



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MATERIALES DE  
ESPUMAS PARA ASIENTOS.

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN ASIENTO  
SUPLEMENTARIO PARA CONDUCTORES DE  
AUTOBÚS

Autor: Erick Roy Minchola Rentería.

Tutor: Jesús Meneses.

Leganés, Octubre de 2015



**Título:** ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MATERIALES DE ESPUMAS PARA ASIENTOS. MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN ASIENTO SUPLEMENTARIO PARA CONDUCTORES DE AUTOBÚS.

**Autor:** Erick Minchola Rentería.

**Director:** Jesús Meneses.

## EL TRIBUNAL

**Presidente:** Cristina Castejón Sisamón

**Vocal:** Jorge Solera Camino

**Secretario:** Alejandro Bustos Caballero

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 22 de octubre de 2015 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



## AGRADECIMIENTOS:

Agradezco a mi amigo, Housseberg Pinzón, por hacerme testigo de las fases de creación de su invención y darme la idea del proyecto, a mi gran amigo, Pablo Huaca, con el que hemos compartido muchos días de risas y estudio durante la carrera, a mi madre, Reneé Rentería, por darme apoyo y soporte en todo momento, y a mi gran amor, Ana Molina, que ha sido la persona que más palabras de aliento, apoyo y cariño me ha dedicado durante estos últimos meses.

Una mención especial de agradecimiento para Jesús Meneses, tutor de este proyecto, por su tiempo de sugerencias y correcciones y por alentarme en hacer y seguir adelante en un tema tan poco estudiado como el que trata este estudio.

También dar las gracias a Alejandro Bustos y Zoser Kalengayi por su apoyo e interés prestado en cuanto a software se refiere.

Y por último al departamento de mecánica de la Universidad UC3M que siempre han estado dispuestos a ayudar y han sido serviciales en la realización de este trabajo.



## RESUMEN:

El objetivo del presente proyecto es la mejora de la calidad de vida de los conductores profesionales de autobús a partir modelado y simulación de un asiento portátil auxiliar que va acoplado encima del asiento del conductor en el autobús. Dado que con el tiempo, uso y humedad la calidad y el confort de las espumas de los asientos de autobuses disminuyen, se propone aliviar las tensiones sufridas en el cuerpo con una pieza adicional de espuma cuyo diseño y material son seleccionados concretamente para ese fin.

El estudio se basa en las propiedades de las espuma poliuretano, así como en la búsqueda de caracterizaciones del material para su simulación por ordenador, haciendo que el programa de elementos finitos haga un ajuste de las curvas tensión-deformación obtenidas a través de ensayos en el material para así, a través de fórmulas de energía de deformación, obtener un modelo de material para su simulación.

Para ello se pretende modelar el asiento del conductor, el asiento auxiliar, músculo y hueso, hacer un breve resumen de estudios previos acerca de la simulación de las propiedades de la masa muscular y así poder obtener un modelo lo más realista posible por ordenador para el fin propuesto.

Con el fin de realizar el modelado y su simulación, se ha utilizado los programas CREO PARAMETRIC 2.0, para el diseño de las distintas partes del asiento, músculo, huesos y el asiento portátil, y CREO SIMULATE 2.0, para el análisis estructural y estudios de tensión-deformación de la masa muscular, así como de la propia espuma.





## ABSTRACT:

The objective of the actual project is to improve the quality of life of professional bus drivers from modelling and simulating a portable bus seat which has to be on the bus driver seat. Because of the time, use and humidity the quality and comfort of the seat foam decreases, it is proposed to relieve the tensions suffer within the driver body with an additional piece of foam which design and material are selected concretely for this aim.

The study is based on the properties of the Polyurethane foam, PU foam, as well as the different ways of simulation by a computer, running a finite element program in order to adjust the curve tension-strain obtained through the tests applied on the material so that using formulas of the energy of deformation it could be possible to have a material model for using it in order to simulate and obtain better designs.

For this purpose, the driver bus seat, the portable seat, the femur and muscle. This project will include a brief resume of previous studies about the simulation of muscle properties, in order to obtain a realistic simulation for that purpose.

The programs used in this study will be CREO PARAMETRIC 2.0, for the design of the different parts of the body and portable seat, and CREO SIMULATE 2.0, for structural analysis and stress-strain studies about the muscle as well as the foam.



# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS: .....	v
RESUMEN: .....	vii
ABSTRACT:.....	ix
ÍNDICE GENERAL.....	xi
INDICE DE FIGURAS: .....	xv
ÍNDICE DE TABLAS .....	xx
1 INTRODUCCIÓN:.....	1
1.1 ORIGEN DEL PROYECTO: .....	1
1.2 MOTIVACIÓN:.....	1
1.3 OBJETIVOS.....	1
1.3.1 Objetivo principal:.....	1
1.3.2 Objetivos secundarios:.....	2
2 ESTUDIO EPIDEMIOLÓGICO DE PUESTO DE TRABAJO DEL CONDUCTOR PROFESIONAL DE AUTOBUS:.....	3
2.1 - CONSIDERACIONES ACERCA DEL ESTRÉS RELACIONADAS CON LA INCOMODIDAD FÍSICA EN EL PUESTO DE TRABAJO:.....	4
3 DOCUMENTACIÓN DEL ESTADO DE LA TÉCNICA Y JUSTIFICACIÓN DEL ACCESORIO:.....	6
4 DISEÑO DEL ASIENTO SUPLEMENTARIO Y CONJUNTO: .....	6
4.1 PARTES DEL ASIENTO SUPLEMENTARIO: .....	9
4.2 ELECCIÓN DEL MATERIAL:.....	11
5 LA QUÍMICA DEL POLIURETANO: .....	13
6 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PU: .....	15
6.1 ESPUMA EN PLANCHA DE LÍNEA CONTINUA: .....	15
6.2 PRODUCCIÓN DE ESPUMA EN BLOQUE:.....	17
6.3 FABRICACIÓN DE ESPUMA POR MOLDEO.....	18
6.4 PRINCIPALES PROCESOS CON INFLUENCIA EN LAS ESPUMAS: .....	18
7 INTRODUCCIÓN A LA MICROESTRUCTURA DE LOS POLÍMEROS DE ESPUMA: .....	20
7.1 DENSIDAD RELATIVA:.....	21
7.2 ANISOTROPÍA: .....	23
8 ENSAYOS MECÁNICOS SIMPLES: .....	24
8.1 INTRODUCCIÓN:.....	24
8.2 TIPOS DE CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN Y PARÁMETROS DE DISTINTOS MATERIALES:.....	24
8.2.1 Linealmente elástico e isotrópico: .....	25

8.2.2	Elásticamente no lineal e isotrópica: .....	25
8.2.3	Anisotrópico y elástico: .....	26
8.2.4	Elasto-plásticos:.....	26
8.2.5	Materiales visco-elásticos: .....	26
8.3	FENÓMENOS VISCOELÁSTICOS: .....	28
8.3.1	Los modelos viscoelásticos:.....	29
8.3.2	Ejemplo de datos de visco-elasticidad en poliuretano sólido:.....	31
8.4	TIPOS DE ENSAYOS: .....	33
8.4.1	Ensayo de compresión uniaxial:.....	33
8.4.2	Ensayo de cizalladura simple:.....	39
8.4.3	Ensayos de flexión de tres puntos:.....	42
9	ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS APLICADO A LA DEFORMACIÓN EN ESPUMAS: .....	43
9.1	MEF ESTÁTICO O DINÁMICO:.....	43
9.2	MODELOS DE MATERIALES PARA FEM:.....	44
9.3	ESPUMAS ELÁSTICAS:.....	45
9.3.1	Ajustes a la curva tensión-deformación:.....	45
9.3.2	Función de la energía de deformación para gomas y caucho.....	46
9.3.3	Función de energía de deformación de Ogden para espumas elásticas:.....	47
9.3.4	Validación MEF: ensayo de hendidura de deformación plana (plane-strain indentation) para espumas flexibles:.....	53
9.3.5	Validación de modelos MEF: .....	56
9.3.6	Resumen:.....	58
10	ESTUDIOS SOBRE ASIENTOS:.....	60
10.1	INTRODUCCIÓN.....	60
10.2	LA BIOMECÁNICA DE SENTARSE EN SILLAS:.....	60
10.2.1	La postura al sentarse y los maniqués: .....	60
10.2.2	Úlceras de la piel por presión e isquemia: .....	62
10.2.3	Distribución de presiones en una postura sentada: .....	64
10.2.4	Comparativa entre la deformación de muslos y espuma: .....	65
10.2.5	Comodidad en asientos de coches:.....	66
10.2.6	Transmisión de vibraciones:.....	67
10.3	SELECCIÓN DEL TIPO DE ESPUMA:.....	69
10.3.1	Factores de selección de la espuma:.....	69
10.4	EJEMPLO DE DISEÑO DE UN ASIENTO:.....	70
10.4.1	Compresión uniaxial uniforme:.....	70
10.4.2	Ensayo IFD con penetrador con forma de glúteos:.....	71

10.4.3	MEF de deformación de glúteos y espuma.....	73
10.5	OTRAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ESPUMA: .....	74
10.5.1	Fatiga mecánica:.....	74
10.6	RESUMEN: .....	75
11	ACERCA DE CREO SIMULATE: .....	76
11.1	CONVERGENCIA DE ELEMENTOS-H (EL PLANTEAMIENTO CLÁSICO):.....	76
11.2	CONVERGENCIA DE ELEMENTOS-P (PLANTEAMIENTO DE CREO): .....	77
11.3	CONVERGENCIA Y EXACTITUD EN LA SOLUCIÓN: .....	79
11.4	MÉTODOS DE CONVERGENCIA: .....	80
11.4.1	Quick Check:.....	80
11.4.2	Single Pass Adaptive (SPA): .....	80
11.4.3	Multi-Pass Adaptive (MPA): .....	81
12	DATOS GENERALES DE LAS SIMULACIONES: .....	83
12.1	MATERIALES A USAR PARA LAS SIMULACIONES: .....	83
12.2	MATERIAL PARA LA MASA MUSCULAR: .....	83
12.3	MODELO DE MATERIAL USADO PARA EL ASIENTO SUPLEMENTARIO: .....	84
12.4	MODELO DE MATERIAL USADO PARA EL ASIENTO DE AUTOBÚS:.....	86
12.5	MATERIAL USADO PARA EL HUESO:.....	88
12.6	TIPO DE SIMULACIÓN:.....	89
12.7	PASOS DE CARGA Y MÉTODO DE CONVERGENCIA: .....	90
13	SIMULACIONES:.....	91
13.1	SIMULACIÓN DONDE INTERACTÚAN EL HUESO, LA MASA MUSCULAR Y EL ASIENTO DE AUTOBÚS: .....	91
13.1.1	Dimensiones de las partes del modelo: .....	91
13.1.2	CARGAS: .....	92
13.1.3	Condiciones de contorno: .....	93
13.1.4	Mallado: .....	95
13.1.5	Resultados: .....	95
13.1.6	Comentario sobre los niveles P:.....	97
13.2	SIMULACIÓN DONDE INTERACTÚAN EL HUESO, LA MASA MUSCULAR, EL ASIENTO SUPLEMENTARIO Y EL ASIENTO DE AUTOBÚS: .....	99
13.2.1	Asiento suplementario:.....	99
13.2.2	Condiciones de contorno: .....	99
13.2.3	Mallado: .....	100
13.2.4	Resultados: .....	101
13.2.5	Comparativa de tensiones en la zona muscular con y sin asiento suplementario:	
	104	

13.3	ESTUDIOS ESTÁNDAR BASADOS EN LA VARIACIÓN DEL ESPESOR DEL ASIENTO	
	SUPLEMENTARIO:.....	106
13.3.1	Resultados de los estudios estándar:.....	107
13.3.2	Comparativa de tensiones de todos los estudios realizados: .....	107
14	CONCLUSIONES: .....	110
15	PRESUPUESTO .....	111
16	TRABAJOS FUTUROS:.....	113
17	GLOSARIO:.....	114
18	BIBLIOGRAFÍA:.....	115
19	ANEXOS: RESULTADOS DE ESTUDIOS ESTÁNDAR CON DIFERENTES ESPESORES DE ASIENTO	
	SUPLEMENTARIO:.....	119
19.1	RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO	
	SUPLEMENTARIO DE 10MM:.....	119
19.2	RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO	
	SUPLEMENTARIO DE 15MM:.....	121
19.3	RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO	
	SUPLEMENTARIO DE 20MM:.....	123
19.4	RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO	
	SUPLEMENTARIO DE 30MM:.....	125
19.5	RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO	
	SUPLEMENTARIO DE 35MM:.....	127
19.6	RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO	
	SUPLEMENTARIO DE 40MM:.....	129
19.7	RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO	
	SUPLEMENTARIO DE 45MM:.....	131
19.8	RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO	
	SUPLEMENTARIO DE 50MM:.....	133

