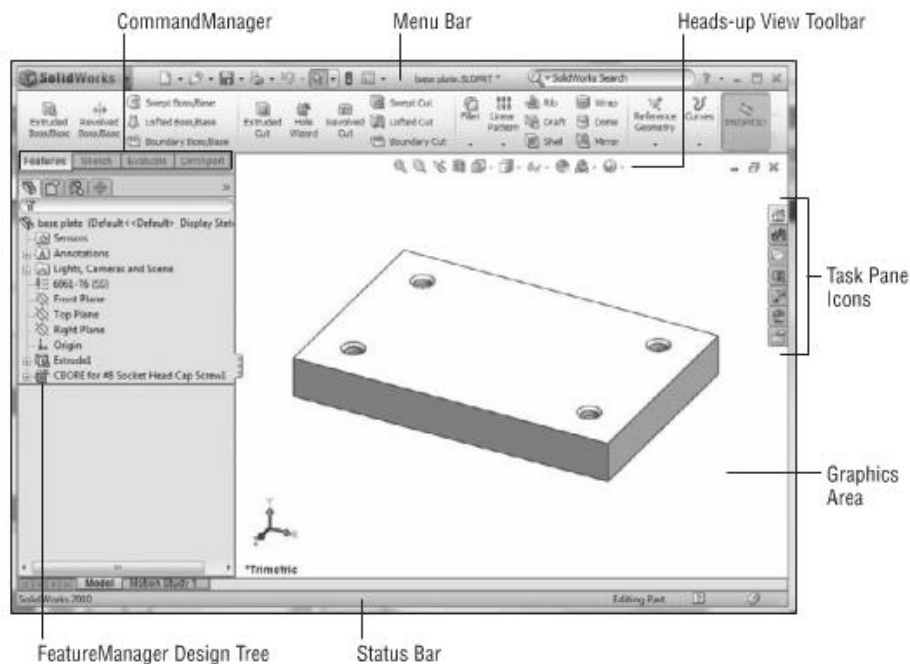
A lo largo de la parte inferior de la interfaz de SolidWorks se encuentra la barra de estado “Status Bar” que da información sobre las acciones que se están realizando en SolidWorks (ver Figura 3.1). A la derecha del área gráfica se encuentra el panel de tareas “Task Pane”. Es un conjunto de ventanas que proporciona un conjunto de recursos. Normalmente se encuentra escondido y sólo se muestran los iconos (ver Figura 3.2).

Los recursos disponibles dentro de este panel de tareas son los siguientes:

- Recursos de SolidWorks: da acceso a tareas comunes cómo crear un nuevo documento o acceder a tutoriales online. También permite acceder al portal del consumidor y a la página web.
- Biblioteca de diseño: apunta a una dirección local del ordenador que se utiliza para almacenar artículos reutilizables comunes cómo piezas, ensamblajes y dibujos.
- Explorador de archivos: permite acceder a los archivos locales del ordenador y de red.



- Buscar: las búsquedas son muy rápidas debido a que se realizan en archivos indexados.
- Paleta de visualización: contiene imágenes de vistas estándar, vistas de sección, vistas de anotación, y los patrones se pueden arrastrar en un dibujo.
- Apariencias, estilos y calcomanías: se pueden añadir apariencias a los modelos sin añadir propiedades físicas.
- Propiedades personalizadas: proporciona una manera sencilla de añadir propiedades personalizadas al documento activo.



**Figura 3.2:** Interfaz de usuario de SolidWorks [49].

En la parte de arriba de la pantalla se encuentra la barra de menú (ver Figura 3.2). Esta barra da un acceso rápido a las acciones más comunes del programa.

El Administrador de comandos se encuentra por debajo de la barra de menús y es una barra de herramientas sensible al contexto (ver Figura 3.2). Sensible al contexto significa que la barra de herramientas se actualizará en base a la barra de herramientas que se desea utilizar y también será actualizada basándose en el tipo de documento activo.

A la izquierda del área gráfica se encuentra el administrador de operaciones “Command Manager” (ver Figura 3.2). Proporciona una vista de la historia de las operaciones realizadas en el diseño de la pieza o conjunto [3].

Por último hay que destacar las barras de herramientas que contienen la mayoría de operaciones disponibles en SolidWorks. Cada una de las barras tiene un nombre referido a

la función de las operaciones que contiene. En la Figura 3.3 se puede ver un ejemplo de barra de herramientas[49].



**Figura 3.3:** Barra de herramientas [49].

### 3.3.Materiales

Para el desarrollo de los dos actuadores blandos que vamos a fabricar en este proyecto necesitamos un material con un comportamiento hiperelástico. Un material hiperelástico puede soportar grandes deformaciones mientras está sometido a tensión para luego volver a su estado inicial cuando esta se deja de aplicar. Leyendo diferentes artículos referidos a investigaciones anteriores llegamos a la conclusión que el mejor material para la fabricación de los actuadores es un elastómero [36].

El elastómero que generalmente es utilizado para la fabricación de los actuadores blandos es el Elastosil M4601. Es una silicona que se caracteriza por tener muy baja contracción, ser elástica y tener una resistencia mecánica muy elevada.

En caso de que no se disponga del Elastosil este puede ser sustituido por el Dragon Skin 30 o el Ecoflex 0030[4]. En la siguiente tabla podemos observar las propiedades de cada uno de los elastómeros que van a afectar a las propiedades finales del actuador. Estas propiedades han sido obtenidas de las hojas de catálogo de los materiales (ver Tabla 3.1).

Elastómero	Resistencia a la tracción ( $N/mm^2$ )	Alargamiento hasta rotura	Dureza Shore
Elastosil M4601	6,5	700%	28A
Dragon Skin 30	3,44	364%	30A
Ecoflex 0030	1,38	900%	30A

**Tabla 3.1:** Propiedades de los diferentes Elastómeros que pueden ser utilizados.

### 3.4. Maqueta

Para controlar los actuadores se utiliza una placa de control “Soft Robotics Toolkit Control Board” con la que se puede regular el flujo de aire a presión en los actuadores. Esta placa de control es una plataforma hardware de código abierto. El propósito de esta maqueta es ser usada para testar el comportamiento de los diferentes actuadores blandos.

La base de la placa es un tablero acrílico cortado con láser, lo que hace que los componentes sean fáciles de reconfigurar. Los componentes a su vez están montados sobre pequeñas placas acrílicas que se fijan mediante tornillos grandes al tablero.

El microcontrolador usado en la placa es el modelo NI MyRio creado por la empresa National Instruments. Este microcontrolador se puede programar con el paquete de software LabVIEW que ha sido desarrollado por la misma empresa. LabVIEW es una plataforma de entorno y desarrollo para diseñar sistemas con un lenguaje de programación gráfico. El código se crea arrastrando bloques funcionales y creando conexiones entre estos bloques [50].

Myrio incluye diez entradas analógicas, seis salidas analógicas, Entrada/Salida de audio y 40 líneas de Entrada/Salida digital. Incluye Wi-Fi, un acelerómetro de tres ejes y varios LEDs programables en un factor de forma duradera, cerrado a bordo [51].

La placa de control dispone de los siguientes componentes para realizar el control del inflado de los actuadores (ver Figura 3.4):

- Regulador de aire comprimido.
- Sensores de presión: proporcionan información sobre el comportamiento del sistema.
- Válvulas de solenoide: permiten o no el paso del fluido al sistema.
- Microcontrolador NI MyRio: permite al usuario interactuar con el hardware utilizando el ordenador. Se pueden controlar distintos componentes, obtener lecturas de sensores y escribir programas que utilizan estos elementos para un control más avanzado de actuadores suaves.
- Transistores MOSFETs e Interruptores: Controlan las válvulas de solenoide.
- Manómetro.
- Sensor de vacío, serie ZSE5B.
- Potenciómetros: Pueden controlar la presión que entra al sistema.
- Eyectores para crear vacío.
- Protoboard.

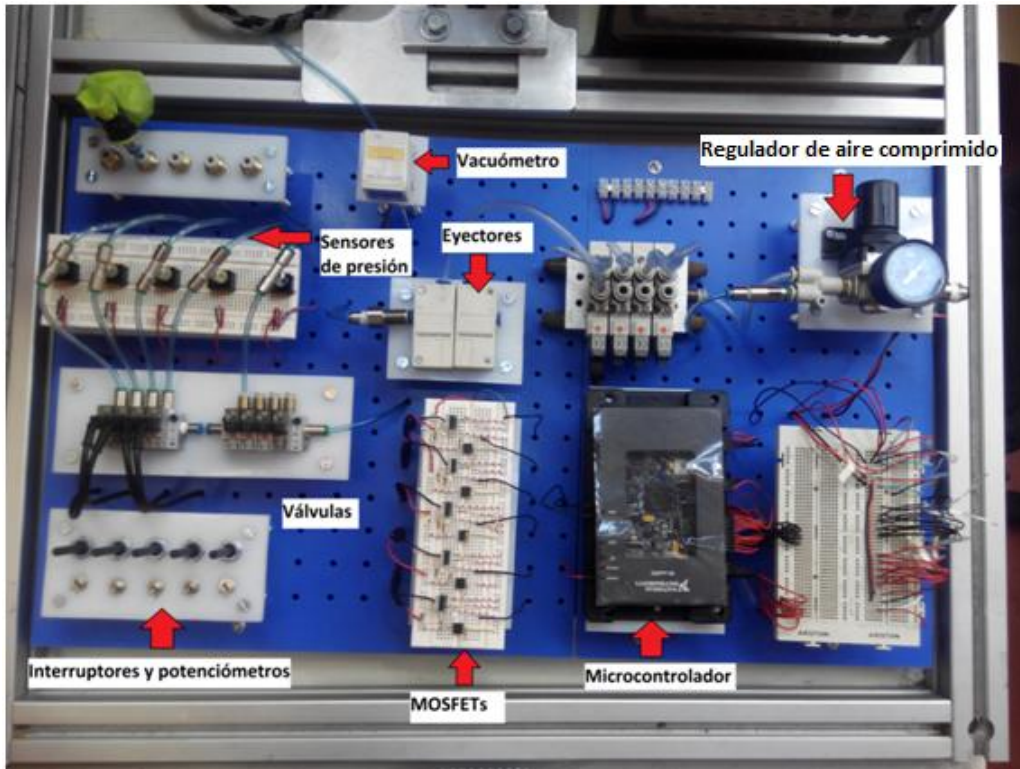


Figura 3.4: Placa de control.

## 4. Diseño y modelado de actuadores neumáticos blandos.

En este capítulo se explica detalladamente como ha sido desarrollado el actuador blando "PneuNet", se incluye la información de cómo ha sido realizado el diseño, la fabricación, el modelado y los ensayos de los actuadores. Para el desarrollo de este actuador es importante entender cómo afectan la morfología y los materiales con los que es fabricado a sus propiedades finales. Para ello se ha llevado a cabo un modelado y posteriores ensayos para determinar el comportamiento de distintos prototipos. De esta forma se pueden realizar conclusiones de cómo afectan las diferentes variaciones al rendimiento del actuador.

### 4.1. Diseño de actuadores "PneuNet"

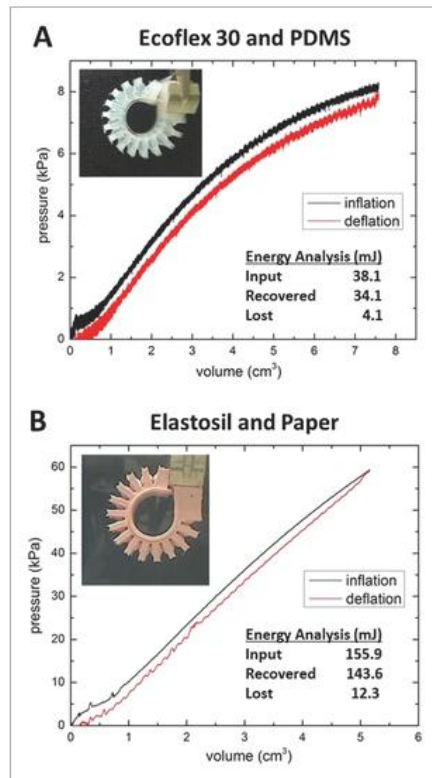
Los actuadores "PneuNets" están compuestos por una serie de cámaras y canales interiores en un material elastomérico. Estos canales se inflan cuando se presurizan produciendo que el actuador se enrolle sobre sí mismo. El movimiento producido depende de la morfología del actuador y de las propiedades de los materiales con los que ha sido fabricado. Dependiendo de las propiedades que quieren obtenerse del actuador se pueden variar diferentes parámetros morfológicos o escoger distintos materiales.

Para realizar el diseño de los diferentes actuadores y moldes se ha utilizado el paquete de software de diseño asistido por ordenador SolidWorks. El principal argumento por el que se ha elegido usar este software es porque contiene un gran conjunto de herramientas, es intuitivo y porque se dispone gran cantidad de fuentes de consulta. Se puede consultar información en estos dos libros [49, 52] que están pensados para asistir a usuarios medios y principiantes en el uso de este paquete de software.

#### 4.1.1. Materiales

Estos actuadores deben ser fabricados por un material elastómero, y una lámina de un material elástico en la parte inferior. Dependiendo de la rigidez del elastómero y de la lámina se obtendrán diferentes comportamientos como resultado.

Se realizó una comparación llevada a cabo por B.Mosadegh entre un actuador más rígido fabricado con Elastosil M4601 (módulo de Young  $\approx 7\text{MPa}$ , dureza Shore A 28) y otro menos rígido fabricado con Ecoflex 0030 (módulo de Young  $\approx 0,1\text{MPa}$ , dureza Shore A 00-30) (ver Figura 4.1).



**Figura 4.1:** Gráficas presión volumen de actuadores “PneuNets” fabricados con siliconas con diferente rigidez[36].

La comparación se realizó midiendo curvas de Presión-Volumen, obteniendo el siguiente resultado:

El actuador fabricado con el elastómero más rígido necesita ocho veces más presión y 1,5 veces menos volumen de aire para doblarse entero. Por lo tanto al necesitar un menor volumen de aire para doblarse entero será más rápido que el actuador fabricado con un elastómero menos rígido [36].

En la siguiente tabla se especifican los materiales necesarios para la fabricación del actuador (ver Tabla 4.1)[1] y las alternativas disponibles en caso de no poder utilizar Elastosil [1] (ver Tabla 4.2).

	<b>Materiales principales para la fabricación</b>
1	Elastosil M4601
2	Hoja de papel de oficina
3	Tubo neumático

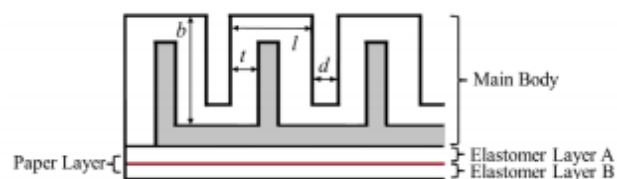
**Tabla 4.1:** Materiales principales para la fabricación del actuador.

Alternativas al Elastosil M4601 [1]	
1	Dragon Skin 30
2	a. Ecoflex 0030 para sustituir al Elastosil b. Una lámina de PDMS Sylgard 184 para sustituir a la hoja de papel.

**Tabla 4.2:** Alternativas al uso del Elastosil M4601

#### 4.1.2. Morfología

Cómo uno de los objetivos de este proyecto es observar cómo afectan los parámetros de diseño al proyecto se han diseñado 6 prototipos distintos para comprobar cómo afecta la morfología de los actuadores a su rendimiento.



**Figura 4.2:** Morfología del actuador, donde  $b$  es el alto de la cámara,  $t$  es el ancho de la pared,  $d$  es la distancia entre cámaras y  $l$  el ancho total del actuador [37].

Con estos prototipos se quiere comprobar cómo afectan los siguientes parámetros al diseño (ver Figura 4.2):

- Altura de las cámaras: se han diseñado dos prototipos que comparten todas las demás medidas que definen el actuador, pero difieren en la altura del cuerpo principal. En uno el cuerpo principal mide 13mm mientras que en el otro 15mm. De esta forma podemos estudiar cómo afecta variar este parámetro al rendimiento de los actuadores.
- Numero de cámaras: se han diseñado dos prototipos que comparten las dimensiones totales del actuador y todas las medidas que definen cada cámara, pero difieren en el número de cámaras que contiene cada actuador. Un modelo dispone de 5 cámaras mientras que el otro cuenta con 10 cámaras.
- Espesor de pared: se han diseñado dos prototipos que comparten las dimensiones totales del actuador y el número de cámaras, pero difieren en el espesor de pared del actuador. Un modelo tiene un espesor de pared de 1mm, mientras que el otro tiene un espesor de 3mm.

El estudio de cómo varían las propiedades del actuador dependiendo de la morfología ha sido realizado previamente por B. Mosadegh. Este investigador realizó un estudio experimental de cómo afecta la variación de estos tres parámetros se que consideran fundamentales: la altura de las cámaras, el número de cámaras y el espesor de pared. Concluyendo lo siguiente:

- Altura de los segmentos: cuanto mayor es la altura, menor es la presión que se necesita aplicar para que el actuador se doble entero [36].
- Número de Cámaras: al aumentar el número de cámaras se consigue una mayor flexión del actuador para una misma presión. Además se disminuye el tiempo de actuación[36].
- Espesor del muro: reduciendo el espesor del muro se reduce también la presión necesaria para realizar la flexión. Además también se reduce el tiempo que se necesita para realizar la flexión [36].



## 4.2. Modelado de actuadores “PneuNet”

Este capítulo se centra en explicar cómo se utiliza el método de elementos finitos (FEM) para el análisis del actuador “PneuNet” utilizando el paquete de software Abaqus[36]. El método de elementos finitos permite modelar el comportamiento del actuador y ver los efectos generados al cambiar diferentes parámetros del diseño. La razón por la que se ha decidido utilizar Abaqus es porque este paquete de software tiene una gran capacidad para realizar análisis no lineales [48]. Para el modelado de este actuador se necesita realizar un análisis no lineal para simular el elastómero que compone el cuerpo principal por estar compuesto principalmente por un material con propiedades hiperplásticas.

Para la llevar a cabo el análisis hemos elegido el procesador de Abaqus/Standard [36] debido a que necesitamos llevar a cabo un alrededor de 5 o 6 simulaciones en cada actuador con distintas presiones, al tener 6 actuadores decidimos. Este procesador utilizado es más rápido que el procesador Abaqus/Explicit debido a que desprecia los efectos inerciales. Un análisis llevado a cabo con el procesador Abaqus/Standard [55] tarda alrededor de una hora en realizar los cálculos mientras que un análisis llevado a cabo con Abaqus/Explicit [56] del mismo actuador tarda alrededor de 6 horas. Comparando dos análisis del mismo actuador utilizando cada uno de estos procesadores los resultados difieren poco por lo que decidimos despreciar los efectos inerciales usando finalmente el procesador Abaqus/Standard en el modelado del actuador por su precisión y rapidez.

### 4.2.1. Sistema de unidades utilizado.

Abaqus no tiene un sistema de unidades, por lo que hay que asegurarse que el sistema con el que trabajamos tiene las unidades definidas en un sistema base consistente, en este caso utilizamos el siguiente:

- **Longitud:** milímetros (mm)
- **Fuerza:** Newton(N)
- **Tiempo:** segundos(s)

Cómo consecuencia de estas unidades base obtenemos estas otras unidades con las que también se va a trabajar:

- **Presión:**  $N/mm^2 = \text{MPa}$
- **Stress:**  $N/mm^2 = \text{MPa}$
- **Velocidad:**  $mm/s$
- **Aceleración:**  $mm/s^2$
- **Masa:**  $Mg = 1e3 \text{ kg}$
- **Volumen:**  $mm^3$
- **Densidad:**  $Mg/mm^3 = 1e12 \text{ kg}/m^3$
- **Energía:**  $mJ = 1e-3 \text{ J}$

#### 4.2.2. Explicación del modelado del Elastosil M4601 como material hiperelástico.

Los actuadores analizados están contruidos con Elastosil M4601, un material hiperelástico, con un comportamiento no lineal. Los materiales hiperelásticos tienen la habilidad de poder estirarse varias veces más que su longitud inicial [36].

El elastómero ha sido modelado como un sólido hiperelástico, y se han computado las tensiones y las energías elásticas utilizando el modelo Yeoh[57, 58] para materiales hiperelástico. La densidad de energía de deformación viene dada por la ecuación:

$$U = \sum_{i=1}^N C_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i}$$

En este modelo usamos  $N=3$  y los coeficientes  $C_{10} = 0,11$ ,  $C_{20} = 0,02$ ,  $C_{30} = 0$ ,  $D_1 = D_2 = D_3 = 0$ . Para modelar la capa de papel se utiliza el modelo elástico lineal con un módulo de Young de 6.5 GPa y un coeficiente de Poisson de 0.2 [36].

#### 4.2.3. Características generales del análisis realizado en cada prototipo.

La geometría del actuador (ver Anexo 2) es importada en Abaqus/CAE como un archivo tipo .step y es mallada utilizando elementos cuadráticos sólidos ("Abaqus element type" C3D10H) para todos los componentes elastoméricos del actuador y elementos tipo lámina ("Abaqus element type" STRI65) para la capa inextensible de papel. La precisión de la malla se determinó llevando a cabo un estudio de precisión, resultando entre 5778 y 8503 elementos totales dependiendo del modelo analizado.

Una vez hecho esto se define una simulación estática con una presión aplicada en todas las cámaras interiores. Se considera que el actuador se encuentra encastrado en un extremo y se tienen en cuenta las fuerzas gravitatorias [36].

#### 4.2.4. Componentes del análisis

Dos materiales:

- Elastosil M4601 (caucho de silicona): material hiperelástico definido por el modelo Yeoh[6,7] definido por los coeficientes  $C_{10} = 0,11$ ,  $C_{20} = 0,02$ ,  $C_{30} = 0$ ,  $D_1 = D_2 = D_3 = 0$ , y una densidad de  $1130 \frac{Kg}{m^3}$ , el material se asume isotrópico.
- Papel: densidad de  $750 \frac{Kg}{m^3}$ , módulo de Young de 6.5GPa y coeficiente de Poisson de 0,2.

Dos secciones:

- Sección de Elastosil: sección sólida uniforme asignada al cuerpo principal y a las dos capas de Elastosil de la base.
- Sección de Papel: sección membrana uniforme asignada a la capa inextensible.

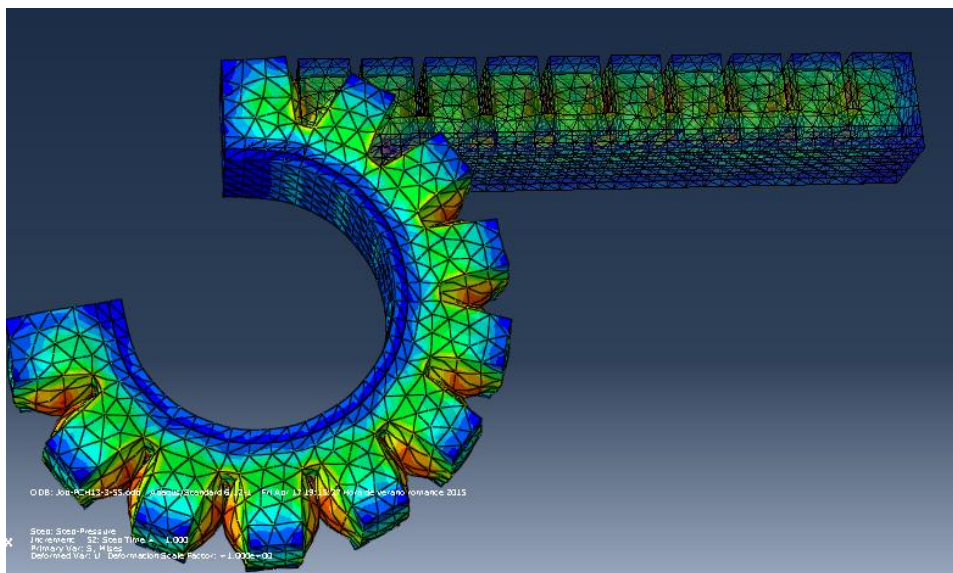
Dos cargas (cada una aplicada en un Step diferente):

- Carga gravitatoria con una condición de contorno (encastre) definida en un extremo del actuador.
- Presión interna, actúa en todas las caras internas de la cámara del actuador.

#### **4.2.5. Pasos generales del modelado realizado (ver Anexo 3)**

1. El primer paso es el diseño de las diferentes geometrías que componen el actuador con el programa de diseño asistido por ordenador SolidWorks. En el Anexo 2 se adjuntan los planos del cuerpo principal de cada actuador que va a ser modelado y de las dos láminas inferiores e idénticas que construyen la base (ver Anexo 2).
2. Después se importan las tres Parts, el cuerpo principal y las dos láminas inferiores, al software Abaqus/CAE previamente guardadas en archivos tipo .STEP.
3. En la superficie B hay que crear una superficie que servirá luego para definir la lámina de papel.
4. Se crean los materiales Elastosil y Papel. Hay que especificar las propiedades de densidad e hiperelasticidad del Elastosil y las propiedades de densidad y elasticidad del papel.
5. Posteriormente se crean dos secciones. La primera de material Elastosil, sólida y homogénea y la segunda de material papel, de tipo lámina y homogénea.
6. Se asigna sección de elastosil a las partes que se han importado.
7. En el módulo “Assembly” crea el actuador final uniendo las tres diferentes partes.
8. Se fusionan las partes, creando una nueva “Part” formada de la unión de las tres
9. Después se crea la capa de papel entre las dos capas de Elastosil de la base.
10. Una vez creada se le asigna la sección cuyo material es papel.
11. Seleccionar la cavidad interior cómo superficie, se utiliza la Herramienta “View Cut” para poder seleccionar todas las superficies interiores.

12. Hay que crear el “Step” donde se aplica la carga gravitatoria, además cómo es el primer Step se especifica la condición de contorno del encastre.
13. Después se crea un siguiente Step donde se aplica la presión dentro de la cámara, hay que seleccionar que la superficie se aplica en la superficie interna que ha sido definida anteriormente.
14. Añadir contacto entre las paredes, primero se definen las propiedades del contacto, que debe ser normal y tangencial. Después se define un contacto de tipo superficie con superficie entre las paredes de cada cámara y con las propiedades indicadas anteriormente.
15. Se crea un mallado de tipo tetraédrico porque el modelo no permite mallar de forma hexagonal estructurada. El tamaño de malla usado es de 3mm, un poco grande pero permite realizar cálculos precisos. La malla debe ser de tipo cuadrático e híbrida debido a que el Elastosil es un material hiperelástico.
16. Para realizar el análisis se crea un “Job” y se ejecuta.
17. Una vez ejecutado se pueden ver los resultados. Los resultados que van a ser analizados en los siguientes modelos son el desplazamiento del actuador en el eje X y el Y, respecto a la presión del aire interior (ver Figura 4.3).

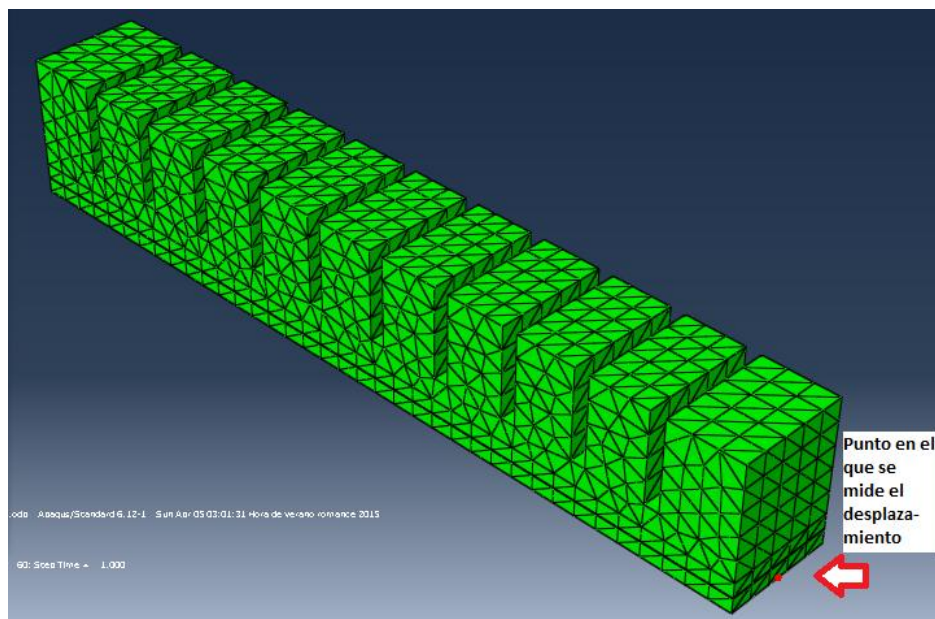


**Figura 4.3:** Modelado del actuador.

## 4.2.6. Resultados del modelado

### 4.2.6.1. Resultados del análisis del desplazamiento del actuador en los ejes X e Y.

En este apartado se realiza un análisis de cómo afectan las propiedades sometidas a estudio de los actuadores a su rendimiento. Para ello se obtiene el desplazamiento en los ejes X e Y para diferentes presiones de actuación en cada actuador para ver cómo se va doblando. El desplazamiento medido en los ejes X e Y es el desplazamiento del punto más alejado del encastre situado en la base del actuador respecto a su posición inicial (ver Figura 4.4). En el Anexo 4 se puede ver detalladamente cómo se ha realizado la visualización del desplazamiento en X-Y del modelado de los diferentes prototipos (ver Anexo 4).



**Figura 4.4:** Punto en el que se mide el desplazamiento

#### – Altura de las cámaras

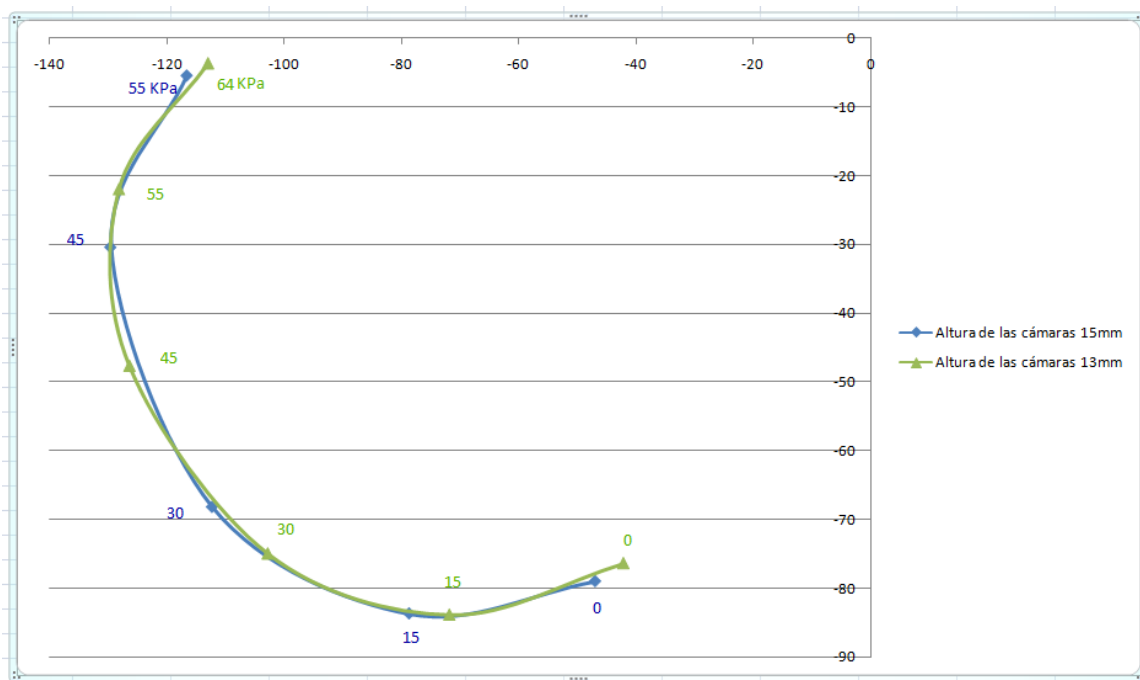
Al aumentar la altura de las cámaras disminuye la presión necesaria para que el actuador se doble completamente, como vemos en el análisis el actuador que tiene cámaras con mayor altura necesita alrededor de 9KPa menos para doblarse entero. Como hemos visto anteriormente este estudio fue realizado por B. Mosadegh experimentalmente obteniendo el mismo resultado [3]. Además B. Mosadegh llegó a la conclusión de que si se aumentaba considerablemente la altura de las cámaras llega un momento que la altura de las cámaras no produce un cambio en el rendimiento del actuador [36] (ver Tablas 4.3 y 4.4 y Figura 4.5).

Presión(KPa)	Desplazamiento X(mm)	Desplazamiento Y(mm)
0	-47	-79
15	-78,7	-83,7
30	-112,3	-68,2
45	-129,6	-30,4
55	-116,6	-5.4

**Tabla 4.3:** Desplazamiento en X-Y del actuador con altura de cámaras de 15mm.

Presión(KPa)	Desplazamiento X(mm)	Desplazamiento Y(mm)
0	-42,1	-76,4
15	-71,8	-83,9
30	-102,8	-75
45	-126,4	-47,7
55	-128,2	-22
64	-113,0	-3,7

**Tabla 4.4:** Desplazamiento en X-Y del actuador con altura de cámaras de 13mm.



**Figura 4.5:** Gráfica del desplazamiento en X e Y para diferentes presiones interiores de los dos actuadores que son usados para comparar cómo depende el rendimiento de la altura de las cámaras.

– Número de cámaras

Al aumentar el número de cámaras disminuye notablemente la presión necesaria para que el actuador se doble completamente, como vemos en el análisis el actuador que tiene mayor número de cámaras necesita alrededor de 70KPa para doblarse entero mientras que el otro actuador que tiene sólo cinco cámaras con 120KPa todavía no es capaz de doblarse entero. Como hemos visto anteriormente este estudio fue realizado por B.

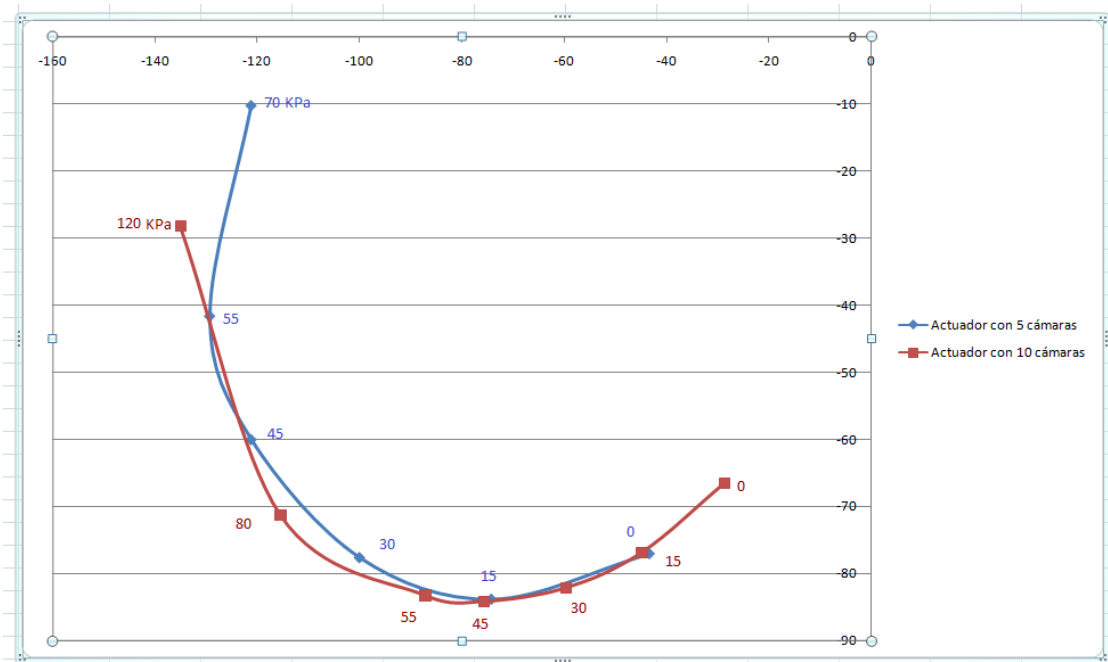
Mosadegh experimentalmente obteniendo el mismo resultado [36] (ver Tablas 4.5 y 4.6 y Figura 4.6).

Presión(KPa)	Desplazamiento X(mm)	Desplazamiento Y(mm)
0	-28,7	-66,6
15	-44,8	-76,9
30	-59,7	-82,2
45	-75,7	-84,2
55	-87,2	-83,3
80	-115,5	-71,3
120	-135,0	-28,3

**Tabla 4.5:** Desplazamiento en X-Y del actuador con 5 cámaras.

Presión(KPa)	Desplazamiento X(mm)	Desplazamiento Y(mm)
0	-43,3	-77,0
15	-74,2	-83,8
30	-100	-77,6
45	-121,2	-60
55	-129,3	-41,6
70	-121,2	-10,2

**Tabla 4.6:** Desplazamiento en X-Y del actuador con 10 cámaras.



**Figura 4.6:** Gráfica del desplazamiento en X e Y para diferentes presiones interiores de los dos actuadores que son usados para comparar cómo depende el rendimiento del número de cámaras.

- Espesor de la pared

Al aumentar el espesor de pared aumenta la presión necesaria para que el actuador se doble completamente, cómo vemos en el análisis el actuador que tiene mayor espesor de

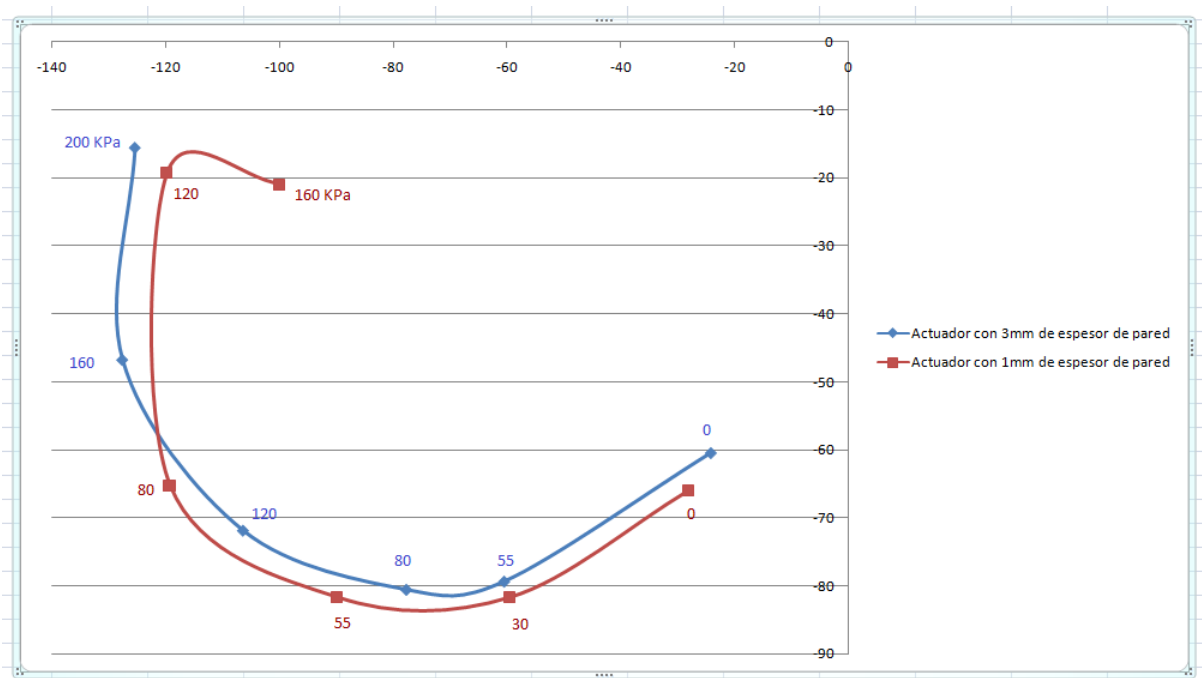
pared necesita alrededor de 200KPa para doblarse entero mientras que el otro actuador que tiene un espesor de pared de 1mm con 120-160KPa es capaz de doblarse entero. Como hemos visto anteriormente este estudio fue realizado por B. Mosadegh experimentalmente obteniendo las mismas conclusiones [36] (ver Tablas 4.7 y 4.8 y Figura 4.7).