## INDICE DE FIGURAS:

Figura 4.1 Gráfico del flujo de diseño. El diseño abarca desde la identificación de una necesidad de mercado, clarificada como un conjunto de requerimientos de diseño, a través de conceptos, desarrollo, y un análisis detallado hacia la especificación del producto (Ashby 2011) [2].....	8
Figura 4.2 Vista general del asiento portátil. ....	10
Figura 4.3 Vista inferior del asiento portátil. ....	10
Figura 4.4 Módulo de Young E para varios materiales. (Ashby 2011) [2]. ....	11
Figura 4.5 Módulo de Young, E, frente a la densidad para diversos materiales. (Ashby 2011). [2] .....	12
Figura 6.1: Proceso de línea continua en la cual la mezcla de polioli e disocianato son aplicadas sobre una cinta transportadora móvil. ....	15
Figura 6.2: Control de densidad en la fabricación de espuma en línea continua dado por el contenido en agua y contenido de cloruro de metileno como agente tenso activo (surfactante). (Mills 2007) [5] .....	16
Figura 6.3: Producto final de espuma en bloque.....	18
Figura 7.1: Fotografía SEM (escaneo de un microscopio electrónico) de (a) una espuma de PU de célula abierta de una densidad de $28 \text{ kgm}^{-3}$ ; y (b) una espuma de polietileno de baja densidad, $24 \text{ kgm}^{-3}$ [5].....	20
Figura 7.2: Estadios en el desarrollo de la espuma: (a) burbujas esféricas aisladas, (b) una célula en una espuma húmeda, (c) una espuma tipo Weaire–Phelan y (d) una espuma de células abiertas (Mills N. 2007) [5].....	23
Figura 8.1: elementos de Maxwell en paralelo con un muelle unitario usado para modelos de relajación del esfuerzo. ....	30
Figura 8.2: Datos de relajación del esfuerzo para un sólido de PU, moldeado a partir de espuma tipo Bulpren, para una deformación inicial del 0,89% (Zhu y Mills, 1999) .....	31
Figura 8.3 MEF de una espuma flexible de células cerradas, con contornos de tensión de compresión vertical (KPa), con una deformación media del 47% (Mills). ....	34
Figura 8.4: Curva tensión-deformación de compresión esquemática para una espuma (Eaves, 2004) [9]. ....	36
Figura 8.5 Energía de deformación a partir de una curva tensión-deformación.....	38
Figura 8.6: FEM de un ensayo de cizalladura de una espuma de aspecto de ratio 2:1 a una deformación de cizalladura media de 0.25, con contornos de tensión de cizalladura (kPa) (Mills 2007) [5]. ....	39
Figura 8.7: Predicciones hechas con MEF de contornos de tensiones cortantes (kPa) en bloques de espuma suaves: (a) ratio de aspecto 2:1 a deformación por cizalladura de 0.875 y (b) ratio de aspecto 5:1 con $\gamma = 0.525$ (Mills 2007) [5] .....	41
Figura 9.1 Volumen unitario y deformaciones principales. Donde $L_1$ , $L_2$ y $L_3$ son las longitudes iniciales y los productos $\lambda_1 L_1$ , $\lambda_2 L_2$ y $\lambda_3 L_3$ las longitudes finales en los ejes principales antes y después de aplicada la carga.....	46
Figura 9.2: Predicciones de ensayos de compresión uniaxial y a tracción con $N = 1$ con el modelo Ogden, para $\mu = 10 \text{ KPa}$ , $\alpha = -2$ ; 2, y 8 para $\mu = 40 \text{ KPa}$ , $\alpha = 20$ , comparados con el modelo de predicciones de Kelvin para $R=0,025$ y $E=50 \text{ Mpa}$ (Mills y Gilchrist, 2000) [17]....	49
Figura 9.3: Datos tensión-deformación de compresión uniaxial (curvas finas) para una espuma PU38 a $24^\circ\text{C}$ , para una velocidad de deformación de $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ comparados con predicciones	

de la función de Ogden para $N = 1$ , $\mu = 10$ kPa, $\alpha = 8$ y para $N = 2$ , $\alpha_1 = 20$ , $\mu_1 = 20$ kPa, $\alpha_2 = -2.0$ , y $\mu_2 = 0,2$ kPa (Mills y Gilchrist, 2000) [17].....	52
Figura 9.4: (a) Datos de tensiones a cizalladura y a tracción para una carga y descarga de cizalladura simple de una espuma PU38 y (b) predicciones de modelos de Ogden para la figura 6.2 (Mills y Gilchrist, 2000b).....	53
Figura 9.5: Campo de deformaciones para un ensayo de hendidura de deformación plana (plane-strain indentation): (a) predicciones para $\alpha = 8$ , $\mu = 10$ , $\nu = 0,75$ , a una deformación $\varepsilon = -0,6$ y (b) datos para una espuma PU38 con $\varepsilon = -0,6$ (LC es la línea central de la muestra) (Davies 2000) [23].....	54
Figura 9.6 Tensión de IFD predicho frente a la media de deformación de compresión, (líneas punteadas) para los modelos de Ogden de la Figura 9.3, comparados con los datos de carga-descarga para una espuma PU38 (curvas sin puntear) (Mills y Gilchrist, 2000) [17] .....	55
Figura 9.7: (a) Forma de un bloque de espuma PS35, predicho por un MEF dinámico, 2,8 ms después del impacto de un cilindro de 39 mm de diámetro, con contornos de tensiones principales a tracción (MPa). (b) Predicción fuerza vs distancia (sin publicar) comparado con datos de una espuma PS35 (Gilchrist y Mills, 2001). .....	57
Figura 9.8: Fotogramas de vídeo de una espuma XPS35 siendo penetrado por un cilindro de diámetro de 39 mm, a los tiempos indicados (Gilchrist y Mills, 2001) [25].....	58
Figura 10.1: Posición de asiento semi-recostada adoptada en la mayoría de vehículos, ilustrado por el muñeco "John" (Hubbard, 1993 ©SAE).....	61
Figura 10.2: (a) vistas de lado y (b) frontal de la pelvis de una persona sentada, con las tuberosidades isquiáticas señaladas con flechas (Mills N.J. 2007) [5].....	62
Figura 10.3: Distribución de presiones con sensores de un estudiante sobre una espuma de PU de 25mm de espesor, con las rodillas a lo alto de la figura, y los picos de presiones sobre las tuberosidades isquiáticas. (Mills N.J. 2007) [5].....	64
Figura 10.4: Deformación del muslo y un asiento de espuma vs. La fuerza aplicada. Ángulo de la rodilla: $100^{\circ}$ , densidad de la espuma de $41 \text{ kg m}^{-3}$ (Setyabudky, 1997 ©SAE) [19].....	66
Figura 10.5: (a) Modelo de masa m sobre un muelle con amortiguación de constante k y (b) transmisibilidad de un asiento de coche vs. La frecuencia, siendo estos datos comparados con la respuesta del modelo (redibujado de Kinkellar, 1998 © Sae [38]).....	67
Figura 10.6: Gráficos de fuerza-deflexión de tres asientos de coche americanos (Shen y Vertiz, 1997 © SAE) [41].....	72
Figura 10.7: Modelo por ordenador en 2-D de un glúteo deformado de un hombre de 80kg sobre un cojín de espuma con contornos de tensión de von Mises (Bouten, 2003, [33], @ American Congress of Rehabilitation Medicine).....	73
Figura 10.8: (a) Modelo en 3-D de una persona sentada sobre un cojín de espuma y (b) mapa de presiones predicha sobre la superficie de la espuma, con la presión en Kpa. (Verver, 2004 © Taylor & Francis) [43]. .....	74
Figura 11.1 Aproximaciones de la función tensión en un modelo. (Toogood 2012) [45].....	77
Figura 11.2 (a) Mallado tetraédrico (4 nodos) de elementos-h de un sólido. (b) Mallado tetraédrico de elementos-P producido por Creo.....	78
Figura 11.3 Dos medidas de convergencia comunes usando elementos-p. (Toogood 2012) [45] .....	79
Figura 12.1 Características del material usado para la masa muscular. ....	84
Figura 12.2 Introducción de datos de puntos tensión-deformación de un ensayo uniaxial para el material PU38, en Definición de material Hyperelástico dentro de Creo Simulate.....	86



Figura 12.3 Introducción de datos de puntos tensión-deformación de un ensayo uniaxial para el material usado como asiento de autobús, en Definición de material Hyperelástico dentro de Creo Simulate. ....	88
Figura 12.4 Datos del aluminio AL2014 usado para la masa ósea en las simulaciones. ....	89
Figura 13.1 Vista general de la simulación donde interactúan el hueso, la masa muscular (ambos en color carne) y el asiento de autobús (gris oscuro). ....	94
Figura 13.2 Mallado de la primera simulación en donde interactúan el hueso, el músculo y el asiento de autobús. ....	95
Figura 13.3 Tensiones en la masa muscular de la interacción hueso-músculo-asiento, donde la tensión de Von Mises máxima es de 18,7Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. ....	96
Figura 13.4 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento en donde la tensión máxima de 13.8Kpa supera el objetivo de confort de 12Kpa. ....	96
Figura 13.5 Deformaciones de la interacción hueso, músculo, asiento. ....	97
Figura 13.6 Niveles P de la primera simulación, donde interactúan hueso, músculo y asiento. ....	98
Figura 13.7 Vista general de la simulación donde interactúan el hueso, la masa muscular (ambos en color carne), el asiento suplementario (color gris claro) y el asiento de autobús (gris oscuro). ....	100
Figura 13.8 Mallado de la segunda simulación en donde interactúan el hueso, el músculo el asiento suplementario y el asiento de autobús. ....	101
Figura 13.9 Tensiones en la masa muscular de la interacción hueso-músculo-asiento suplementario, donde la tensión de Von Mises máxima es de 17,5Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. ....	102
Figura 13.10 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario en donde la presión de contacto máxima de 10.2Kpa está por debajo del objetivo de confort de 12Kpa. ....	102
Figura 13.11 Deformaciones de la interacción hueso, músculo, asiento suplementario y asiento de autobús. ....	103
Figura 13.12 Niveles P de la segunda simulación, donde interactúan hueso, músculo, asiento suplementario y asiento de autobús. ....	104
Figura 13.13 Ejemplo de definición de estudio estándar, basado en la variación del espesor del asiento suplementario, en este caso, se simulará el modelo con un espesor de 10mm. De asiento suplementario. ....	106
Figura 13.14 Tensiones máximas de Von mises del músculo en la zona de contacto con el hueso. Ninguno de estos valores está dentro de los límites de confort marcados en 12Kpa. ....	109
Figura 13.15 Presiones de contacto en la interacción músculo-espuma y valores máximos de tensión de Von Mises en la zona muscular propiamente dicha. ....	109
Figura 19.1 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 10mm. ....	119
Figura 19.2 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 10mm. Donde la tensión de Von Mises máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 18,2Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 13.3Kpa, la cual también está fuera del objetivo de confort marcado. ....	119
Figura 19.3 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 10mm. En donde la presión de contacto máxima de 12.3Kpa está fuera del objetivo de confort de 12Kpa. ....	120

Figura 19.4 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 10mm. .....	120
Figura 19.5 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 15mm. ....	121
Figura 19.6 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 15mm. Donde la tensión de Von Misses máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 17,9Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 12.9Kpa, la cual también está fuera del objetivo de confort marcado. ....	121
Figura 19.7 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 15mm. En donde la presión de contacto máxima de 10.7Kpa está dentro del objetivo de confort de 12Kpa.....	122
Figura 19.8 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 15mm. .....	122
Figura 19.9 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 20mm. ....	123
Figura 19.10 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 20mm. Donde la tensión de Von Misses máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 17,7Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 12.8Kpa, la cual también está fuera del objetivo de confort marcado. ....	123
Figura 19.11 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 20mm. En donde la presión de contacto máxima de 10.7Kpa está dentro del objetivo de confort de 12Kpa.....	124
Figura 19.12 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 20mm. .....	124
Figura 19.13 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 30mm. ....	125
Figura 19.14 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 30mm. Donde la tensión de Von Misses máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 17,3Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 12.2Kpa, la cual también está fuera del objetivo de confort marcado. ....	125
Figura 19.15 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 30mm. En donde la presión de contacto máxima de 9.6Kpa está dentro del objetivo de confort de 12Kpa.....	126
Figura 19.16 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 30mm. .....	126
Figura 19.17 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 35mm. ....	127
Figura 19.18 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 35mm. Donde la tensión de Von Misses máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 17,1Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa	

muscular propiamente dicha, es de 12.0Kpa, la cual está al límite del objetivo de confort marcado. ....	127
Figura 19.19 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 35mm. En donde la presión de contacto máxima de 9.8Kpa está dentro del objetivo de confort de 12Kpa.....	128
Figura 19.20 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 35mm. ....	128
Figura 19.21 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 40mm. ....	129
Figura 19.22 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 40mm. Donde la tensión de Von Misses máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 16,9Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 11.9Kpa, la cual está dentro del objetivo de confort marcado. ....	129
Figura 19.23 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 40mm. En donde la presión de contacto máxima de 8.9Kpa está dentro del objetivo de confort de 12Kpa.....	130
Figura 19.24 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 40mm. ....	130
Figura 19.25 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 45mm. ....	131
Figura 19.26 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 45mm. Donde la tensión de Von Misses máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 16,7Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 11.7Kpa, la cual está dentro del objetivo de confort marcado. ....	131
Figura 19.27 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 45mm. En donde la presión de contacto máxima de 9.2Kpa está dentro del objetivo de confort de 12Kpa.....	132
Figura 19.28 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 45mm. ....	132
Figura 19.29 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 50mm. ....	133
Figura 19.30 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 50mm. Donde la tensión de Von Misses máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 16,6Kpa estando por encima de los 11.4Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 11.4Kpa, la cual está dentro del objetivo de confort marcado. ....	133
Figura 19.31 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 50mm. En donde la presión de contacto máxima de 8.7Kpa está dentro del objetivo de confort de 12Kpa.....	134
Figura 19.32 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 50mm. ....	134

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 8.1: Series de Prony para un cilindro sólido de PU. Donde $\tau_i$ son los tiempos de relajación, y $E_i$ son los módulos de Young para el tiempo $i$ .....	32
Tabla 8.2 Especificaciones de la dureza a compresión de una espuma de 60Kg/m <sup>3</sup> de densidad de una empresa de fabricación de espumas de Madrid.....	37
Tabla 9.1: Pico de coeficiente de fuerza de hendidura (indentation force ratio) en un ensayo de hendidura de deformación plana (plane-strain indentation). ....	56
Tabla 10.1 Puntuaciones de confort y distribuciones de presión corporales (Milivojevich 2000) .....	67
Tabla 12.1 Datos de los puntos tensión-deformación para el material PU38. (Ver Figura 9.3 de la página 52).....	85
Tabla 12.2 Datos de los puntos tensión-deformación usados para definir el modelo de material que se usará modelar el asiento de autobús. ....	87
Tabla 12.3 Pasos de carga para las simulaciones 2D Plain-Strain. ....	90
Tabla 13.1 Comparativa de las tensiones máximas sin y con asiento suplementario. ....	105
Tabla 13.2 Tabla de resultados y comparativa de tensiones de los distintos estudios realizados. ....	108
Tabla 14.1 Porcentaje de las reducciones de presión de contacto y tensión máxima en la zona muscular propiamente dicha obtenidas con distintos espesores de asiento suplementario con respecto a las tensiones de la simulación sin asiento suplementario. ....	110
Tabla 15.1 Fases del proyecto y duración aproximada de la misma.....	111
Tabla 15.2 a) 1 Hombre mes = 131,25 horas. Máximo anual de dedicación de 12 hombres mes (1575 horas).....	111
Tabla 15.3 Costes de equipo informático. ....	111
Tabla 15.4 Fórmula de cálculo de la amortización.....	112
Tabla 15.5 Costes finales del proyecto.....	112



# 1 INTRODUCCIÓN:

## 1.1 ORIGEN DEL PROYECTO:

Este proyecto tuvo su origen en la posibilidad de aportar los conocimientos de ingeniería aprendidos en la carrera a un caso particular y puntual como es el estudio de un material con tan escasos estudios en España y en lengua española, como es la espuma de poliuretano para un fin práctico y concreto como el modelado y mejora continua de un producto útil para el confort de conductores profesionales de autobús.

## 1.2 MOTIVACIÓN:

La principal motivación para elegir este proyecto es la idea de adentrarse en el estudio de un material tan poco usual en los proyectos fin de carrera como es el estudio de las espumas de poliuretano. Así como también recibir la propuesta de hacer el modelado y simulación por parte de la persona encargada de dicha invención.

Dada la poca información que hay sobre el material en la universidad Carlos III, y en general en todas las universidades españolas, es un aliciente empezar unos estudios sobre un tema en el cual ningún compañero se había adentrado antes. Y así, abrir camino para posibles futuros estudios sobre el material, dadas las aplicaciones tan variadas que tienen los polímeros.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo principal:

El objetivo principal del presente proyecto es la mejora del confort de los conductores profesionales de autobús a partir del modelado y simulación de un asiento portátil auxiliar que va acoplado encima del asiento del conductor en el autobús. Esto se consigue mediante unos objetivos secundarios:

### 1.3.2 Objetivos secundarios:

- Estudio de las condiciones antropométricas en el puesto de trabajo.
- Reunir documentación acerca del estado del arte.
- Estudio de las propiedades de los materiales de espuma.
- Estudio de modos de simulación de los materiales de espuma.
- Encontrar un modelo de material que simule la masa muscular.
- Modelado y ensamblaje de todas las partes.
- Simulación del comportamiento de las partes del ensamblaje.
- Estudio de tensiones y deformaciones de la simulación sin asiento suplementario.
- Comparativa de tensiones de las simulaciones con y sin el asiento suplementario auxiliar.
- Comparativa de tensiones de simulaciones en donde se varía el espesor del asiento suplementario.
- Comparativa de todos los estudios realizados y su aplicación a la hora de mejorar el diseño del asiento suplementario.

## 2 ESTUDIO EPIDEMIOLÓGICO DE PUESTO DE TRABAJO DEL CONDUCTOR PROFESIONAL DE AUTOBUS:

La interacción entre conductor y asiento se hace evidente durante toda la jornada laboral, creando un notorio desgaste en la espuma de poliuretano del asiento ya que es el elemento más débil del puesto de trabajo.

Los factores que contribuyen al desgaste del asiento del conductor profesional son:

- 1- Jornada laboral: el conductor profesional tiene jornadas de entre 8 y 10 horas diarias.
- 2- Relevos: con el fin de obtener mayor beneficio, las empresas organizan relevos para que a pesar de que el conductor este limitado en tiempo de conducción, los vehículos no se vean afectados, llegando hasta 20 horas diarias de trabajo continuo.
- 3- Vida útil: la vida útil de un vehículo industrial está comprendida entre 10 y 14 años y si tenemos en cuenta que al cabo de 8 años o menos recorrerá más de un millón de kilómetros, se entiende que la espuma del asiento, a los pocos años, sufra un gran deterioro.

Resumiendo, el elevado número de horas de trabajo continuo durante tantos años hace que la espuma de poliuretano sea el elemento de confort más sufrido en un vehículo profesional.

Por último merece la pena mencionar que la absorción de sudor por parte de la espuma durante tantas horas diarias sin apenas tiempo para airearse, produzca el relleno de sudor en los poros que la constituyen, dejando consigo piel muerta y grasa corporal. Este cambio de materia supone que el comportamiento elástico de la espuma varíe debido a que el aire que se aloja en el interior de cada poro sea reemplazado por residuos orgánicos.

Por otro lado, el asiento de un vehículo profesional está diseñado para durar y la solución del fabricante es aumentar la dureza que normalmente se obtiene con un incremento de la densidad. Es por esta razón que el confort de un vehículo utilitario dista tanto de uno industrial.

Las características antropométricas de los conductores representan un reto para los ingenieros que diseñan los asientos de vehículos profesionales, ya que la talla, peso o longitud de extremidades son diferentes para cada individuo. De ahí que sea imposible diseñar un asiento para el gusto de todos.



Cuando un asiento se encuentra en mal estado no es capaz de absorber las vibraciones por rodadura del vehículo, creando incomodidad en la zona de los glúteos y forzando al conductor a adoptar malas posturas para contrarrestar las molestias. A partir de una mala postura se generan problemas en la zona lumbar que tarde o temprano derivan en problemas cervicales. Si a esto sumamos una jornada de 8 horas diarias, trato con el público y constante atención a la circulación es razonable que aparezca el estrés. De esta manera se muestra la relación directa entre incomodidad y estrés.

## 2.1 - CONSIDERACIONES ACERCA DEL ESTRÉS RELACIONADAS CON LA INCOMODIDAD FÍSICA EN EL PUESTO DE TRABAJO:

El estrés está considerado como la enfermedad del siglo XXI y ha sido definido como un conjunto de reacciones emocionales, cognitivas, fisiológicas y del comportamiento, ante situaciones nocivas del contenido, organización o entorno de trabajo; caracterizado por altos niveles de excitación y angustia, con la sensación de no poder hacer frente a la situación.

La Organización Internacional del Trabajo (OIT) se refiere al estrés laboral como una: "Enfermedad peligrosa para las economías industrializadoras y en vías de desarrollo; perjudicando a la producción, al afectar la salud física y mental de los trabajadores".

A largo plazo, hay evidencia científica de la relación del estrés con trastornos: cardiovasculares (hipertensión, infarto de miocardio), respiratorios: hiperactividad bronquial, asma), inmunitarios: (artritis reumatoide), gastrointestinales: (dispepsia, úlcera péptica, enfermedad de Crohn, colitis ulcerosa, dermatológicos: (psoriasis, neurodermitis), endocrinológicos, músculo-esqueléticos: (dolores de espalda), psicológicos: (ansiedad, depresión).

Otra enfermedad profesional relevante es el trastorno musculoesquelético o TME, pero en algunos artículos aparece como síndrome músculo-esquelético (SME). El SME es el resultado de la prolongada exposición del conductor a vibraciones en posición sentada. El SME se presenta en cuello, hombro, mano-muñeca, rodilla, tobillos-pies, espalda superior e inferior y cadera. Es decir, las vibraciones por rodadura o las generadas por el mismo vehículo provocan un desgaste significativo en la unión de las vértebras de todo el cuerpo, pero crea una mayor incidencia en aquellas zonas donde el músculo tiene que trabajar continuamente.

El SME tiene varias manifestaciones y son:

- Dolor
- Entumecimiento
- Calambre
- Rigidez.

Si sumamos las dos enfermedades más comunes en conductores profesionales es fácil deducir que la mala postura causada por un asiento insuficientemente acolchado, altera la curvatura natural de la espalda, que sumado a la tensión corporal (resultado del estrés) aumenta la presión en los discos intervertebrales, pudiendo dar como resultado una temprana protrusión discal (hernia discal).

Es interesante destacar que los problemas de espalda no están incluidos como enfermedades profesionales en el sector de transporte, debido a la repercusión económica que esto conlleva.

Un estudio llevado a cabo por la Universidad del Zulia (Maracaibo, Venezuela) en conductores de autobús de línea regular, obtuvo que el 24 % de los conductores sufrían de SME en el cuello y porcentajes más bajos en espalda baja, espalda superior rodillas, etc. Si tenemos en cuenta de que la carga cervical influye directamente sobre la capacidad visual del conductor, se puede deducir que la seguridad vial depende en gran medida de la capacidad de concentración y reacción del conductor, más aun si lleva un vehículo pesado. Un factor que compensa estas deficiencias es la experiencia de los profesionales.

Por último destacar la transmisión de hongos debido al relevo de conductores, que aunque no es una enfermedad profesional supone una carga añadida al trabajo y es en muchos casos la razón básica de que los conductores de autobús lleven una toalla para poner sobre el asiento.

A día de hoy las empresas se preocupan más por la salud de los trabajadores, proporcionando cursos periódicos de riesgos laborales con el fin de formar e informar sobre los factores que influyen en la salud, tanto en el puesto de trabajo como fuera de él (cambios posturales periódicos, comida sana, deporte, estiramientos, dormir bien entre otros). Además las empresas que fabrican los vehículos han puesto puntual interés en el diseño del asiento, teniendo en cuenta aspectos tan importantes como pueda ser la regulación (dimensiones del conductor) o la ergonomía.

A pesar de todo esto, los asientos de vehículos industriales terminan en un estado sumamente deficiente y no existe ninguna regulación que obligue a la empresa a tapizarlos de forma periódica.

### 3 DOCUMENTACIÓN DEL ESTADO DE LA TÉCNICA Y JUSTIFICACIÓN DEL ACCESORIO:

Existen diversos tipos de accesorios que complementan de alguna manera las limitaciones del asiento de fábrica y son:

- Respaldo lumbar
- Protector de asiento ,capaz de enfundar y desenfundar, semi-acolchado
- Funda de bolas en madera
- Base ergonómica en espuma viscolástica
- Cojines calefactores o refrigerantes entre otros.

Pero ningún accesorio posee las características que presenta el diseño del presente trabajo.

Como no existe en el mercado un asiento suplementario con las características del presente trabajo, el estado de la técnica queda un tanto al descubierto y con ello se hará más hincapié en la justificación del accesorio.

### 4 DISEÑO DEL ASIENTO SUPLEMENTARIO Y CONJUNTO:

Con toda la información aportada anteriormente y partiendo de la necesidad de los conductores profesionales de una mayor comodidad en el puesto de trabajo de los conductores profesionales, se hace evidente que ***“un dispositivo es requerido para complementar las características de los asientos usados de los conductores profesionales de autobús para, de esta forma, dar mayor confort durante la jornada laboral y así evitar enfermedades relacionadas con los excesos de presión y sus picos en los músculos y la piel así como evitar las enfermedades derivadas de una mala postura a la hora de conducir”***.

El desarrollo de diseño del producto, según el inventor, partió con la idea de poner simplemente un protector de forma rectangular con cierto espesor acolchado. Pero se topó con el inconveniente de que a la hora de colocar el protector encima del asiento de autobús, aparecían pliegues por encima de las aristas del asiento de autobús. Con lo que la base para el diseño nació a partir del mismo diseño del asiento del vehículo, limitado a sus formas y tamaño.

Partiendo de un modelo inicial rectangular, con la parte inferior de las mismas dimensiones del asiento, para facilitar su acoplamiento, se fue desarrollando la forma de la base del asiento mediante ensayo prueba-error usando el sentido del tacto.

El material se fue moldeando con un cúter, quitando material en las zonas donde las partes en contacto, músculo, huesos y espuma donde sensorialmente se sentían los picos de presión, hasta obtener una base satisfactoria. Y a partir de una base estable se puede diseñar el respaldo y es en éste donde se hace más notorio el confort de los trabajadores, puesto que la espuma que se usa en todos los vehículos tanto industriales como particulares es común de aproximadamente  $60 \text{ kg/m}^3$  de densidad, por otro lado la espuma que se coloca en el respaldo del asiento portátil es viscolástica, con el fin de absorber las vibraciones y reducir los puntos de presión en la zona lumbar, aunque manteniendo siempre una adecuada postura.

Este primer prototipo fue dado a probar a cuarenta conductores de autobús con los siguientes resultados:

- A las personas de más de 1,90 cm y 100kg de peso, en total 4 personas, no les satisfizo el producto, no sintieron un gran cambio en cuanto a confort.
- A otro 10% no les gustó el producto, porque no lo sintieron cómodo o porque sencillamente no se acostumbraron a él.
- El otro 80% de conductores que se les dio a probar el modelo se sintieron más cómodos, les alivió tensiones en la espalda, columna y las piernas.

Por último detallar el cabecero, que en un principio no parecía necesario, pero con el uso los conductores notaron cierta incomodidad en el cuello, debido a que ya estaban acostumbrados a reposar la cabeza aunque fuera solo por unos segundos cada vez.

El diseño de este asiento está protegido con un modelo de utilidad, modelo similar a una patente, y tiene asignado el número de expediente U201400719 [1].

En la Figura 4.1 se muestra un gráfico del flujo de diseño del prototipo.