Presión(KPa)	Desplazamiento X(mm)	Desplazamiento Y(mm)
0	-28,2	-65,9
30	-59,6	-81,6
55	-89,9	-81,6
80	-119,3	-65,2
120	-129,8	-19,2
160	-100,0	-20,9

**Tabla 4.7:** Desplazamiento en X-Y del actuador con espesor de pared de 1mm.

Presión(KPa)	Desplazamiento X(mm)	Desplazamiento Y(mm)
0	-24,3	-60,5
55	-60,6	-79,4
80	-77,8	-80,6
120	-106,5	-71,9
160	-127,7	-46,8
200	-125,5	-15,6

**Tabla 4.8:** Desplazamiento en X-Y del actuador con espesor de pared de 3mm.

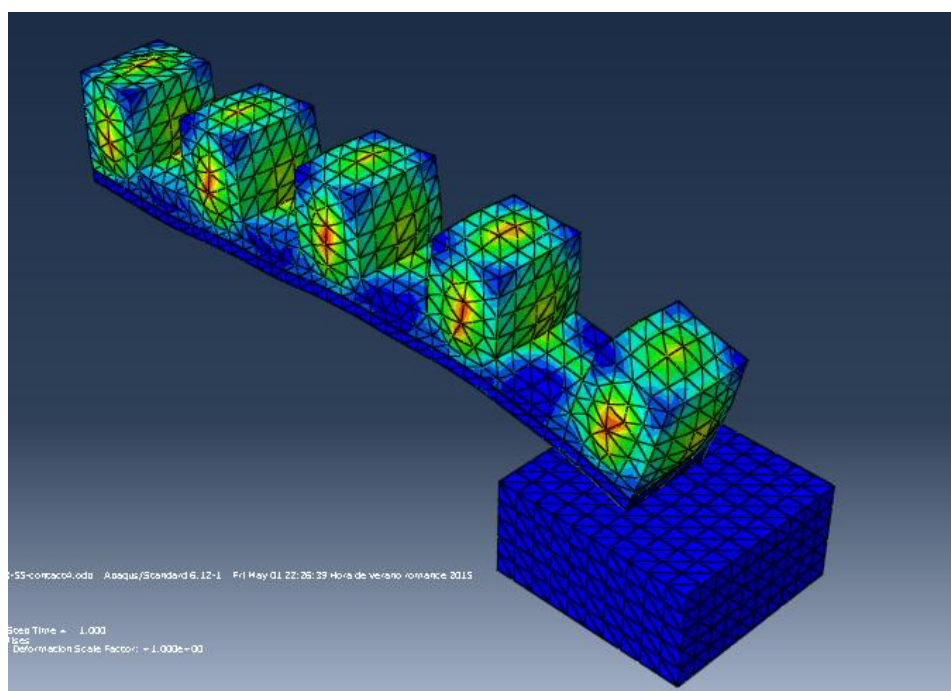


**Figura 4.7:** Gráfica del desplazamiento en X y en Y para diferentes presiones interiores de los dos actuadores que son usados para comparar cómo depende el rendimiento del espesor de pared.



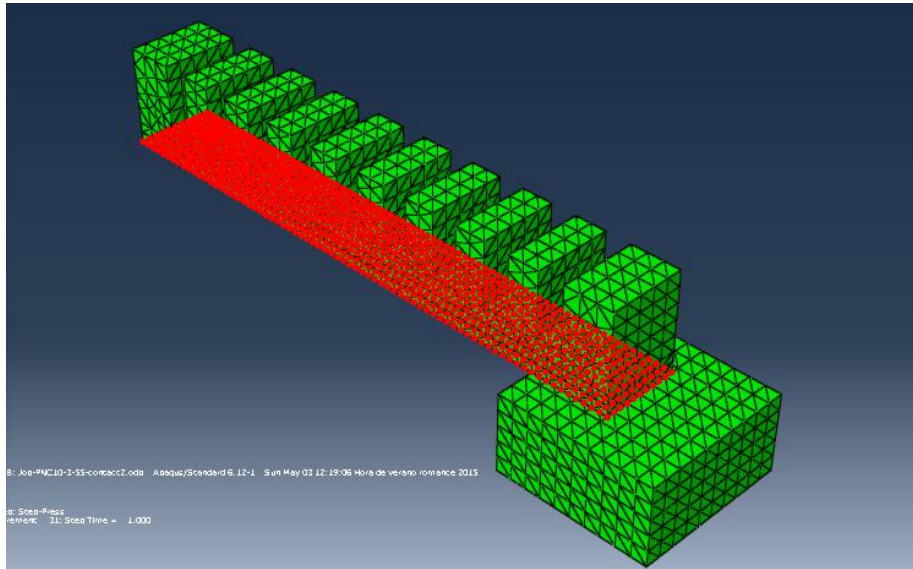
#### 4.2.6.2. Resultados de análisis de fuerza de contacto.

Al igual que se ha realizado un estudio sobre cómo afecta al desplazamiento el cambio de los distintos parámetros del diseño del actuador, también se ha realizado un estudio sobre cómo varía la fuerza ejercida por el actuador para una misma presión de 55KPa variando los diferentes parámetros (ver Figura 4.8). Esta fuerza se calcula situando un bloque debajo del actuador para provocar el contacto y medir la fuerza de contacto. En este análisis se ha despreciado el efecto de la gravedad y sólo se ha tenido en cuenta el efecto de la presión interior. En el Anexo 5 se puede ver detalladamente cómo se ha realizado el modelado de la fuerza de contacto ejercida sobre un bloque en los diferentes prototipos (ver Anexo 5).



**Figura 4.8:** Análisis de la fuerza que ejerce el actuador sobre un bloque.

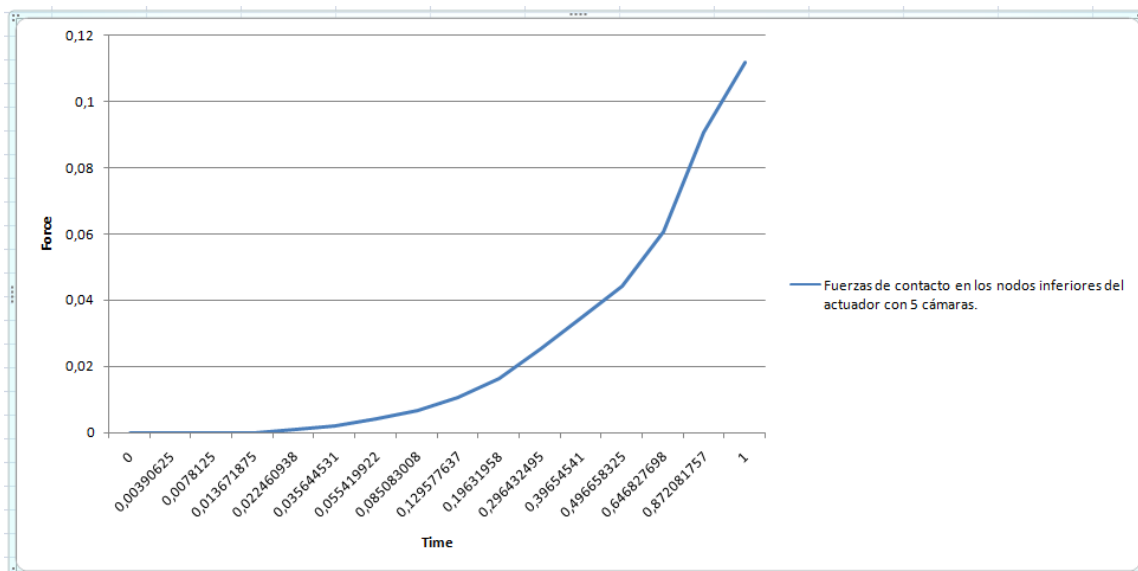
La fuerza de contacto se mide en toda la superficie inferior del actuador, se obtiene una gráfica de cómo va aumentando la fuerza de contacto según va aumentando la presión interior hasta que llega al valor final a lo largo del tiempo de simulación (ver Figura 4.9).



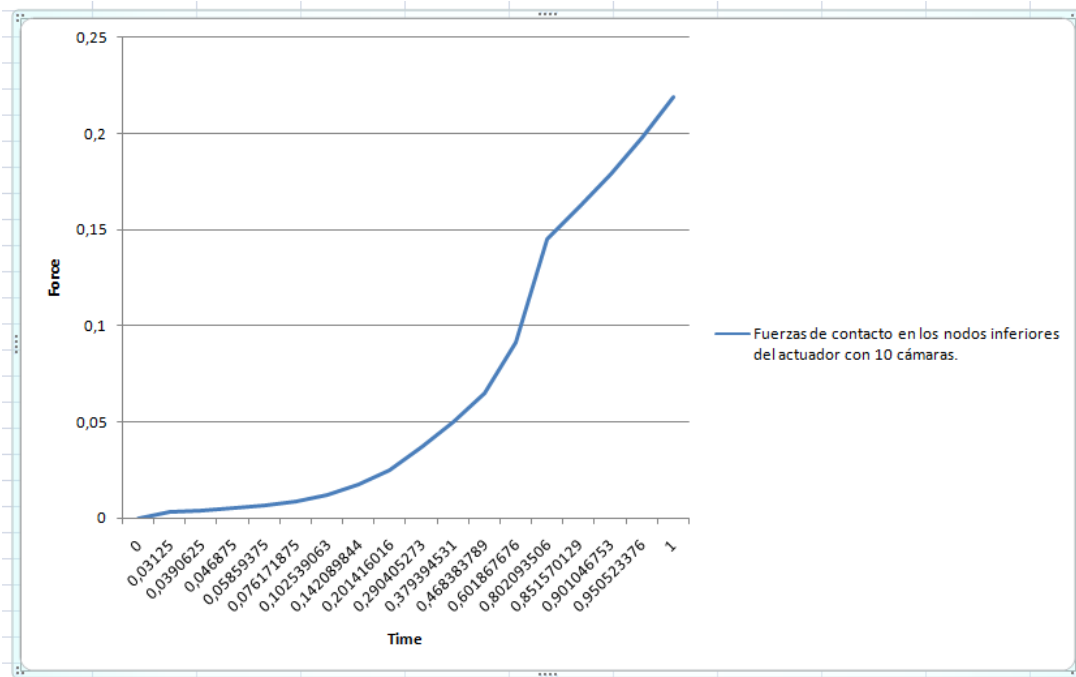
**Figura 4.9:** Superficie donde se mide la fuerza.

– Número de cámaras

Observando el resultado del análisis de las fuerzas de contacto en los dos actuadores con diferente número de cámaras llegamos a la conclusión de que para la misma presión interior de 55KPa el actuador con mayor número de cámaras ejerce una mayor fuerza sobre el bloque. El actuador con 10 cámaras ejerce una fuerza sobre el bloque de 0,2188Newton mientras que el actuador con 5 cámaras ejerce una fuerza de 0,112 Newton. Dada la misma presión interior podemos concluir que el actuador con mayor número de cámaras ejerce una fuerza de contacto mayor (ver Figuras 4.10 y 4.11).



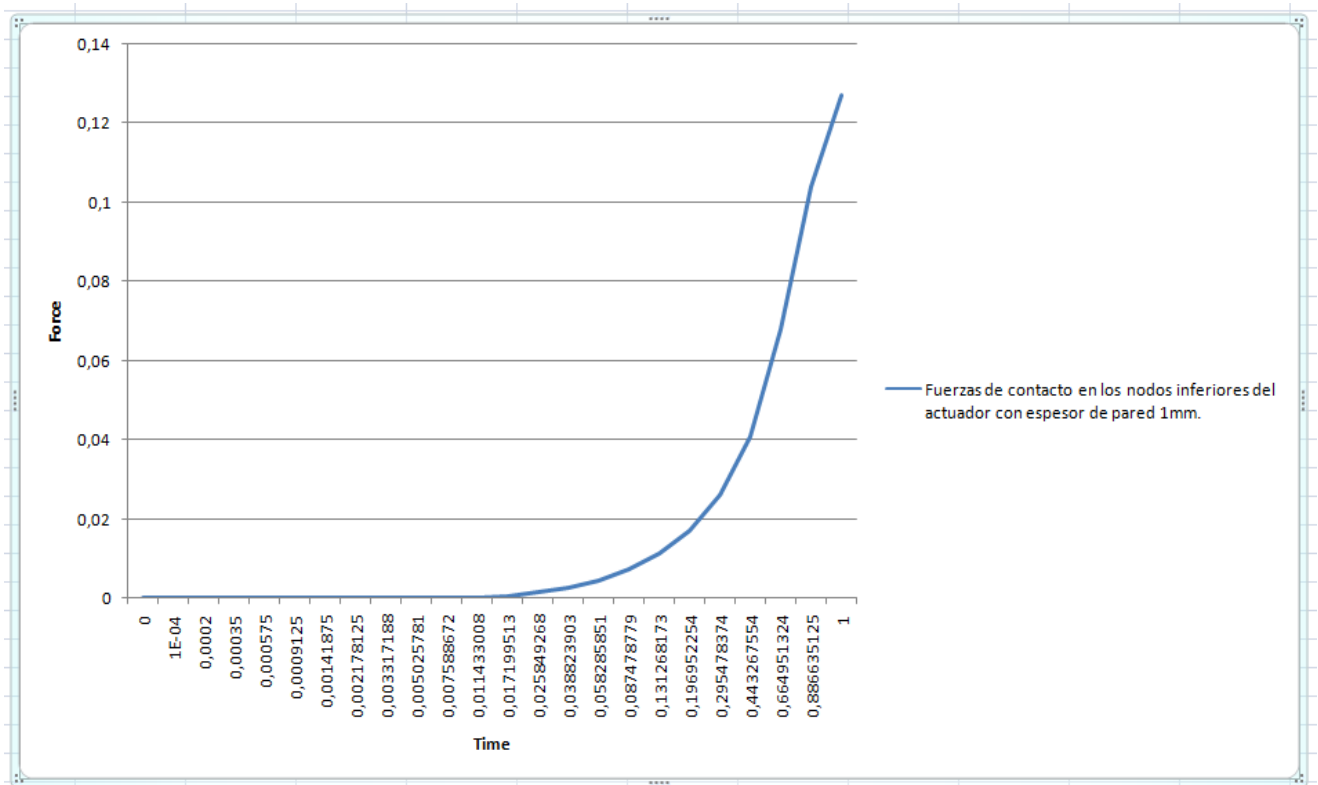
**Figura 4.10:** Fuerzas de contacto en los nodos inferiores del actuador con 5 cámaras. Fuerza en Newton en el eje y, tiempo en segundos en el eje x.



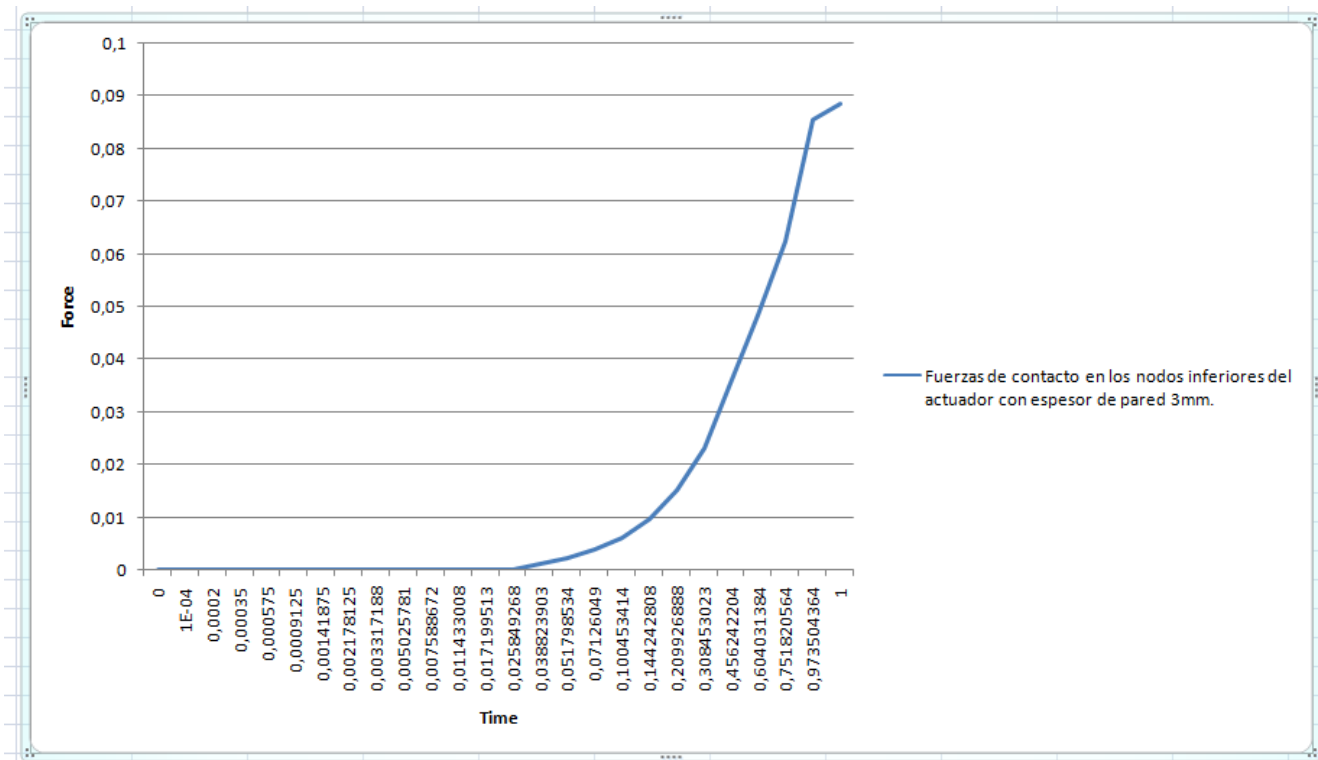
**Figura 4.11:** Fuerzas de contacto en los nodos inferiores del actuador con 10 cámaras. Fuerza en Newton en el eje y, tiempo en segundos en el eje x.

– Espesor de pared

Observando el resultado del análisis de las fuerzas de contacto en los dos actuadores con diferente espesor llegamos a la conclusión de que para la misma presión interior de 55KPa el actuador con menor espesor de pared ejerce una mayor fuerza sobre el bloque. El actuador con espesor de pared de 1mm ejerce una fuerza sobre el bloque de 0,127Newton mientras que el actuador con espesor de pared 3mm ejerce una 0,088 fuerza de Newton. Dada la misma presión interior podemos concluir que el actuador con menor espesor de pared ejerce una fuerza mayor (ver Figuras 4.12 y 4.13).



**Figura 4.12:** Fuerzas de contacto en los nodos inferiores del actuador con espesor de pared 1mm. Fuerza en Newton en el eje y, tiempo en segundos en el eje x.



**Figura 4.13:** Fuerzas de contacto en los nodos inferiores del actuador con espesor de pared 3mm. Fuerza en Newton en el eje y, tiempo en segundos en el eje x.

# 5. Fabricación y ensayo de actuador neumático blando

## 5.1. Fabricación de actuadores “PneuNet”

El proceso de fabricación requiere tres moldes: un molde exterior y otro interior para el cuerpo principal y un tercero para la capa inextensible inferior. En primer lugar se realiza mezclan los dos componentes A y B del Elastosil en una proporción de nueve porciones de A por cada porción de B. Posteriormente se llenan los moldes con el Elastosil mezclado (el molde usado para la capa inextensible inferior sólo hasta la mitad) y se introducen en una cámara de vacío durante diez minutos para eliminar las burbujas de aire que hay en la mezcla. Una vez des-gasificado el elastómero, se coloca la lámina de papel sobre el tercer molde y se introducen los dos moldes en un horno a 65-70 grados centígrados durante 10 minutos. A los diez minutos se comprueba si el nivel de Elastosil ha disminuido (si ha disminuido se añade más elastómero) y se vuelve a introducir otros 10 minutos a la misma temperatura. Una vez curado el elastómero de los dos moldes se añade elastómero en el molde de la capa inextensible inferior hasta llenarlo. Después se liga el cuerpo principal del actuador con la capa inferior aprovechando el nuevo elastómero y se introduce en el horno a 65-70 grados centígrados otros 10 minutos. Se inserta el tubo por donde se realiza el inflado de los actuadores y si fuese necesario se puede añadir a la junta pegamento epoxi flexible en el lugar donde se inserta el tubo [53].

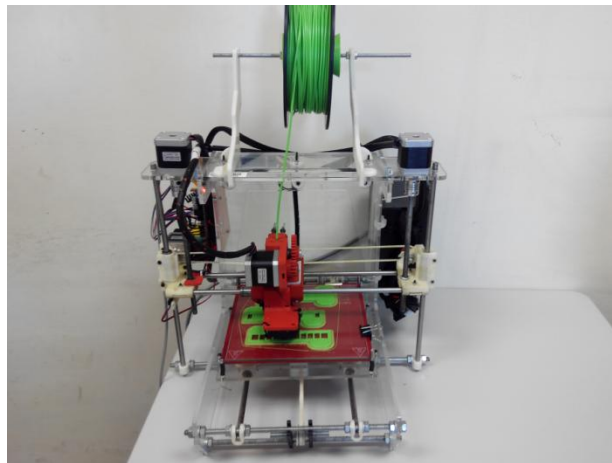
### 5.1.1. Equipos y herramientas utilizados para la fabricación

- Herramientas
  - Guantes de látex
  - Aguja de metal de 2 a 3 mm. de ancho.
  - Jeringuilla
- Equipos
  - Cámara de vacío
  - Horno
  - Báscula
  - Vasos para mezclar
  - Centrifugadora

## 5.1.2. Fabricación paso por paso

### 1. Fabricación del molde

Los moldes se fabrican mediante la impresión 3D de las tres partes que lo componen, los materiales utilizados son PLA (poliácido láctico) o ABS (acrilonitrilo butadieno estireno). La impresión 3D se realiza mediante el modelado por deposición fundida, el cual consiste en deposición del material en capas para conformar la pieza final (ver Figura 5.1). El molde interior tiene una serie de cámaras conectadas por un canal, que es lo que luego va a ser el hueco interior del actuador final. El molde superior se encarga de separar las diferentes cámaras unas de otras. El tercer molde sirve para fabricar la base del actuador, es una lámina con un hueco de 4mm de profundidad, 112mm de largo y 15 mm de ancho. En el Anexo 1 se adjuntan los planos de uno de los moldes utilizados para la fabricación (ver Anexo 1).



**Figura 5.1:** Impresión 3D de los moldes.

### 2. Preparación del Elastómero

Para la fabricación del actuador se necesita moldear las tres partes cuyo material es Elastosil M4601, antes de introducir el elastómero en el molde. El primer paso es pesar la parte A y la parte B, debido a que el Elastosil necesita ser mezclado en un ratio 1:9 de parte A respecto a la cantidad de parte B. Después se introduce en una centrifugadora para que se produzca una mezcla homogénea. En caso de no tener una centrifugadora se puede realizar la mezcla manualmente (ver Figura 5.2).



**Figura 5.2:** Preparar el Elastosil y los moldes.

### 3. Moldeado del actuador

En primer lugar hay que rellenar el molde principal, asegurándose de que se llenan todas las partes (ver Figura 5.3). El molde principal se debe fijar con un alambre para evitar que se mueva. También se rellena el molde de la base a la mitad.



**Figura 5.3:** Rellenar el molde principal de Elastosil.

Después de haber vertido el Elastosil en los moldes, hay que desgasificar el Elastosil para quitarle las burbujas que se pueden quedar en el modelo final. Para ello se introducen las dos componentes en una cámara de vacío y se crea vacío dentro durante 10 minutos o hasta que se pueda apreciar que han parado de aparecer nuevas burbujas (ver Figura 5.4).



**Figura 5.4:** Moldes en la cámara de vacío.

Una vez acabada la desgasificación se debe utilizar una espátula para retirar las burbujas que han quedado en la superficie. No se debe introducir la espátula muy dentro del molde y se recomienda realizar el proceso lentamente (ver Figura 5.5).



**Figura 5.5:** Retirar las burbujas

Retirar el exceso de Elastosil de la parte superior del molde asegurándose de que se pueden ver perfectamente los divisores entre cámaras. Colocar la capa de papel en el molde de la parte inferior. Colocar ambos moldes en el horno durante 10 minutos a 65°C (ver Figura 5.6).



**Figura 5.6:** Introducir moldes en el horno durante 10 minutos.

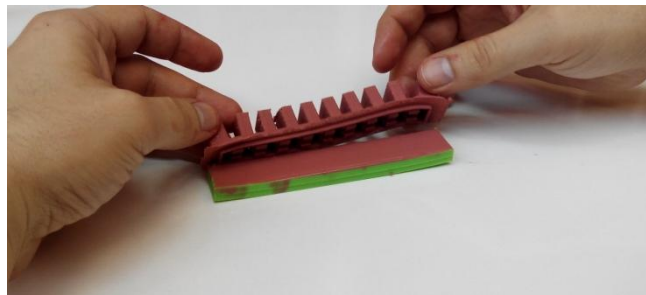
Comprobar si el nivel de Elastosil ha disminuido. SI no ha disminuido ponerlo otra vez en el horno durante otros 10 minutos. En caso de haber disminuido más de 2 mm., se debe



verter más Elastosil antes de volverlo a introducir en el horno, para que las paredes superiores no sean demasiado finas, y limpiar el exceso con una espátula como en los casos anteriores.

#### 4. Ensamblado de las diferentes partes

Para sacar del molde la parte principal es recomendable usar un destornillador plano y hacer palanca entre las dos partes del molde. Se debe tener cuidado de no dañar el elastómero con el destornillador. Una vez retirado el molde superior, retirar la parte principal del actuador del molde de abajo manualmente. Al ensamblar las diferentes partes es muy importante no bloquear el canal de aire central que suministra aire a todas las diferentes cámaras. Al mismo tiempo la unión entre la base y el cuerpo principal tiene que ser totalmente estanca para que no se produzca ninguna fuga de aire (ver Figura 5.7).

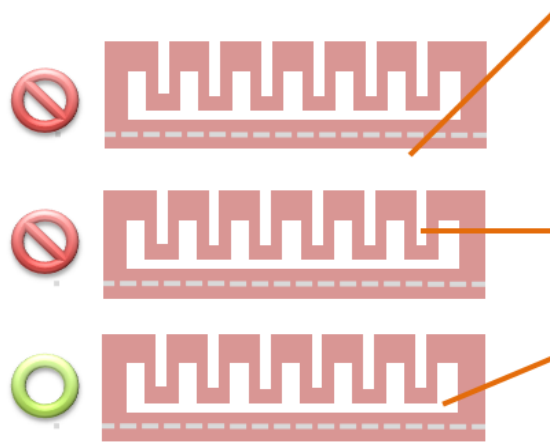


**Figura 5.7:** Ensamblado de las diferentes partes.

- Se rellena la parte superior del molde de la base que hemos dejado sin rellenar de Elastosil.
- Se coloca el cuerpo principal encima con cuidado de no presionar mucho para no taponar el canal central.
- Introducir en el horno entre 5 y 10 minutos a 65°C.
- Sacar del molde, si hay agujeros o imperfecciones, se deben rellenar con Elastosil y curar el elastómero de nuevo.

#### 5. Conectar la fuente de aire

Para conectar la fuente de aire al actuador se realiza un agujero para conectar el tubo neumático. El agujero se debe realizar con una aguja gorda de metal y de la siguiente forma (ver Figura 5.8):



**Figura 5.8:** Forma adecuada de realizar el agujero [54].

Por lo que esta operación se debe realizar delicadamente y con mucha precisión para no perforar otras paredes. Estando la aguja metida se pone un trozo de tubo sobre la aguja y se introduce.

#### 6. Comprobar funcionamiento adecuado, solucionar problemas.

En último lugar conectamos el actuador a la fuente de aire a presión o a una bomba de una bici y si comprobamos que se infla .En caso de que no se infle podemos comprobar donde tiene poros el actuador por donde se escape el aire. Para comprobar donde están podemos introducir el actuador en agua. Una vez localizados los tapamos con Elastosil y repetimos el proceso de curado en el horno .En caso de que se haya taponado el canal central habrá que repetir el proceso de fabricación (ver Figura 5.9).



**Figura 5.9:** Comprobar funcionamiento adecuado.

## 5.2. Ensayos del actuador “PneuNet”

El rendimiento de un actuador “PneuNet” puede ser clasificado por al menos cinco parámetros [36]:

- Velocidad con la que se consigue una actuación determinada.
- Fuerza ejercida para una presión interior.
- Cambio en volumen necesario para obtener un grado de movimiento.
- Número de ciclos de actuación antes de fallo.
- Correlación entre la presión interior y el desplazamiento del actuador.

El cambio de volumen de la cámara interior no es posible medirlo porque no tenemos ningún caudalímetro instalado en la placa de control. Sin embargo el cambio de volumen afecta directamente a la velocidad de movimiento. Cuanto más cambio de volumen sea necesario para el movimiento, mayor tiempo tardará en realizar el desplazamiento el actuador [36].

Una vez fabricado el actuador se han realizado la medición experimental de dos de los parámetros de actuación. Se ha elegido medir el desplazamiento del actuador para una determinada presión y la velocidad con la que se consigue la actuación completa. En la siguiente imagen se puede observar el movimiento completo del actuador (ver Figura 5.10).

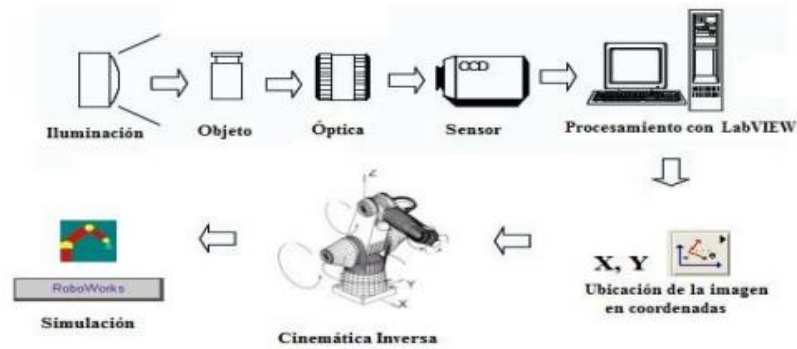


**Figura 5.10:** Movimiento completo del actuador.

### **5.2.1. Resultados experimentales del desplazamiento del actuador en los ejes X-Y.**

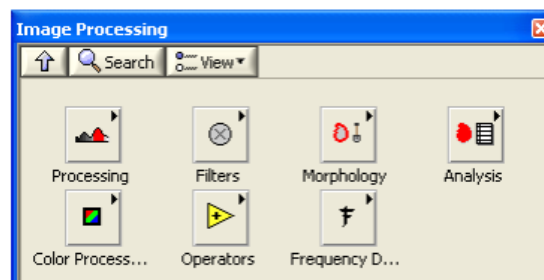
El objetivo de los ensayos experimentales es ver si el rendimiento del actuador se ajusta a la simulación. En este caso concretamente se ha medido el desplazamiento del actuador para distintos valores de presiones interiores. Este ensayo ya se ha realizado teóricamente mediante el modelado de los distintos actuadores.

Para medir el desplazamiento del extremo del actuador en los ejes x e y se ha utilizado una cámara de alta precisión cuyas imágenes son analizadas por el módulo visión del paquete de software LabVIEW. En la Figura 5.11 se muestran los pasos realizados para lograr la detección del movimiento del objeto [59].



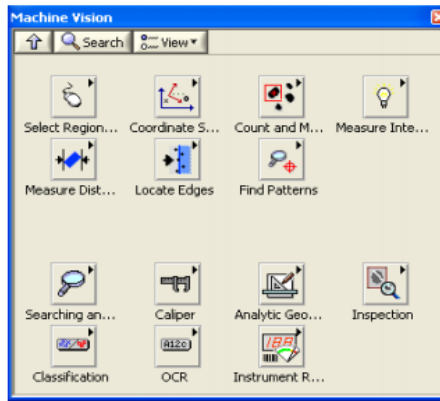
**Figura 5.11:** Pasos realizados para la detección del movimiento del objeto[59].

En primer lugar es necesario realizar un pre-procesamiento de la imagen debido a la necesidad de corregir errores inducidos por los equipos de adquisición y el ambiente. Se realiza un tratamiento previo para mejorar la calidad de la imagen eliminando la existencia de ruido y acentuando las características de la imagen como el realce, suavizado, redimensionamiento, contraste, la conversión a escala de grises y la rotación para conseguir un mejor análisis de la misma. En LabVIEW en el paquete de “Vision and Motion” (ver Figura 5.12) presenta el conjunto de instrumentos virtuales utilizados para analizar filtrar y procesar imágenes [59].



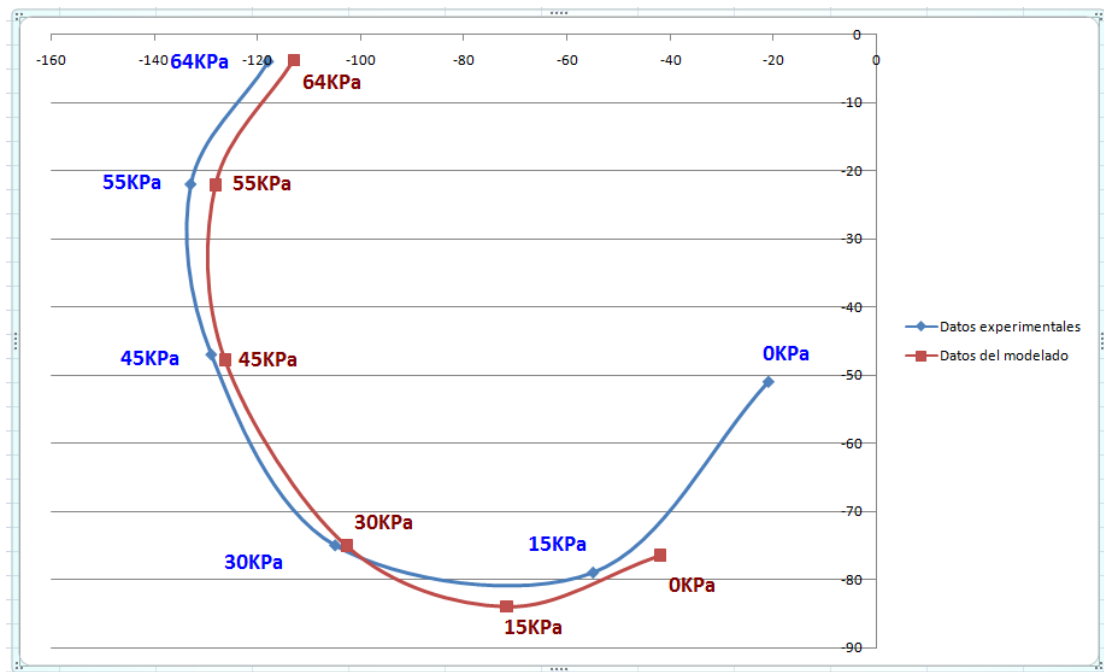
**Figura 5.12:** Instrumentos para el pre-procesamiento de la imagen [59].

Una vez la imagen se encuentra pre-procesada el siguiente paso es procesarla. Para ello hay que implementar las funciones de detección de bordes, segmentación y búsqueda de patrones (ver Figura 5.13) [59].



**Figura 5.13:** Instrumentos para procesar la imagen [59].

Una vez definido el objeto y tomado como patrón el programa realiza una búsqueda continua del objeto y lo señala con un recuadro. Estas coordenadas obtenidas son en dos dimensiones que son en las que necesitamos estudiar el desplazamiento del actuador[59]. De esta forma se obtiene el desplazamiento realizado por el actuador para una determinada presión, para el actuador fabricado obtuvimos la siguiente gráfica (ver Figura 5.14).



**Figura 5.14:** Comparación de los datos experimentales del actuador fabricado con los datos del modelado mediante el método de elementos finitos.

### **5.2.2. Resultados experimentales del desplazamiento del actuador en los ejes X-Y.**

Para medir la velocidad de actuación del actuador se utilizó un cronómetro. Es importante realizar la medida con la máxima precisión posible debido a que el movimiento del actuador es muy rápido y es difícil de medir exactamente. Para el actuador fabricado el resultado experimental fue que tardo en realizar el movimiento completo aproximadamente dos segundos.

## 6. Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir del modelado y la fabricación permiten llegar a diferentes conclusiones sobre la morfología del actuador y sobre cómo mejorar el proceso de fabricación.

El modelado de los diferentes prototipos de actuador permitió llegar a la conclusión de cómo afectan ciertas propiedades morfológicas al rendimiento del actuador. Una mayor altura de las cámaras, un mayor número de cámaras y un menor espesor de pared de muro hacen que el actuador necesite una menor presión para realizar el movimiento completo.

En el proceso de fabricación encontramos varios detalles que se deben mejorar:

- Se requiere una impresora muy precisa para poder asegurar que las paredes de las cámaras tendrán 1mm. de espesor. En este caso la impresora que hemos utilizado por lo que se debería utilizar un espesor de muro de 2mm. para que los muros de las cámaras sean más resistentes.
- Aunque se utiliza una cámara de vacío para que las burbujas interiores asciendan a la superficie del molde, después de curar el Elastosil se puede observar que quedan algunas burbujas en las superficies que están en el interior del molde. Esto provoca que las paredes tengan más puntos débiles por donde se pueden producir fugas. También al diseccionar una parte de un actuador inservible se puede observar cómo hay una gran cantidad de burbujas en el interior del actuador (ver Figura 5.1). Las soluciones posibles a este problema son:



**Figura 6.1:** Burbujas interiores en el actuador.

- Aumentar la presión negativa de la cámara de vacío para facilitar que las burbujas interiores salgan a la superficie del molde.



- Una vez mezclados los dos componentes del Elastosil verter en el molde e introducir el molde en la cámara de vacío lo más rápido posible. De esta forma se evita que el Elastosil se empiece a curar y se vuelva más denso lo que imposibilita que las burbujas interiores puedan salir hacia la superficie.
- Por último se debe diseñar un canal más grande y pensar en algún sistema para evitar que se tapone. Este es el principal problema que se ha encontrado en la fabricación. En torno a la mitad de actuadores que han sido fabricados a alguno se le ha taponado algún canal, lo que provoca que el actuador sea inservible.

Por último lugar se puede concluir que el comportamiento real de los actuadores es muy parecido al resultado que se había obtenido en el modelado. Se puede ver la comparación en la Figura 5.14.

# Anexos

## I. Anexo 1: Molde del actuador con altura de cámara de 15mm.

Para fabricar las dos partes del actuador necesitamos un molde que hemos diseñado también y luego es impreso mediante impresión 3-D. En este anexo se presenta un ejemplo del molde del actuador que tiene una altura de cámaras de 15 mm. El molde se compone de tres partes, las dos primeras para moldear el cuerpo principal del actuador y la última para moldear la lámina inextensible inferior.