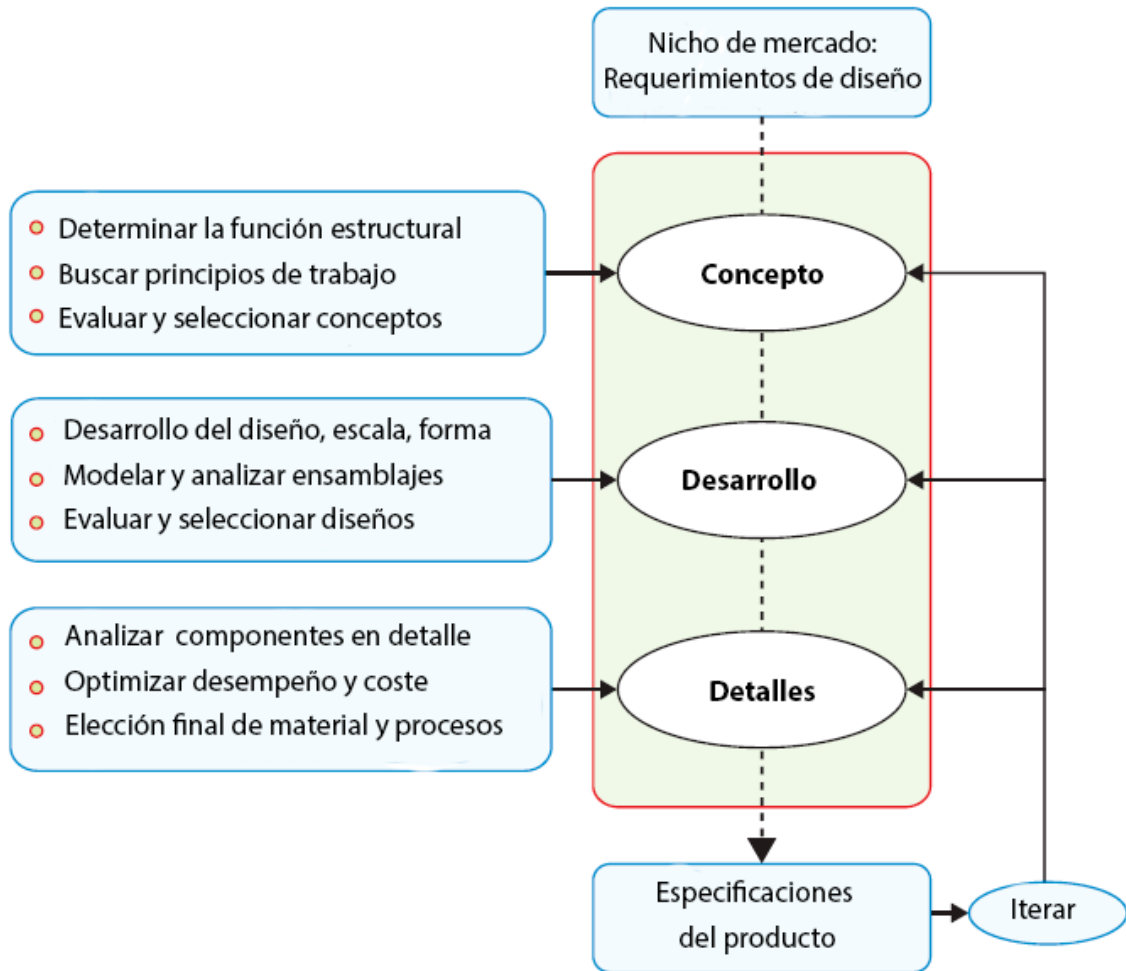


Figura 4.1 Gráfico del flujo de diseño. El diseño abarca desde la identificación de una necesidad de mercado, clarificada como un conjunto de requerimientos de diseño, a través de conceptos, desarrollo, y un análisis detallado hacia la especificación del producto (Ashby 2011) [2]

A partir del estudio de mercado donde se analizó los factores comunes que exigían los trabajadores, se obtuvo las propiedades necesarias para el diseño del ASIENTO PORTÁTIL PARA CONDUCTORES PROFESIONALES y son:

- Cómodo transporte
- Lavable
- Transpirable
- Ergonómico
- Protección de toda la superficie de contacto entre asiento y conductor
- Por último y el más importante que supliera las deficiencias por desgaste del asiento del vehículo, dando así más confort a la hora de aliviar las

tensiones sufridas en el cuerpo del conductor mientras éste cumple con su jornada laboral.

Partiendo de las propiedades antes detalladas, el primer paso fue diseñar la distribución de la superficie de contacto con el fin de plegarla sobre sí misma, obteniendo como resultado un asiento compuesto por tres elementos (base, respaldo y cabecero).

Para que el asiento fuera lavable tuvo que ser diseñado de tal modo que se pudiese desenfundar, puesto que uno de los requisitos más solicitados es suplir las deficiencias por desgaste del asiento del vehículo y allí es donde se ha prestado más atención.

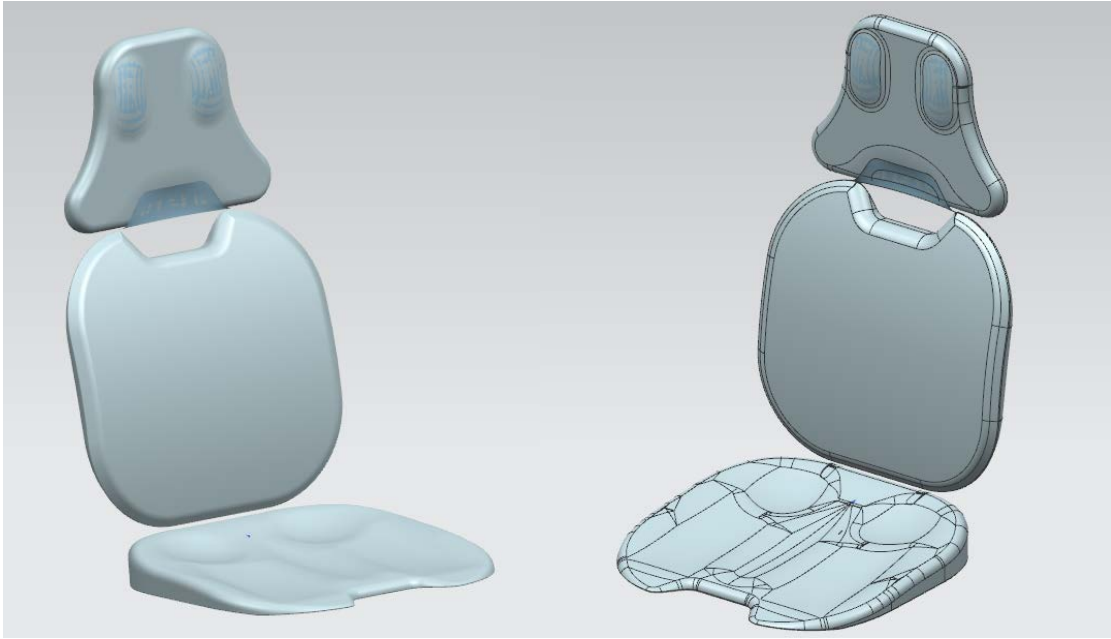
Las deficiencias por desgaste del asiento del vehículo pesado se acentúan en la espuma de poliuretano, llegando a un deterioro total en algunos casos. Por ello fue necesario diseñar espuma para la base, el respaldo y el cabecero del asiento portátil.

#### 4.1 PARTES DEL ASIENTO SUPLEMENTARIO:

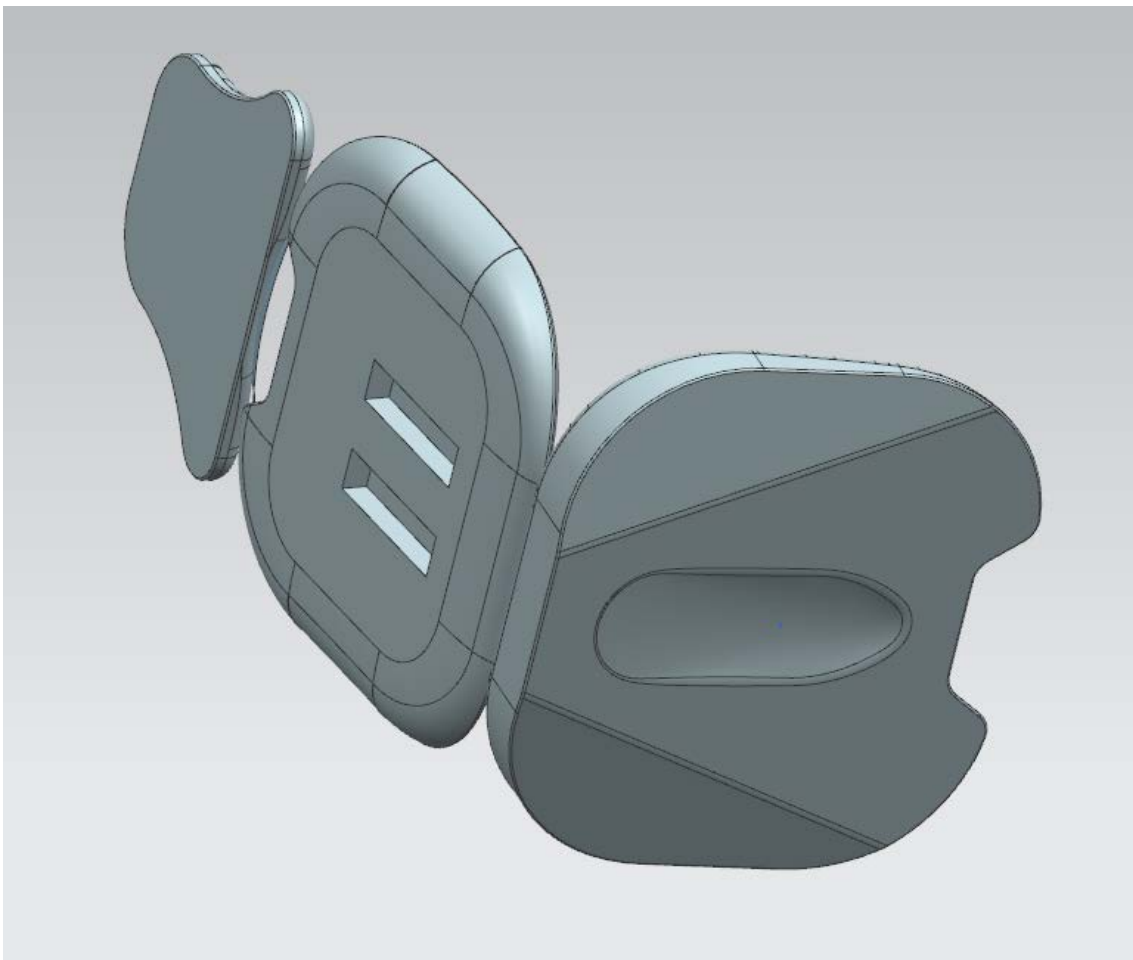
Cómo se ha comentado anteriormente, el asiento portátil está formado por una base, un respaldo y un cabecero. El montaje se hace de acuerdo a la Figura 4.2.

Las dimensiones del asiento suplementario están hechas para que el acoplamiento se ajuste a las dimensiones de un asiento de autobús profesional (ver Figura 4.3).

El objetivo de la invención es disminuir los picos de tensión producidos en la masa muscular del conductor, sobre todo en zonas específicas del cuerpo como son la zona de las tuberosidades isquiáticas y el coxis, como se verá en el apartado de estudios previos.



*Figura 4.2 Vista general del asiento portátil.*



*Figura 4.3 Vista inferior del asiento portátil.*

## 4.2 ELECCIÓN DEL MATERIAL:

El poliuretano es el material ampliamente usado por la industria del mueble y automoción para fabricar asientos y muebles. Este es el material usado para el asiento suplementario y las simulaciones.

En la Figura 4.4, cada línea vertical representa el rango de valores de E, módulo de Young, para cada material en particular. Sólo algunos materiales están etiquetados. Se puede obtener más información si el eje X representa otra propiedad del material, por ejemplo la densidad.

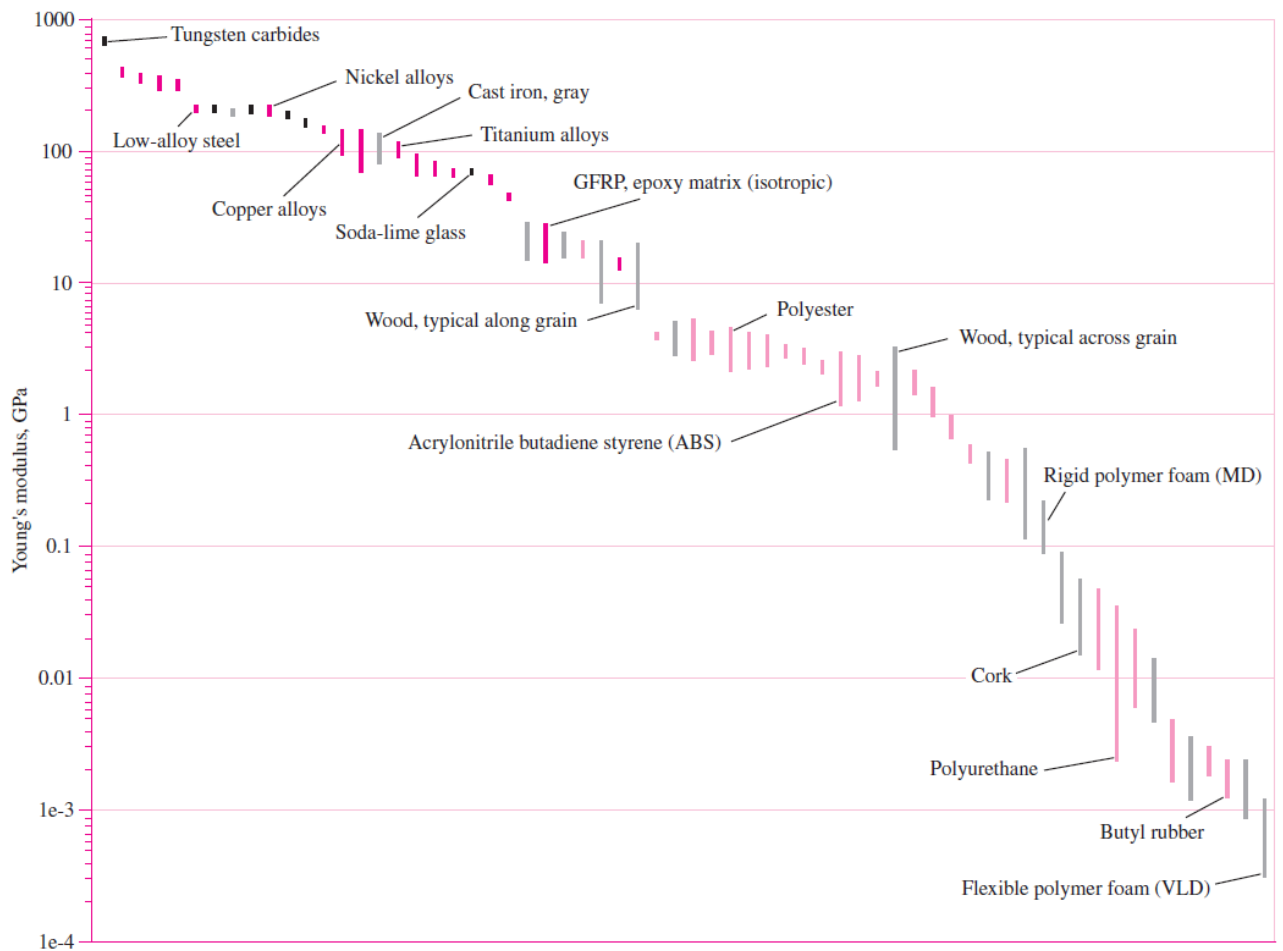


Figura 4.4 Módulo de Young  $E$  para varios materiales. (Ashby 2011) [2].