### 1. Molde del cuerpo principal, parte de abajo (ver Figura A1.1):

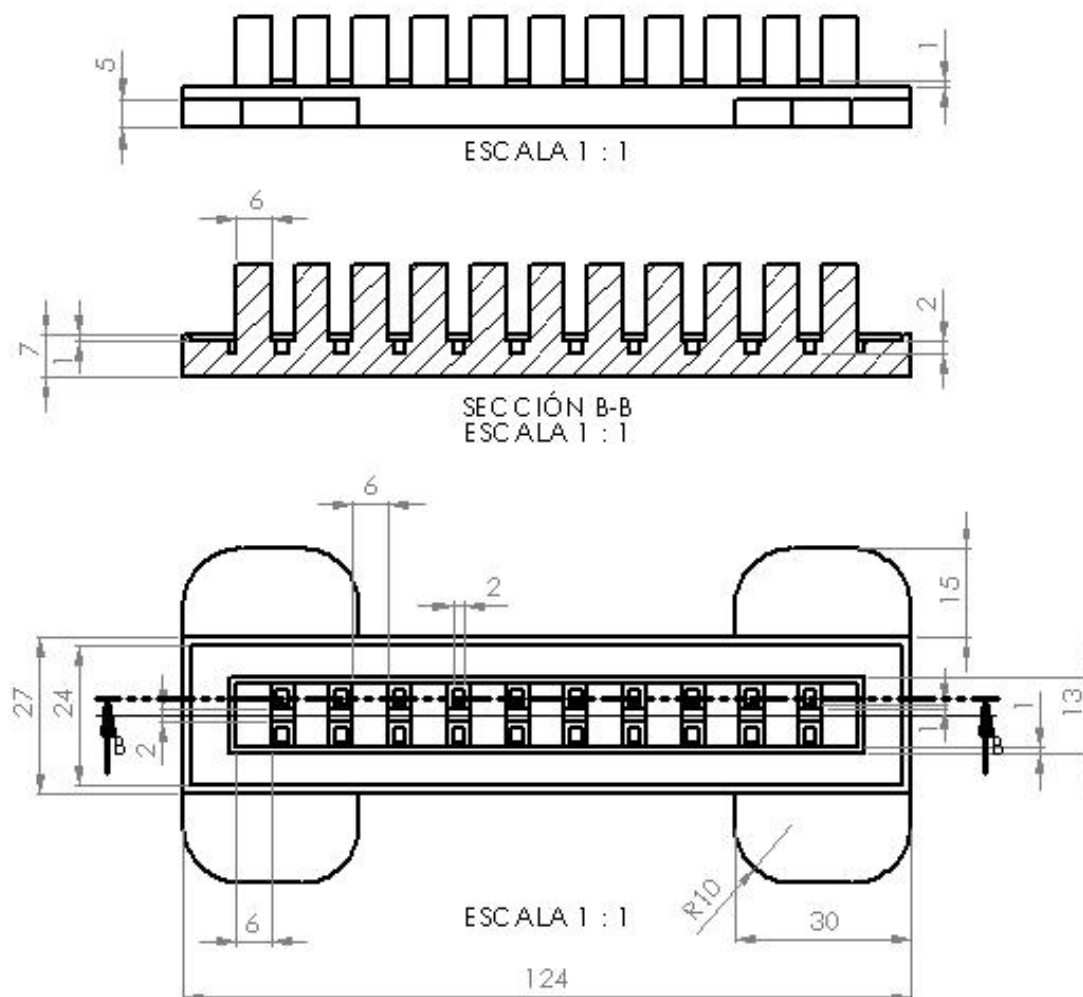
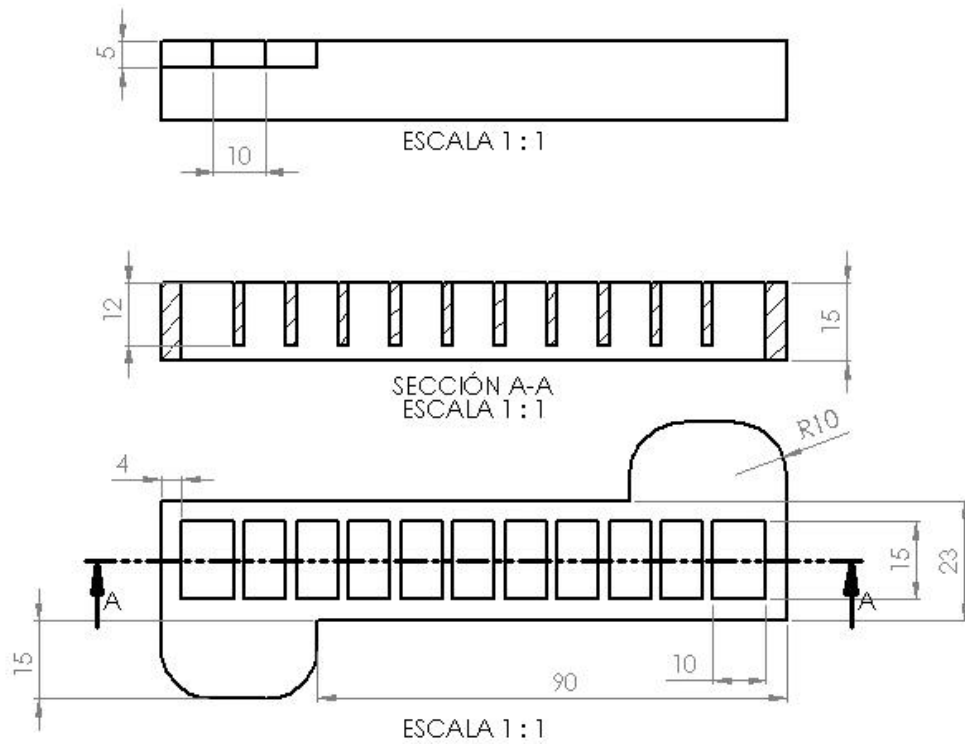


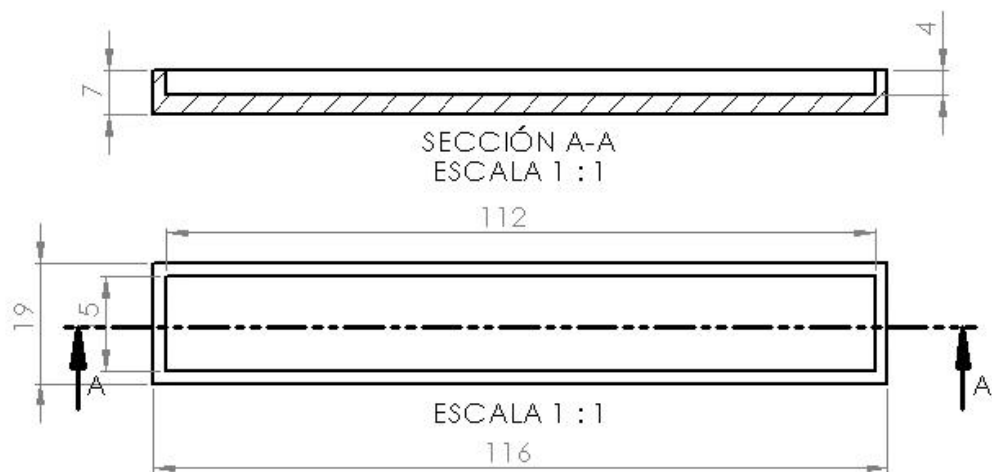
Figura A1.1: Parte de abajo del molde del cuerpo principal del actuador.

### 2. Molde del cuerpo principal, parte de arriba (ver Figura A1.2):



**Figura A1.2:** Parte de abajo del molde del cuerpo principal del actuador.

### 3. Molde de la capa inferior inextensible (ver Figura A1.3)



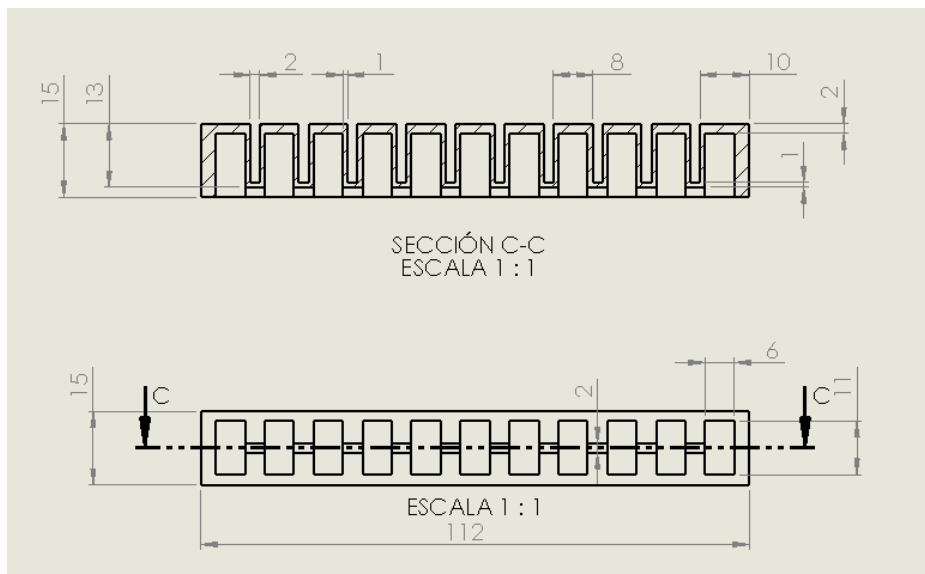
**Figura A1.3:** Molde de la capa inferior inextensible del actuador.

## II. Anexo 2: Planos de los prototipos y de uno de los moldes.

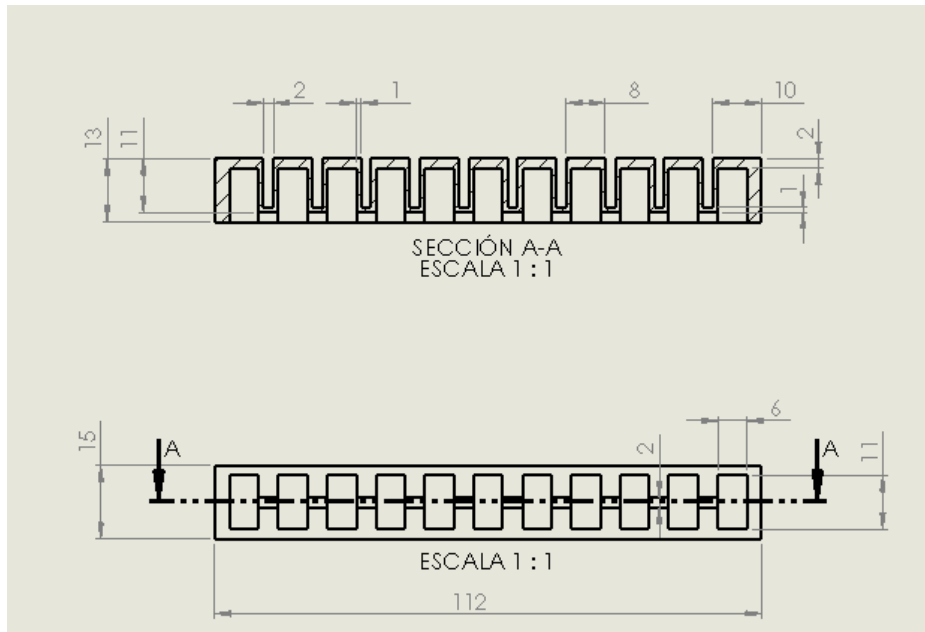
Cómo se ha explicado anteriormente, se han creado seis prototipos para estudiar los efectos en el rendimiento de tres parámetros de la morfología del actuador. Seguidamente se anexan los planos de los seis prototipos. Las cotas están en milímetros.

### – Comparar el efecto de la altura de las cámaras:

Para comparar el efecto que tiene la altura de las cámaras sobre el rendimiento del actuador se diseñaron dos prototipos que sólo difieren en la altura de las cámaras, uno tiene una altura de las cámaras de 15mm (ver Figura A2.1) y el otro prototipo tiene una altura de las cámaras de 13mm (ver Figura A2.2).



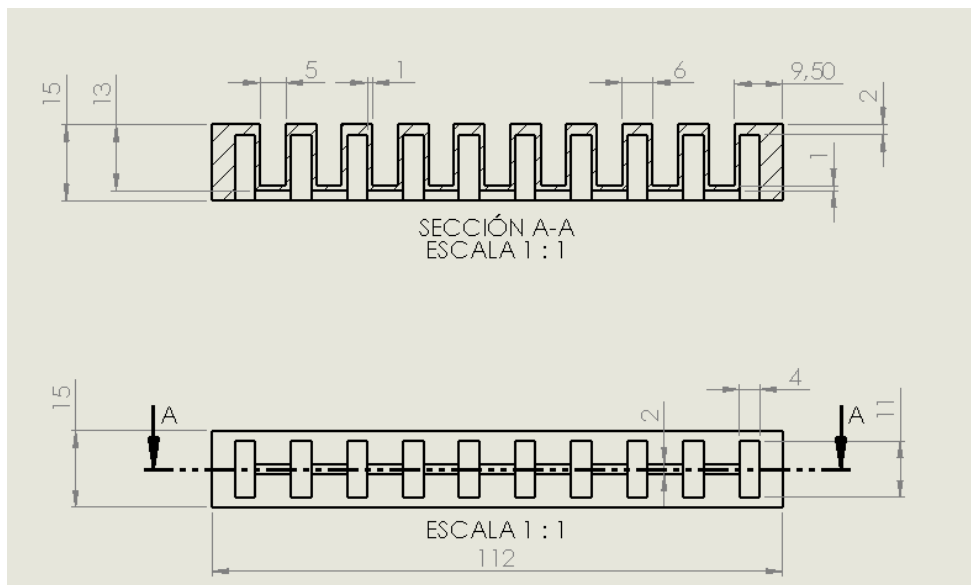
**Figura A2.1:** Planos de actuador con altura de cámara de 15mm.



**Figura A2.2:** Planos de actuador con altura de cámara de 15mm.

– **Comparar el efecto del número de cámaras:**

Para comparar el efecto que tiene el número de cámaras sobre el rendimiento del actuador se diseñaron dos prototipos que difieren en el número de cámaras, teniendo las cámaras las mismas dimensiones, uno tiene 10 cámaras (ver Figura A2.3) y el otro prototipo tiene 5 cámaras (ver Figura A2.4).



**Figura A2.3:** Planos de actuador con 10 cámaras.

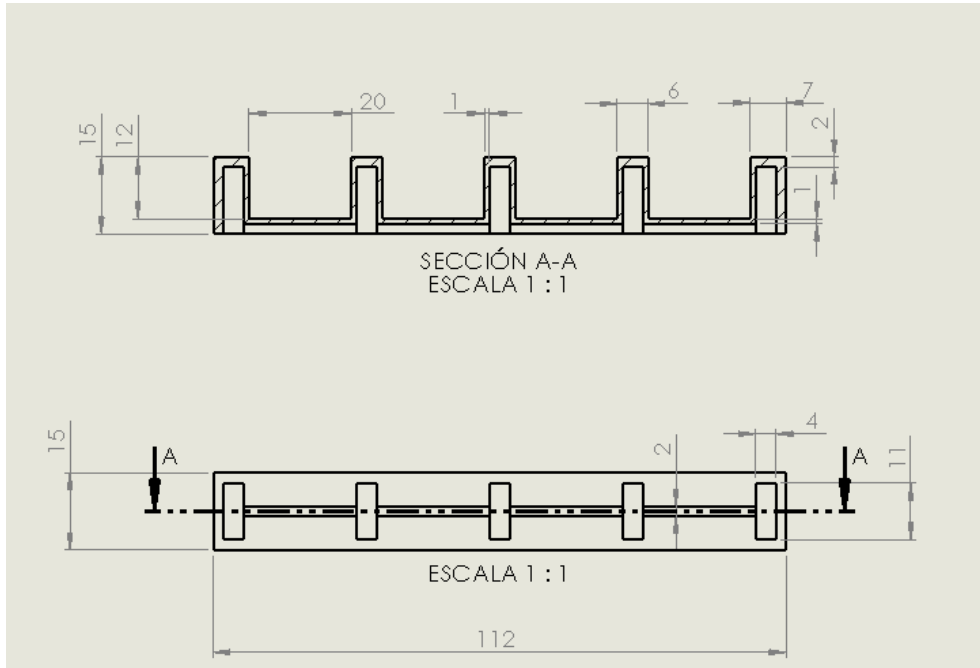


Figura A2.4: Planos de actuador con 5 cámaras.

– Comparar el efecto del espesor de pared:

Para comparar el efecto que tiene el espesor de pared sobre el rendimiento del actuador se diseñaron dos prototipos que difieren en el espesor de pared, teniendo las demás dimensiones que comparten iguales, uno tiene un espesor de pared de 1mm (ver Figura A2.5) y el otro prototipo tiene un espesor de pared de 3mm (ver Figura A2.6).

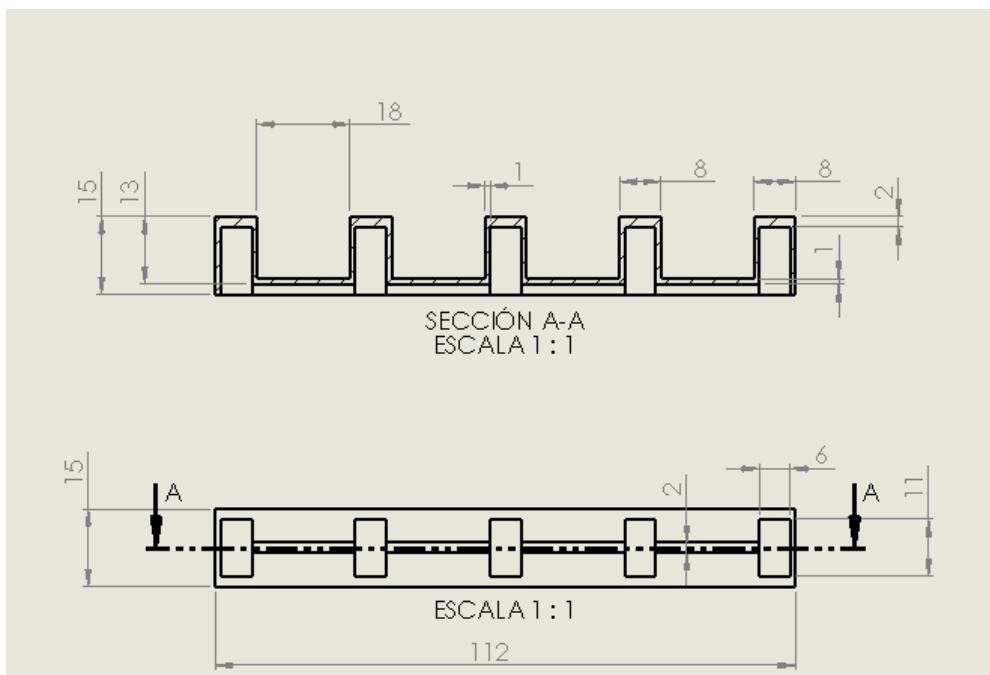
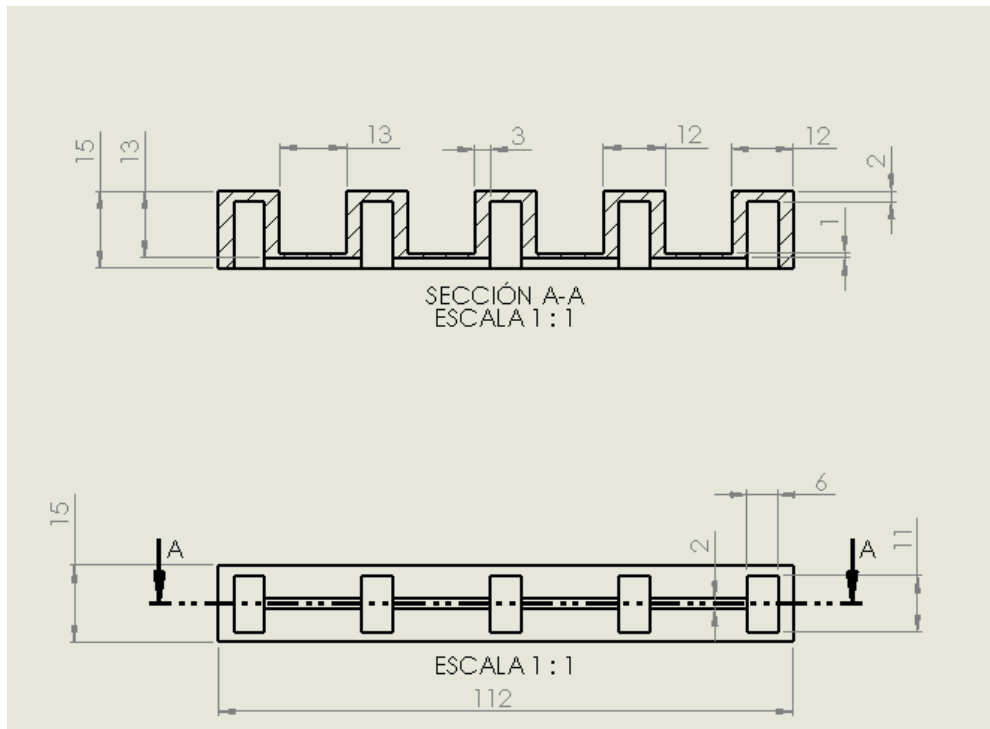
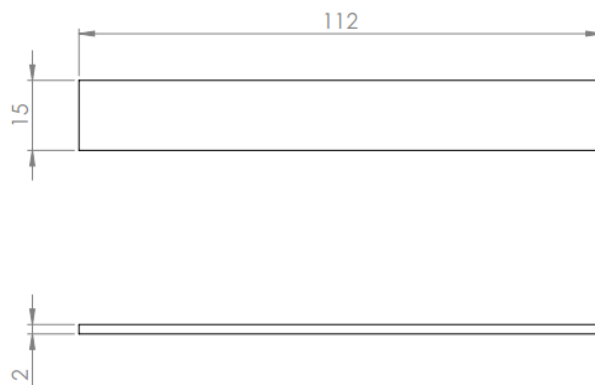


Figura A2.5: Planos de actuador con espesor de pared de 1mm.



**Figura A2.6:** Planos de actuador con espesor de pared de 1mm.

Para completar la geometría del actuador se necesita añadirle dos láminas cómo la que se puede ver en los planos de la Figura A2.7. Estas láminas inferiores se utilizan para el modelado del actuador en Abaqus.



**Figura A2.7:** Plano de las dos placas idénticas de la base inferior del actuador.

### III. Anexo 3: Guía para modelado de los actuadores blandos “PheuNet” en Abaqus.

#### 1. Diseñar “Parts”

Diseñamos las diferentes “Parts” en el programa de diseño asistido por ordenador SolidWorks y las guardamos en un archivo del tipo .STEP que permite importar los diseños a Abaqus.

#### 2. Importar “Parts”

El primer paso en Abaqus es crear las diferentes “Parts”. Como es difícil diseñar las diferentes “Parts” en Abaqus, es recomendable diseñarlas en un programa de diseño asistido por ordenador y guardar las diferentes “Parts” en archivos tipo “.STEP” para poderlas importar a Abaqus. En este caso el programa que hemos elegido para el diseño asistido por ordenador es Solid Works.

Para importar las “Parts” hay que seguir los siguientes pasos: en el menú de la izquierda de Abaqus, hay que hacer “click” con el botón derecho en **Parts**, y seleccionar “**Import...**” (ver Figura A3.1).

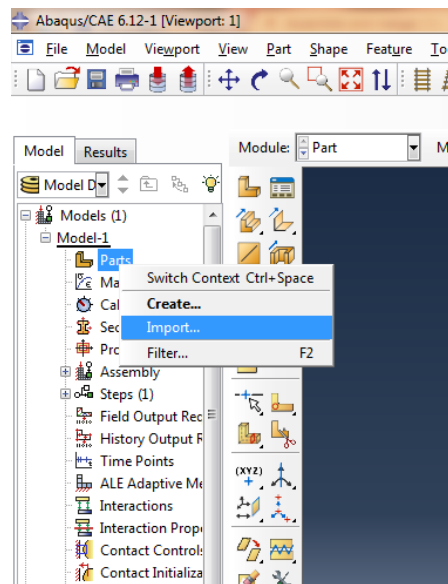
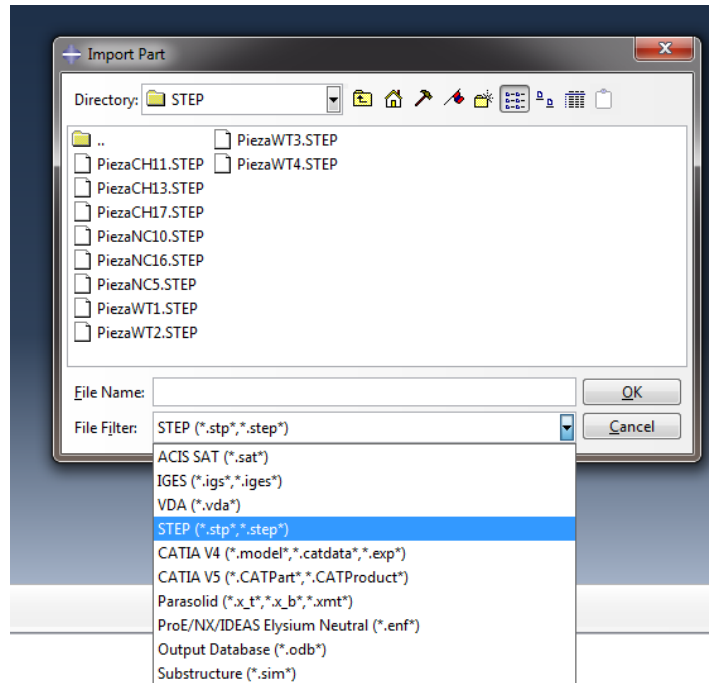


Figura A3.1: Importar partes

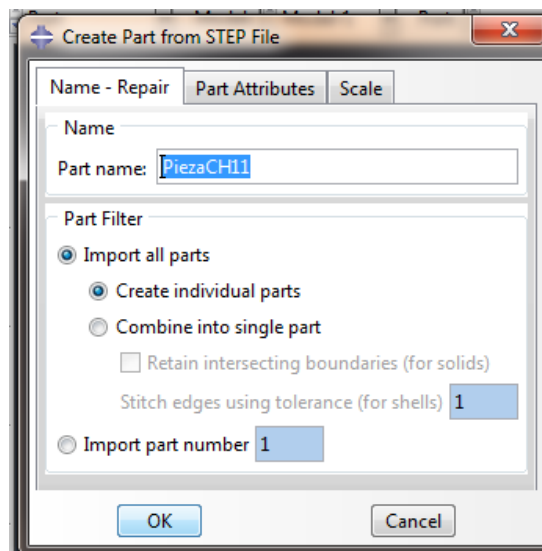
Se abrirá una ventana para seleccionar el archivo (ver Figura A3.2), en esta ventana seleccionamos el tipo de archivo que vamos a importar (abajo en el menú desplegable donde pone “File Filter:” ) y seleccionamos la “Part” que queremos importar para nuestra simulación (ver Figura A3.3).





**Figura A3.2:** Seleccionar tipo de archivo .step

Después nombrar la parte.



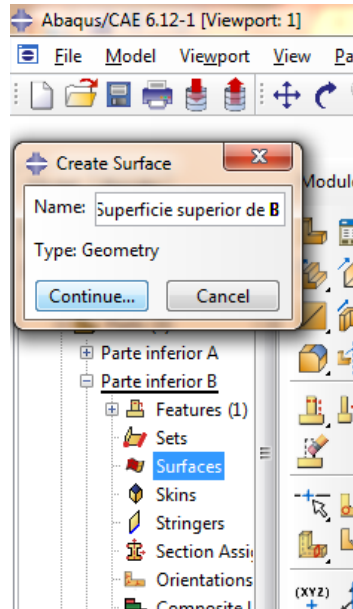
**Figura A3.3:** Nombrar la parte importada

Es necesario importar las tres Parts necesarias para el modelado, el cuerpo principal, y las dos capas de la parte de abajo.

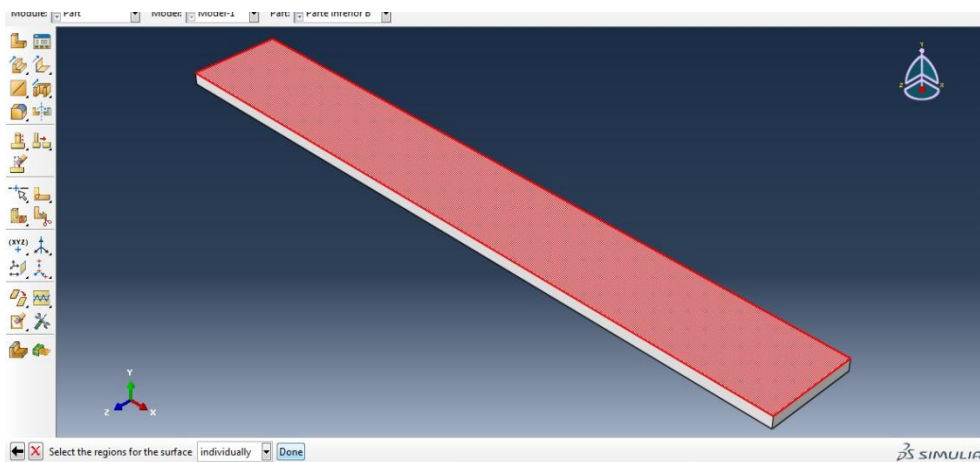
### 3. Crear una superficie en la “Parte inferior B”

Con el propósito de modelar la capa de papel que va a estar situada entre la “Parte inferior A” y “Parte inferior B” es necesario crear una superficie( funcionará cómo

marcador de posición) en la Part **“Parte inferior B”**. Desplegando el menú de la Part **“Parte inferior B”**, hay que hacer doble click en **“Surfaces”**, después se le da el nombre a la superficie (**“Superficie superior de B”**) (ver Figura A3.4) y se selecciona la superficie superior de la pieza, una vez seleccionada hay que hacer click en el botón **“Done”** para crear esta nueva superficie (ver Figura A3.5).



**Figura A3.4:** Crear superficie



**Figura A3.5:** Seleccionar superficie

#### **4. Crear Materiales: Elastosil y Papel**

El siguiente paso consiste en la creación de los materiales de los que está compuesto el modelo actuador blando Pheunet. El actuador está compuesto por dos materiales Elastosil M4601 y Papel.

Las propiedades del Elastosil importantes para la simulación son la densidad y la hiperelasticidad. El movimiento del actuador va a ser afectado por el campo gravitatorio terrestre, debido a que es un actuador que está diseñado para trabajar en la Tierra y por ello es importante la densidad para el modelado. La silicona Elastosil M4601 es un material hiperelástico que va a sufrir una deformación cuando se le inyecta aire a presión, por ello también se incluyen las propiedades hiperelásticas al crear el material. Al definir el material sólo especificamos las propiedades del material que van a ser importantes para el modelado.

#### a. Crear Elastosil

Las propiedades que hay que especificar al crear el material Elastosil son:

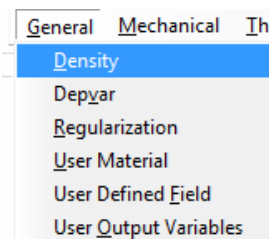
**Densidad:**  $1130\text{Kg}/\text{m}^3$  al introducirlo en Abaqus hay que cambiarlo a  $\text{Mg}/\text{mm}^3$ , por lo que se introduce  $1130\text{E}-12\text{ Mg}/\text{mm}^3$ .

**Hiperelasticidad:** Para definir el potencial de energía de deformación Yeoh utilizados los coeficientes  $C10=0.11$  y  $C20=0.02$ . Asumimos el Elastosil como isotrópico, las propiedades del material no varían dependiendo de la orientación.

Para crear el material en Abaqus seguimos los siguientes pasos:

Primero hay que hacer doble click en “**Materials**” en el menú de la parte izquierda para crear un nuevo material. Se le cambia el nombre del material por “**Elastosil**” y se le asignan las dos propiedades.

- Click en “**General**”, **Density** y se añade el valor de la densidad en  $\text{Mg}/\text{mm}^3$ ,  $1130\text{E}-12\text{Mg}/\text{mm}^3$  (ver Figuras A3.6 y A3.7).



**Figura A3.6:** Especificar la densidad del material

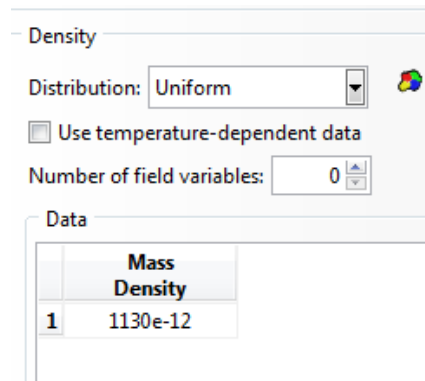


Figura A3.7: Densidad especificada

- Click en “**Mechanical**”, “**Elasticity**”, “**Hyperelastic**” y se selecciona “**Isotropic**”, Strain energy potential: “**Yeoh**”, “**coefficients**”, “**Moduli time scale**”: “**Long-term**”, “**Strain energy potential order**”: 3, y se rellenan los coeficientes  $C10=0.11$  y  $C20=0.02$  (ver Figuras A3.8 y A3.9).

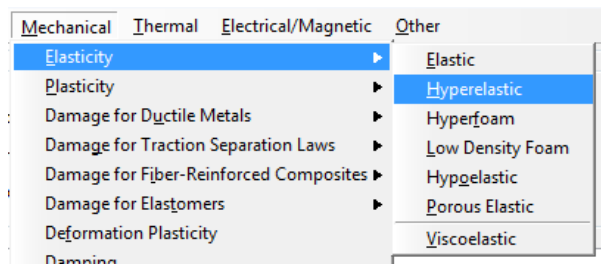


Figura A3.8: Especificar la hiperelasticidad del Elastosil.

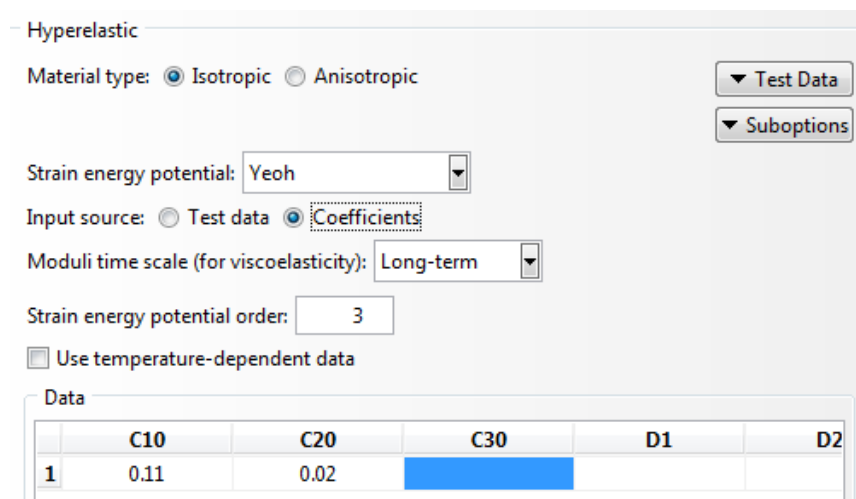


Figura A3.9: Introducir parámetros necesarios para definir la hiperelasticidad del Elastosil.

## b. Crear Papel

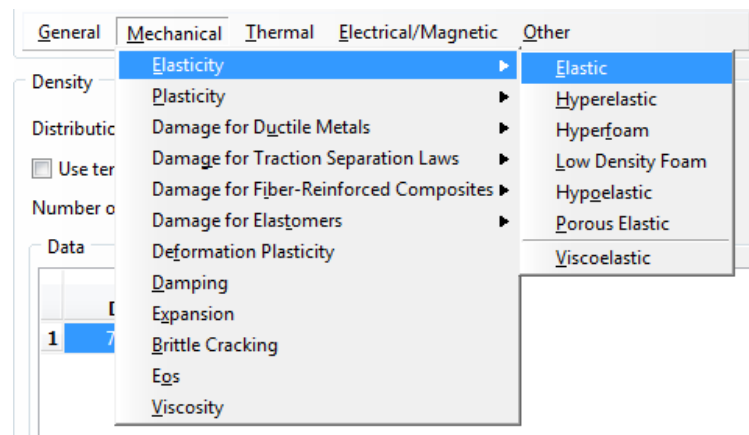
Las propiedades necesarias para definir el material Papel en Abaqus son la Densidad y la Elasticidad.

**Densidad:**  $750\text{Kg}/\text{m}^3$  al introducirlo en Abaqus hay que cambiarlo a  $\text{Mg}/\text{mm}^3$ , por lo que se introduce  $750\text{E}-12\text{ Mg}/\text{mm}^3$ .

**Elasticidad:** El papel para esta simulación lo podemos considerar cómo un material elástico isotrópico porque en todo momento el papel trabaja en el campo elástico y nunca en el plástico(doblándose). Hay que definir el Módulo de Young  $6.5\text{GPa}=6500\text{MPa}$  y el coeficiente de Poisson=0.2.

Para crear el material en Abaqus seguimos los siguientes pasos:  
Cómo al crear el Elastosil se siguen los mismos pasos para crear el material y cambiarle el nombre a **“Paper”** y se le asignan las propiedades.

- Click en **“General”**, **“Density”** y se añade el valor de la densidad en  $\text{Mg}/\text{mm}^3$ .
- Click en **“Mechanical”**, **“Elasticity”**, **“Elastic”**, y se selecciona Type: **“Isotropic”**, **“Number of field”** variables **“Module time scale”**: **“Long-term”** y se asignan los valores al Módulo de Young  $6.5\text{GPa}=6500\text{MPa}$  y al coeficiente de Poisson= 0.2 (ver Figuras A3.10 y A3.11).



**Figura A3.10:** Introducir la elasticidad de la lámina de papel.

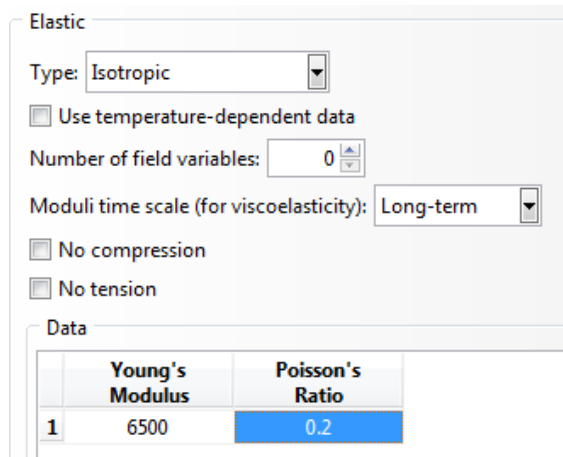


Figura A3.11: Introducir parámetros necesarios para definir la elasticidad del papel.

## 5. Crear secciones.

Hay que crear dos secciones, una con cada material.

### a. "Sec-Elastosil"

Hay que hacer doble click en **"Sections"** y se selecciona una sección homogénea **"Homogeneous"** y la categoría **"Solid"**. Después de hacer click en **"Continue"** elegimos el material Elastosil para crear la sección (ver Figuras A3.12 y A3.13).

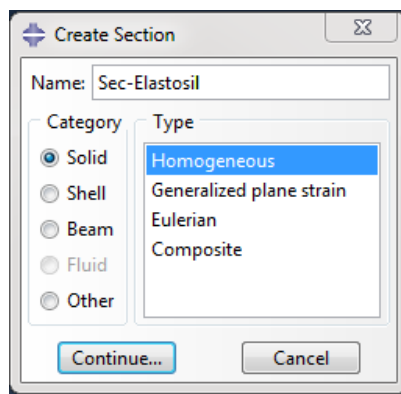


Figura A3.12: Crear la sección sólida de Elastosil.

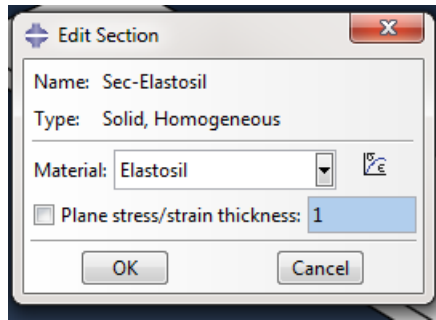


Figura A3.13: Seleccionar Elastosil cómo material de la sección.

## b. "Sec-Papel"

Hay que hacer doble click en **"Sections"** y se selecciona una sección homogénea **"Homogeneous"** y la categoría **"Shell"**. Después de hacer "click" en **"Continue"** se selecciona el material Papel para crear la sección, la anchura de la sección 0.1 y la regla de integración de Simpson (ver Figuras A3.14 y A3.15).

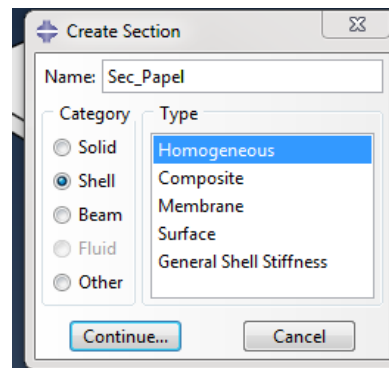


Figura A3.14: Crear sección tipo membrana de Papel.

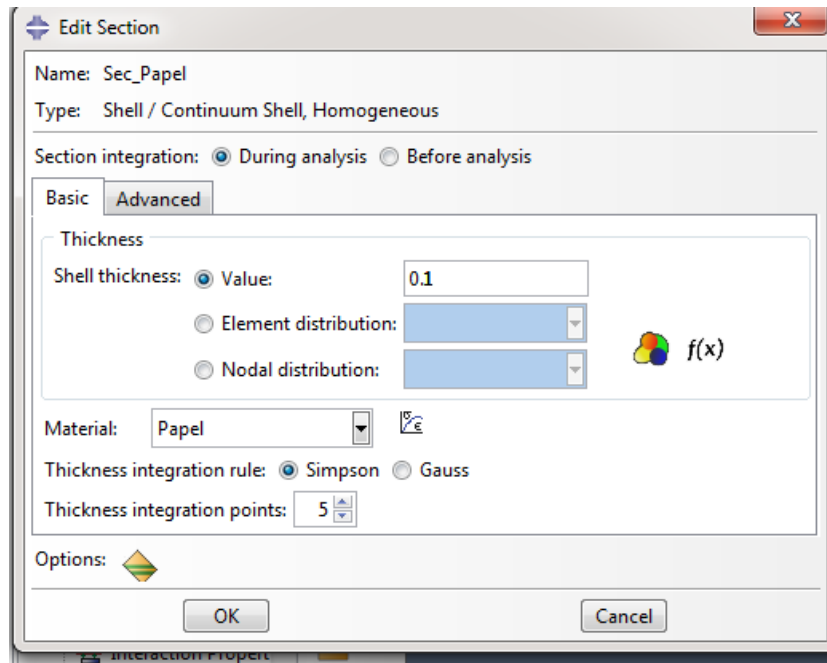


Figura A3.15: Seleccionar papel como material de la sección.

## 6. Asignar las “Sections” a las “Parts”

Para asignar las secciones a las partes hay que irse al menú extensible de cada Part, doble “click” en “**Section Assignment**”, se selecciona la “**Sec-Elastosil**” luego se selecciona toda la “Part” y se hace “click” en “**Done**”. Se utiliza este método en todas las parts creadas hasta el momento (ver Figuras A3.16 y A3.17).

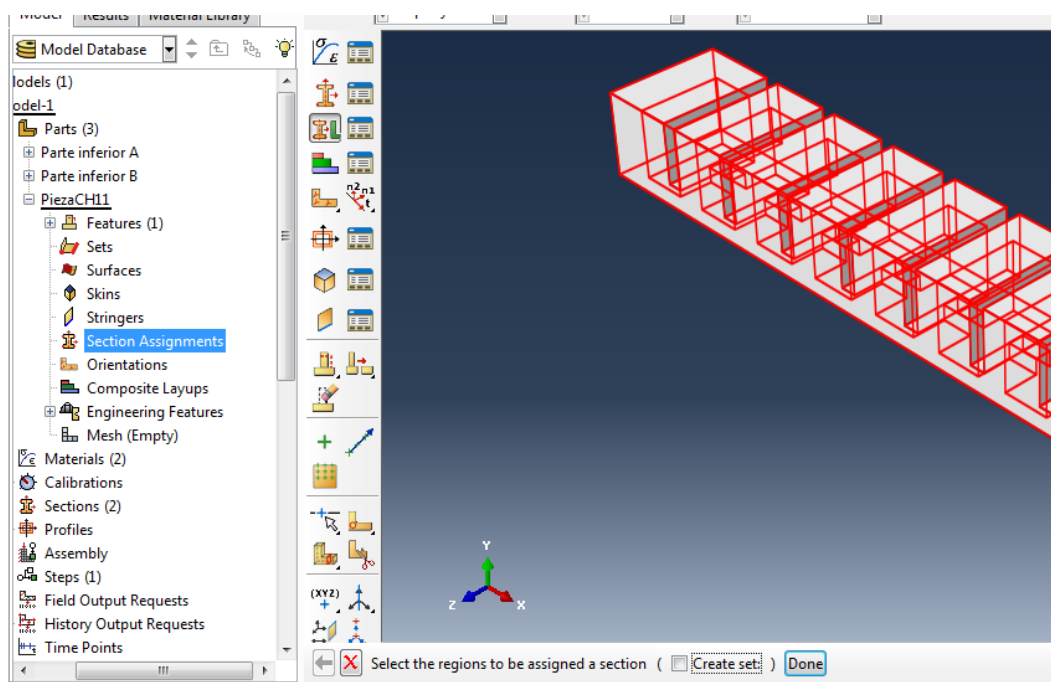


Figura A3.16: Seleccionar el sólido al que se le va a aplicar la sección.



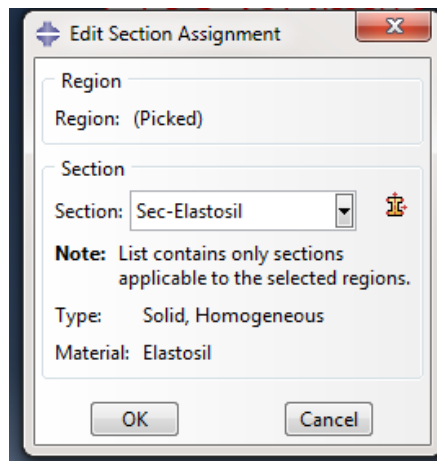
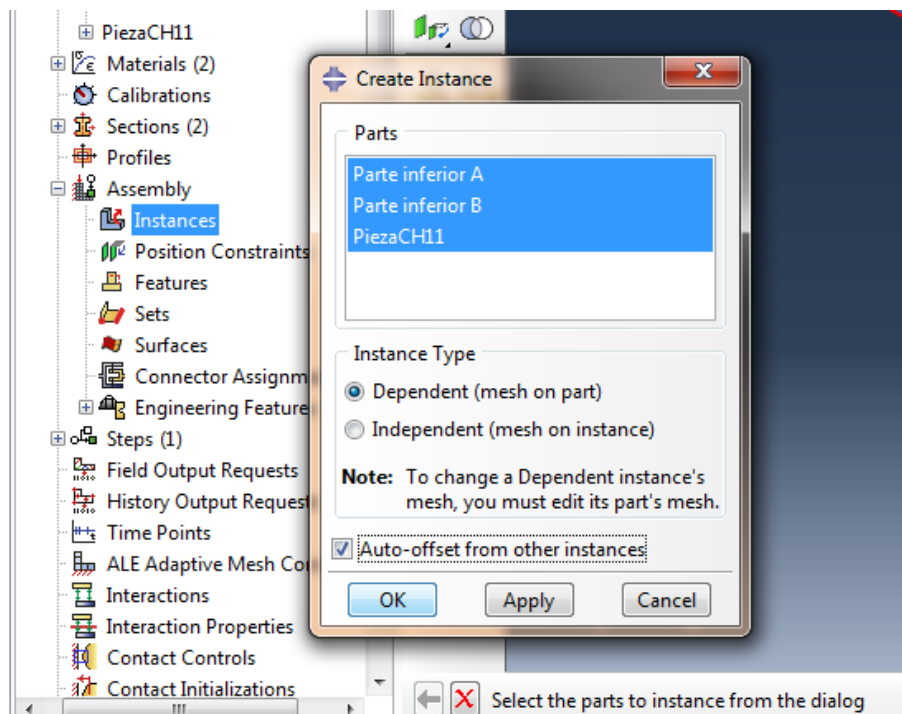


Figura A3.17: Seleccionar la sección.

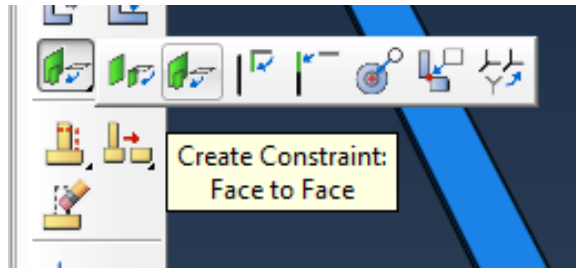
## 7. Crear "Assembly"

Para juntar las tres "Parts" diferentes se tiene que utilizar el módulo "Assembly". Hay que desplegar el menú de "Assembly" y hacer doble "click" en el "Instances". Se seleccionan las tres "Parts" (ver Figura A3.18).



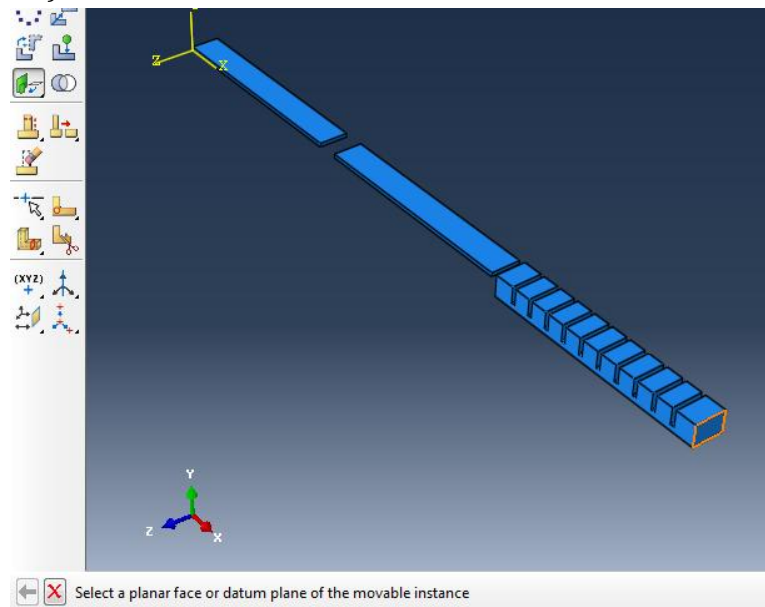
FiguraA3.18: Seleccionar las diferentes partes.

Para unir las diferentes "Parts" utilizamos la función "face-to-face".

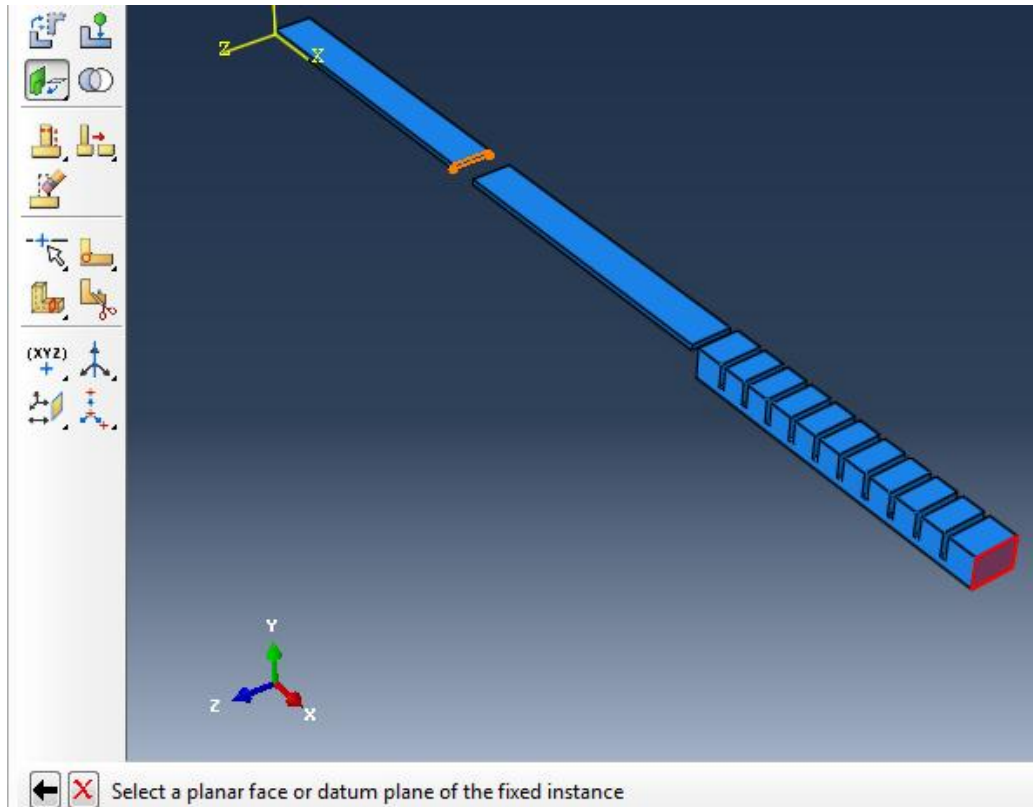


**Figura A3.19:** Crear restricciones de posición entre caras.

Para utilizar esta función: seleccionamos la cara que queremos dejar fija, que es la de la "Parte inferior A", y seleccionamos la otra cara el cuerpo principal para unir las (ver Figura A3.19 y A3.20).



**Figura A3.20:** Seleccionar la superficie del sólido que se quiere desplazar.



**Figura A3.21:** Seleccionar la segunda superficie

Después de seleccionar las dos superficies comprobamos que las flechas apunten en la misma dirección. Usando esta función se consigue relacionar las superficies con relaciones de paralelismo y la distancia entre ellas (ver Figura A3.21).

## 8. Fusionar Parts

Para fusionar las partes se utiliza el botón **"Merge/Cut Instances"** y se configura la ventana emergente de la siguiente forma.

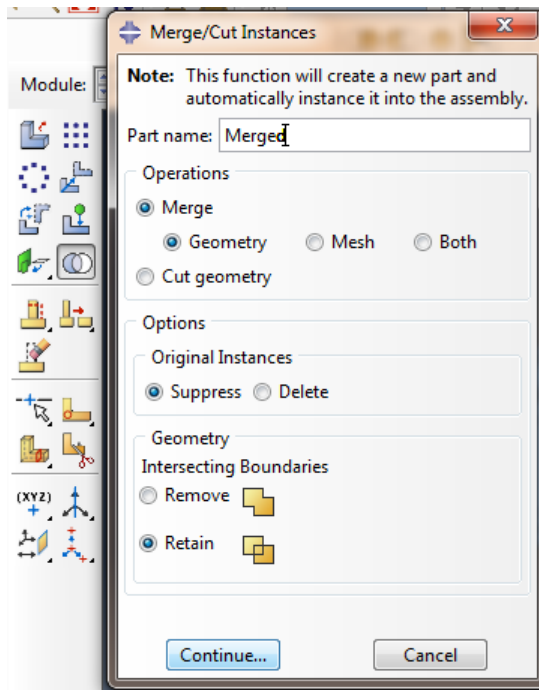


Figura A3.22: Crear una nueva “Part” ensamblando las otras partes

Se seleccionan las tres “Parts” y se hace “click” en “Done” (ver Figura A3.22).

## 9. Crear la capa de Papel

En la siguiente modelación del actuador blando “PneuNet” es necesario incluir la capa de papel que tiene el actuador en la base. Para crearla es necesario seguir los siguientes pasos:

- El primer paso es seleccionar la “**Superficie superior de B**” pero ahora está entre dos partes, por lo que para seleccionarla sola hay que ir a “**Tools**”, después dejar la flecha sobre “**Display Group**”, y hacer “click” en “**Manager...**” (ver Figuras A3.23 y A3.24).

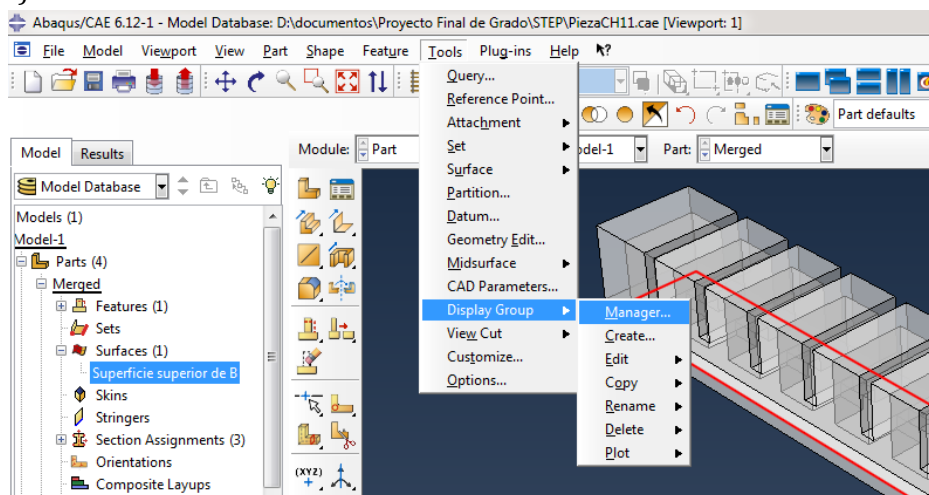


Figura A3.23: Seleccionar la superficie.

- Después aparece una ventana en la que hay que hacer click en **“Create”**.

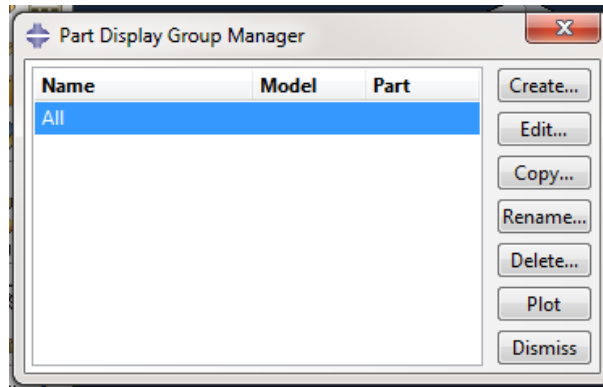


Figura A3.24: Permite elegir sólo la visualización de un grupo de elementos.

- Click en **“Surfaces”**, selecciona “Superficie superior de B”, después **“Replace”** y por último Dismiss (ver Figura A3.25).

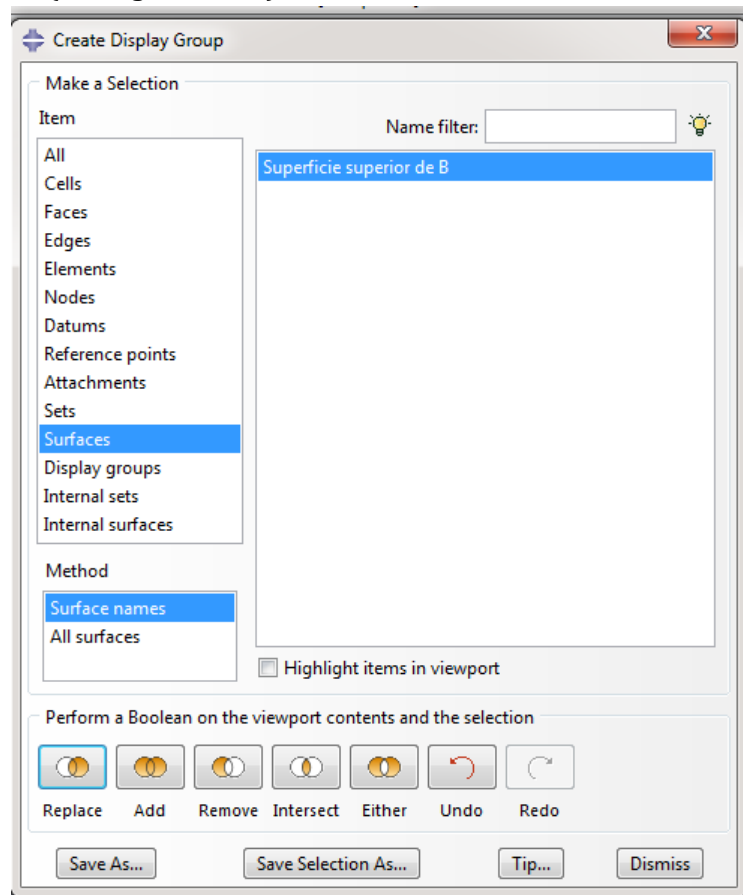


Figura A3.25: Seleccionar la superficie que se quiere ver sola.

- Por último se hace doble “click” en **“Skins”**, se selecciona la superficie y después “click” en **“Done”** (ver Figura A3.26).

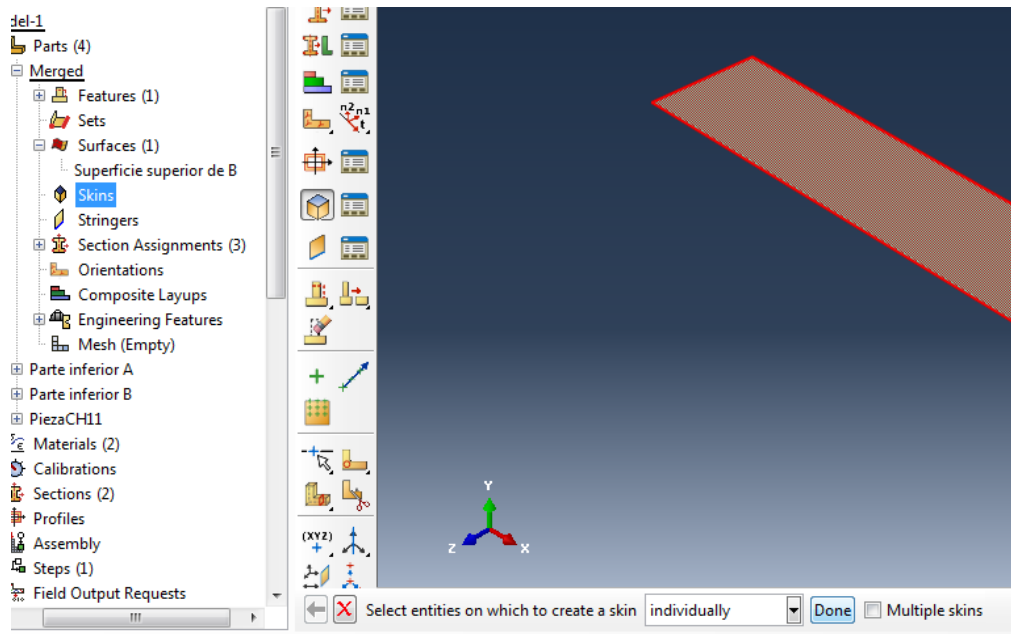


Figura A3.26: Crear la "Skin".

## 10. Asignar sección a la superficie

Para asignar una sección a la "Skin" que se ha creado tenemos que hacer doble "click" en "Section Assignments" donde debe haber ya creadas otras tres secciones todas ellas de Elastosil. Se selecciona la región en la que se va a crear la sección, que es la "Skin" creada y se hace "click" en "Done" (ver Figura A3.27).

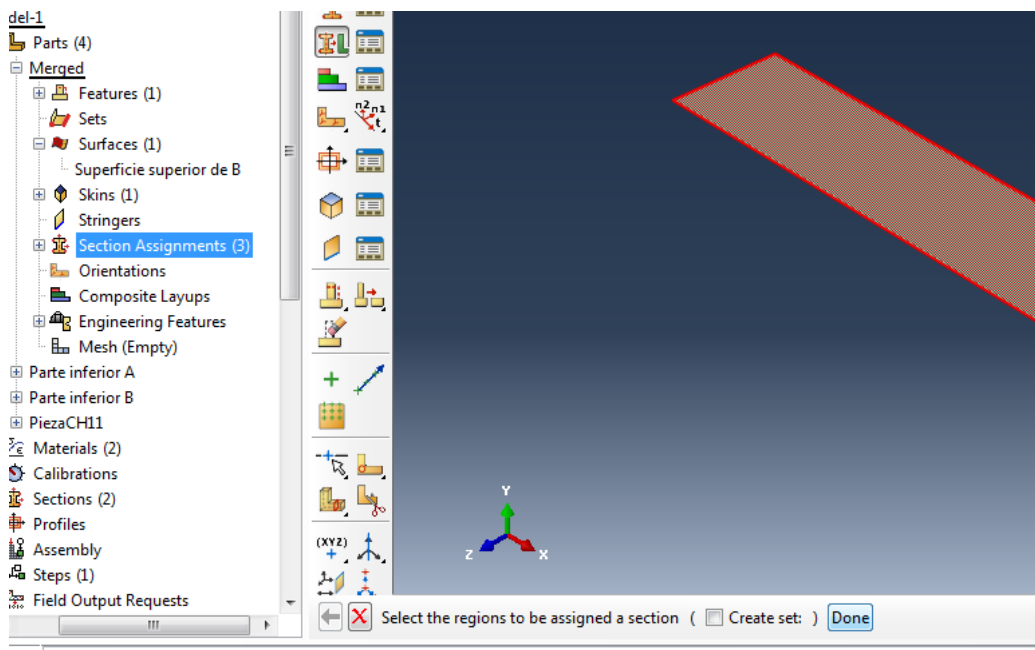
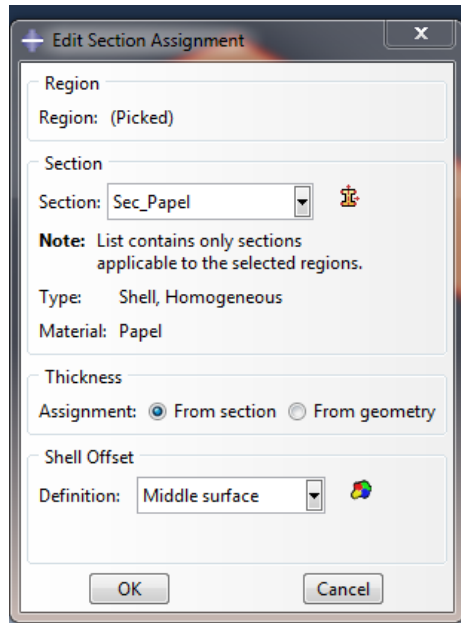


Figura A3.27: Asignar sección a la superficie.

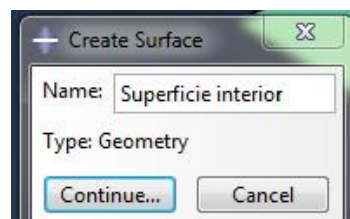
Aparecerá una ventana emergente **“Edit Section Assignment”** donde elegiremos la sección **“Sec\_Papel”** (ver Figura A3.28).



**Figura A3.28:** Seleccionar la sección.

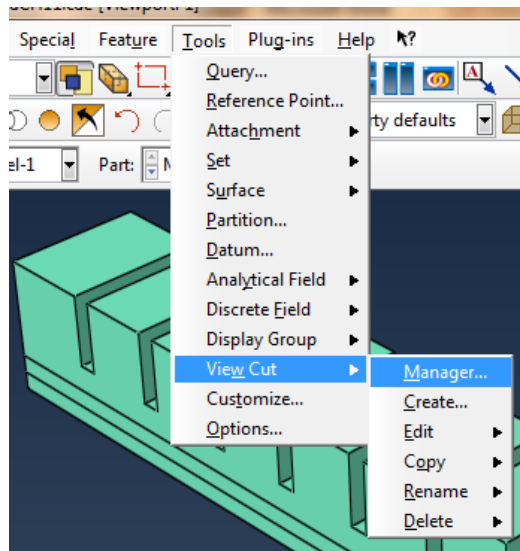
### 11. Seleccionar la cavidad interior como superficie

Para crear una superficie se hace mediante el mismo procedimiento que para crear la “Superficie superior de B”. Hay que hacer doble “click” en **“Surfaces”**, y darle el nombre **“Superficie interior”** (ver Figura A3.29).



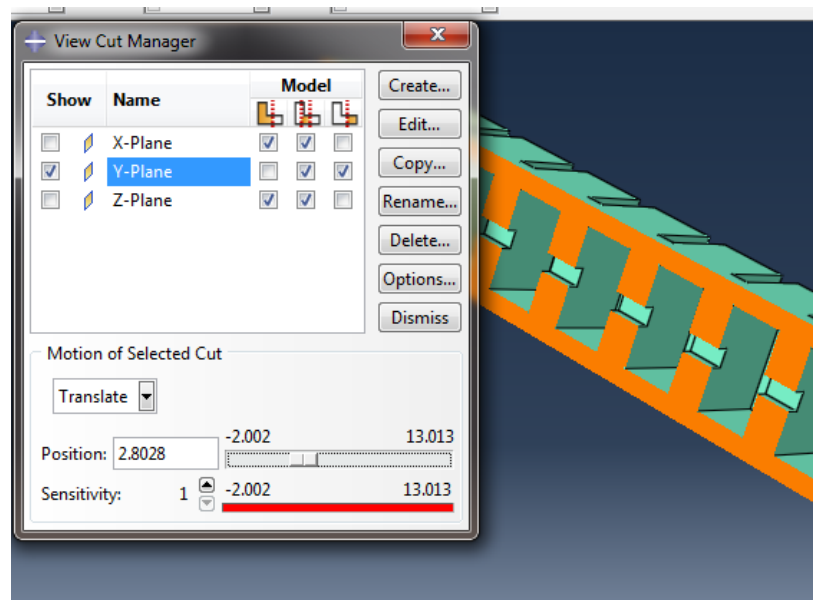
**Figura A3.29:** Crear superficie interior.

Ahora para seleccionarla hay que abrir el **“View Cut Manager”** para poder seleccionar las superficies interiores. Para abrirlo hay que hacer “click” en **“Tools”**, mantener el ratón sobre **“View Cut...”** y hacer “click” en **“Manager”** (ver Figura A3.30).



**Figura A3.30:** Seleccionar el asistente para ver creando cortes en la pieza "View Cut".

Una vez abierto seleccionamos primero el siguiente corte para seleccionar las superficies interiores. Para seleccionar varias superficies a la vez hay que mantener pulsado el botón "Shift" en el teclado (ver Figura A3.31).



**Figura A3.31:** Seleccionar el corte para ver las superficies internas.

Se selecciona todas las superficies internas que se pueden desde este corte (ver Figura A3.32).



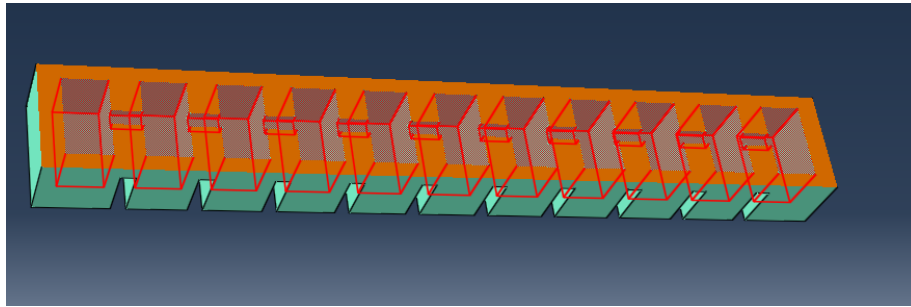


Figura A3.32: Se seleccionan las superficies internas.

Y realizamos otro corte diferente para seleccionar la superficie que queda (ver Figura A3.33).

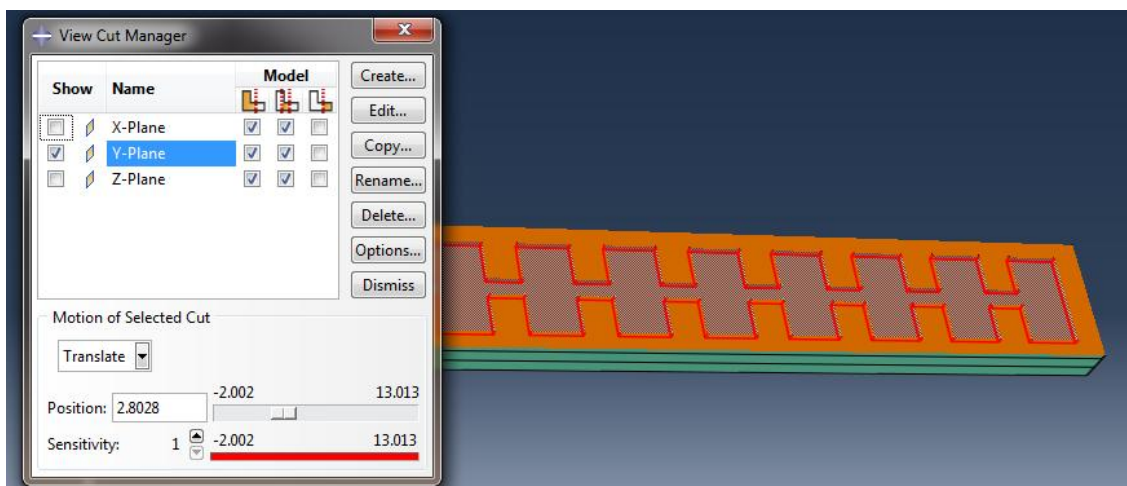


Figura A3.33: Seleccionar la superficie que queda.

Y por último se hace "click" en "Done" para crear la Superficie.

## 12. Crear Step-Gravedad

En el árbol de "Model-1" hay que hacer doble "click" en "Steps", y creamos uno nuevo llamado "Step-Gravedad" (ver Figura A3.34).

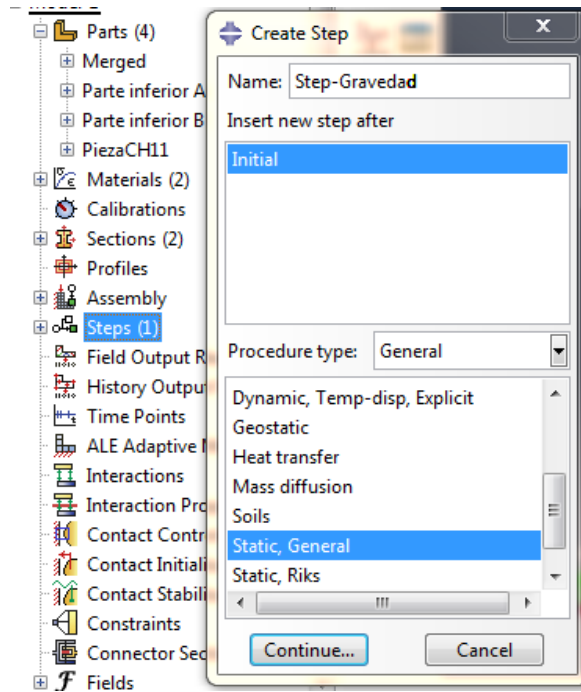


Figura A3.34: Crear el “Step” en el que se va a aplicar la carga gravitatoria.

En la siguiente ventana activar la opción “NLgeom”, no linealidades geométricas (ver Figura A3.35).

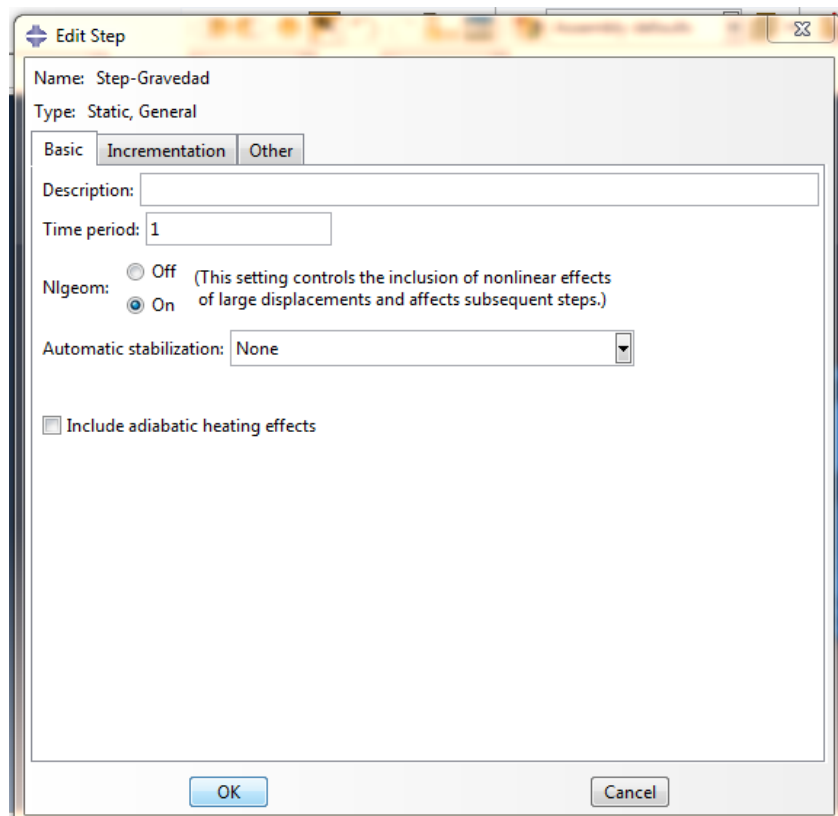


Figura A3.35: Activar las no linealidades geométricas para hacer un análisis no lineal.

### 13. Crear la fuerza gravitatoria

En el "Step" creado, doble "click" en "Loads". Se crea "Load-Gravedad" y se selecciona que la fuerza es de tipo gravitatoria (ver Figura A3.36).

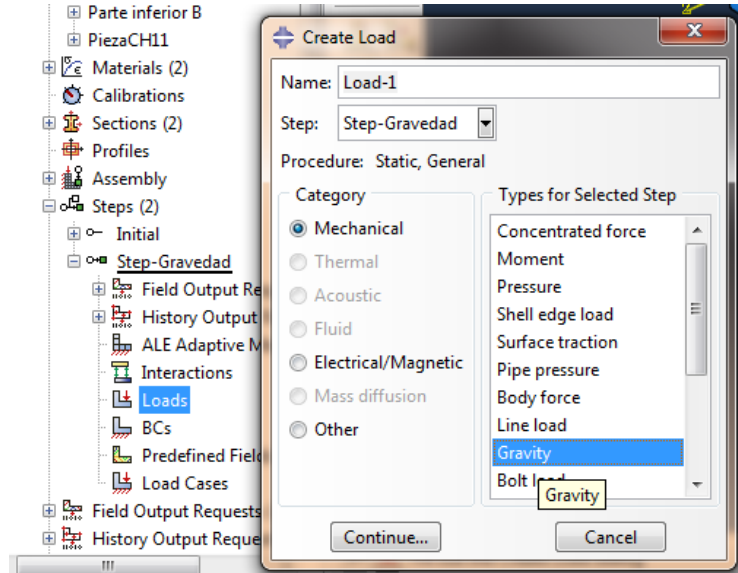


Figura A3.36: Crear carga gravitatoria.

Y se selecciona el valor -9810 para el eje Y (ver Figura A3.37).

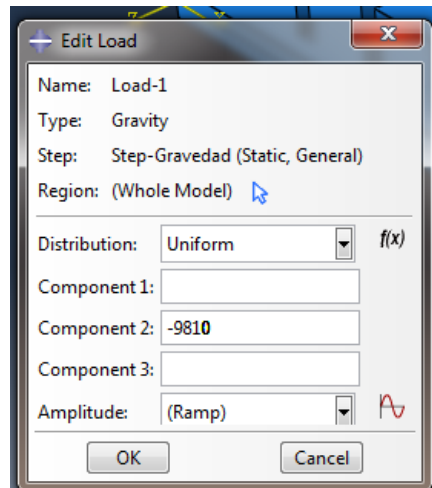
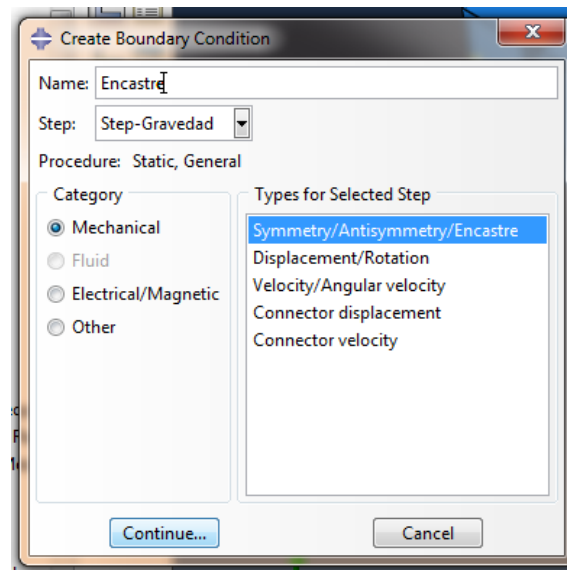


Figura A3.37: Dar valor y dirección a la carga.