La Figura 4.5, denominada, gráfico de burbujas, representa al módulo de Young,  $E$ , frente a la densidad  $\rho$ . Los rangos de las líneas de cada propiedad del material son ahora mostrados en dos dimensiones formando elipses, o burbujas. Esta imagen es más útil que los gráficos de barras de estas dos propiedades por separado. Se puede ver también cómo la dureza y el peso de varios materiales están relacionados. El cociente entre el módulo de Young y la



densidad,  $E/\rho$ , es conocido como *módulo específico*, o *dureza específica*. Este cociente es de particular interés cuando se desea minimizar peso cuando la principal limitación de diseño es la deformación, dureza, o frecuencia natural, más que la resistencia. Los componentes fabricados con materiales con un módulo específico más alto tendrán una menor deformación, mayor dureza, y mayor frecuencia natural.

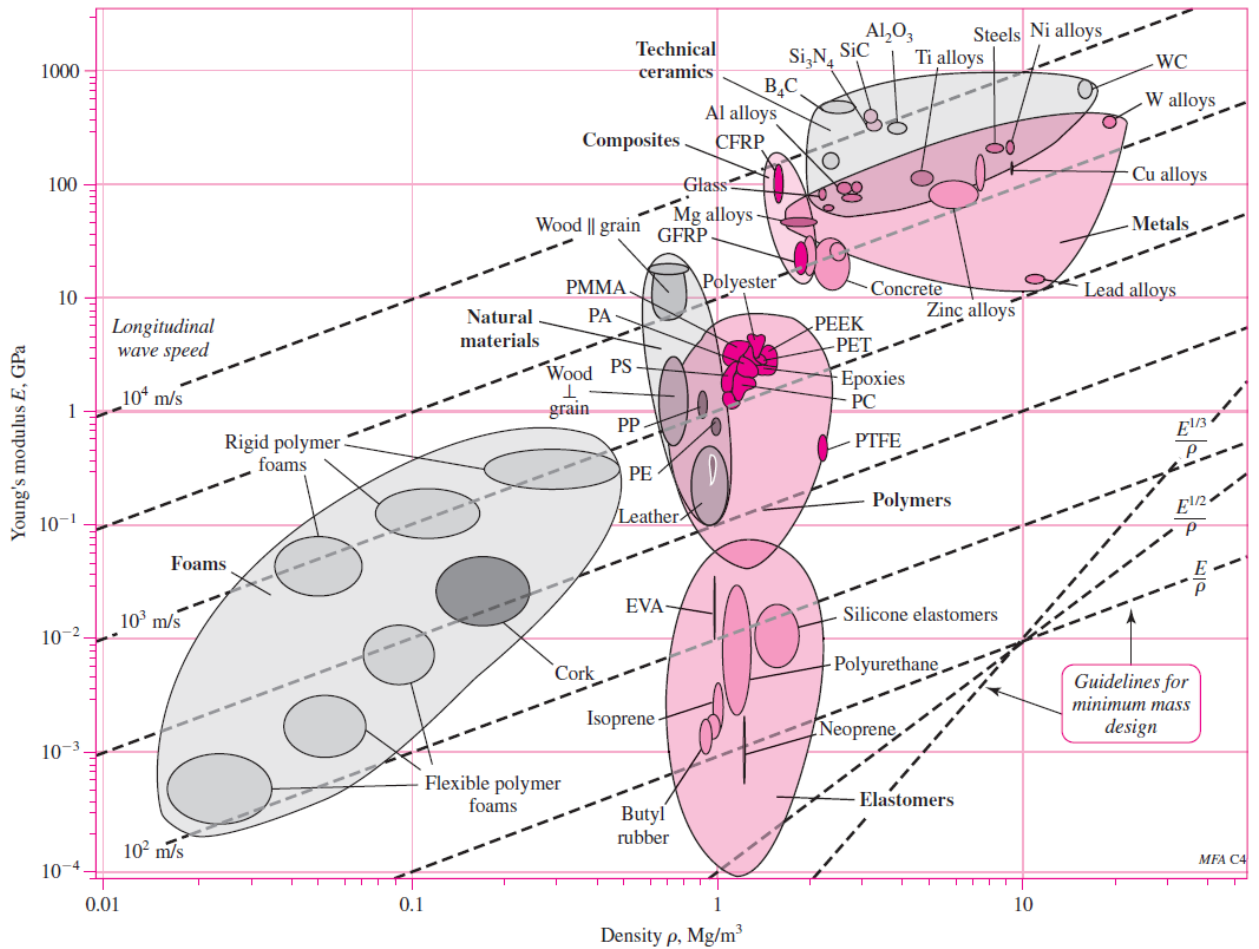


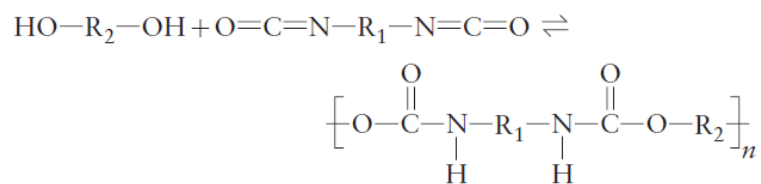
Figura 4.5 Módulo de Young,  $E$ , frente a la densidad para diversos materiales. (Ashby 2011). [2]

## 5 LA QUÍMICA DEL POLIURETANO:

Debido a que el material usado para el producto es un material poco estudiado, mucho menos estudiado que el acero, en las universidades, se va a proceder a dar información acerca del material a usar en el presente proyecto.

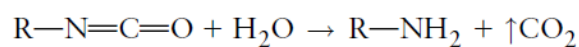
Esta sección considera la química del Poliuretano (PU), el proceso de formación de la espuma, la física detrás de las estructuras de espuma y las microestructuras típicas.

Los poliuretanos son una familia de polímeros en crecimiento producidos por una reacción química entre el diol y el disocianato.

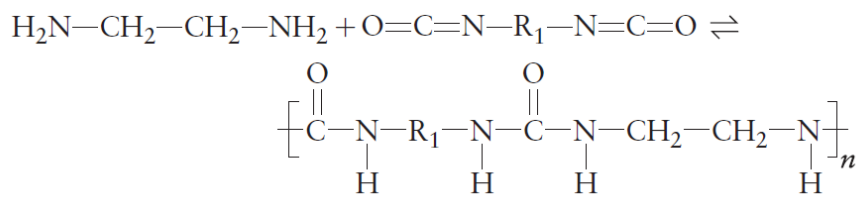


Lo que produce una cadena de uretano NH—Coo—, sin más productos secundarios. Un disocianato típico es el MDI (4,4 disocianato difenil metano), donde el grupo R<sub>1</sub> es φCH<sub>2</sub>φ, donde φ representa un anillo de benceno. Esto forma la parte rígida de la molécula de PU. En un diol típico, R<sub>2</sub> es un óxido de polietileno de bajo peso molecular (M=200); esto produce la parte flexible de la molécula de PU. Los componentes del polioli e disocianato varían para producir espumas con una amplia gama de propiedades.

El gas CO<sub>2</sub> es generado por la reacción del 1-4% contenido en agua con el monómero de disocianato



Los grupos amida, formados a ambos lados del monómero, reaccionan con el disocianato posterior para formar cadenas de urea NH—CO—NH



Y así, el copolímero contiene principalmente PU con algunos bloques de poliurea, los cuales son separados luego en el proceso de fabricación.

## 6 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PU:

### 6.1 ESPUMA EN PLANCHA DE LÍNEA CONTINUA:

En el proceso de plancha continua, la espuma tiene restringido el crecimiento lateral debido a la presencia de papel encerado a ambos lados de la correa, y por el material de detrás y en frente de él sobre la correa. Ver vídeo en referencia [3].

El proceso implica la aplicación de químicos líquidos sobre una cinta de transporte con los lados restringidos, y luego se espera a que los químicos se expandan hacia una espuma de plancha continua. Luego la plancha es cortada en la forma que corresponda a su aplicación requerida en el mercado. La espuma, producto de este proceso es usada para la industria colchonera y de muebles de espuma.

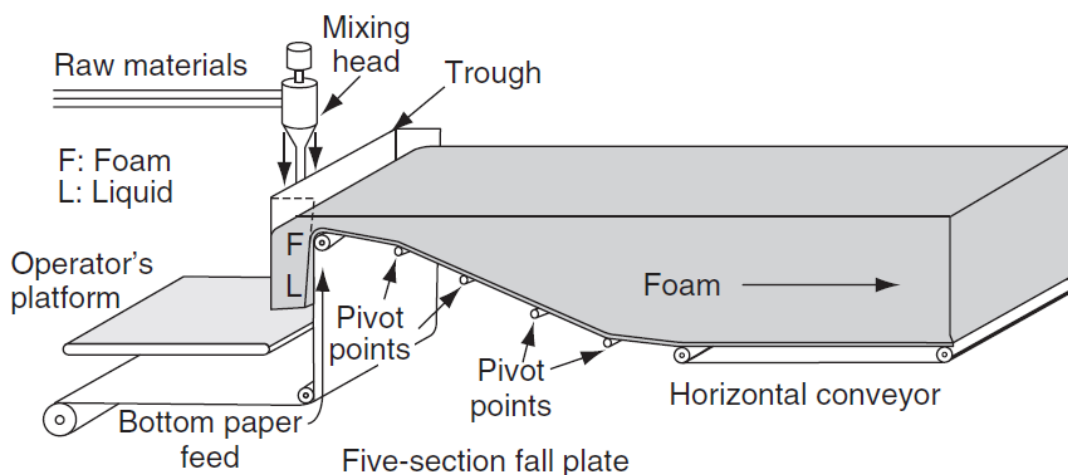


Figura 6.1: Proceso de línea continua en la cual la mezcla de poliol e isocianato son aplicadas sobre una cinta transportadora móvil.

Las espumas de PU están caracterizadas por el valor del denominado IFD (*Indentation Force Deflection*), el cual está relacionado con el módulo de Young

de la espuma. Este valor está controlado por el agua y el contenido cloruro de metileno que actúa como agente espumante. Así mismo, diferentes densidades pueden tener el mismo valor de IFD. Un incremento en el contenido de agua crea más poliúrea, segmentos duros, que refuerzan la matriz de la goma e incrementa su módulo. Por el contrario, un incremento en el contenido de cloruro de metileno reduce la densidad de la espuma, y a su vez reduce el valor de IFD. El proceso de plancha continua puede usar polioles de masa molecular media relativamente baja, su baja viscosidad permite a las células abrirse al final de la reacción, si se usan los tenso-activos adecuados. Para ver un vídeo del test para obtener los valores del IFD, ver la referencia [4]:

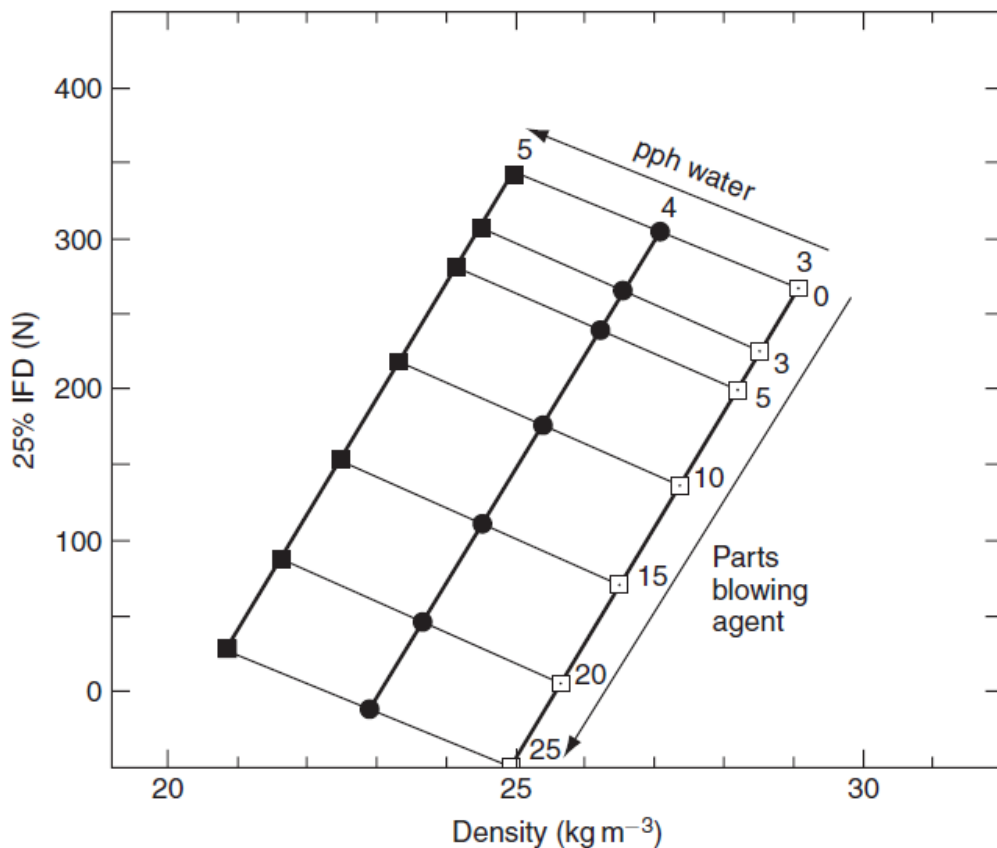


Figura 6.2: Control de densidad en la fabricación de espuma en línea continua dado por el contenido en agua y contenido de cloruro de metileno como agente tenso activo (surfactante). (Mills 2007) [5]

En la Figura 6.2 se muestra el control de densidad en la fabricación de espuma en línea continua dado por el contenido en agua y contenido de cloruro de metileno como agente tenso activo (surfactante).