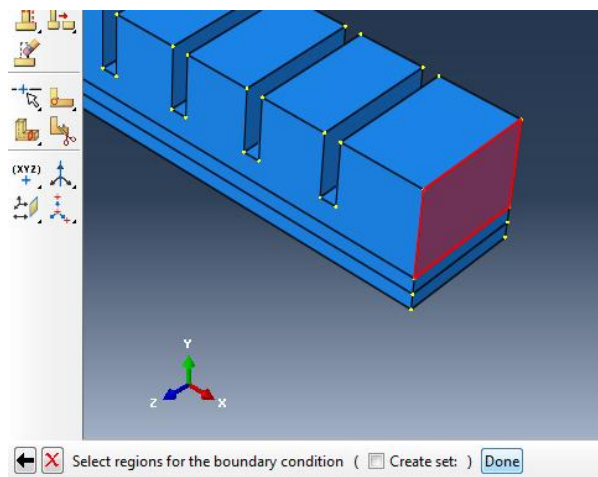
### 14. Seleccionar las condiciones de contorno de la carga gravitatoria.

Es necesario hacer doble “click” en “BCs” y después nombrar la condición de contorno cómo “Encastre”. Se selecciona también “Symmetry/Antisymmetry/Encastre” (ver Figura A3.38).



**Figura A3.38:** Seleccionar el tipo de condición de contorno que se quiere aplicar.

Y se selecciona la superficie donde se aplica la condición de contorno (ver Figura A3.39).



**Figura A3.39:** Seleccionar la superficie donde se aplica la superficie de contorno.

Al seleccionarla y hacer “click” en “Done” aparece una ventana emergente donde hay que seleccionar que la condición de contorno es un “ENCASTRE” (ver Figura A3.40).

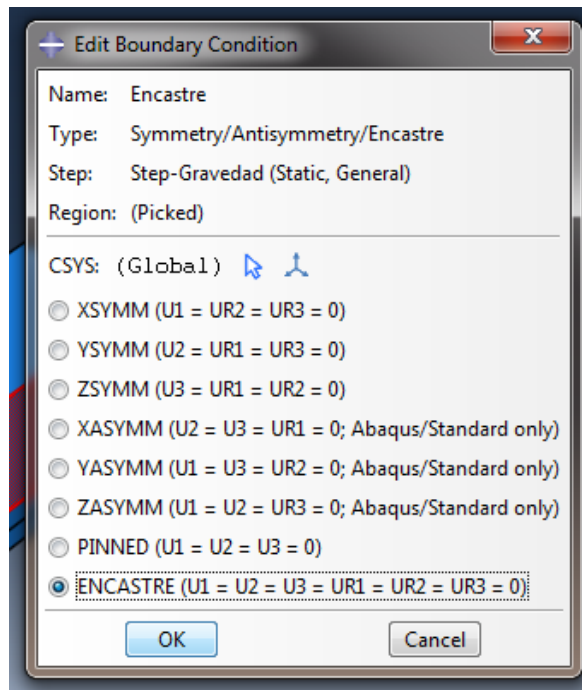


Figura A3.40: Seleccionar el la condición de contorno.

### 15. Crear Step-Presion

Hay que hacer doble "click" en "Steps" para crear un nuevo Step estático llamado "Step-Presion" (ver Figura A3.41).

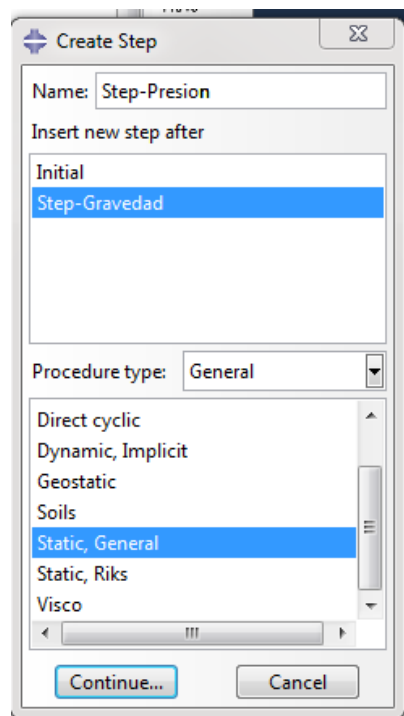


Figura A3.41: Crear el "Step" donde se aplica la presión interior.

En la siguiente ventana se hace “click” en “Ok” y ya está creado el “Step” (ver Figura 42).

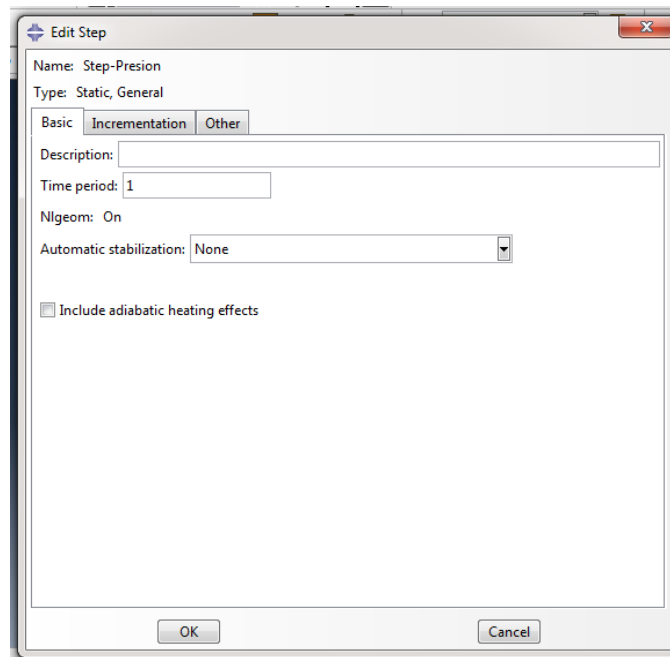


Figura A3.42: Ver que están activadas las no linealidades geométricas “Nlgeom”.

## 16. Crear presión interna

Dentro del “Step-Prision” se crea una carga haciendo doble “click” en “Loads”, y especificando que la carga es una presión seleccionando “Pressure” (ver Figura A3.43).

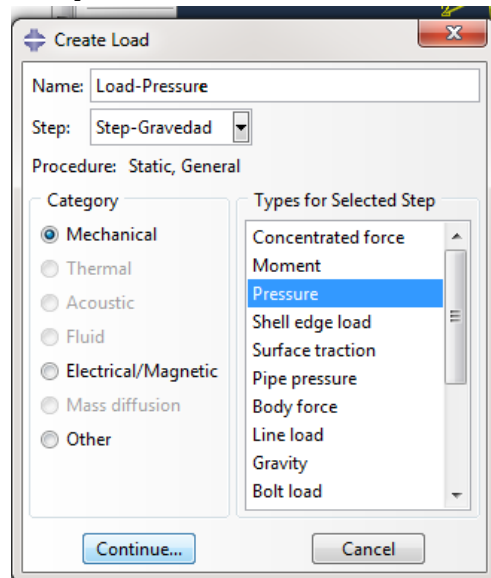


Figura A3.43: Crear la presión interna.

Para seleccionar la superficie interna hay que hacer “click” en “Surfaces” y seleccionar “Superficie interior” (ver Figura A3.44 y A3.45).

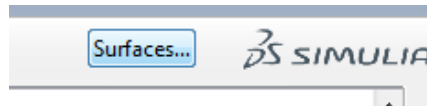


Figura A3.44: Asignar la superficie en la que se quiere aplicar la presión.

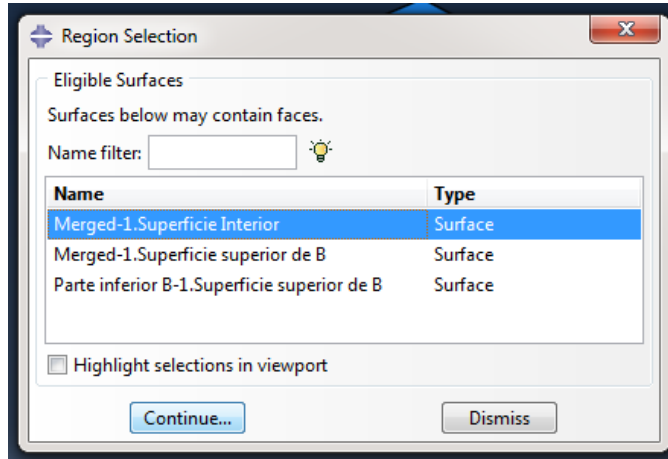


Figura A3.45: Seleccionar "Superficie Interior".

Se escribe el valor de la presión interior 0.055MPa (ver Figura A3.46).

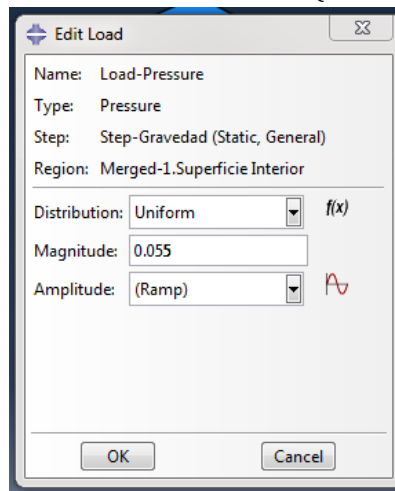


Figura A3.46: Especificar el valor numérico de la presión

## 17. Añadir contacto en las paredes

Cuando se infla el actuador las paredes exteriores entran en contacto. Para modelarlo hay que añadir este contacto en el modelado porque sino los muros se transpasan entre si en la simulación. Hay que añadir un contacto tangencial y un contacto normal.

Doble click in "Interaction Properties", se selecciona el tipo "Contact" (ver Figura A3.47).

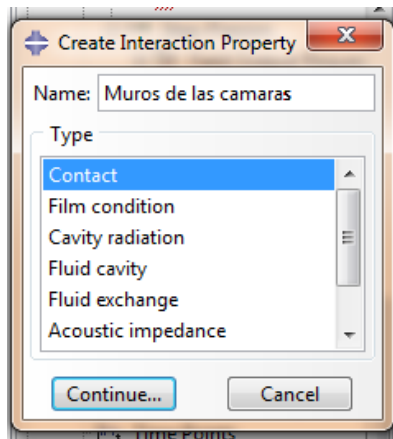


Figura A3.47: Definir contacto.

Se selecciona en la siguiente ventana un contacto mecánico en **“Mechanical”** y después **“Tangential Behaviour”** (ver Figuras A3.48 y A3.49).

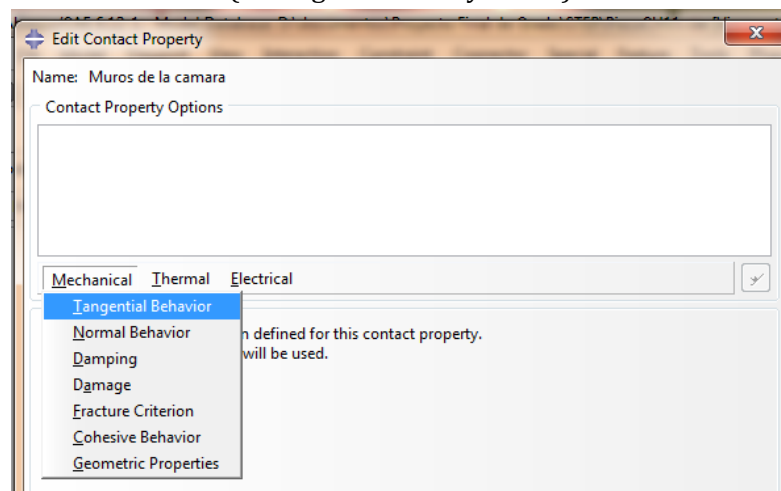


Figura A3.48: Seleccionar contacto tangencial.

Después se deja seleccionada la opción **“Frictionless”**.

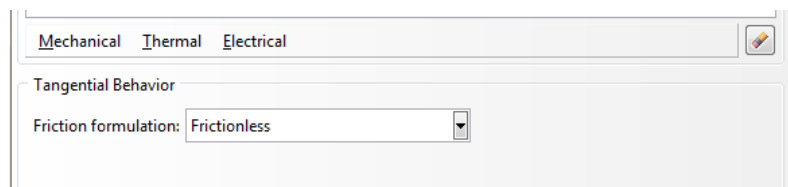


Figura A3.49: Seleccionar contacto sin fricción.

Además del contacto tangencial hay que definir un contacto normal entre las superficies (ver Figura A3.50).



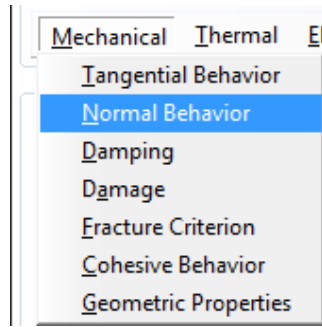


Figura A3.50: Seleccionar contacto normal.

Dejar todas las opciones del contacto que vienen por defecto (ver Figura A3.51).

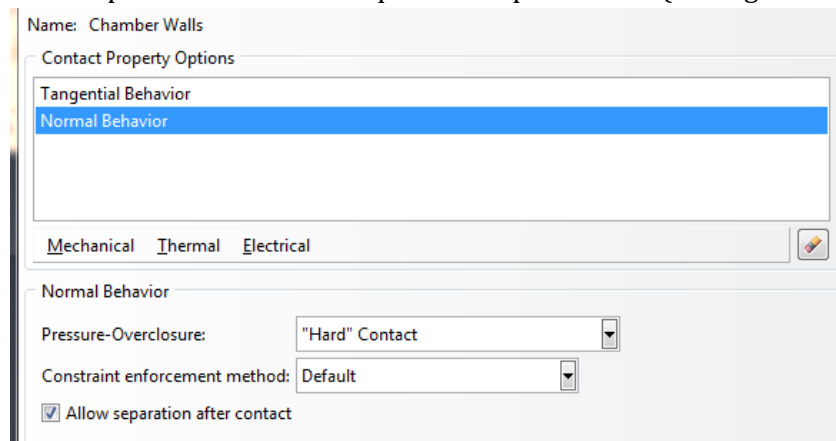


Figura A3.51: Dejar las opciones por defectos.

El siguiente paso es crear una interacción, doble click en “Interactions”, y seleccionar como tipo de interacción “Surface-to-surface” (ver Figura A3.52).

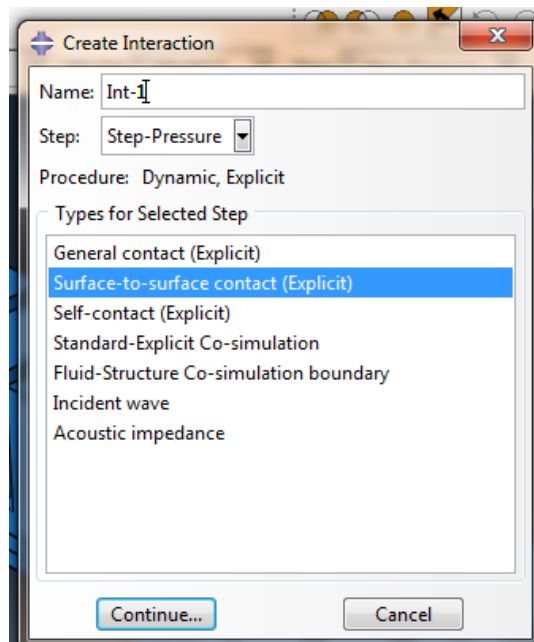
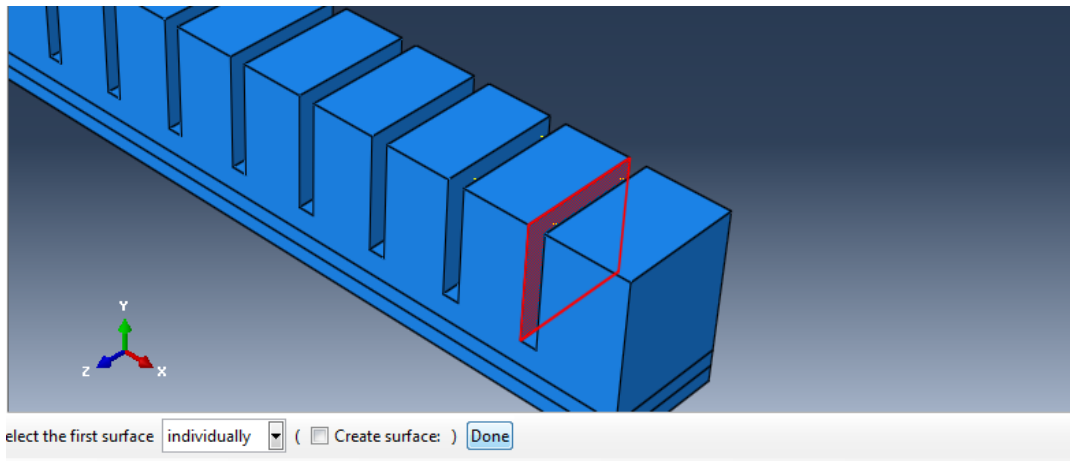


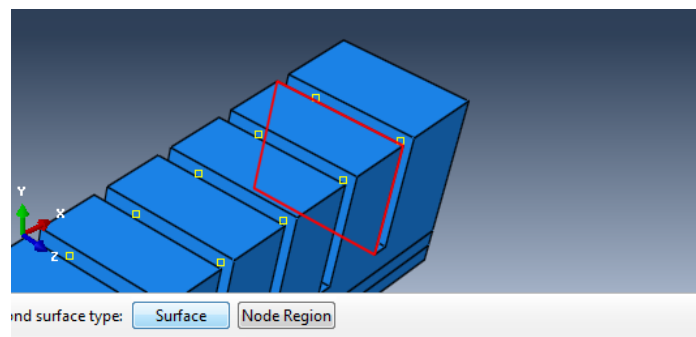
Figura A3.52: Seleccionar contacto superficie con superficie.

Se selecciona la superficie, y hay que hacer “click” en “Done” (ver Figura 53).



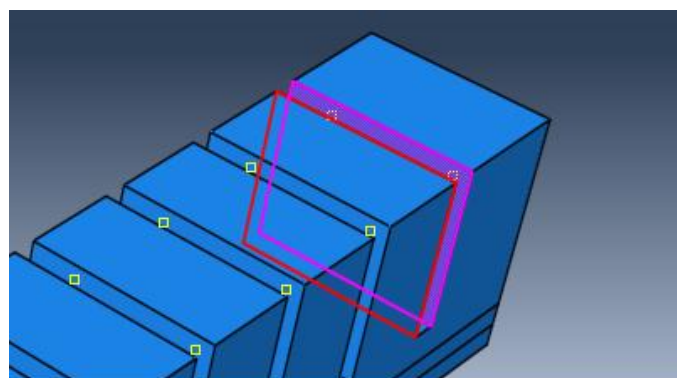
**Figura A3.53:** Se selecciona la primera superficie.

Se selecciona que va a tener un contacto con una superficie (ver Figura A3.54).



**Figura A3.54:** Se define el tipo de contacto.

Se selecciona la otra cara y se hace “click” en Done (ver Figura A3.55).



**Figura A3.55:** Se selecciona la otra superficie.

Se abre una última ventana para editar la interacción y deberá ser configurada de la siguiente manera (ver Figura A3.56).

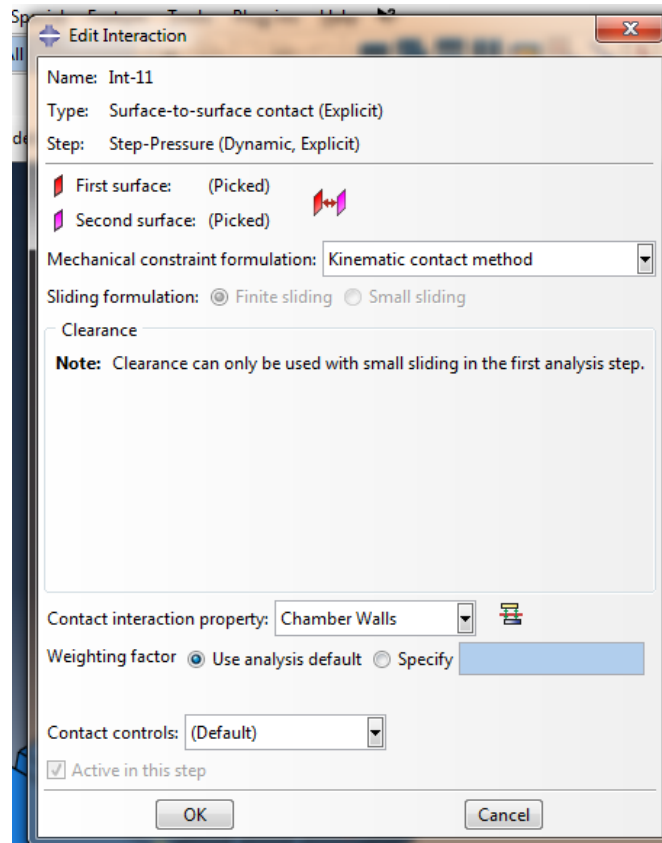
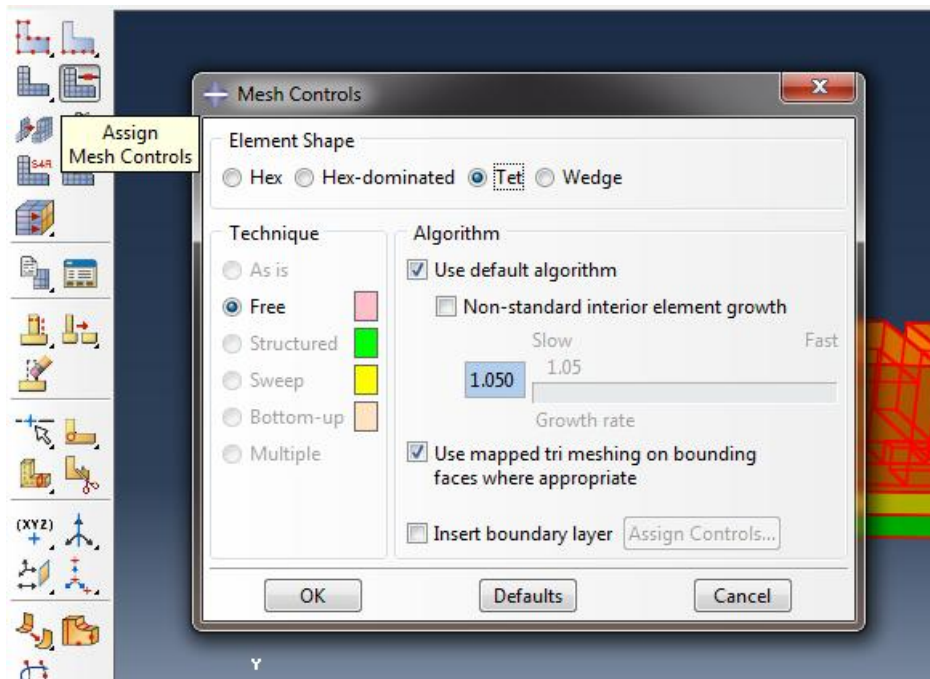


Figura A3.56: Seleccionar el tipo de contacto.

Esta acción de definir la interacción se repite tantas veces haya que definir contacto entre cada par de superficies que van a chocar.

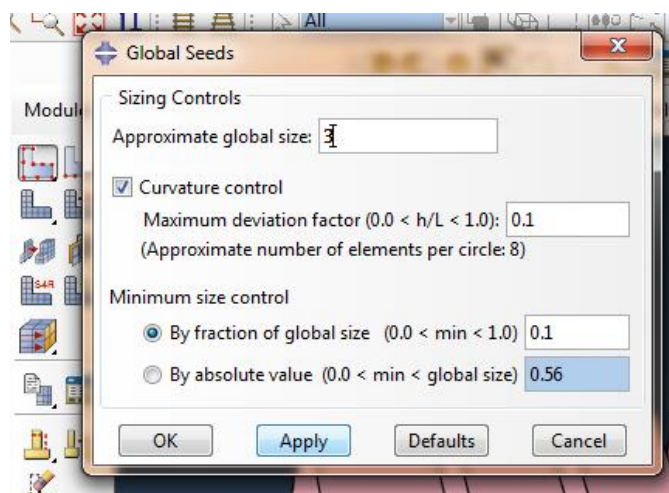
## 18. Crear Mallado

Para crear el mallado se abre el árbol de **“Merged”**, y hay que hacer doble click en **“Mesh”**. Posteriormente se hace doble click en **“Assign Mesh Controls”** se seleccionan las tres diferentes Parts que lo componen, después se hace click en **“Done”** y se configura la ventana emergente de la siguiente forma (ver Figura A3.57).



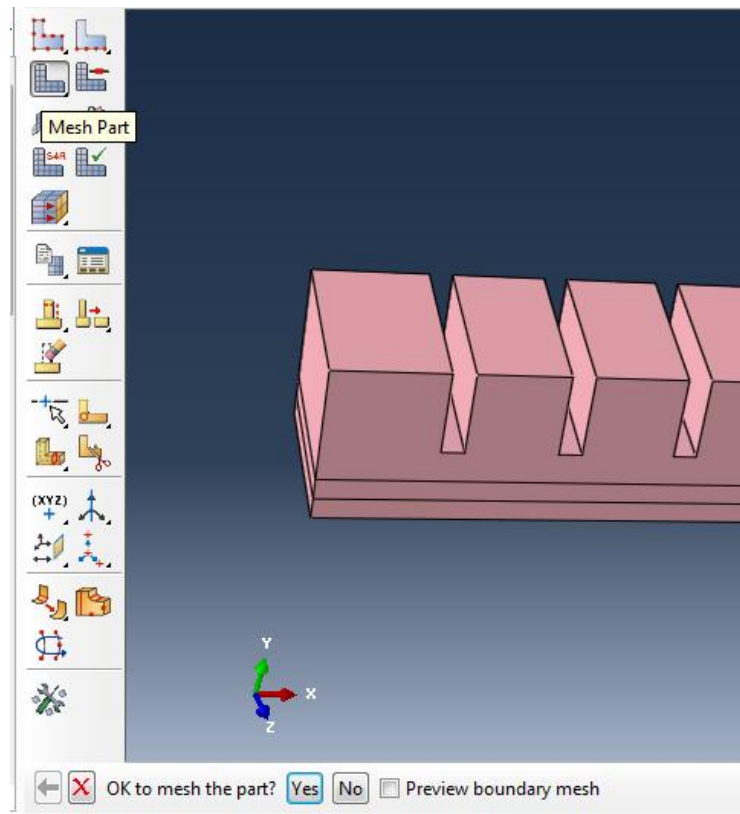
**Figura A3.57:** Se selecciona el tipo de mallado tetraédrico.

Posteriormente se hace doble click en **“Seed Part”** para establecer las semillas de la malla que se va a crear posteriormente. Se rellena la ventana emergente de la siguiente forma. El tamaño de la malla tiene que estar ajustado dependiendo del tipo de problema. Si es muy grande no se ajustará bien con las caras de la pieza y si es muy pequeña puede hacer a la pieza demasiado rígida (ver Figura A3.58).



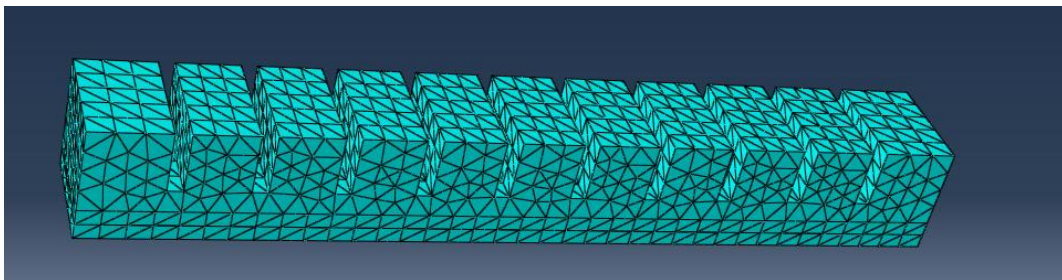
**Figura A3.58:** Se selecciona el tamaño de mallado.

Por último se malla la pieza haciendo doble click en **“Mesh part”** (ver Figura A3.59).



**Figura A3.59:** Mallado de la pieza.

Después de pulsar “Yes” la pieza queda mallada de la siguiente forma (ver Figura A3.60).



**Figura A3.60:** Pieza mallada.

### 19. Seleccionar el tipo de mallado

Hay que hacer “click” en el menú de arriba en “**Mesh**” después seleccionar “**Element Type...**” (ver Figura A3.61).

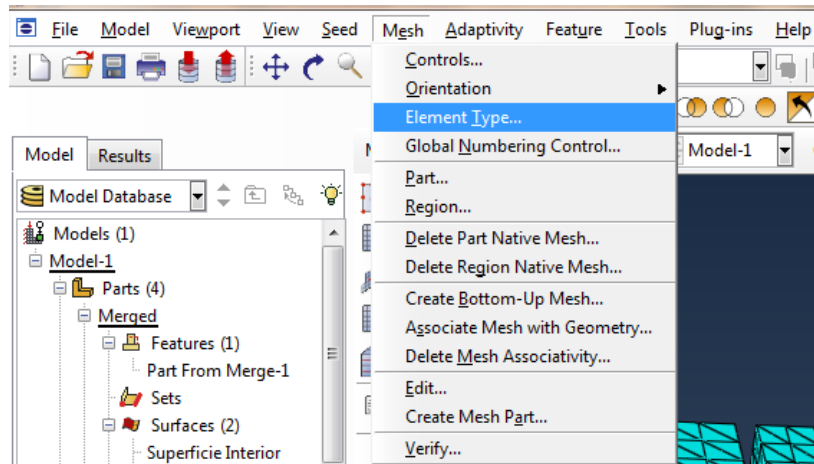


Figura A3.61: Seleccionar el tipo de los elementos.

Se selecciona “**Hybrid formulation**”, después se seleccionan las tres partes y se hace “click” en “**Done**” (ver Figura A3.62)

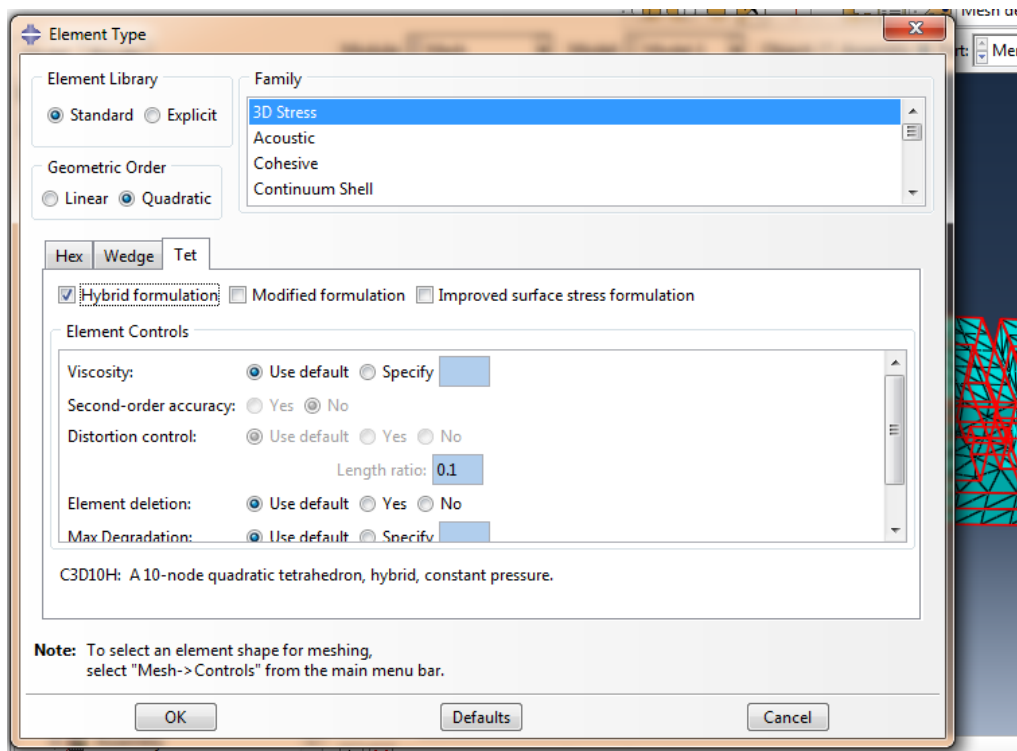
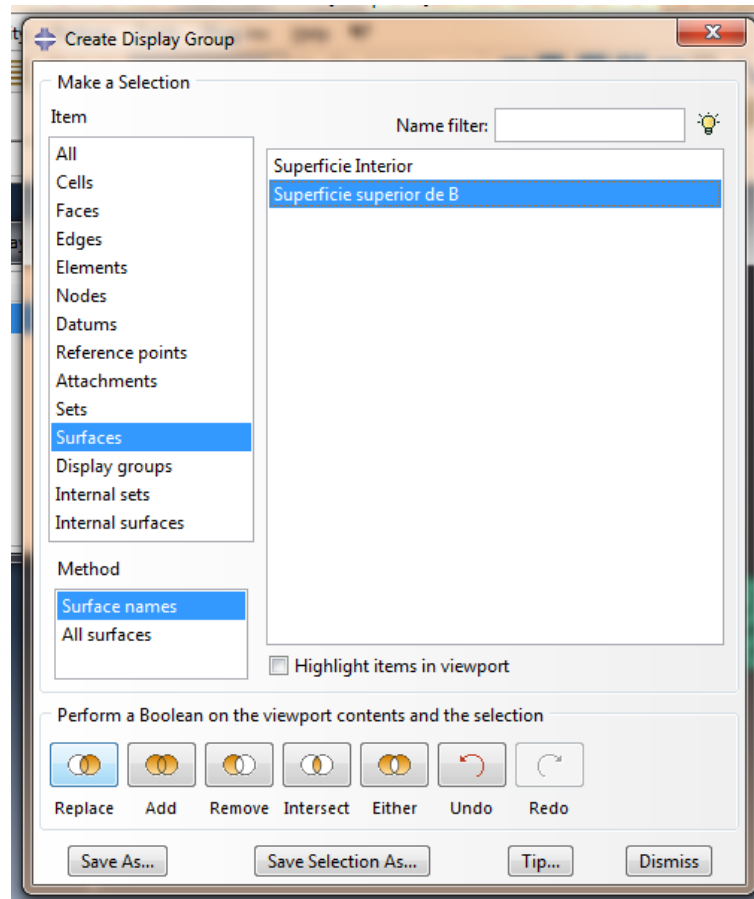


Figura A3.62: Seleccionar elementos híbridos.

Ahora se hace lo mismo con la “Skin”. Se aísla a la superficie cómo se ha hecho anteriormente con la función “**Display Group Manager**” (ver Figura A3.63).



**Figura A3.63:** Seleccionar la "Skin".

Después hay que seleccionar la superficie y hacer "click" en "**Done**". En la siguiente ventana especificar que la malla debe tener geometría cuadrática "**Quadratic**" (ver Figura A3.64).

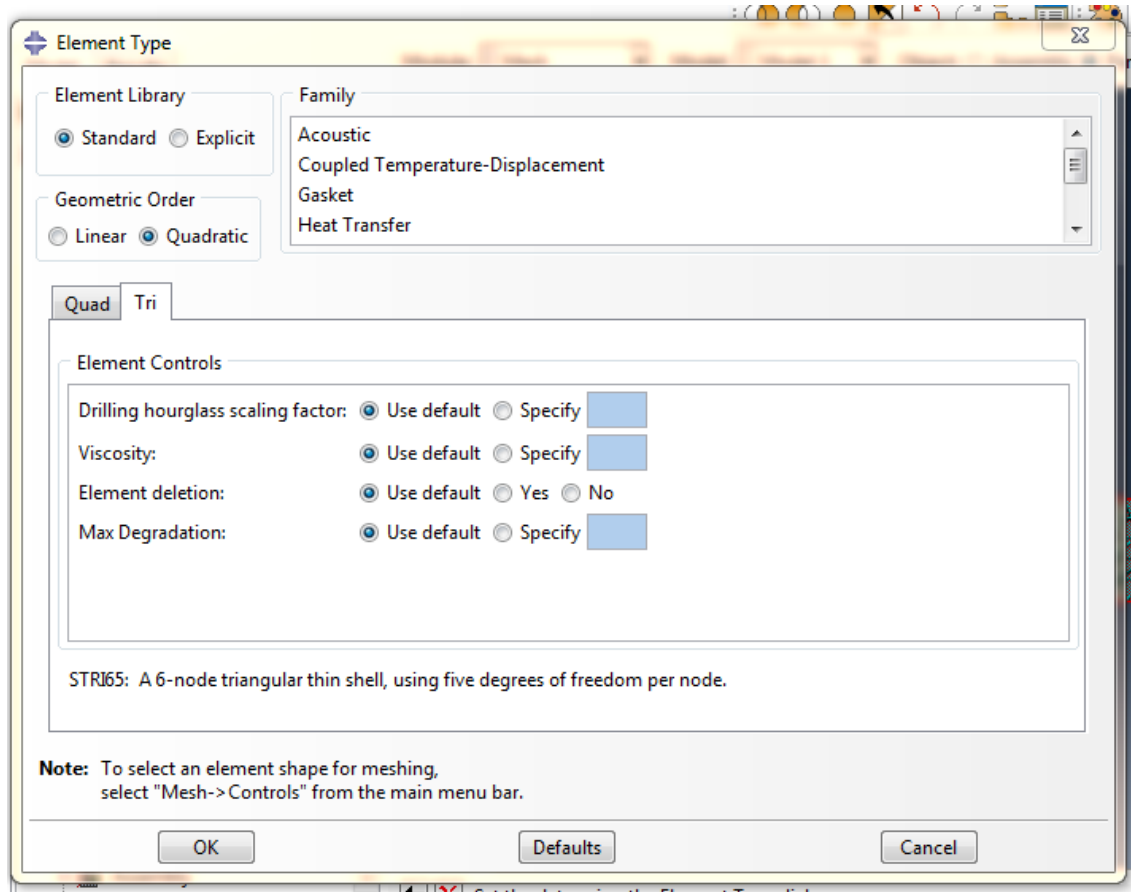


Figura A3.64: Seleccionar geometría cuadrática.

## 20. Crear un Job y ejecutarlo

Para crear un Job se hace doble “click” sobre “**Jobs**” y emerge la siguiente ventana (ver Figura A3.65):



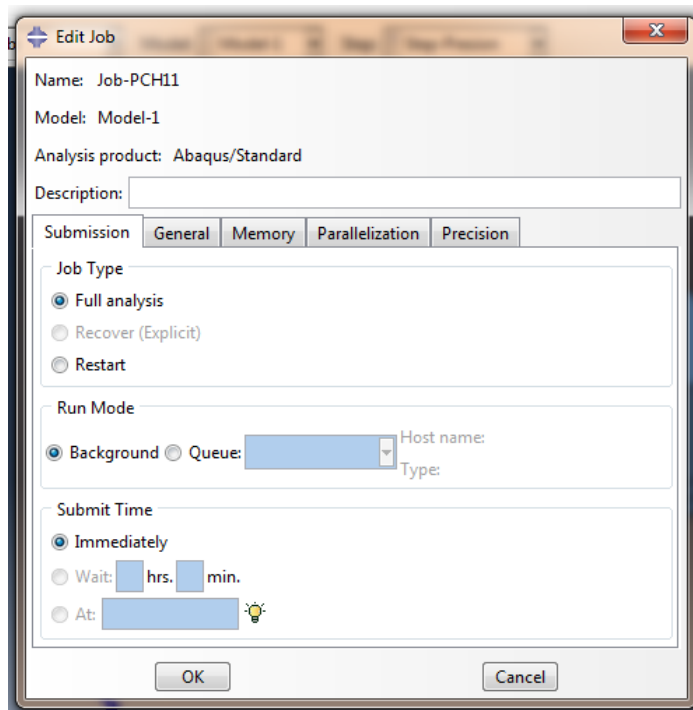


Figura A3.65: Crear "Job".

En la sub-ventana "Memory" se puede cambiar el porcentaje de uso de cada procesador (ver Figura A3.66).

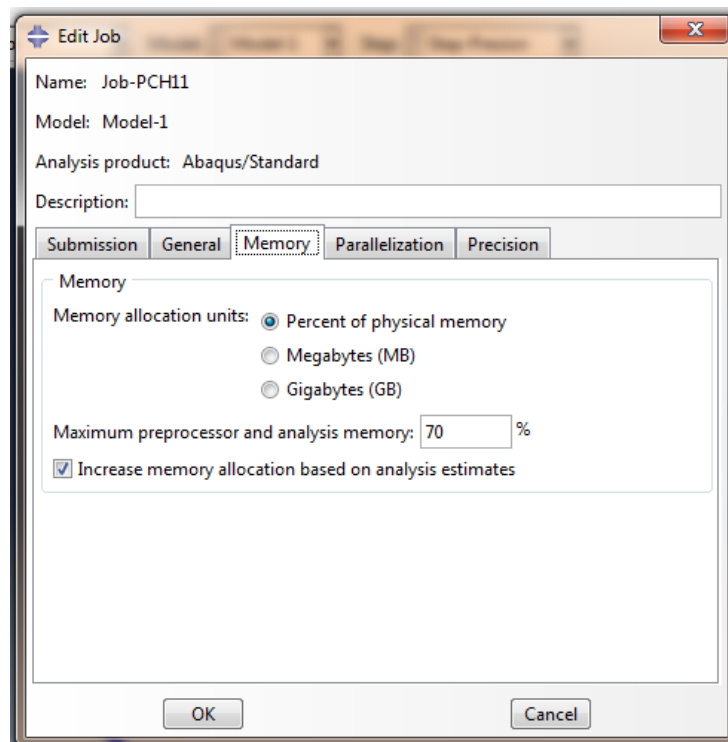


Figura A3.66: Cambiar el porcentaje de uso del procesador.

Y en la sub-ventana “Parallelization” se puede cambiar el número de procesadores que va a utilizar el ordenador para realizar los cálculos, en este caso el ordenador utilizado tiene cuatro procesadores (ver Figura A3.67).

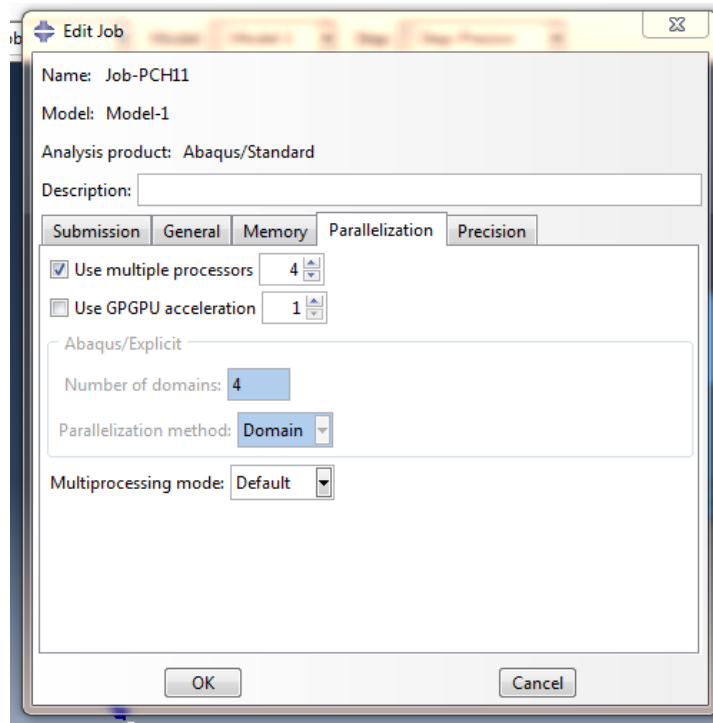


Figura A3.67: Usar múltiples procesadores.

Para que el ordenador empiece a realizar los cálculos del Job es necesario hacer “click” derecho sobre el Job y pulsar “Submit” (ver Figura A3.68).

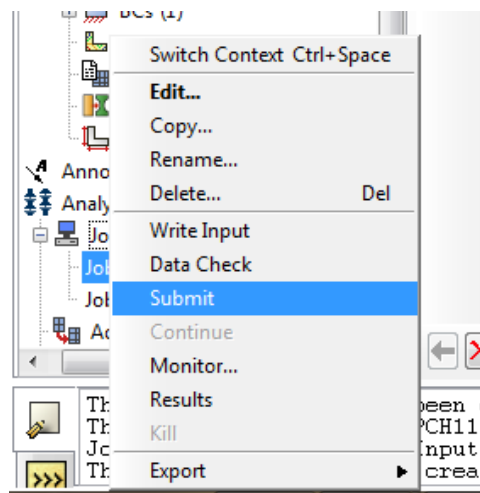


Figura A3.68: “Submit Job”.

Una vez que haya empezado a ejecutarse aparece al lado del nombre del “Job” en paréntesis “(Running)” que significa que el ordenador está realizando los cálculos necesarios (ver Figura A3.69).

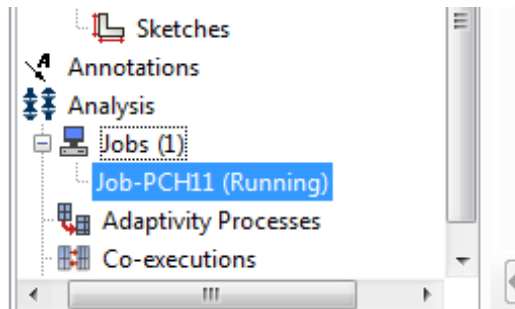


Figura A3.69: “Job” en ejecución.

Mientras el programa está corriendo podemos utilizar **“Monitor...”** para ver el porcentaje completado de los cálculos (ver Figura A3.70).

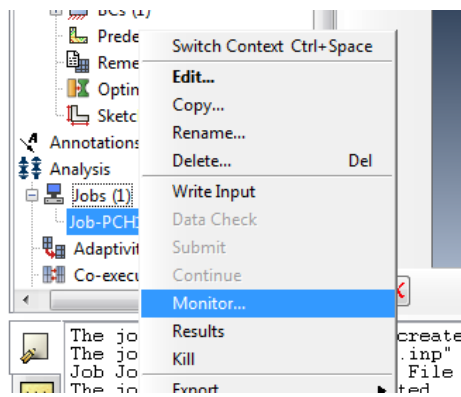


Figura A3.70: Utilizar “Monitor...”.

**“Step Time/LPF”** muestra el porcentaje de cálculos realizados de cada “Step”, en este caso hay dos, el de la carga gravitatoria y en el que se simula el aire a presión (ver Figura A3.71).

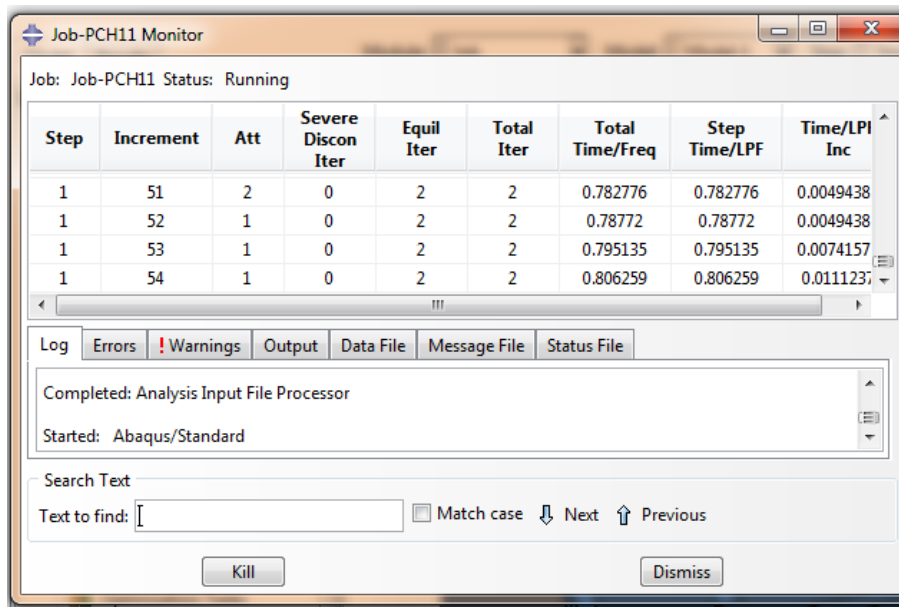


Figura A3.71: "Monitor...".

Cuando haya terminado y los resultados estén disponibles aparecerá **"(Completed)"**. Entonces podemos ver los resultados haciendo "click" derecho en el Job y seleccionando **"Results..."** (ver Figura A3.72).

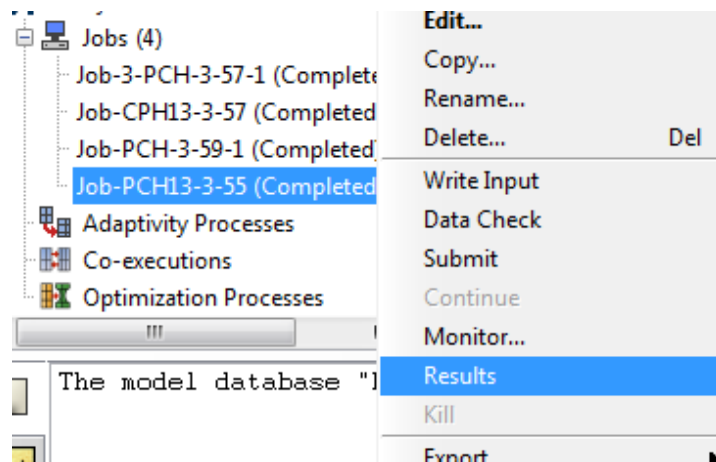
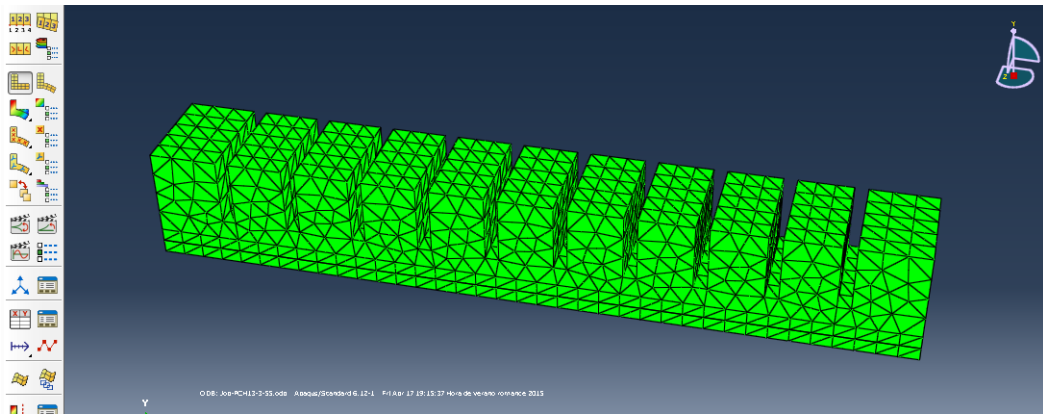


Figura A3.72: Ver resultados.

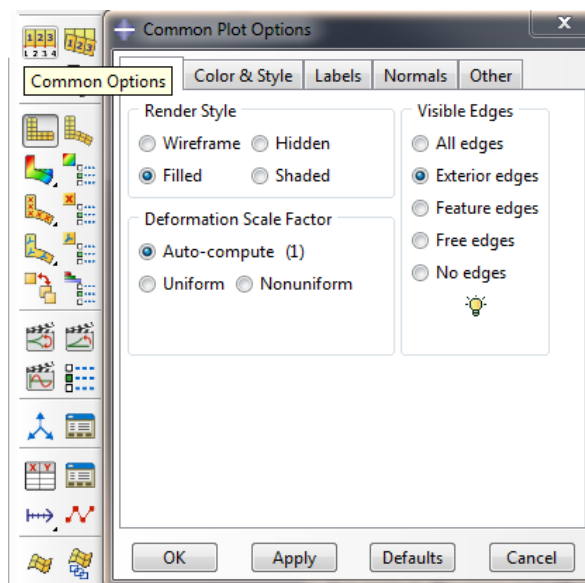
## 21.Ver resultados

Una vez el trabajo está completado el último paso es analizar los resultados (ver Figura A3.73).



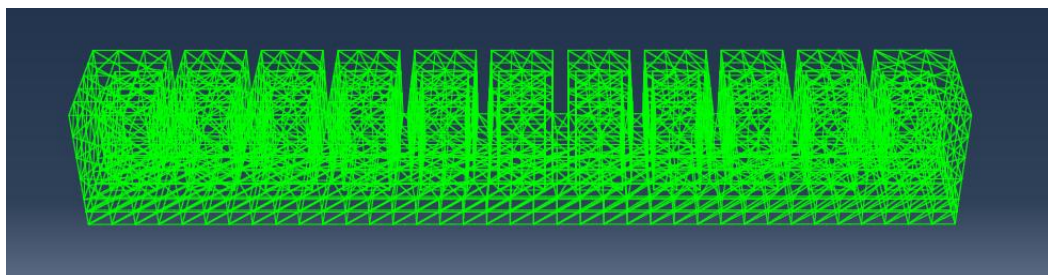
**Figura A3.73:** Ver resultados.

En primer lugar en el primer botón del menú, “**Common Options**” se puede editar la apariencia del modelo (ver Figura A3.74).



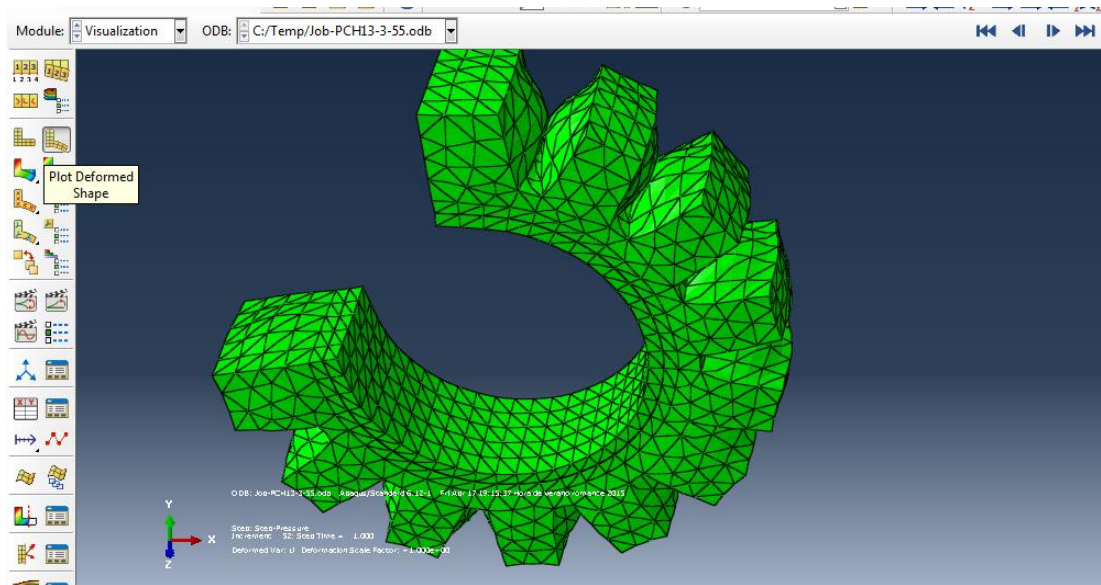
**Figura A3.74:** Editar la apariencia del modelo.

Por ejemplo así se vería si se escoge la opción “**Wireframe**” (ver Figura A3.75).



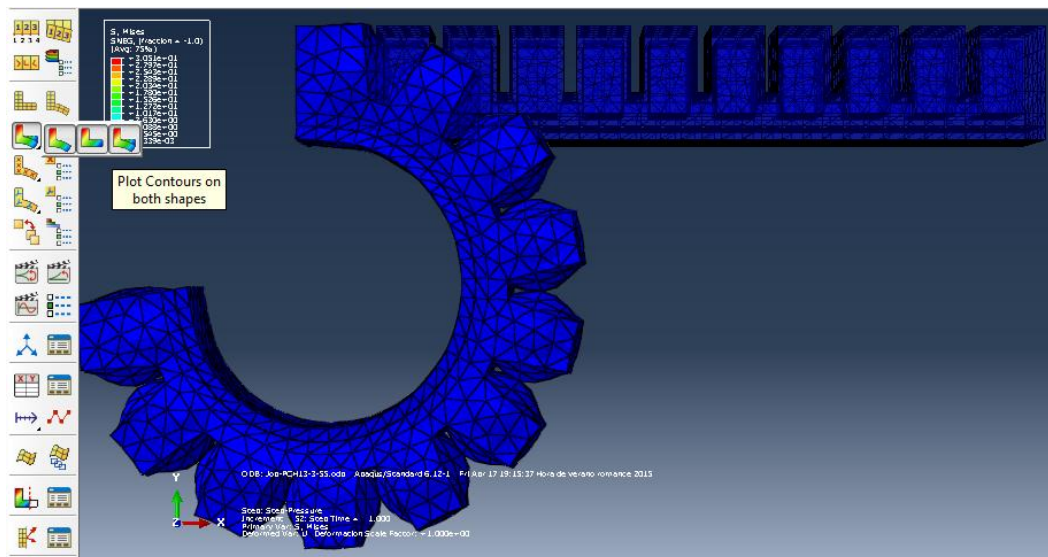
**Figura A3.75:** “Wireframe”

Para ver la pieza deformada hay que pulsar el botón **“Plot Deformed Shape”**. Para ver el movimiento realizado por la pieza en los dos “Steps” se pueden usar los botones que aparecen en el margen superior derecho de la imagen (ver Figura A3.76).



**Figura A3.76:** Pieza deformada.

Para ver el modelado de la pieza tanto cuando está sometida a las fuerzas cómo en su estado inicial y con una escala de colores relacionada con los resultados del análisis se debe elegir la opción **“Plot Colours on both shapes”** (ver Figura 77).



**Figura A3.77:** Ver los dos estados.

Para ver el código de colores en diferentes partes del actuador se puede cambiar la escala de colores en **“Contour Options”** (ver Figura A3.78).

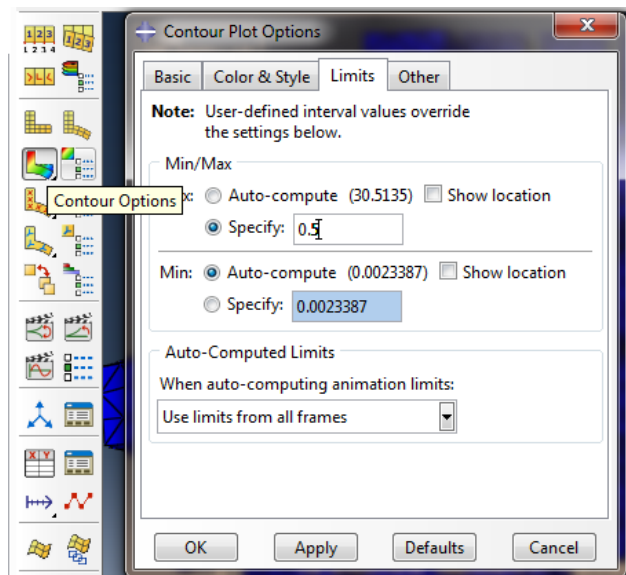


Figura A3.78: Cambiar la escala de colores.

Se cambia de la opción por defecto “**Auto-compute**” a “**Specify**” y se pone un valor de 0.5 para probar. El código de colores cambia en la pieza, en la referencia de la izquierda podemos ver a que valores de tensiones de Von Mises (S) corresponde cada color (ver Figuras A3.79 y A3.80).

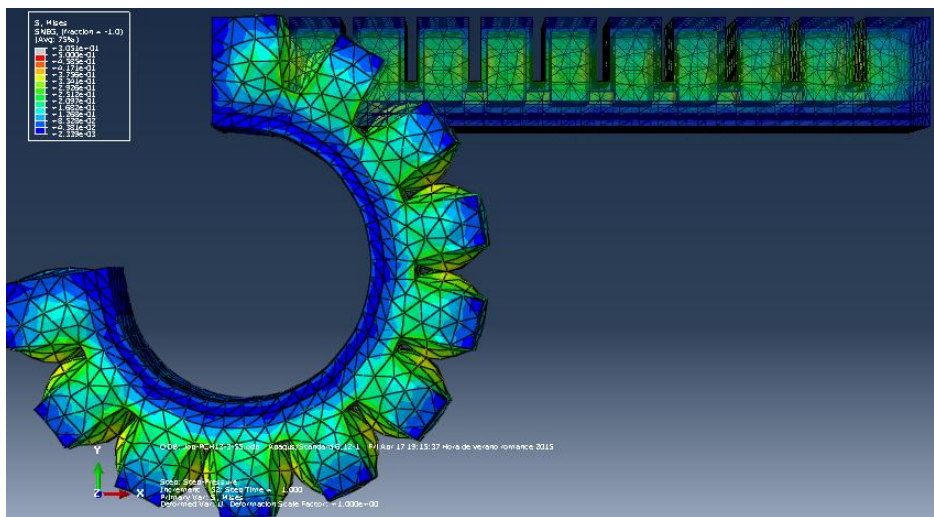


Figura A3.79: Pieza con código de colores cambiado.

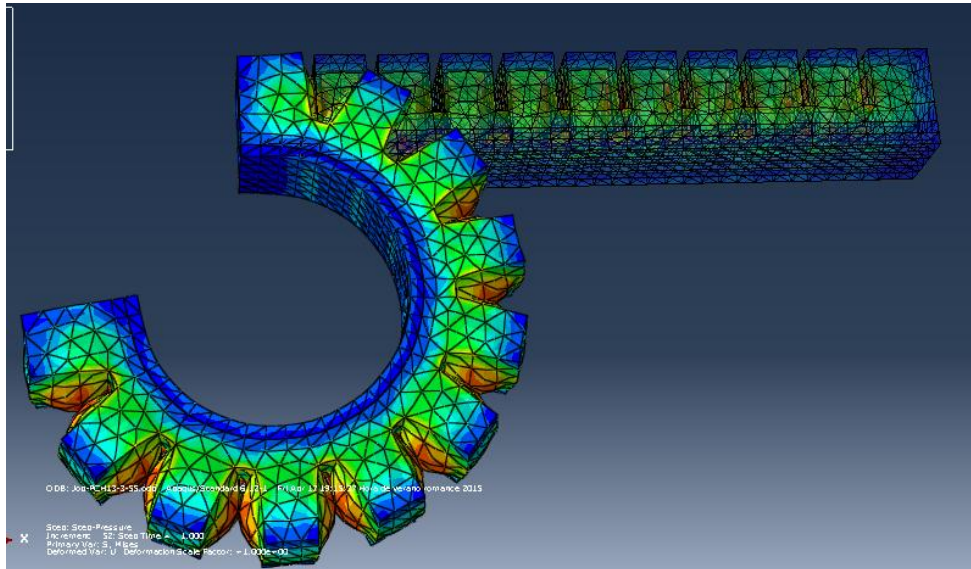


Figura A3.80: Código de colores cambiado.

También se puede ver el interior de la pieza utilizando la opción “View Cut Manager”, para ver el interior de la pieza (ver Figuras A3.81 y A3.82).

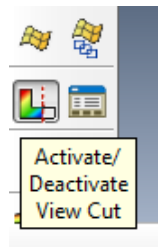


Figura A3.81: Ver interior de la pieza.

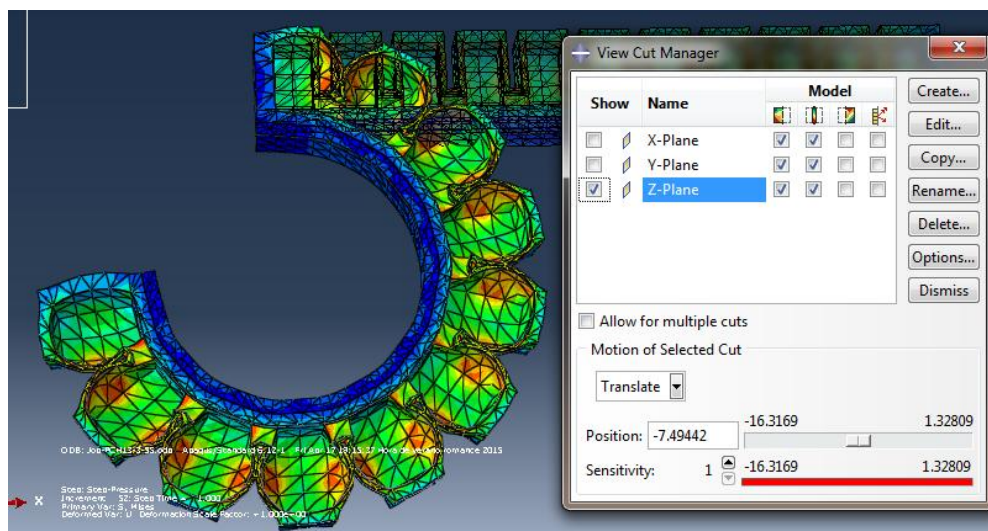


Figura A3.82: Ver corte.



# SIMULACIÓN DINÁMICA

---

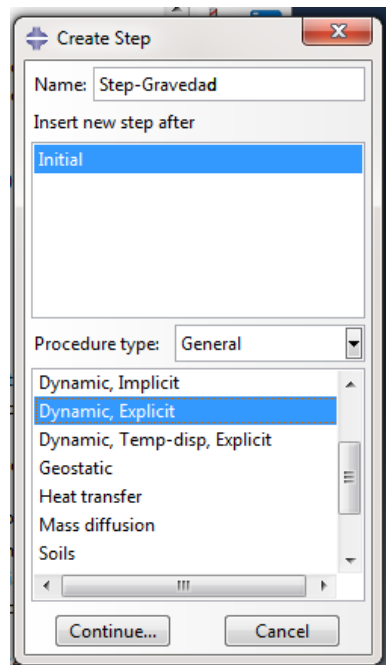
En determinados casos realizando una simulación estática la solución no converge, esto pasa a veces debido al contacto en las paredes. La solución para este problema es realizar una simulación dinámica en Abaqus.

Para realizar esta simulación dinámica en líneas generales sólo cambian los pasos al definir los “Steps” que se definen como **“Dynamic, Explicit”** y al definir el mallado.

**Definir “Steps” y Mallado:** Siguiendo los pasos anteriores, en la mayoría habría que realizar lo mismo pero desde el punto 12 al 16 en el caso de definir los “Steps”, y en los puntos 18 y 19 en el caso de definir el mallado habría que hacer diferentes operaciones explicadas a continuación.

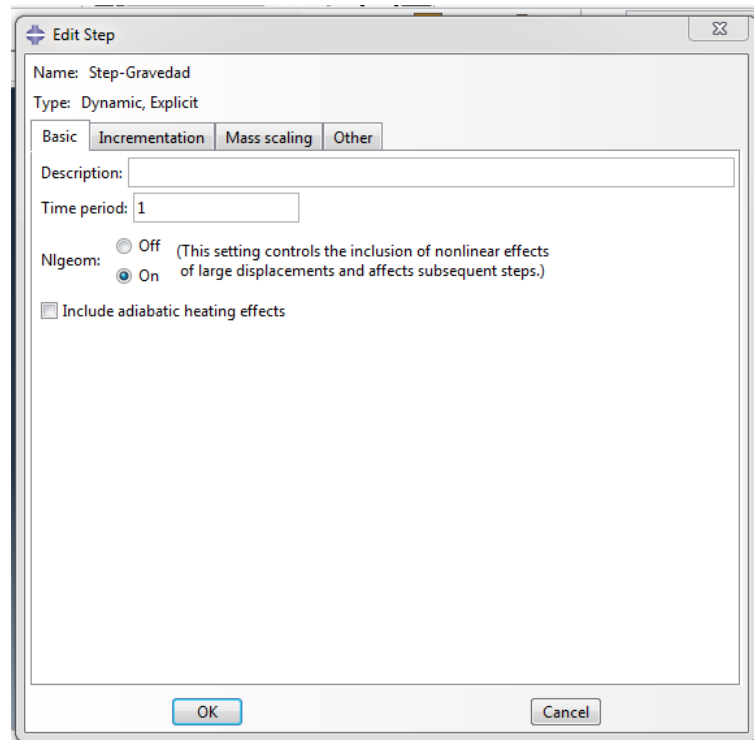
## 1. Crear Step-Gravedad

En el árbol de **“Model-1”** hay que hacer doble click en **“Steps”**, y creamos uno nuevo llamado **“Step-Gravedad”** del tipo **“Dynamic, Explicit”** (ver Figura A3.83).



**FiguraA3.83:** Crear “Step” dinámico.

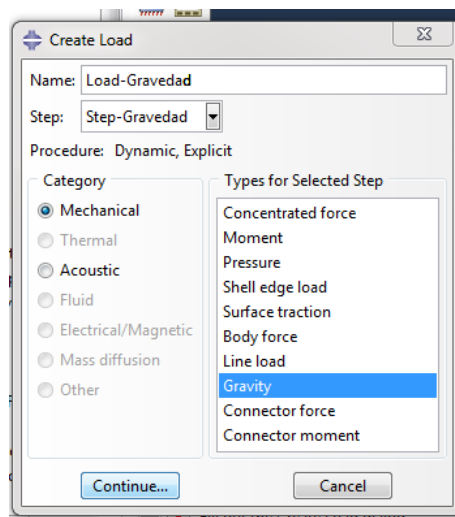
En la siguiente ventana activar la opción **“NLgeom”**, no linealidades geométricas (ver Figura A3.84).



**Figura A3.84:** Activar “Nlgeom”.

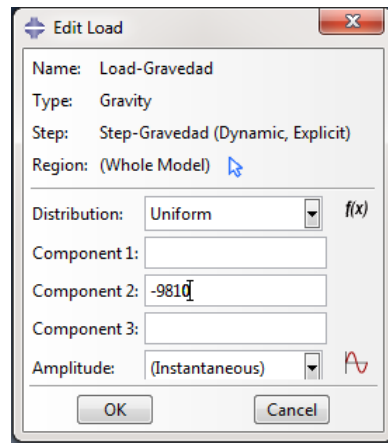
## 2. Crear la fuerza gravitatoria

En el “Step” creado, doble “click” en “Loads”. Se crea “Load-Gravedad” y se selecciona que la fuerza es de tipo gravitatoria (ver Figura 85).



**Figura A3.85:** Crear carga gravitatoria.

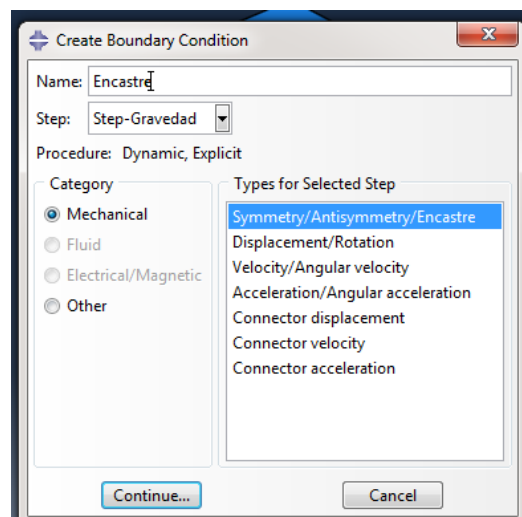
Y se selecciona el valor -9810 para el eje Y (ver Figura A3.86).



**Figura A3.86:** Especificar valor y dirección del campo gravitatorio.

### 3. Seleccionar las condiciones de contorno de la carga gravitatoria.

Es necesario hacer doble “click” en “BCs” y después nombrar la condición de contorno como “Encastre”. Se selecciona también “Symmetry/Antisymmetry/Encastre” (ver Figura A3.87).



**Figura A3.87:** Crear Encastre.

Y se selecciona la superficie donde se aplica la condición de contorno (ver Figura A3.88).

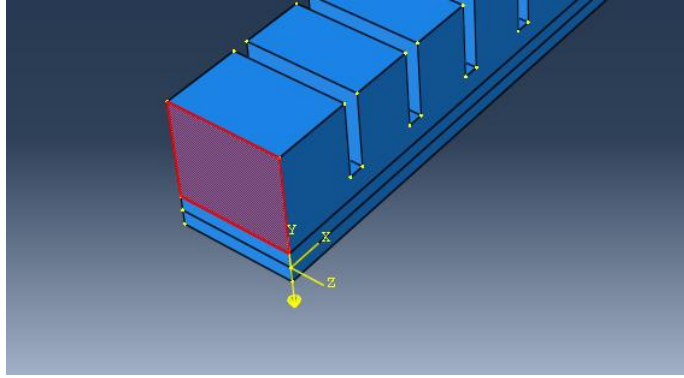


Figura A3.88: Seleccionar la superficie.

Al seleccionarla y hacer “click” en “Done” aparece una ventana emergente donde hay que seleccionar que la condición de contorno es un “ENCASTRE” (ver Figura A3.89).

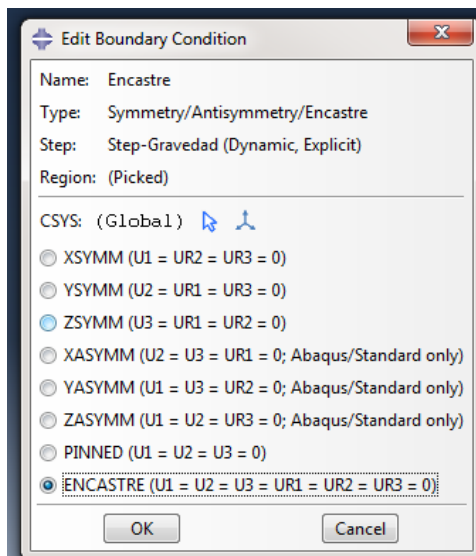


Figura A3.89: Seleccionar “ENCASTRE”.

#### 4. Crear “Step-Prision”

Hay que hacer doble “click” en “Steps” para crear un nuevo Step estático llamado “Step-Prision” (ver figura A3.90).

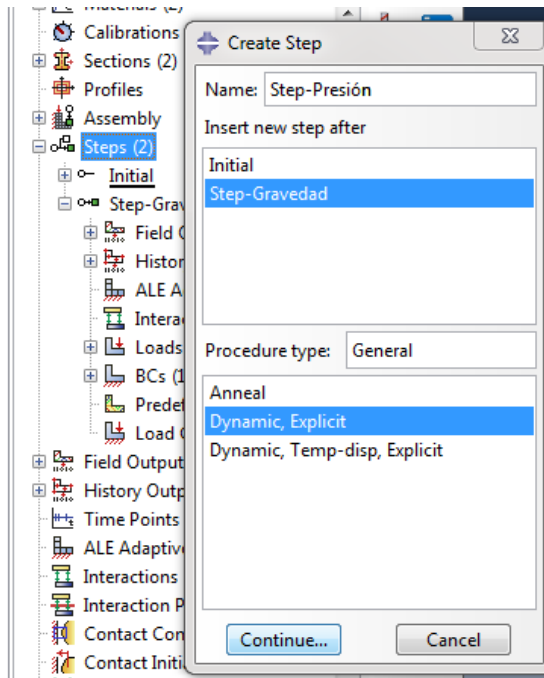


Figura A3.90: Crear “Step” dinámico donde se aplica la presión interna.

En la siguiente ventana se hace “click” en “Ok” y ya está creado el “Step” (ver Figura 91).

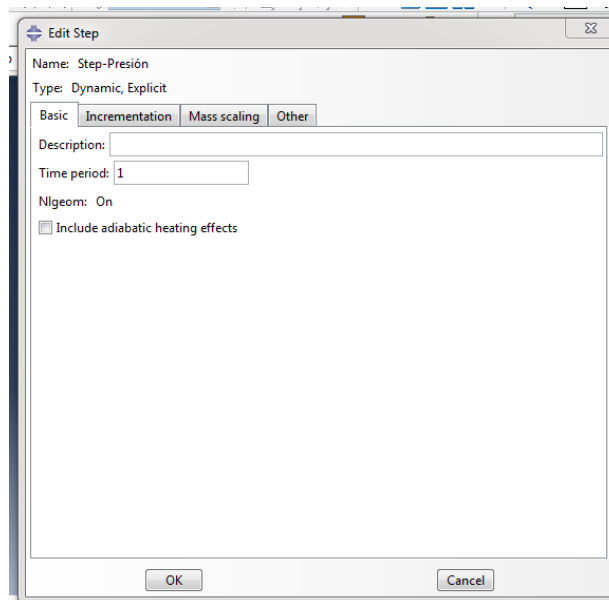


Figura A3.91: Ver que las no linealidades geométricas “Nlgeom” se encuentran activadas.

## 5. Crear presión interna

Dentro del “**Step-Presion**” se crea una carga haciendo doble “click” en “**Loads**”, y especificando que la carga es una presión seleccionando “**Pressure**”.

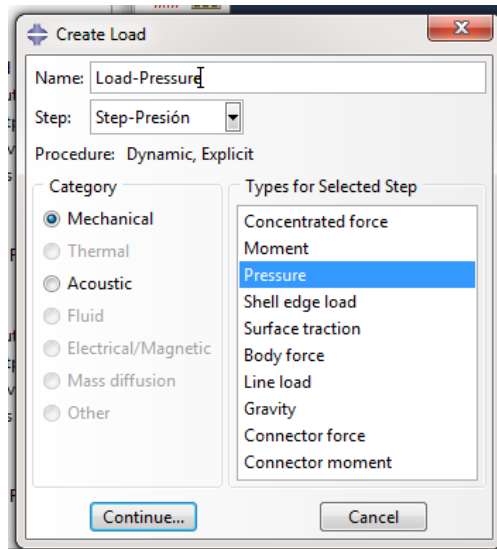


Figura A3.92: Crear presión.

Para seleccionar la superficie interna hay que hacer “click” en “Surfaces” y seleccionar “Superficie interior” (ver Figuras A3.93 y A3.94).

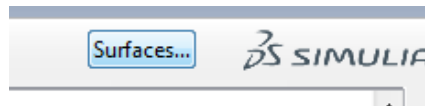


Figura A3.93: Seleccionar la superficie.

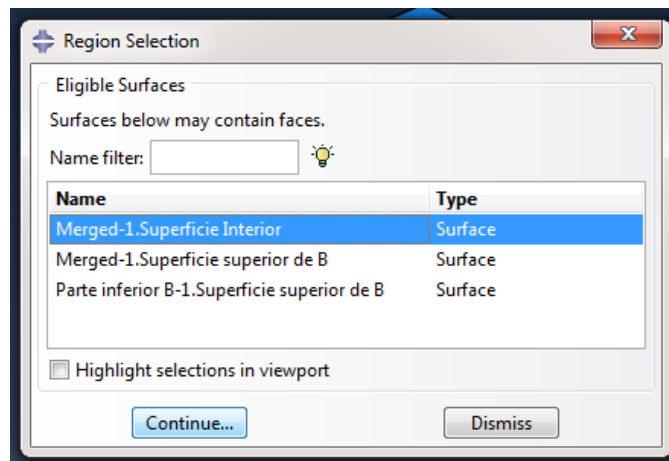


Figura A3.94: Seleccionar “Superficie Interior”

Se escribe el valor de la presión interior 0.055 MPa. En diferentes “Jobs” se puede probar posteriormente con otros valores para la presión (ver Figura A3.95).

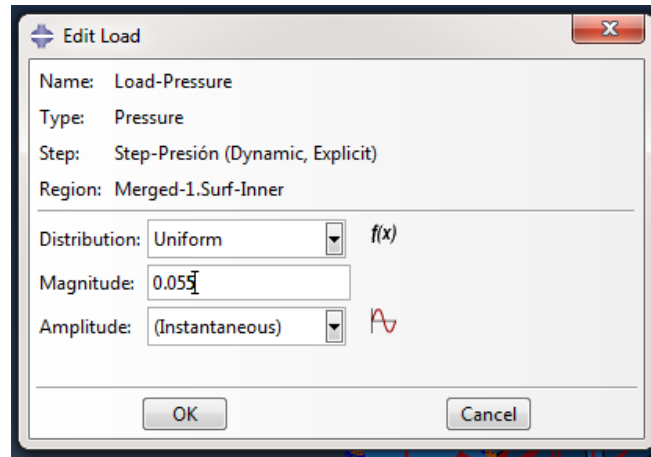


Figura A3.95: Especificar el valor de la presión.

Y en el caso del mallado hay que realizar estos dos puntos en vez de los 18 y 19 que están explicados para el análisis estático.

## 6. Crear Mallado

Para crear el mallado se abre el árbol de **“Merged”**, y hay que hacer doble click en **“Mesh”**. Posteriormente se hace doble “click” en **“Assign Mesh Controls”** se seleccionan las tres diferentes partes que lo componen, después se hace “click” en **“Done”** y se configura la ventana emergente de la siguiente forma (ver Figura A3.96).