El fenómeno final de la producción de espuma de PU es la apertura de las celdas; los tenso-activos de silicona en la formulación del PU controlan la cantidad de celdas abiertas y el tamaño de las celdas medio. Para hacer espumas reticuladas, una mezcla de hidrógeno y aire es difundido hacia las celdas, luego explotan para eliminar las caras, dejando sólo los bordes de la celda.

## 6.2 PRODUCCIÓN DE ESPUMA EN BLOQUE:

El proceso comienza con la colocación de cuatro planchas formando un espacio cerrado en donde la mezcla de productos químicos, polioliol e isocianato, es depositada. Una vez hecho esto, se espera a que la mezcla actúe químicamente y alcance su máxima altura a la vez que expulsa los gases sobrantes: CO<sub>2</sub>, vapor de agua, etc. El proceso de producción en bloque se parece mucho al de plancha de línea continua, la principal diferencia es la naturaleza discontinua del bloque. (Vídeo de producción de espuma en bloque: referencia [6] ). La *Figura 6.3* muestra el producto final de este tipo de producción de espuma.



*Figura 6.3: Producto final de espuma en bloque.*

### 6.3 FABRICACIÓN DE ESPUMA POR MOLDEO.

El proceso de fabricación de espuma por moldeo consiste en el llenado de moldes con químicos de poliuretano líquido y luego esperar a que estos químicos reaccionen y llenen por completo la forma del molde. El moldeo provee una libertad para diseños ilimitada, alta calidad de acabado y llenado y permite la integración con partes que actúan como soporte en el caso de asientos y muebles.

Debido a que la polimerización ocurre en moldes cerrados, a una velocidad mayor que en el proceso de fabricación por bloque, los asientos de molde contienen una proporción significativa de celdas cerradas. Después de este proceso de desmoldado, se golpea mecánicamente el producto para romper las caras de las celdas para prevenir una contracción dimensional posterior.

### 6.4 PRINCIPALES PROCESOS CON INFLUENCIA EN LAS ESPUMAS:

Los principales procesos que tiene influencia en las espumas de PU son:

1.- La tensión superficial determina la forma de la célula. Las células pueden ser elongadas si la espuma se eleva, tal y como sucede en el proceso de fabricación en línea continua. (Figura 6.1 de la página 15)

2.- Los químicos usados determinan la microestructura del PU.

3.- Los tenso-activos de silicona controlan la apertura de caras de las células; pueden variar desde cero hasta 100%, pasando por todos los casos intermedios.

La geometría de las células de espuma es cuantificada para asistir el modelado de las propiedades mecánicas. La descripción estadística es necesario debido a la variabilidad en la estructura de la espuma.



## 7 INTRODUCCIÓN A LA MICROESTRUCTURA DE LOS POLÍMEROS DE ESPUMA:

La Figura 7.1 compara las microestructuras típicas de espumas de células abiertas y cerradas, vistas desde un microscopio electrónico “*scanning electron microscope*” (SEM).

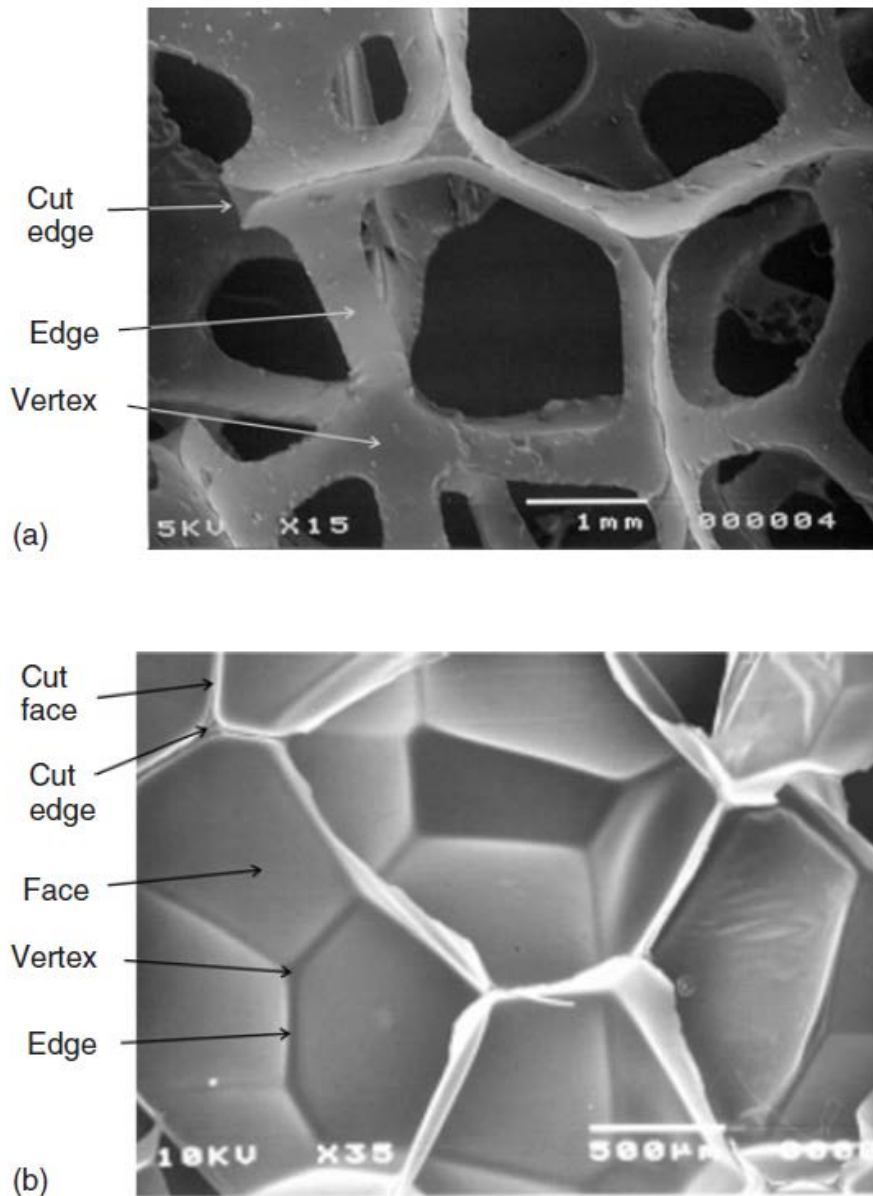


Figura 7.1: Fotografía SEM (escaneo de un microscopio electrónico) de (a) una espuma de PU de célula abierta de una densidad de  $28 \text{ kgm}^{-3}$ ; y (b) una espuma de polietileno de baja densidad,  $24 \text{ kgm}^{-3}$  [5].

El escáner permite apreciar completamente el interior de las células de una espuma de poliuretano de célula abierta, material con el que se va a trabajar. El aire puede pasar libremente entre las células de tales espumas. Aunque en la Figura 7.1a todas las caras de las células están abiertas, sólo una pequeña fracción de estas caras necesita estar abiertas para crear un pasadizo de aire continuo.

### 7.1 DENSIDAD RELATIVA:

La *densidad relativa*  $R$  de una espuma está definida por

$$R = \frac{\rho_f}{\rho_p} \quad (7.1)$$

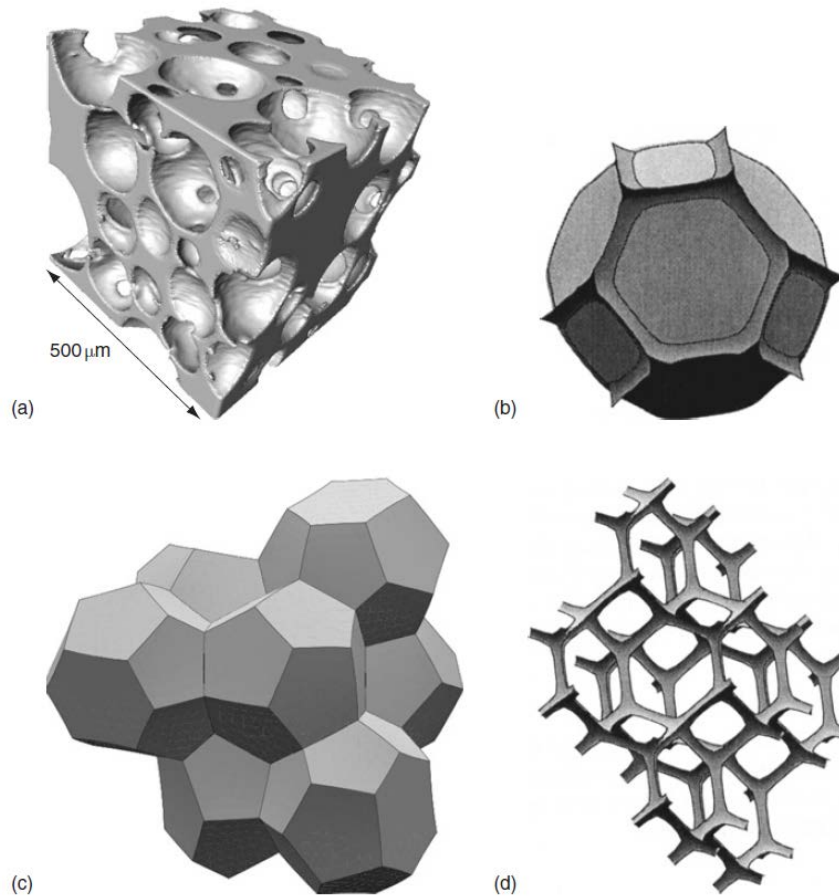
Donde  $\rho_f$  es la densidad de la espuma y  $\rho_p$  es la densidad del polímero, el cual está generalmente en un rango de entre 900-1200 kg/m<sup>3</sup>. Cuando no hay otras fases (como fibra de vidrio o aditivos retardantes antiincendios) presentes,  $R$  es la fracción de volumen del polímero dentro de la espuma. Las espumas de baja densidad tiene  $R < 0.1$ , objetos de estudio aquí.

La Figura 7.2 muestra las etapas de desarrollo de las espumas:

- a) Se forman unas burbujas esféricas asiladas que crecen dentro del polímero líquido. Estas esferas tienen un área de superficie mínima para un volumen dado, tal que la energía superficial de la interface gas-líquido es minimizada.
- b) Cuando las burbujas contactan entre sí, su forma se distorsiona. Las burbujas de similar tamaño apiladas en una matriz cúbica centrada en las caras, tocarían cuando  $R = 0.26$ . En este estado, la espuma de células cerradas aún permanece “húmeda” y hay caras planas entre las células.

Las superficies curvas poseen líquido en los bordes de las células y los vértices. El término “húmeda”, implica un contenido significativo de agua. Si la espuma se eleva, mientras tiene restringido el crecimiento a lo ancho, la forma de las células tiene a ser anisotrópica.

- c) En el límite donde la densidad relativa  $R \rightarrow 0$ , la espuma de célula cerrada se “seca”. Este estado nunca es alcanzado en las espumas poliméricas, pero la idealización es útil para fines de diseño de modelado. Cuando el agua es drenada por gravedad, las caras de las células se estabilizan debido a las moléculas surfactantes, y los bordes son del mismo ancho que las caras.
- d) Cuando las caras en una espuma de células cerradas colapsa, una espuma de células abiertas es formada. La polimerización y el entrecruzamiento de las cadenas del PU estabiliza los bordes y los vértices.



*Figura 7.2: Estadios en el desarrollo de la espuma: (a) burbujas esféricas aisladas, (b) una célula en una espuma húmeda, (c) una espuma tipo Weaire–Phelan y (d) una espuma de células abiertas (Mills N. 2007) [5]*

## 7.2 ANISOTROPÍA:

A menos que las espumas fuesen hechas en condiciones que permitan esencialmente la libre expansión en las tres dimensiones, éstas pueden exhibir una anisotropía estructural, y de sus propiedades, frecuentemente en el caso de espumas producidas por un proceso de extrusión, donde las células tienen alguna distorsión lateral. Esto tiene como resultado diferencias en sus propiedades físicas medidas en las direcciones a lo largo y ancho. Los fabricantes a menudo citan propiedades medidas en estas dos direcciones.

## 8 ENSAYOS MECÁNICOS SIMPLES:

### 8.1 INTRODUCCIÓN:

Aunque los ensayos de tracción son comunes para otros materiales, estos raramente son usados para espumas. Esto es debido parcialmente a la dificultad de sujetar las espumas a la hora de aplicarle cargas a tracción, y parcialmente debido a que muy pocas aplicaciones soportan cargas de tracción. Por el contrario, los esfuerzos de compresión en espumas son comunes, por ejemplo en el caso de las almohadas de espuma, este es el caso del producto objeto de estudio. El esfuerzo cortante aparece cuando la fuerza aplicada tiene componente en dirección del plano superficial del bloque de espuma. La flexión y la torsión también se dan en productos de espuma.

### 8.2 TIPOS DE CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN Y PARÁMETROS DE DISTINTOS MATERIALES:

Si los resultados de los ensayos mecánicos son expresados en términos de tensión y deformación, los resultados deberían ser independientes al tamaño y la forma de la muestra. Sin embargo, las formas de la muestra de compresión y cizalladura pueden afectar el resultado. A menos que sean referidos de otra manera, esto es, en términos de tensión ingenieril, definida en base a las dimensiones originales de la espuma, y deformación ingenieril, definido como el cambio relativo en longitud.