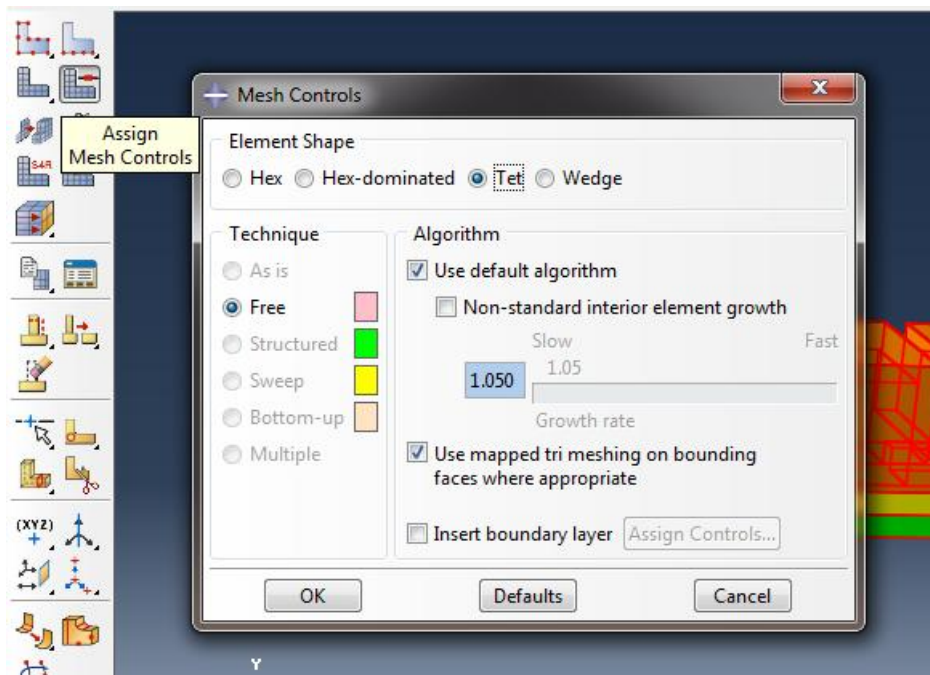


Figura A3.96: Especificar que la malla es tetraédrica.

Posteriormente se hace doble “click” en **“Seed Part”** para establecer las semillas de la malla que se va a crear posteriormente. Se rellena la ventana emergente de la siguiente

forma. El tamaño de la malla tiene que estar ajustado dependiendo del tipo de problema. Si es muy grande no se ajustará bien con las caras de la pieza y si es muy pequeña puede hacer a la pieza demasiado rígida (ver Figura A3.97).

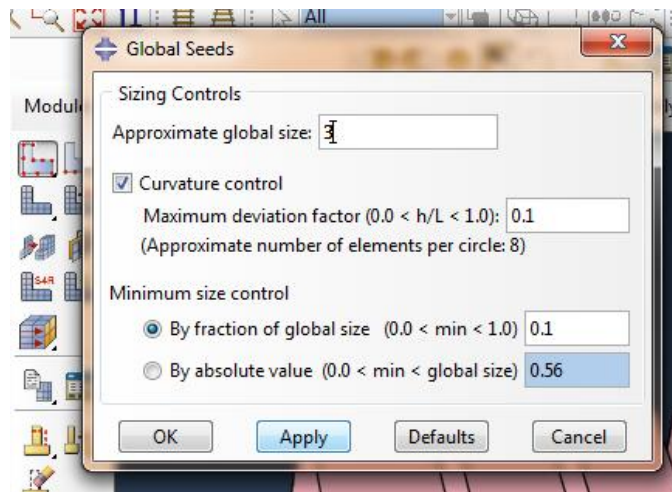


Figura A3.97: Seleccionar tamaño de la malla.

Por último se malla la pieza haciendo doble “click” en “**Mesh part**” (ver Figura A3.98).

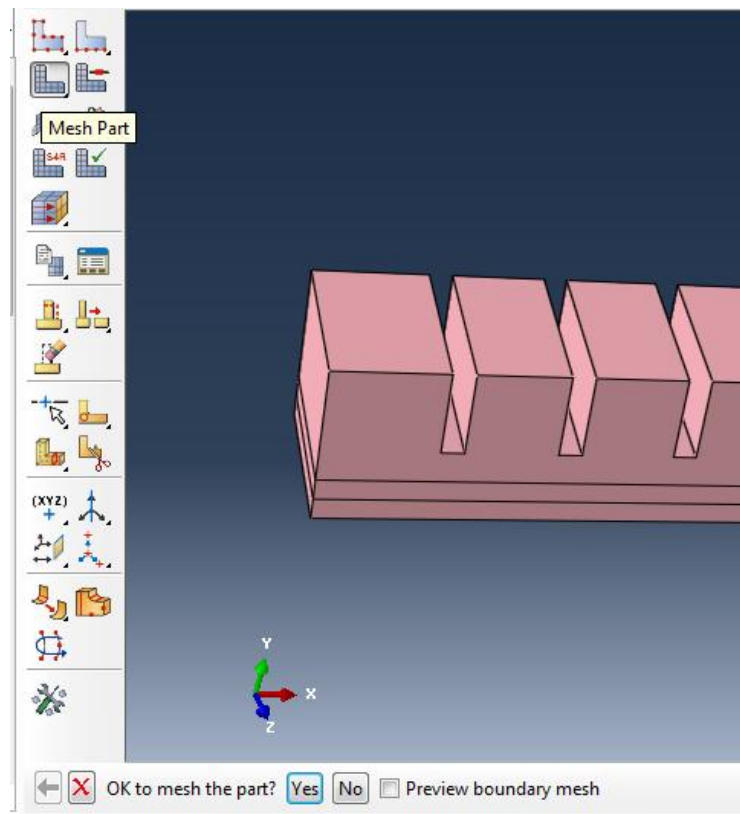
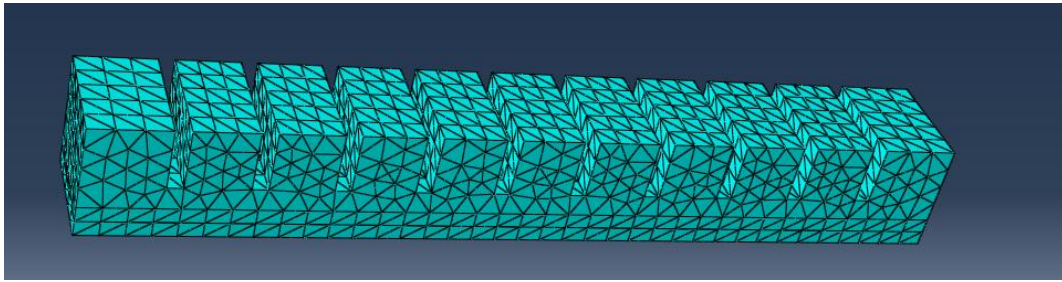


Figura A3.98: Mallas la pieza.



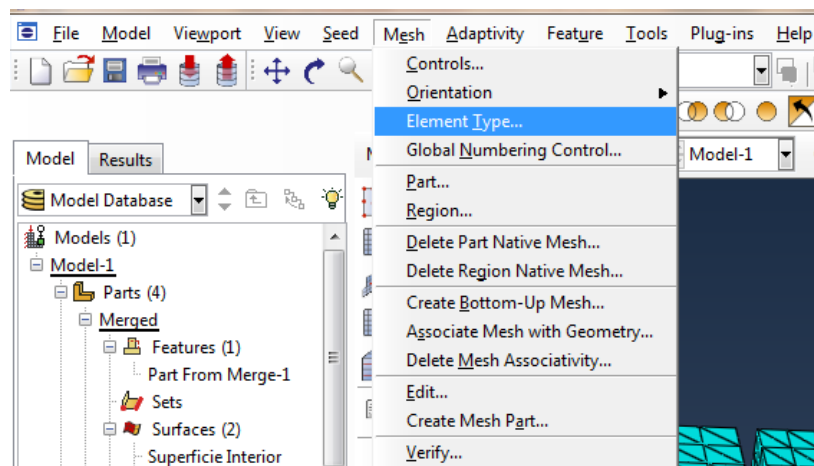
Después de pulsar **“Yes”** la pieza queda mallada de la siguiente forma (ver Figura A3.99).



**Figura A3.99:** Pieza mallada.

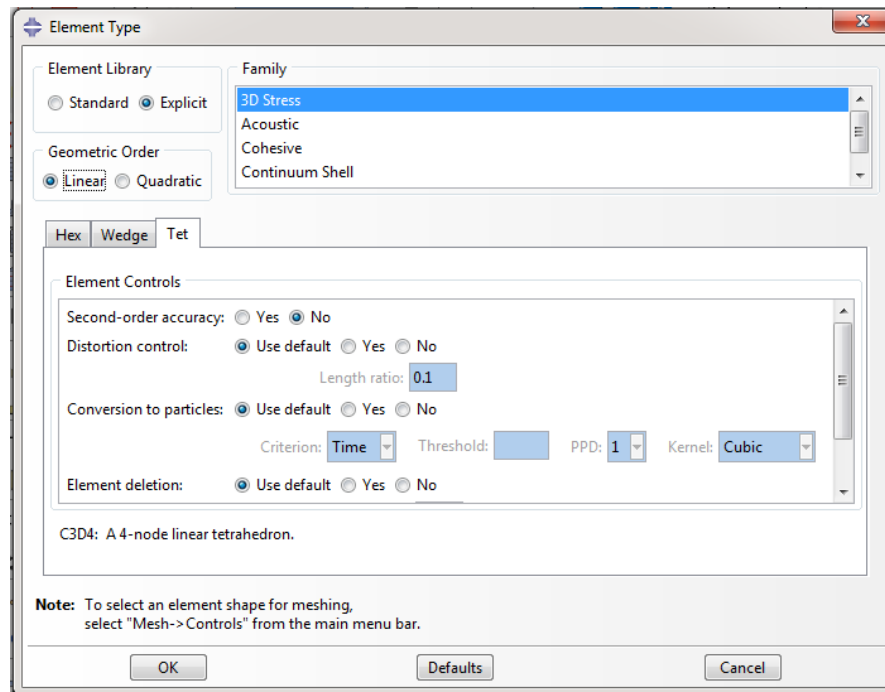
## 7. Seleccionar el tipo de mallado

Hay que hacer **“click”** en el menú de arriba en **“Mesh”** después seleccionar **“Element Type...”** (ver Figura A3.100).



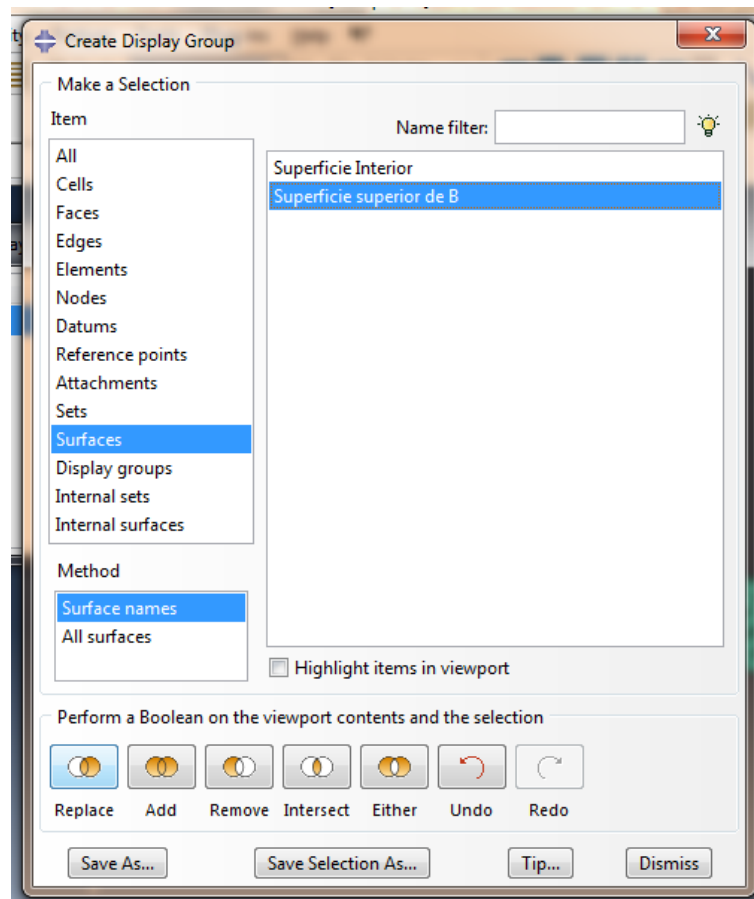
**Figura A3.100:** Seleccionar el tipo de elemento de la malla.

Se seleccionan las tres partes y se hace **“click”** en **“Done”** (ver Figura A3.101).



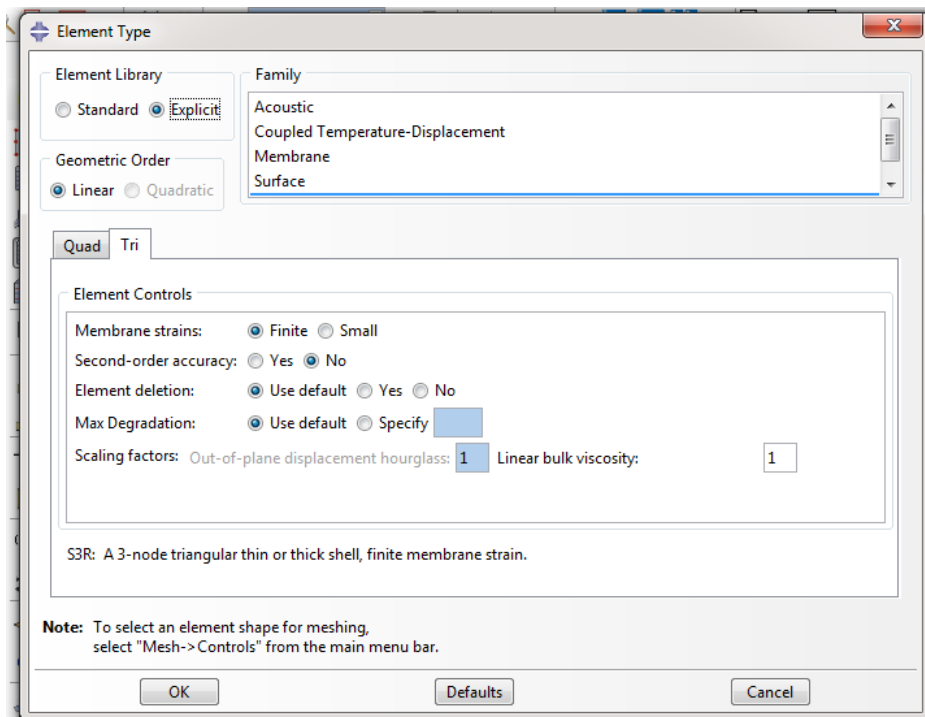
**Figura A3.101:** Seleccionar el siguiente cuadro de esta forma.

Ahora se hace lo mismo con la “Skin”. Se aísla a la superficie cómo se ha hecho anteriormente con la función “**Display Group Manager**” (ver Figura A3.102).



**Figura A3.102:** Seleccionar la Superficie de la lámina.

Después hay que seleccionar la superficie y hacer “click” en “**Done**”. En la siguiente ventana especificar que la malla debe tener geometría cuadrada (ver Figura A3.103).



**Figura A3.103:** Seleccionar los controles del tipo de elemento de la siguiente forma.

#### IV. Anexo 4: Ver desplazamiento en X e Y del punto más lejano.

Para obtener el desplazamiento teórico obtenido en el modelado, que se produce en el extremo del actuador, se puede utilizar el archivo de resultados .odb en el que visualizamos los resultados del proyecto. En primer lugar se selecciona **“Tools”**, **“XY Data”** y **“Manager...”** (ver Figura A4.1).

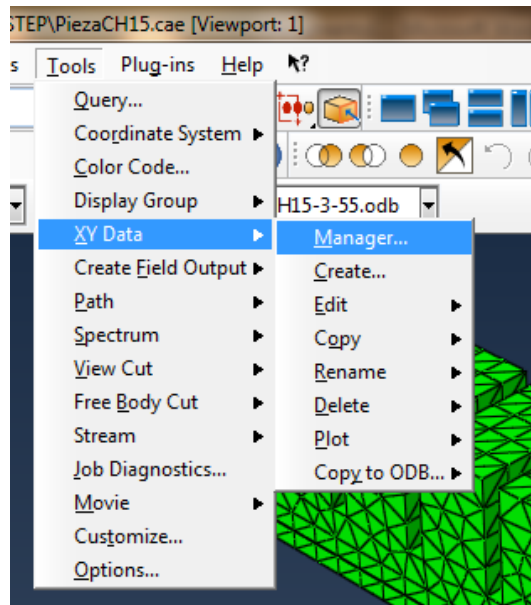


Figura A4.1: Abrir “XY Data Manager”.

Se abre la siguiente ventana, donde hay que seleccionar que seleccionar **“Create...”** y después en la siguiente que aparece en la fuente se selecciona **“ODB field output”** (ver Figuras A4.2 y A4.3).

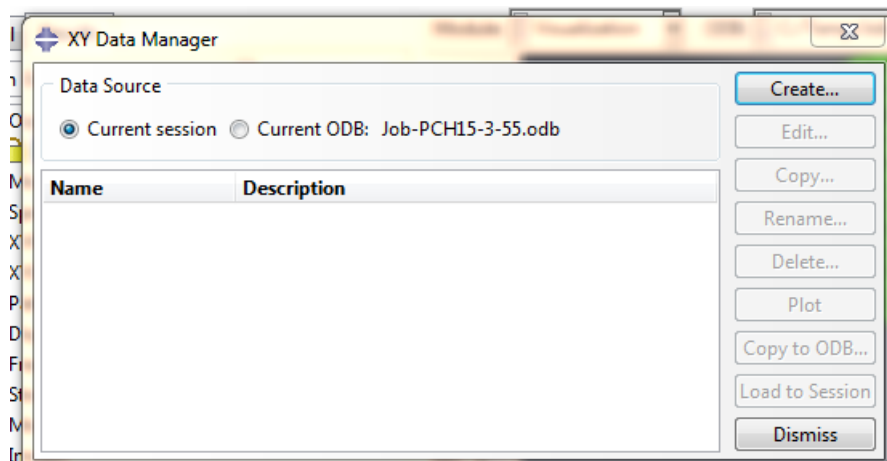


Figura A4.2: Crear datos.

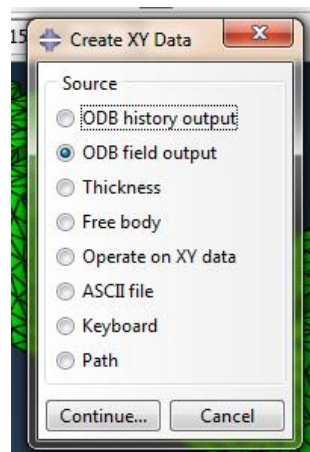


Figura A4.3: Seleccionar “ODB field output”.

Aparece la siguiente ventana “**XY data from ODB Field Output**”, seleccionamos Position: “**Unique Nodal**” y la variable que queremos obtener que es “**U**” se selecciona en el cuadro de abajo (ver Figura A4.4).

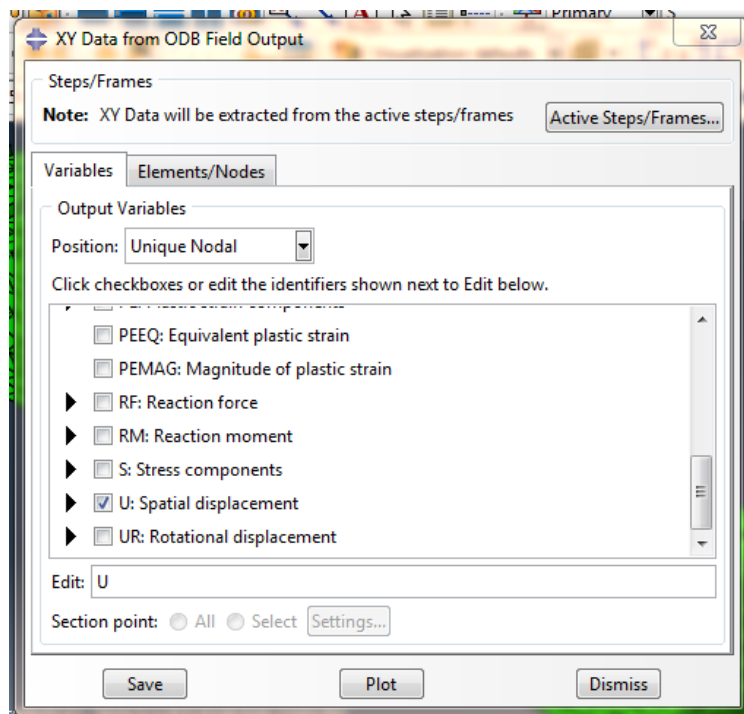
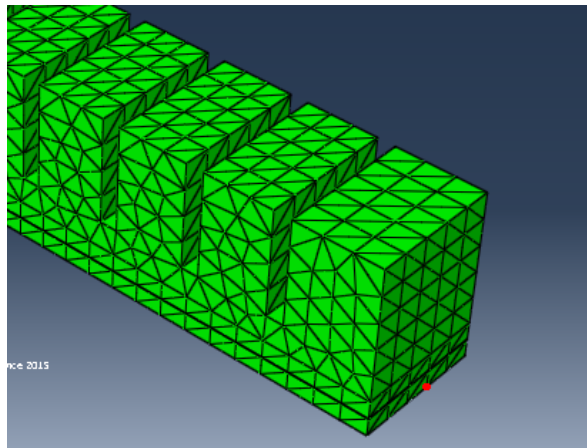


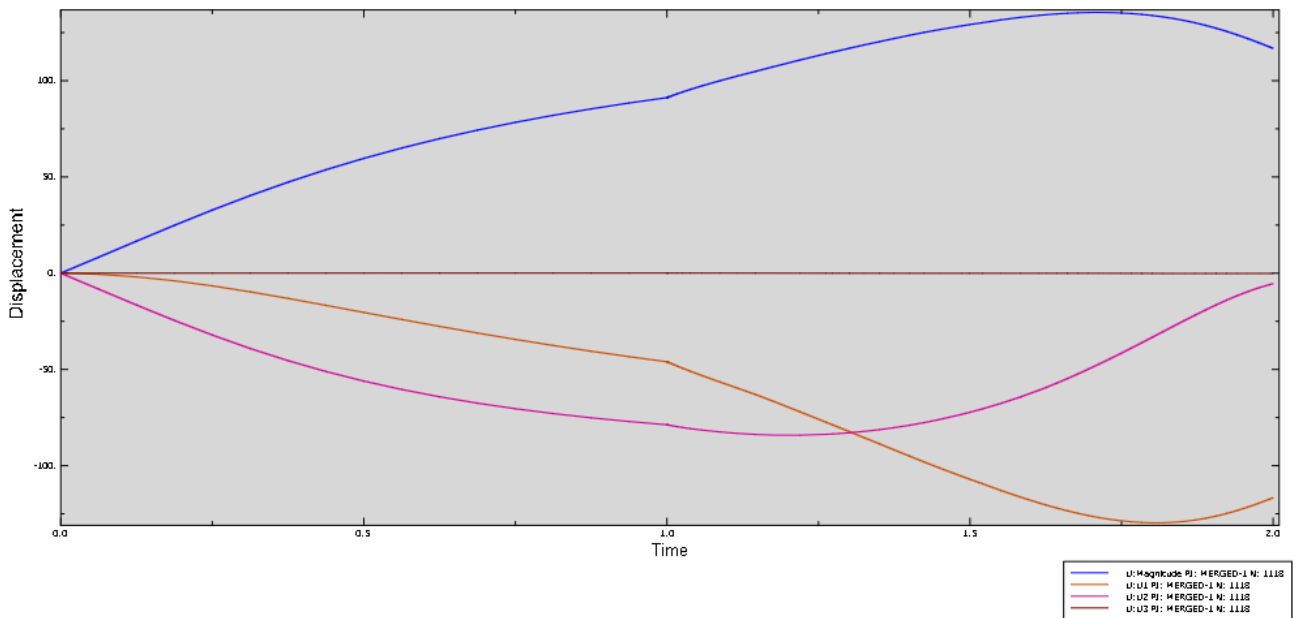
Figura A4.4: Seleccionar el desplazamiento (U).

Después en la pestaña “**Element/Nodes**”, se selecciona el método “**Pick from Viewport**” y después desde “**Edit Section**” podemos seleccionar el punto de la malla donde queremos medir el desplazamiento que será uno del extremo del actuador donde no está empotrado (ver Figura A4.5).

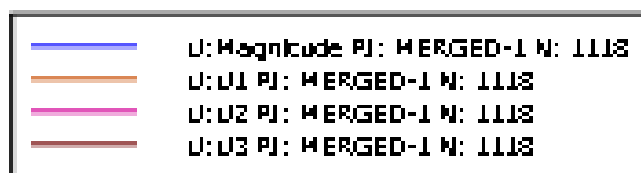


**Figura A4.5:** Seleccionar nodo.

Después de seleccionar el nodo se hace click en **“Plot”** para obtener el gráfico del movimiento (ver Figuras A4.6 y A4.7).



**Figura A4.6:** Desplazamiento (U) del nodo.



**Figura A4.7:** Código de colores.

En este caso hay creado un “Step” de gravedad y un “Step” con la presión aplicada. En la primera parte se aprecia el movimiento producido por la gravedad y posteriormente por la presión aplicada.

U1 se refiere al movimiento en el eje X, U2 al movimiento en el eje Y y U3 al movimiento en el eje Z. U es el módulo del movimiento (ver Figura 7).

Cómo se puede observar el movimiento en el eje Z se mantiene igual a 0, mientras que el movimiento en X crece negativamente porque el actuador se retrae al aplicarle la presión. Por último en el eje Y el actuador al principio tiene un desplazamiento negativo cuando se empieza a enrollar pero en la segunda parte del gráfico recupera el desplazamiento negativo hasta que casi llega la altura del punto de partida.

Si el análisis realizado es dinámico y teniendo en cuenta sólo la presión, despreciando la gravedad en el problema, la gráfica que obtendríamos sería la siguiente y sólo serviría para fijarnos en los valores máximos y mínimos (ver Figuras A4.8 y A4.9).

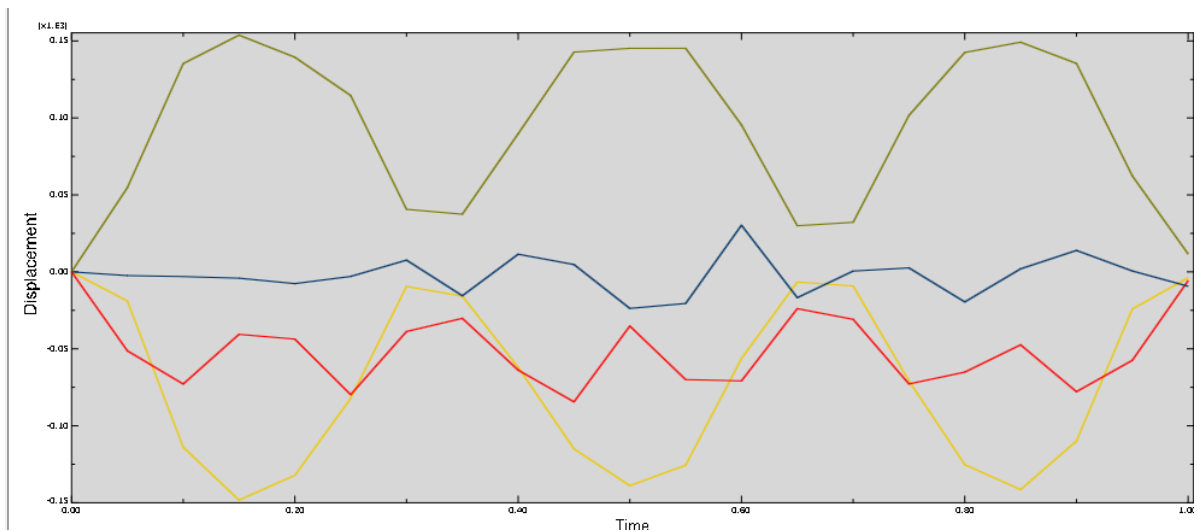


Figura A4.8: Desplazamiento (U) del nodo.

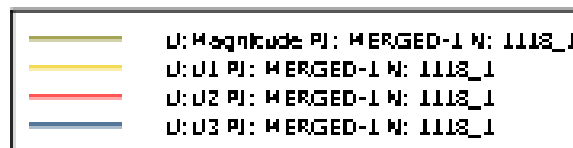


Figura A4.9: Código de colores.



## V. Anexo 5: Análisis FEM de la fuerza que ejerce el actuador.

El primer paso es abrir el mismo archivo con el que se ha realizado la primera simulación, y realizar unos cambios para poder realizar el análisis de la fuerza ejercida por el extremo. Para poder obtener la fuerza realizada hay que limitar el movimiento al actuador con un contacto y medir la fuerza producida en el mismo.

### 1. Crear una nueva “Part” para simular el contacto

Hay que hacer doble “click” en “Parts”, y crear un bloque de dimensiones (30x30x15mm). En la ventana emergente se deja todo por defecto (ver Figura A5.1).

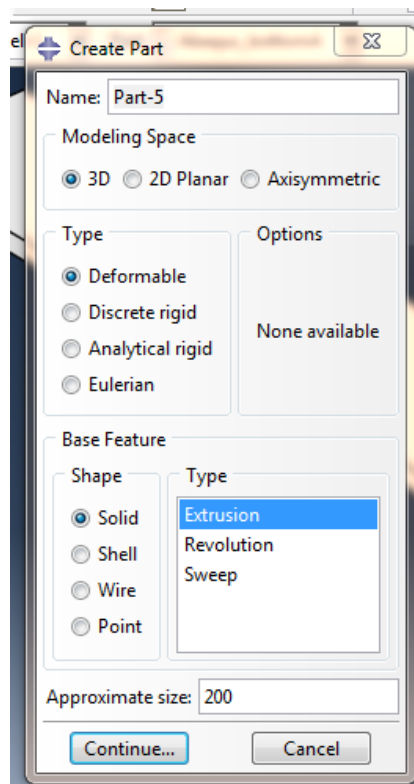


Figura A5.1: Crear bloque para el contacto.

Con la herramienta “**Create Lines: Rectangle**” situada en el menú de la izquierda de la pantalla se dibuja un rectángulo de dimensiones 30x15 (ver Figura A5.2).

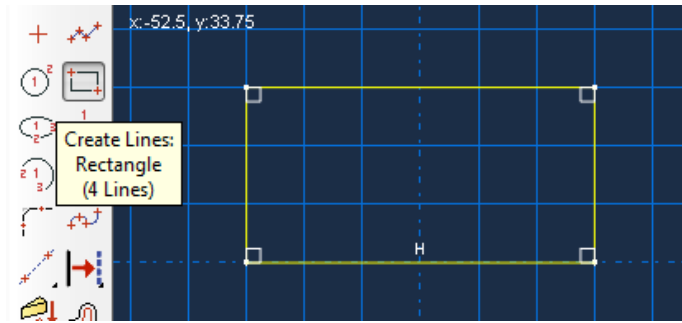


Figura A5.2: Crear rectángulo (30x15mm).

Después de seleccionar **“Done”** aparecerá la siguiente ventana donde se debe especificar una profundidad de 30mm (ver Figura A5.3).

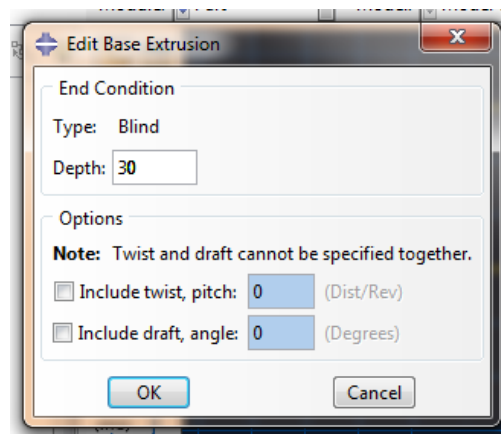


Figura A5.3: Extruir en bloque.

## 2. Asignar sección

Cómo el ya hay definida una sección sólida homogénea de Elastosil, se le asigna a la nueva parte. No importa el material creado, importa que se produzca un contacto y poder medir así la fuerza de contacto.

Se selecciona en el menú desplegable de la Part, **“Section Assignments”**, se selecciona la nueva **“Part”** y se hace **“click”** en **“Done”** donde aparece la siguiente ventana emergente donde se selecciona la sección **“Sec-Elastosil”** (ver Figura A5.4).

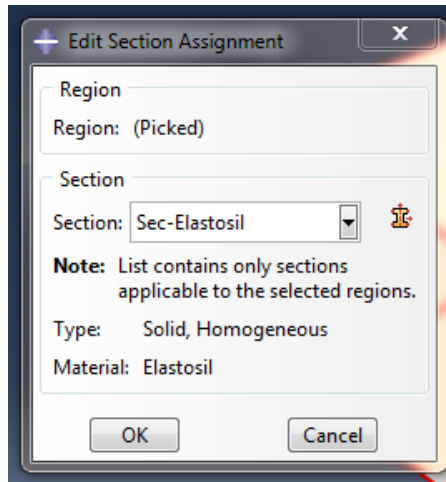


Figura A5.4: Asignar sección.

### 3. "Assembly".

Se añade la nueva "Part" al "Assembly" y se coloca con la herramienta "Create Constraint: Face to Face" que permite ajustar caras paralelas y utilizada anteriormente para crear el actuador con las diferentes "Parts". La posición de un cuerpo respecto a otro debe ser aproximadamente cómo se muestra en la siguientes imágenes, con unos 2mm de separación entre partes en la zona del contacto (ver Figuras A5.5, A5.6 y A5.7).

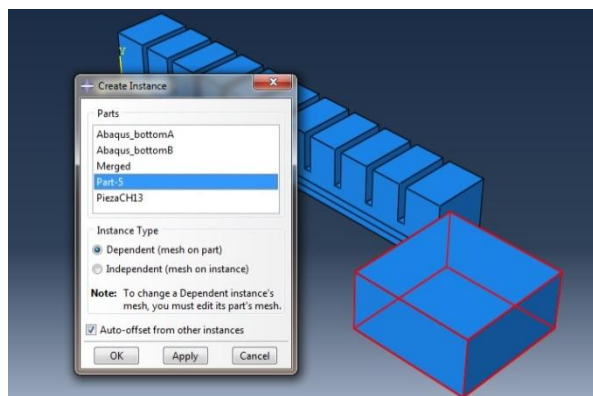
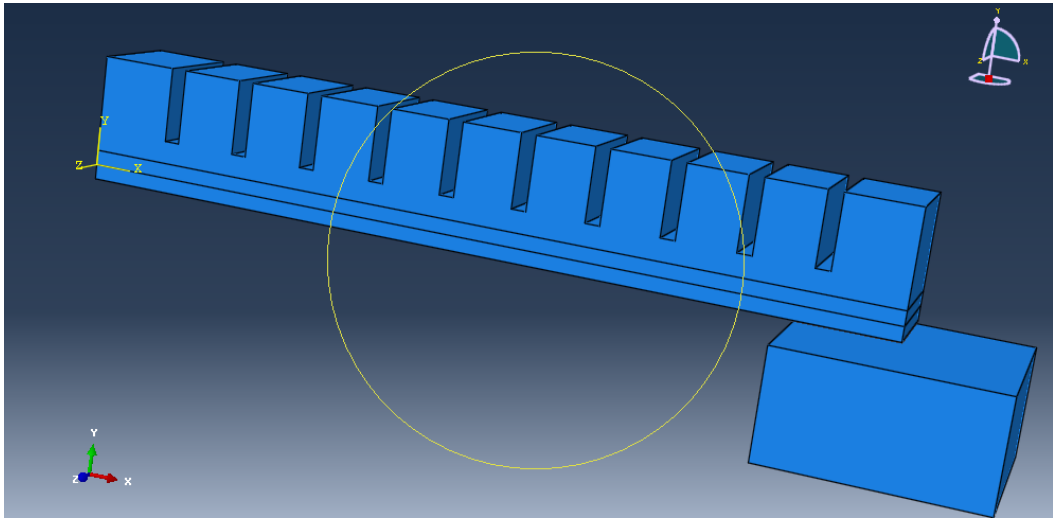
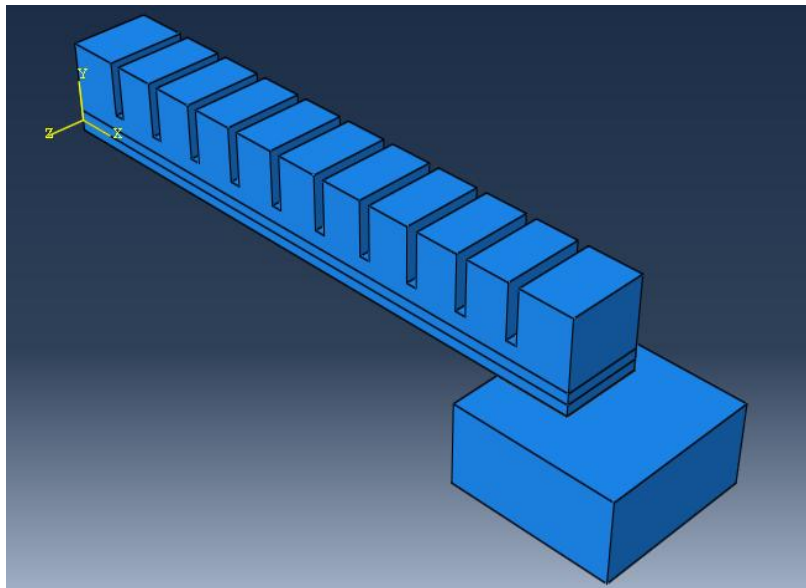


Figura A5.5: Colocar la nueva pieza para el contacto.



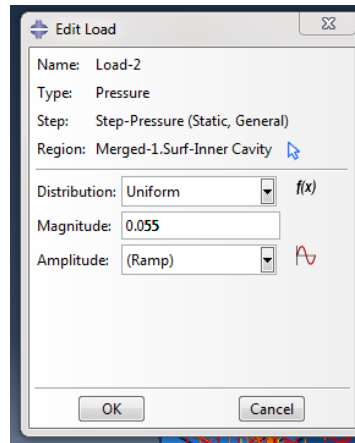
**Figura A5.6:** Colocación final.



**Figura A5.7:** Colocación final.

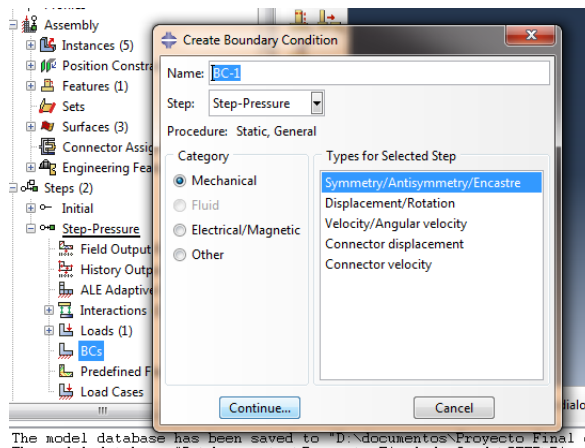
#### **4. Borrar el “Step” asociado a la gravedad.**

En esta simulación queremos ver la fuerza que ejerce el modelo debido sólo a la presión por lo que se debe eliminar el “Step” donde se aplica esta carga, y definir las condiciones de contorno en el “Step” asociado a la aplicación de presión en la cámara interior. Hay que asegurarse de que el valor de la presión interior es 55KPa (ver Figura A5.8).



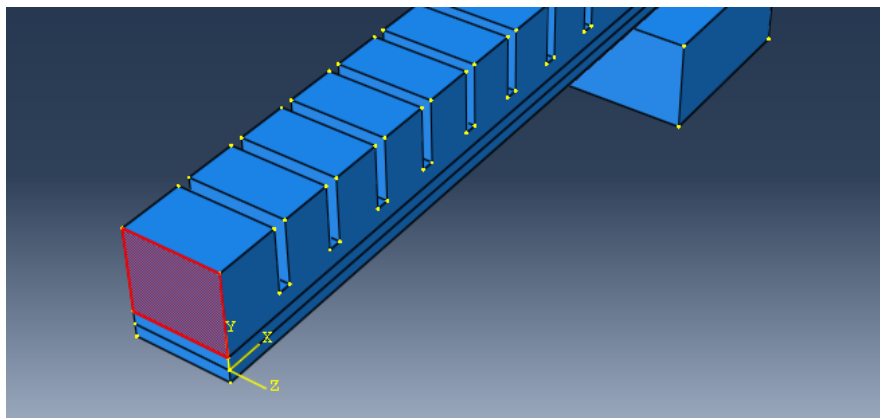
**Figura A5.8:** Se especifica la presión.

Se definen dos encastres para fijar cada pieza, el primero es cómo el que había en el Step asociado a la gravedad (ver Figura A5.9).



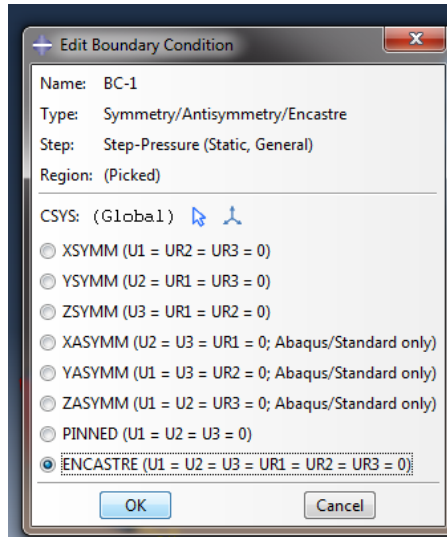
**Figura A5.92:** Crear condición de contorno.

Y se selecciona la superficie a la que se le aplica la condición de contorno (ver Figura A5.10):



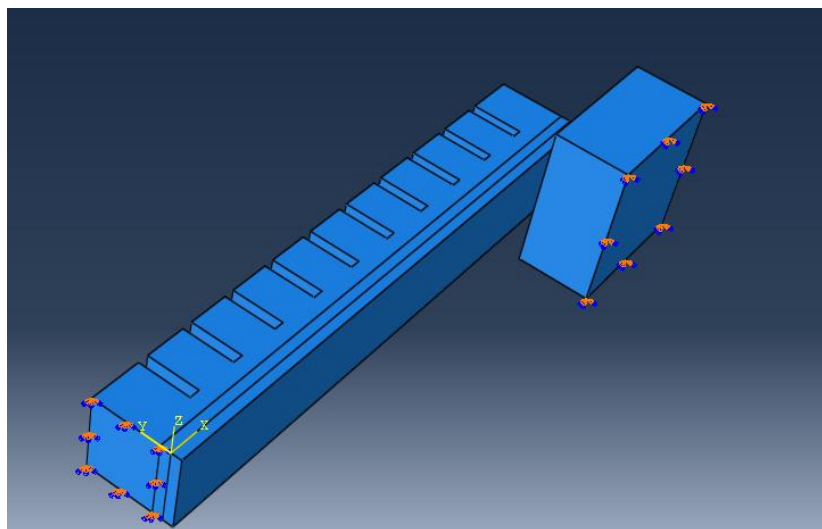
**Figura A5.10:** Seleccionar superficie.

Se selecciona que la condición de contorno sea un encastre (ver Figura A5.11):



**Figura A5.11:** Seleccionar encastre.

Realizar la misma operación para fijar la “Part” que ha sido creada nueva, para que quede fijada con un encastre de la siguiente forma (ver Figura A5.12).



**Figura A5.12:** Especificar el encastre en el Nuevo bloque.

Por último se deben crear nuevos “History Output” y “Field Output”. En primer lugar este es el proceso para crear el “History Output”, doble click en “History Output Request” (ver Figura A5.13).

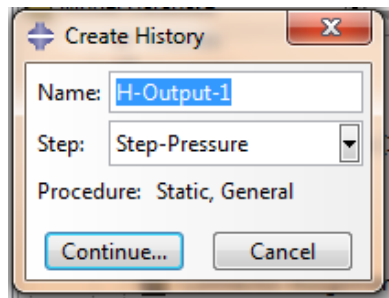


Figura A5.13: Crear "Hystory Output".

Y seleccionar **"Preselected Defaults"**, una vez seleccionado desplegar el menú **"Contact"** y seleccionar **"CFN, Total forces due to contact"**(ver Figura A5.14).

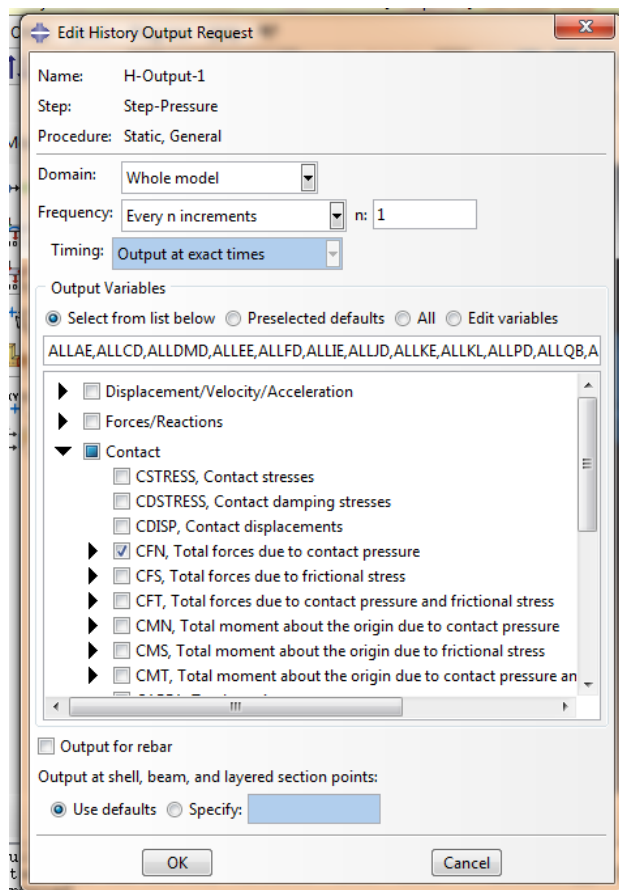


Figura A5.14: Seleccionar parámetros por defecto.

Para crear el **"Field Output"** se debe hacer doble click en **"Field Output Request"**, y seleccionar igual **"Preselected Defaults"** (ver Figura A5.15).

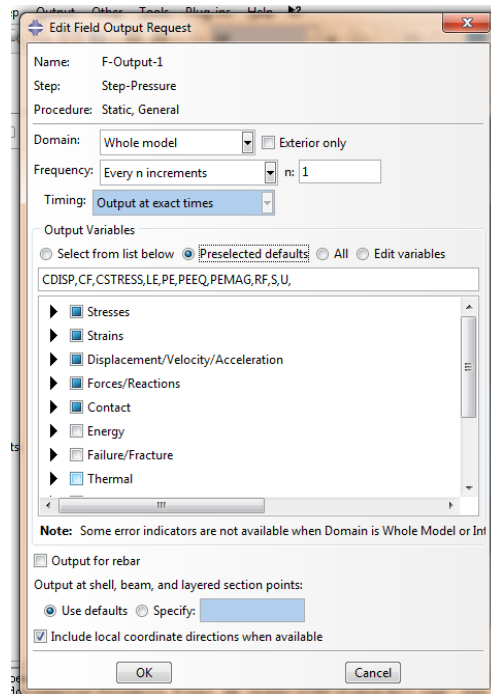


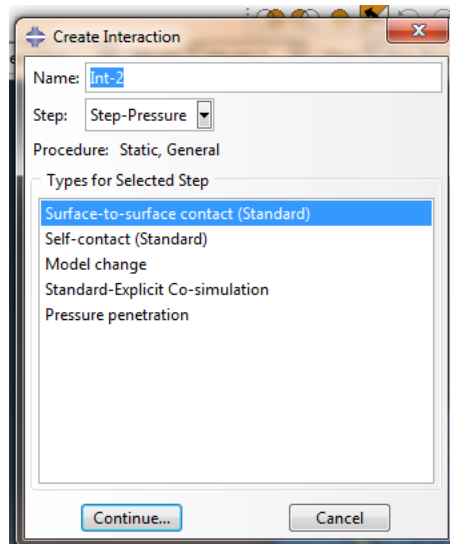
Figura A5.35: Seleccionar parámetros por defecto.

Posteriormente antes de darle a **“Ok”**, se despliega el menú de **“Contact”** y se selecciona **CFORCE** para que el análisis calcule la fuerza de contacto entre las superficies y luego poder verla una vez el análisis esté terminado.

## 5. Definir contacto entre superficies.

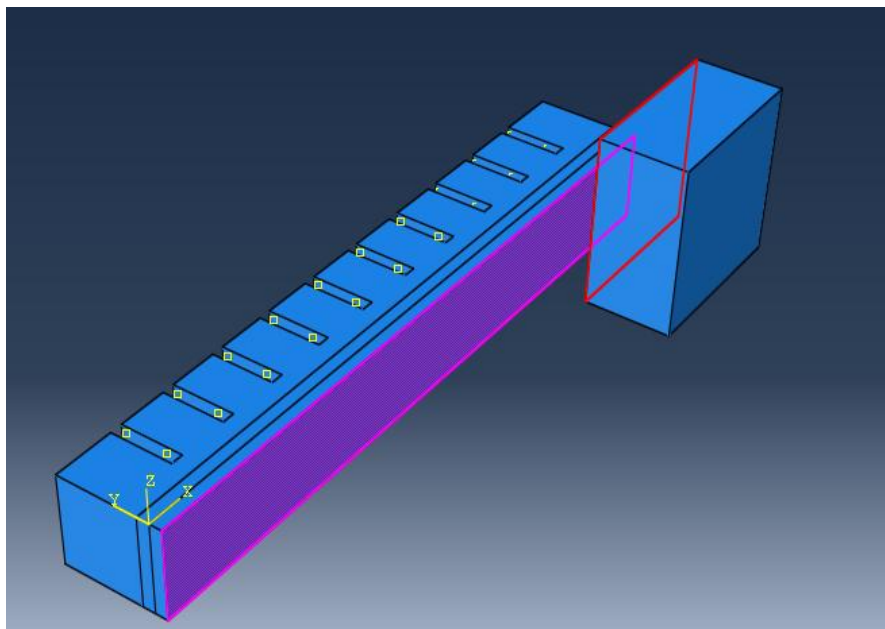
Para calcular la fuerza de contacto entre las dos superficies se debe definir un contacto entre la superficie inferior del actuador y el nuevo sólido. El tipo de contacto debe ser del tipo **“Surface-to-surface”**. En primer lugar se hace doble click en **“Interactions”** (ver Figura A5.16).





**Figura A5.16:** Seleccionar contacto superficie con superficie.

Seleccionar las dos superficies (ver Figura A5.17):



**Figura A5.17:** Seleccionar las dos superficies.

Después aparece la siguiente ventana donde se deja todo por defecto y se define el contacto (ver Figura A5.18).

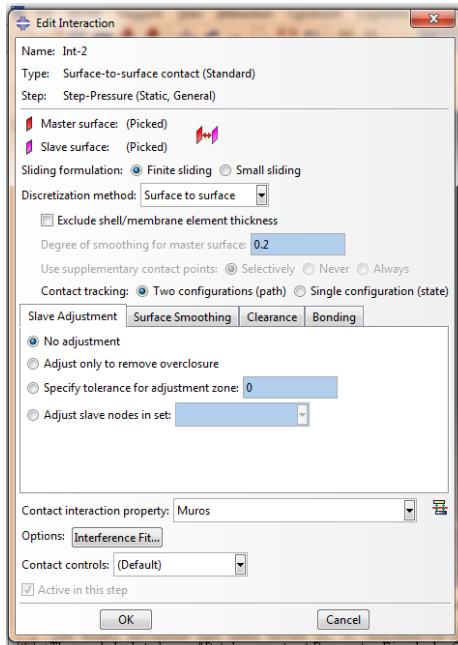


Figura A5.18: Definir contacto.

## 6. Mallado.

Se realiza el mallado de la nueva “Part” creada. Se despliega el menú de la nueva “Part” y se hace “click” en “Mesh”. El primer paso es utilizar la herramienta “Assign mesh controls”, y seleccionar una malla tetraédrica y dejar todas las demás opciones por defecto (ver Figura A5.19).

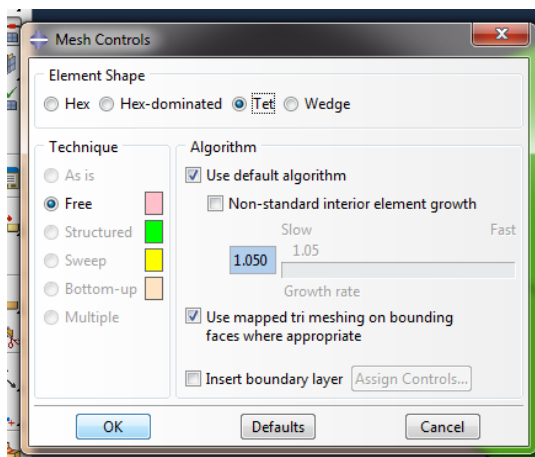


Figura A5.194: Crear malla tetraédrica.

El siguiente paso es seleccionar los nodos, con la herramienta “Seed Parts”. Se selecciona una distancia entre nodos de 3mm y se dejan las demás por defecto (ver Figura A5.20).

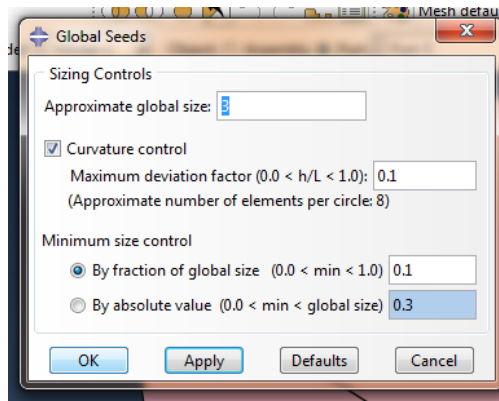


Figura A5.20: Definir el tamaño del mallado.

Después se pulsa **“Mesh Part”** y se malla la nueva **“Part”** (ver Figura A5.21).

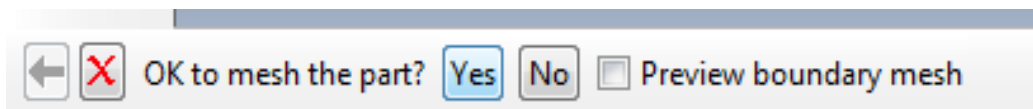


Figura A5.21: Mallar la pieza.

Una vez realizado el mallado de la Part, hay que especificar que la malla es híbrida debido a que el material es hiperelástico. Se pulsa **“Mesh...”** y después **“Element Type”**. Aparecerá la siguiente ventana donde hay que marcar **“Hybrid Formulation”** (ver Figura A5.22).

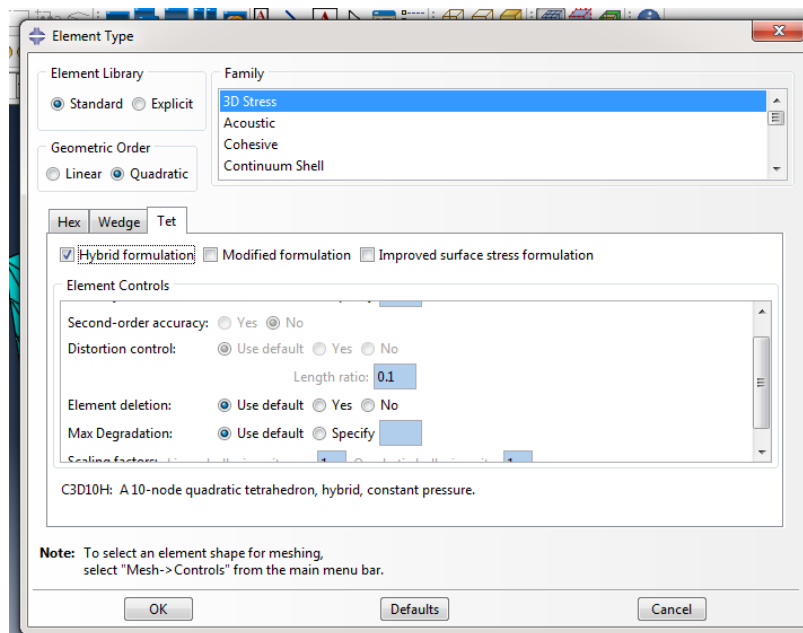


Figura A5.22: Activar **“Hybrid Formulation”**.

## 7. Crear **“Job”**.

Se crea un nuevo "Job" para realizar el análisis (ver Figura A5.23).

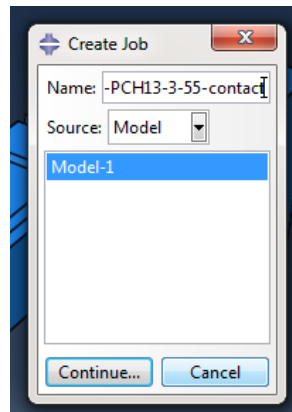


Figura A5.23: Crear Nuevo "Job".

En la ventana emergente se seleccionan tantos procesadores como tenga el ordenador (ver Figura A5.24).

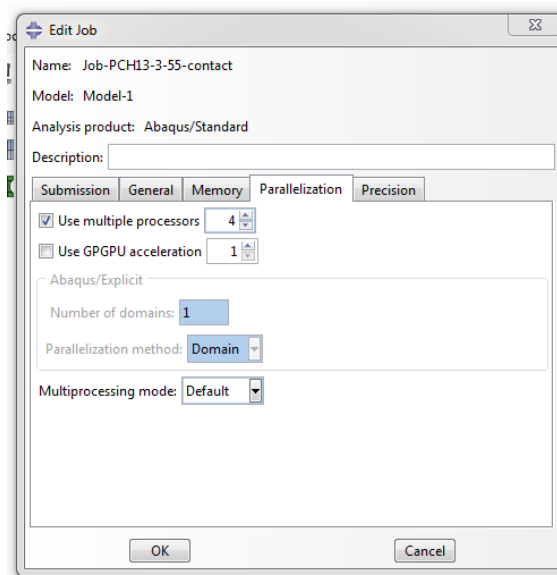
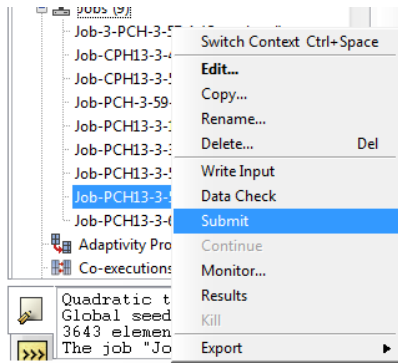


Figura A5.24: Seleccionar número de procesadores.

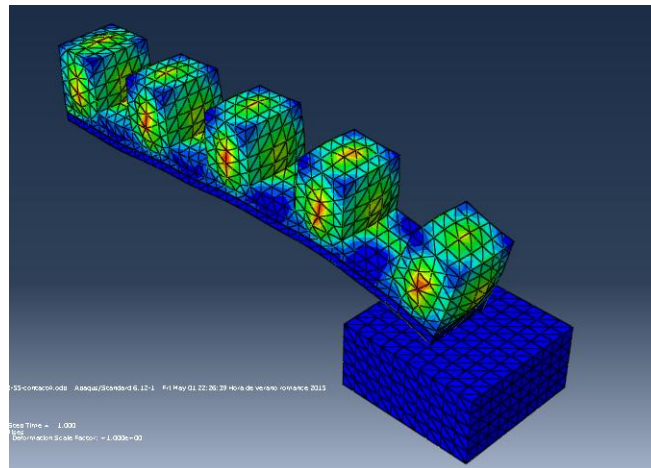
Una vez creado el Job se hace click derecho en él y se selecciona "Submit" (ver Figura A5.25).



**Figura A5.25:** Empezar el análisis.

## 8. Ver fuerza de contacto.

Para ver los resultados se hace la misma operación anterior de pulsar botón derecho en el “Job” y se selecciona “Results” (ver Figura A5.26).



**Figura A5.26:** Ver resultados.

Para obtener la información de la fuerza en el contacto, se selecciona “**Results**” e “**History Output...**” donde sale la siguiente ventana emergente (ver Figura A5.27). Hay que seleccionar para graficar la fuerza de contacto “CFNM : CFNM ASSEMBLY\_PICKEDSURF.....” de la superficie inferior del actuador.

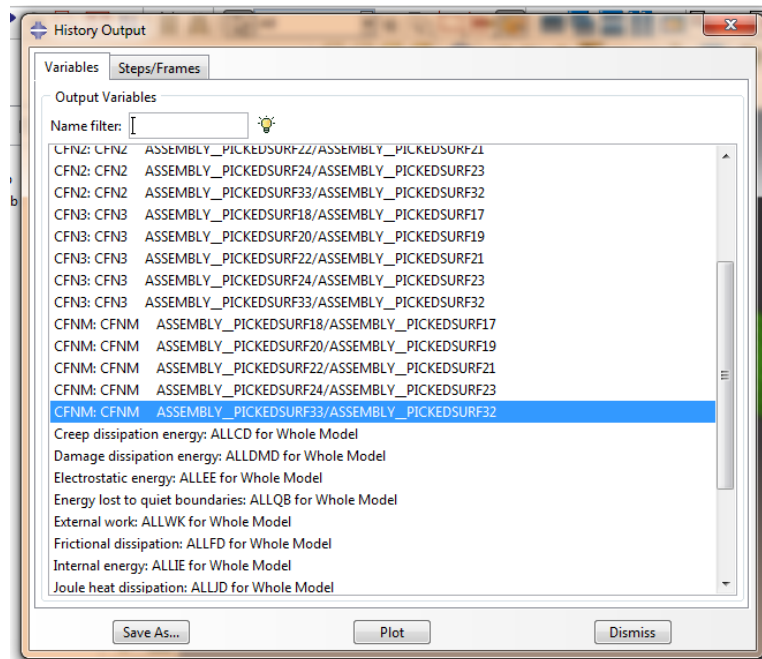


Figura A5.27: Seleccionar Fuerza de contacto.

Una vez seleccionado se hace click en “Plot” y aparecerá el siguiente gráfico (ver Figura A5.28). El software para realizar el cálculo de la fuerza de contacto final realiza cálculos sucesivos con incrementos de presión cada cierto tiempo hasta llegar a la presión final que se quiere modelar. Por ello en esta gráfica se aprecia cómo aumenta la fuerza de contacto a lo largo del tiempo, porque en este tiempo de un segundo la presión va incrementando de 0 a 55 KPa.

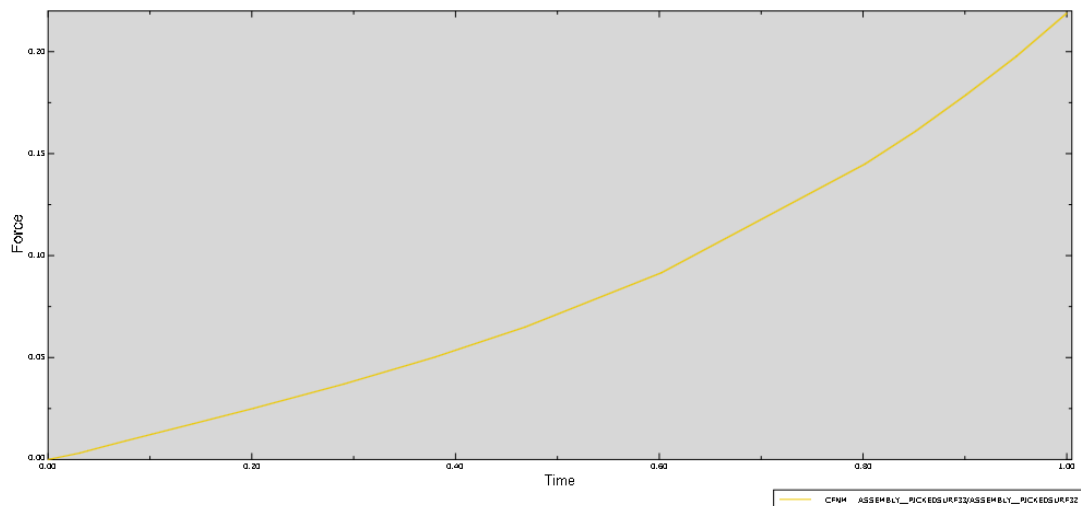


Figura A5.285: Seleccionar fuerza de contacto. Fuerza en Newton, tiempo en segundos.

Para ver el valor final de la fuerza de contacto en Newton se pueden exportar todos los valores de la fuerza de contacto representados a un archivo excell donde se puede obtener el valor exacto. Para ello hay que seguir la secuencia “Plug-ins”, “Tools” y “Excel Utilities...” (ver Figura A5.29).

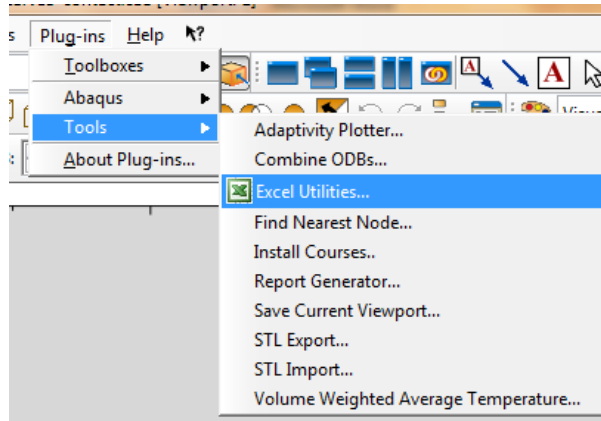


Figura A5.29: Exportar datos a Excel.

Aparece una ventana emergente donde se selecciona **“From Current XY Plot”** (ver Figura A5.30).

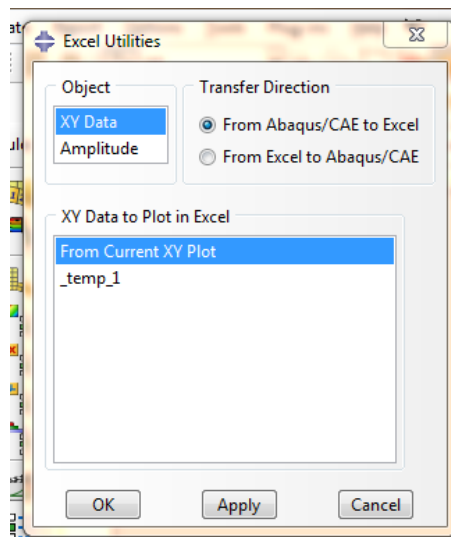


Figura A5.30: Exportar datos a Excel.

Se abrirá un documento de Excel con los datos de la fuerza, hay que quedarse con el valor de la fuerza en Newtons cuando el tiempo es un segundo (ver Figura A5.31). Los datos del tiempo en segundos son los de la columna de la izquierda y los datos de la derecha son la fuerza de contacto en Newtons. En este caso el valor de la fuerza de contacto es de 0,2188 Newtons.

	A	B	C
1	0	0	
2	0,03125	0,00318808	
3	0,0390625	0,00425724	
4	0,046875	0,00530825	
5	0,05859375	0,00685691	
6	0,07617188	0,00913875	
7	0,10253906	0,01249061	
8	0,14208984	0,01748256	
9	0,20141602	0,02506419	
10	0,29040527	0,03701728	
11	0,37939453	0,05016012	
12	0,46838379	0,06497149	
13	0,60186768	0,09152745	
14	0,80209351	0,14495131	
15	0,85157013	0,16098389	
16	0,90104675	0,17879398	
17	0,95052338	0,19769558	
18	1	0,21886152	
19			
20			
21			

**Figura A5.31:** Valor de la fuerza de contacto.



# Referencias

- [1] C. Laschi and M. Cianchetti. Soft robotics: New perspectives for robot bodyware and control. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 22014.
- [2] S. Kim, C. Laschi and B. Trimmer. Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics. *Trends Biotechnol.* 31(5), pp. 287-294. 2013. . DOI: 10.1016/j.tibtech.2013.03.002.
- [3] R. A. Brooks. New approaches to robotics. *Science* 253(5025), pp. 1227-1232. 1991. . DOI: 10.1126/science.253.5025.1227.
- [4] R. (. Pfeifer, J. Bongard and S. Grand. *How the Body Shapes the Way we Think: A New View of Intelligence* 2007.
- [5] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M. R. Zakin, H. Lipson and H. M. Jaeger. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 107(44), pp. 18809-18814. 2010. . DOI: 10.1073/pnas.1003250107.
- [6] E. Guizzo. Soft robotics. *IEEE Robotics and Automation Magazine* 19(1), pp. 123-128. 2012. . DOI: 10.1109/MRA.2011.2181779.
- [7] J. Hiller and H. Lipson. Automatic design and manufacture of soft robots. *IEEE Transactions on Robotics* 28(2), pp. 457-466. 2012. . DOI: 10.1109/TRO.2011.2172702.
- [8] Medina, J. & Véñez, P., *Soft Robotic: A Change of Conventional Paradigm of Robotics*, 2015.
- [9] R. Pfeifer, M. Lungarella and F. Iida. The challenges ahead for bio-inspired 'soft' robotics. *Communications of the ACM* 55(11), pp. 76-87. 2012. . DOI: 10.1145/2366316.2366335.
- [10] M. J. Pearson, A. G. Pipe, C. Melhuish, B. Mitchinson and T. J. Prescott. Whiskerbot: A robotic active touch system modeled on the rat whisker sensory system. *Adapt. Behav.* 15(3), pp. 223-240. 2007. . DOI: 10.1177/1059712307082089.
- [11] M. Kovač, M. Schlegel, J. Zufferey and D. Floreano. Steerable miniature jumping robot. *Autonomous Robots* 28(3), pp. 295-306. 2010. . DOI: 10.1007/s10514-009-9173-4.
- [12] B. Balinski. Elephantine festo robotic arm gets taught a few new tricks. *PACE* 2014.

- [13] H. Lin, G. G. Leisk and B. Trimmer. GoQBot: A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot. *Bioinspiration & Biomimetics* 6(2), pp. 026007. 2011. . DOI: 10.1088/1748-3182/6/2/026007.
- [14] B. Mazzolai, L. Margheri, M. Cianchetti, P. Dario and C. Laschi. Soft-robotic arm inspired by the octopus: II. from artificial requirements to innovative technological solutions. *Bioinspiration and Biomimetics* 7(2), pp. 025005. 2012. . DOI: 10.1088/1748-3182/7/2/025005.
- [15] M. Raibert. BigDog, the rough-terrain quadruped robot. 2008, . DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.4278.
- [16] J. Ayers and J. Witting. Biomimetic approaches to the control of underwater walking machines. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 365(1850), pp. 273-295. 2007. . DOI: 10.1098/rsta.2006.1910.
- [17] T. Umedachi, K. Takeda, T. Nakagaki, R. Kobayashi and A. Ishiguro. Fully decentralized control of a soft-bodied robot inspired by true slime mold. *Biol. Cybern.* 102(3), pp. 261-269. 2010. . DOI: 10.1007/s00422-010-0367-9.
- [18] C. Fiazza, C. Fiazza, T. Salumae, T. Salumae, M. Listak, M. Listak, G. Kulikovskis, G. Kulikovskis, R. Templeton, R. Templeton, O. Akanyeti, O. Akanyeti, W. Megill, W. Megill, P. Fiorini, P. Fiorini, M. Kruusmaa and M. Kruusmaa. Biomimetic mechanical design for soft-bodied underwater vehicles. 2010, . DOI: 10.1109/OCEANSSYD.2010.5603660.
- [19] R. Cory, *Supermaneuverable Perching*, 2010.
- [20] T. Minato, Y. Yoshikawa, T. Noda, S. Ikemoto, H. Ishiguro and M. Asada. CB2: A child robot with biomimetic body for cognitive developmental robotics. 2007, . DOI: 10.1109/ICHR.2007.4813926.
- [21] M. Asada, M. Asada, K. Hosoda, K. Hosoda, Y. Kuniyoshi, Y. Kuniyoshi, H. Ishiguro, H. Ishiguro, T. Inui, T. Inui, Y. Yoshikawa, Y. Yoshikawa, M. Ogino, M. Ogino, C. Yoshida and C. Yoshida. Cognitive developmental robotics: A survey. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development* 1(1), pp. 12-34. 2009. . DOI: 10.1109/TAMD.2009.2021702.
- [22] H. G. Marques, H. G. Marques, M. Jäntschi, M. Jäntschi, S. Wittmeier, S. Wittmeier, O. Holland, O. Holland, C. Alessandro, C. Alessandro, A. Diamond, A. Diamond, M. Lungarella, M. Lungarella, R. Knight and R. Knight. ECCE1: The first of a series of anthropomimetic musculoskeletal upper torsos. 2010, . DOI: 10.1109/ICHR.2010.5686344.
- [23] T. Sugaiwa, T. Sugaiwa, H. Iwata, H. Iwata, S. Sugano and S. Sugano. Shock absorbing skin design for human-symbiotic robot at the worst case collision. 2008, . DOI: 10.1109/ICHR.2008.4755998.

- [24] J. Park, S. Haddadin, J. Song and A. Albu-Schäffer. Designing optimally safe robot surface properties for minimizing the stress characteristics of human-robot collisions. 2011, . DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980282.
- [25] R. Bischoff, J. Kurth, G. Schreiber, R. Koeppe, A. Albu-Schäffer, A. Beyer, O. Eiberger, S. Haddadin, A. Stemmer, G. Grunwald and G. Hirzinger. "The KUKA-DLR lightweight robot arm - A new reference platform for robotics research and manufacturing," in Anonymous 2010, .
- [26] F. Endres, J. Hess and W. Burgard. Graph-based action models for human motion classification. Presented at Robotics; Proceedings of ROBOTIK 2012; 7th German Conference On. 2012, .
- [27] N. Paine, S. Oh and L. Sentis. Design and control considerations for high-performance series elastic actuators. *IEEE-ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS* 19(3), pp. 1080-1091. 2014. . DOI: 10.1109/TMECH.2013.2270435.
- [28] A. Bicchi, G. Tonietti, M. Bavaro and M. Piccigallo. Variable stiffness actuators for fast and safe motion control. *Springer Tracts in Advanced Robotics* 15pp. 527-536. 2005.
- [29] F. Carpi and E. Smela. *Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators* 2009. DOI: 10.1002/9780470744697.
- [30] Y. Bar-Cohen, S. Sherrit and S. -Lih. Characterization of the electromechanical properties of EAP materials. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng* 4329pp. 319-327. 2001. . DOI: 10.1117/12.432663.
- [31] F. Carpi, R. Kornbluh, P. Sommer-Larsen and G. Alici. Electroactive polymer actuators as artificial muscles: Are they ready for bioinspired applications? *Bioinspiration and Biomimetics* 6(4), pp. 045006. 2011. . DOI: 10.1088/1748-3182/6/4/045006.
- [32] L. Lecce, A. Concilio and S. Ameduri. *Shape Memory Alloy Engineering: For Aerospace, Structural and Biomedical Applications* 2015.
- [33] Sangbae Kim, E. Hawkes, Kyujin Cho, M. Joldaz, J. Foley and R. Wood. Micro artificial muscle fiber using NiTi spring for soft robotics. Presented at Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference On. 2009, . DOI: 10.1109/IROS.2009.5354178.
- [34] R. Merz, *Dissertation Shape Deposition Manufacturing*, 1994.
- [35] A. M. Dollar and R. D. Howe. The highly adaptive SDM hand: Design and performance evaluation. *The International Journal of Robotics Research* 29(5), pp. 585-597. 2010. . DOI: 10.1177/0278364909360852.
- [36] B. Mosadegh, P. Polygerinos, C. Keplinger, S. Wennstedt, R. Shepherd, U. Gupta, J. Shim, K. Bertoldi, C. Walsh and G. Whitesides. Pneumatic networks for soft robotics

that actuate rapidly. *ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS* 24(15), pp. 2163-2170. 2014. . DOI: 10.1002/adfm.201303288.

[37] P. Polygerinos, S. Lyne, Z. Wang, L. F. Nicolini, B. Mosadegh, G. M. Whitesides and C. J. Walsh. Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation. 2013, . DOI: 10.1109/IROS.2013.6696549.

[38] K. C. Galloway, P. Polygerinos, C. J. Walsh and R. J. Wood. Mechanically programmable bend radius for fiber-reinforced soft actuators. 2013, . DOI: 10.1109/ICAR.2013.6766586.

[39] C. Chou and B. Hannaford. Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles. *IEEE Trans. Rob. Autom.* 12(1), pp. 90-102. 1996. . DOI: 10.1109/70.481753.

[40] M. Doumit, M. Doumit, A. Fahim, A. Fahim, M. Munro and M. Munro. Analytical modeling and experimental validation of the braided pneumatic muscle. *IEEE Transactions on Robotics* 22; 25(6), pp. 1282-1291. 2009. . DOI: 10.1109/TRO.2009.2032959.

[41] G. Nikolakopoulos, S. Manesis and G. Andrikopoulos. Pneumatic artificial muscles. *Control Eng. Pract.* 21(12), 2013.

[42] A. M. Gordon, A. F. Huxley and F. J. Julian. The variation in isometric tension with sarcomere length in vertebrate muscle fibres. *J. Physiol. (Lond.)* 184(1), pp. 170-192. 1966.

[43] D. Thuau, C. Ayela, P. Poulin and I. Dufour. Highly piezoresistive hybrid MEMS sensors. *Sensors and Actuators A: Physical* 209(0), pp. 161-168. 2014. . DOI: <http://dx.doi.org/strauss.uc3m.es:8080/10.1016/j.sna.2014.01.037>.

[44] Y. Park, B. Chen and R. J. Wood. Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors. *IEEE Sensors Journal* 12(8), pp. 2711-2718. 2012. . DOI: 10.1109/JSEN.2012.2200790.

[45] T. Sekitani, U. Zschieschang, H. Klauk and T. Someya. Flexible organic transistors and circuits with extreme bending stability. *NATURE MATERIALS* 9(12), pp. 1015-1022. 2010. . DOI: 10.1038/NMAT2896.

[46] M. Kaltenbrunner, T. Sekitani, J. Reeder, T. Yokota, K. Kuribara, T. Tokuhara, M. Drack, R. Schwödiauer, I. Graz, S. Bauer-Gogonea, S. Bauer and T. Someya. An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics. *Nature* 499(7459), pp. 458-463. 2013. . DOI: 10.1038/nature12314.

[47] G. R. Liu, G. R. Liu and S. S. Quek. *The Finite Element Method : A Practical Course* (Second edition. ed.) 2013.

[48] G. R. Liu and S. S. Quek. *The Finite Element Method: A Practical Course* 2003.

- [49] A. Ruiz, J. Jack and I. Books24x7. *SolidWorks 2010: No Experience Required* 2010.
- [50] J. R. Lajara Vizcaíno and J. Pelegrí Sebastiá. *LabVIEW: Entorno Gráfico De Programación* 2011.
- [51] Anonymous National instruments to release myRIO. *Wireless News* 2013.
- [52] M. Lombard and I. Books24x7. *SolidWorks 2010 Bible* 2010.
- [53] Y. Sun, Y. S. Song and J. Paik. Characterization of silicone rubber based soft pneumatic actuators. 2013, . DOI: 10.1109/IROS.2013.6696995.
- [54] (). . Available: <http://softroboticstoolkit.com/book/pneunets-step-4>.
- [55] Anonymous *ABAQUS/Standard : User's Manual* 1995.
- [56] Anonymous *ABAQUS/Explicit : User's Manual* 1996.
- [57] O. H. Yeoh. Some forms of the strain energy function for rubber. *Rubber Chemistry and Technology* 66(5), pp. 754-771. 1993. . DOI: 10.5254/1.3538343.
- [58] C. Renaud, J. Cros, Z. Feng and B. Yang. *International Journal of Impact Engineering* 2009.
- [59] C. E. Prieto, J. E. Febres, M. Cerrolaza and R. Miquelarena, "Sistema de visión artificial para el control del movimiento de un asistente robótico médico," vol. 29, pp. 6619-6629, Noviembre, 2010.