Los datos de tensión-deformación son usados para el diseño. Estos datos, extraídos de una variedad de tipos de ensayos, son necesarios para calcular parámetros del material de espuma de estos modelos en un análisis de elementos finitos (MEF). Es útil clasificar las respuestas de las curvas tensión-deformación como uno de los siguientes tipos.

### 8.2.1 Linealmente elástico e isotrópico:

Una respuesta elástica significa que la relación tensión-deformación es la misma si la espuma fuese cargada, se mantuviese a una tensión fija, o descargada. Una relación lineal elástica a compresión o tracción  $\sigma_x$ , aplicada a lo largo del eje x, y su correspondiente deformación puede ser descrita por

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \quad (8.1)$$

Donde la constante  $E$  es el módulo de Young. En tal ensayo a compresión o tensión, hay deformaciones en las direcciones de los ejes  $y$  y  $z$ , dadas por:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = \nu\varepsilon_x \quad (8.2)$$

Donde  $\nu$  es el coeficiente de Poisson. Las propiedades de una espuma isotrópica son las mismas en todas las direcciones, hay dos constantes elásticas independientes. Consecuentemente, si el módulo de Young y el coeficiente de Poisson son medidos, el módulo de cortadura  $G$  puede ser calculado usando:

$$G = 2E(1 + \nu) \quad (8.3)$$

La idealización elástica lineal es útil para espumas con deformaciones menores a un pequeño porcentaje dado, pero no para grandes deformaciones.

### 8.2.2 Elásticamente no lineal e isotrópica:

Las relaciones tensión-deformación, para poliuretanos flexibles son usualmente convexas cuando la tensión aumenta (y a compresión, si la tensión de compresión y la deformación son tomadas como positivas). La no linealidad es parcialmente debida a cambios en la geometría micro estructural de la espuma a grandes deformaciones. Estas espumas caen en esta categoría de materiales no lineales elásticamente, como materiales biológicos y gomas. Estos materiales

también son llamados materiales híper-elásticos, lo que significa que la relación tensión deformación puede ser calculada como una función de su energía de deformación, lo cual se usará en este proyecto.

### 8.2.3 Anisotrópico y elástico:

Los procesos de fabricación de la espuma a menudo producen células elongadas. Por esta razón, la respuesta tensión-deformación de la espuma es una función de la dirección de la tensión aplicada relativa al eje de la espuma (dirección de extrusión, dirección de crecimiento, etc.). Una gran deformación aplicada a una espuma inicialmente isotrópica podría causar también anisotropía mecánica; las células pueden estar aplanándose hacia un plano en particular, lo cual causaría que la espuma fuese anisotrópica. Tales materiales, por tanto, tienen diferentes valores de las constantes elásticas para las diferentes direcciones.

### 8.2.4 Elasto-plásticos:

Si la tensión aplicada supera un cierto límite, el límite elástico, algo de la deformación será permanente cuando la muestra se descargue. La idealización funciona muy bien para metales, pero con mucho menos exactitud para espumas poliméricas, porque la lentitud de la recuperación viscoelástica puede causar deformaciones que parezcan permanentes.

### 8.2.5 Materiales visco-elásticos:

Todas las espumas poliméricas son viscoelásticas a cierto grado. Por ejemplo, las espumas de PU flexibles muestran una histéresis cuando éstas son descargadas

(los datos caen por debajo de los datos de carga, y hay energía que es absorbida en el ciclo carga-descarga). El término viscoelástico implica una combinación de una respuesta viscosa Newtoniana, donde la tensión a tracción  $\sigma$  es proporcional a la deformación a tracción en un ratio  $d\varepsilon/dt$  y la constante  $\eta$  es la constante de viscosidad:

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (8.4)$$

Y la ecuación (8.1) de respuesta elástica. La respuesta de los modelos viscoelásticos lineales puede ser descrita usando ecuaciones diferenciales lineales, con analogías mecánicas de muelles elásticos y amortiguador.

El modelo mecánico de Voigt, a menudo usado para deformación con fluencia lenta (creep), muestra simbólicamente como un muelle y un amortiguador en paralelo. La conexión en paralelo implica que la deformación es la misma en el muelle que en el amortiguador. Para un dispositivo mecánico, la ecuación entre la fuerza total  $F$  y la deformación  $x$  es

$$F = kx + n \frac{dx}{dt} \quad (8.5)$$

Donde  $k$  es la constante de rigidez del muelle y  $n$  la constante del muelle. Si el dispositivo mecánico estuviera escondido en una “caja negra”, la fuerza aplicada, aplicada sobre un área de  $1 \text{ m}^2$ , puede ser reemplazado por la tensión, y la extensión, dada sobre una longitud de  $1 \text{ m}$ , puede ser reemplazada por la deformación  $\varepsilon$ . En este caso es necesario renombrar las dos constantes como constantes del material;  $E$  es el módulo de Young y  $\eta$  es la viscosidad. Entonces el equivalente visco-elástico de la ecuación (8.5):

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (8.6)$$



La ecuación constitutiva es para materiales viscoelásticos lineales, dado que sólo contiene variables de primer orden. Esta sería una ecuación visco-elástica no lineal si contiene variables no integrales o de grado mayor. La respuesta de polímeros tales como el PU a grandes deformaciones es viscoelástica no lineal, así como la respuesta de las espumas hechas de estos polímeros.

### 8.3 FENÓMENOS VISCOELÁSTICOS:

Los materiales viscoelásticos exhiben fenómenos tales como:

- Deformación por fluencia lenta, cuando un esfuerzo constante es aplicado a partir del tiempo cero, y la deformación se incrementa con el tiempo.
- Relajación del esfuerzo (stress relaxation), cuando una deformación constante es aplicada, en el tiempo cero, y la tensión disminuye con el tiempo.
- Un retardo de fase (phase lag) entre la tensión y la respuesta del material es sometido a unos pequeños esfuerzos que varían sinusoidalmente en el tiempo  $t$

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (8.7)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia angular y  $\delta$  es el ángulo de desfase. La deformación debida a la tensión aplicada varía mediante la fórmula:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (8.8)$$

Cuando la deformación alcanza su valor máximo  $\varepsilon_0$ , la tensión es  $\sigma_0 \cos \delta$

. En un ciclo completo:

$$\frac{\text{energía disipada por ciclo}}{\text{energía elástica máxima almacenada}} = 2\pi \tan \delta$$

### 8.3.1 Los modelos viscoelásticos:

Las teorías viscoelásticas son modelos matemáticos (Ferry, 1970) [7] para el comportamiento de materiales. Los parámetros usados no tienen relación con la microestructura del polímero o con la estructura de la espuma.

En la deformación por fluencia lenta, una tensión constante  $\sigma$ , normalmente aplicada en el tiempo cero, causa una deformación dependiente del tiempo  $\varepsilon(t)$  donde el tiempo  $t > 9$  segundos. En este caso, se trata de cargas a compresión para espumas.

La capacitancia de fluencia lenta, *creep compliance*,  $J$  es definida por:

$$J(\sigma, t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} \quad (8.9)$$

En general  $J$  es una función de ambos, de la tensión y el tiempo, y la respuesta del material describe una viscoelasticidad no lineal.

A menudo es más fácil medir la función  $J(t)$  que el módulo de relajación  $E(t)$ , porque es más fácil aplicar una carga constante que una deformación constante en una fracción de un segundo. La teoría de la viscoelasticidad lineal puede relacionar  $E(t)$  con  $J(t)$ . A menos que el polímero esté cerca de una temperatura de transición, la capacitancia de fluencia lenta es una función que varía lentamente con el tiempo, con lo que

$$J(t) \cong \frac{1}{E(t)} \quad (8.10)$$

Los datos de la relajación del esfuerzo pueden ser modelados por un conjunto de elementos de la visco-elasticidad de Maxwell (un muelle representando a un módulo de Young  $E_i$ , en serie con un amortiguador representando la viscosidad

$\eta_i$ ) conectados en paralelo, más un elemento elástico en solitario  $E_\infty$  para la respuesta en un tiempo prolongado. El modelo tiene un módulo de relajación

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i \exp(-t/\tau_i) \quad (8.11)$$

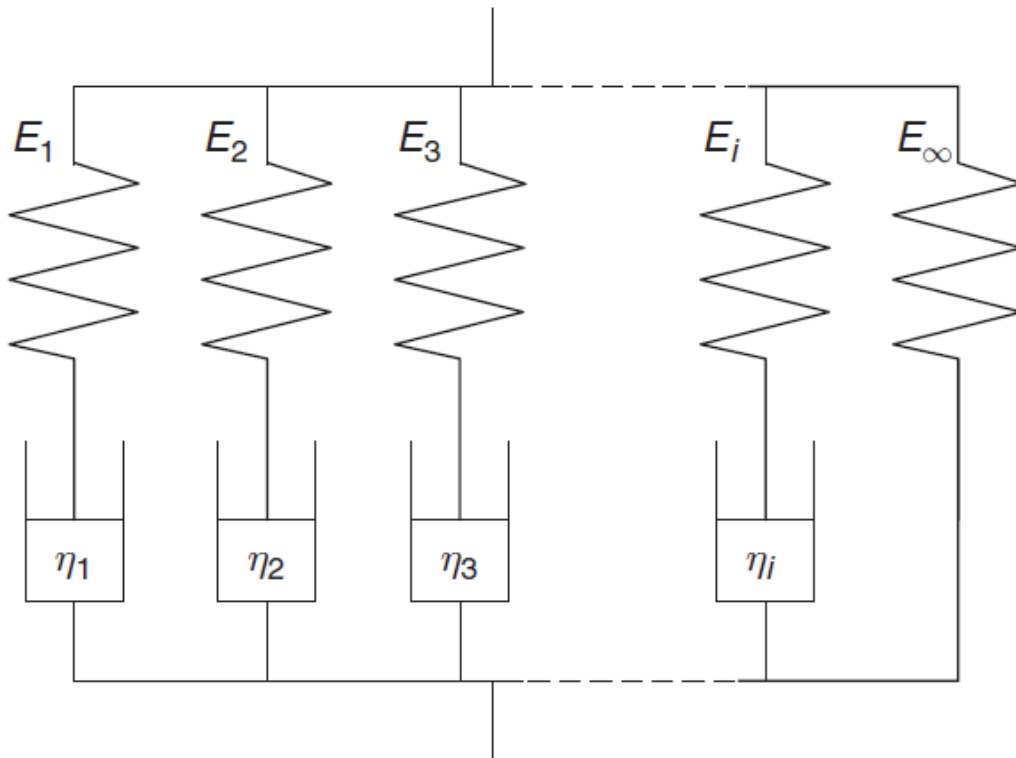


Figura 8.1: elementos de Maxwell en paralelo con un muelle unitario usado para modelos de relajación del esfuerzo.

Donde  $\tau_i$  son los tiempos de relajación, definidos como  $\eta_i/E_i$ . La fórmula matemática de la ecuación (8.11) es una serie de Prony. Las constantes pueden obtenerse a través de los datos de la relajación del esfuerzo ajustándolos a su curva. El modelo puede ser usado para predecir la respuesta del material a una deformación por fluencia lenta, a una deformación constante en el tiempo, a una deformación que varíe sinusoidalmente, o a cualquier otra historia de deformación.

### 8.3.2 Ejemplo de datos de visco-elasticidad en poliuretano sólido:

Para modelos de espumas en deformación por fluencia lenta, se requieren los datos visco-elásticos para caracterizar la microestructura de los polímeros tal y como están en las espumas. Puede resultar difícil obtener estos datos debido a la orientación termoplástica de las caras de las células, o la “cristalinidad” de una espuma de PU, los cuales a menudo difieren de los datos en las muestras sólidas. Debido a que las espumas de PU no pueden ser devueltas al estado sólido, y hasta que estos datos estén disponibles para elementos de espuma, es necesario usar los datos relacionados con los PU sólidos.

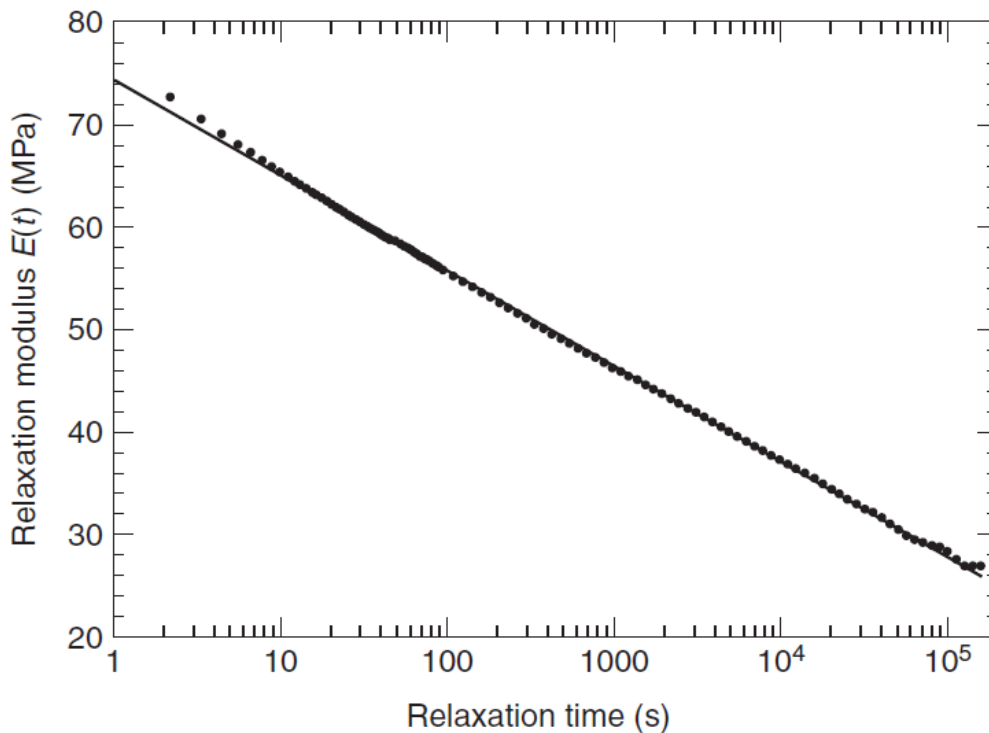


Figura 8.2: Datos de relajación del esfuerzo para un sólido de PU, moldeado a partir de espuma tipo Bulpren, para una deformación inicial del 0,89% (Zhu y Mills, 1999)

Zhu y Mills (1999), [8], hicieron mediciones de relajación del esfuerzo en un cilindro sólido de PU, moldeado desde una espuma con las cadenas ligeramente cruzadas de PU de alta densidad. La muestra fue comprimida a una deformación

fija en 8 s, luego la tensión fue monitorizada por los siguientes 5000 s, durante este tiempo la tensión cayó cerca de un 25%. El módulo de relajación  $E(t)$ , cuando fue comparado con el  $\log t$ , se asemejaba a una línea recta (Figura 8.2). Los datos pueden aproximarse a la ecuación (8.11), usando los tiempos de relajación de 0,1; 1; 10;...; 105s con módulos de  $E_1=5$ ;  $E_2=E_3=6$ ;  $E_4=E_5=7$ ;  $E_6=E_7=9,3$ Mpa, además de  $E_\infty = 20$ Mpa. En el tiempo cero, la suma de los módulos es  $E(0) = 102,4$  Mpa. Cuando la relajación del esfuerzo fue llevada a un rango de deformación inicial por encima de 11%, y el módulo de relajación a los 100 s  $E(100)$  fue dibujada junto con la deformación, el comportamiento no lineal fue descrito por

$$E(100) = 64,05 - 3,68\varepsilon + 0,125\varepsilon^2 \quad (8.12)$$

Cuando  $\varepsilon$  es la deformación y el módulo está expresado en MPa.

	<b>T<sub>i</sub>(S)</b>	<b>E<sub>i</sub>(MPA)</b>
<b>1</b>	0,1	5
<b>2</b>	1	6
<b>3</b>	10	6
<b>4</b>	100	7
<b>5</b>	1000	7
<b>6</b>	10000	9,3
<b>7</b>	100000	9,3

Tabla 8.1: Series de Prony para un cilindro sólido de PU. Donde  $\tau_i$  son los tiempos de relajación, y  $E_i$  son los módulos de Young para el tiempo  $i$ .

## 8.4 TIPOS DE ENSAYOS:

A continuación se van a explicar los distintos tipos de ensayos aplicados a los materiales de espuma:

### 8.4.1 Ensayo de compresión uniaxial:

Se trata de aplicar a la muestra una fuerza de compresión y medir la deformación del material.

Los resultados de la relación tensión-deformación en un ensayo de compresión pueden depender de los siguientes factores:

#### *8.4.1.1 Tamaño y forma de la muestra:*

El coeficiente de Poisson en la mayoría de espumas es aproximadamente cero (Mills 2007) [5], lo que significa que no hay apenas expansión lateral de la espuma en un test a compresión. Por tanto, no es necesario considerar el efecto de la fricción, en la interface metal/espuma, sobre las tensiones en la muestra. Este es el caso del Poliuretano por ejemplo, dado que tiene sus células abiertas. En contraposición de lo que pasa por ejemplo en el caso de la espuma de células cerradas Cloruro de Polivinilo (PVC), cuyo coeficiente de Poisson es alto y cuya fricción causa una distribución de presiones no uniforme a lo largo de las caras que soportan la carga. Esto no ocurre en el caso del material aplicado al producto de estudio. La Figura 8.3 muestra este fenómeno para una muestra cilíndrica de altura inicial igual a su diámetro, con un coeficiente de fricción de 0.7. Los lados de la muestra sobresalen a media altura, y hay una distribución de tensiones no uniforme, con 300 KPa de tensión en la ubicación de la esquina original de la muestra. Sin embargo es raro considerar los efectos de la fricción en los ensayos de espumas, no hay estudios sobre el efecto del uso de capas de baja fricción en los interfaces que soportan las cargas.

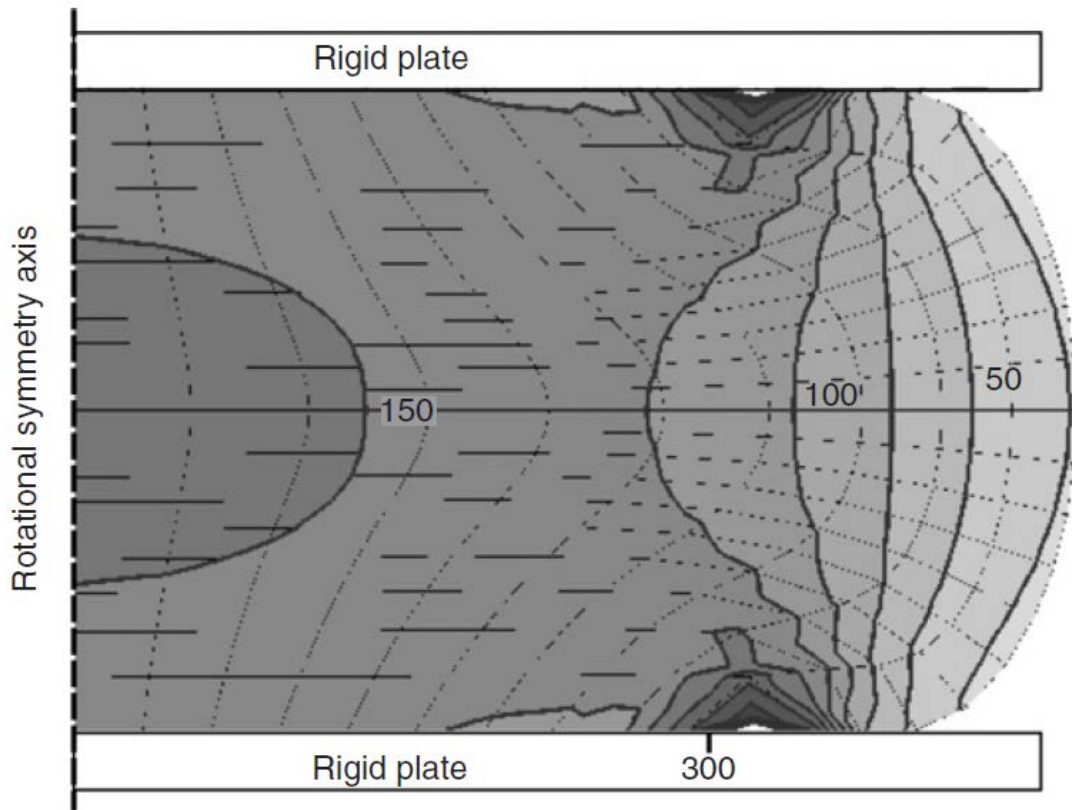


Figura 8.3 MEF de una espuma flexible de células cerradas, con contornos de tensión de compresión vertical (KPa), con una deformación media del 47% (Mills).

Si la muestra de espuma hubiera sido más alta, los efectos de la fricción en las esquinas hubieran sido menores. Sin embargo, los ensayos de compresión deberían ser llevados a cabo sobre muestras que se asemejen a un cubo, alto y ancho similares, para evitar el riesgo de que aparezca el efecto de pandeo.

El efecto del tamaño ocurre si las dimensiones de la muestra no exceden en veinte veces el tamaño de la célula.

#### 8.4.1.2 Efectos dinámicos.

Si una espuma de células abiertas es sometida a compresión a unas velocidades de impacto considerables, el flujo de aire podría contribuir a la tensión total. Este fenómeno es sólo significativo para muestras de lado  $> 0.2$  m, a impactos a

una velocidad mayor que  $5\text{ms}^{-1}$ . En el caso del asiento suplementario al asiento de un autobús, esto no ocurre, con lo que se desprecia, por este motivo, el efecto del aire, debido a que, al ser una espuma de células abiertas, el aire se desplaza libremente sin ningún obstáculo hasta que alcanza el equilibrio de tensiones.

#### *8.4.1.3 Curva Tensión-deformación en una espuma de PU:*

Todas las espumas con células abiertas muestran a compresión una curva tensión-deformación (Figura 8.4), la cual puede ser estudiada separadamente en tres regiones:

- Región 1 – comportamiento lineal “de Hook”)
- Región 2 – meseta de colapso
- Región 3 – densificación.

En la región 1, el comportamiento elástico lineal es controlado por la flexión de los bordes, mal llamados columnas dado que no soportan ningún esfuerzo axial, de las células. En la región 2, las células colapsan a través del pandeo y deformación de los bordes de las células. En la región 3, ocurre la densificación. Conforme aumenta la densidad de la espuma, el módulo de Young en la región 1 se incrementa, el esfuerzo en la meseta se incrementa, y la deformación, a partir de la cual la densificación empieza, se reduce.

Cuando existen grandes deformaciones de compresión, la curva, tensión-deformación se incrementa agudamente debido a la densificación, y tiende a hacer una pendiente límite (considerablemente más alta que el módulo inicial) donde tiende a llegar a una deformación límite máxima. Este esfuerzo es mucho menor del que pudiera ser calculado asumiendo que éste fuera el punto en el que todos los poros del material hubieran sido eliminados. Conforme los bordes que forman el entramado de las células se juntaran todas dando lugar a alguna deformación mucho menor.



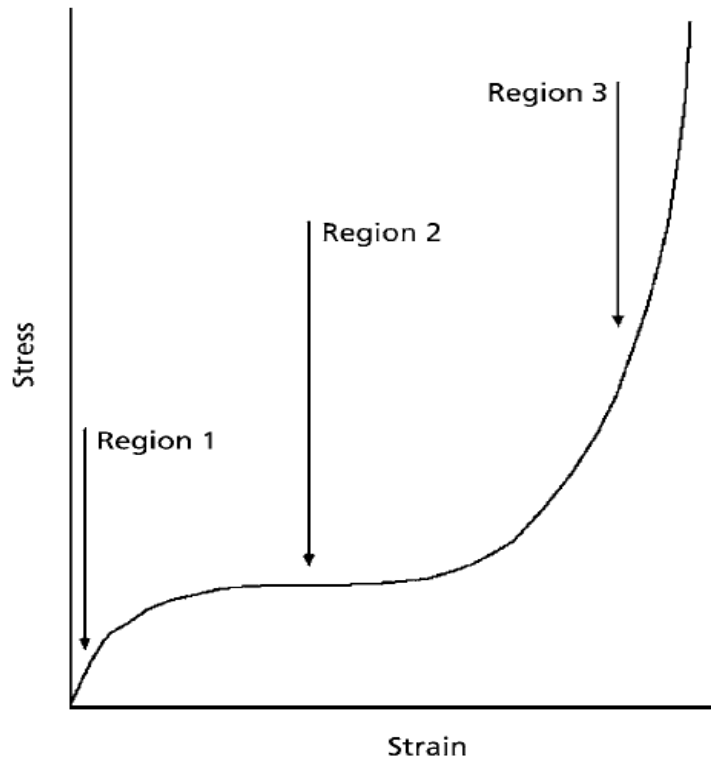


Figura 8.4: Curva tensión-deformación de compresión esquemática para una espuma (Eaves, 2004) [9].

Usando estructuras celulares idealizadas, se han derivado ecuaciones que relacionan las propiedades de la espuma con su estructura, sus propiedades poliméricas de la matriz y la densidad relativa de la espuma. Estas ecuaciones tienen en cuenta el módulo de elasticidad a compresión inicial, el módulo de cortadura, el esfuerzo elástico de colapso (en la meseta del gráfico), el coeficiente de Poisson (el efecto de deformación negativo entre el esfuerzo axial y deformación lateral) todos ellos han sido considerados. Sin embargo, a efectos prácticos y debido a que en muchas espumas las propiedades iniciales de los polímeros son modificadas por reacciones durante el proceso de manufactura de las espumas tales como el entrecruzamiento de las cadenas de polímero, las propiedades de las espumas se miden directamente mediante ensayos y se proporcionan por los fabricantes mediante tablas o figuras.

En la hoja de especificaciones, proporcionada por una empresa de fabricación de espumas de Madrid, de una espuma de  $60\text{Kg/m}^3$  de densidad sólo aparecen tres puntos (Tabla 8.2).

<b>Dureza a compresión (DIN 53577)</b>	
<i>Deformación (%)</i>	<i>Tensión (KPa.)</i>
25	4.0 + 0.5
40	7.0 + 1
65	12 + 2

*Tabla 8.2 Especificaciones de la dureza a compresión de una espuma de  $60\text{Kg/m}^3$  de densidad de una empresa de fabricación de espumas de Madrid.*

El ensayo DIN 53577 es un tipo de ensayo CLD (Compresión carga deflexión). Es un ensayo ampliamente usado en toda Europa por los fabricantes de espumas. Usa una muestra de espuma de dimensiones  $100 \times 100 \times 50$  mm.

El ensayo procede primero a medir las dimensiones de espesor de la muestra de espuma (pre-cargada). Luego es comprimido hasta una deformación del 25% a una velocidad definida. Luego hace lo mismo con una deformación del 40%. Para finalmente ser comprimida a un 60% de su forma de espesor original y la fuerza necesaria para hacer esto es medida y grabada. Esta fuerza, normalmente expresada como presión en kiloPascuales (kPa), es el valor de la dureza.

Lo que hacen los programas MEF a nivel práctico es primero ajustar la curva tensión-deformación dada por un fabricante mediante algoritmos y fórmulas, expresadas y explicadas en siguiente capítulo. Una vez hecho esto, el programa utilizará la energía de deformación, área sombreada debajo de la curva tensión-deformación, para hacer un modelo de material. Con el material aplicado al modelo a simular, Creo Simulate, en este caso, simulará las tensiones y deformaciones en el modelo.

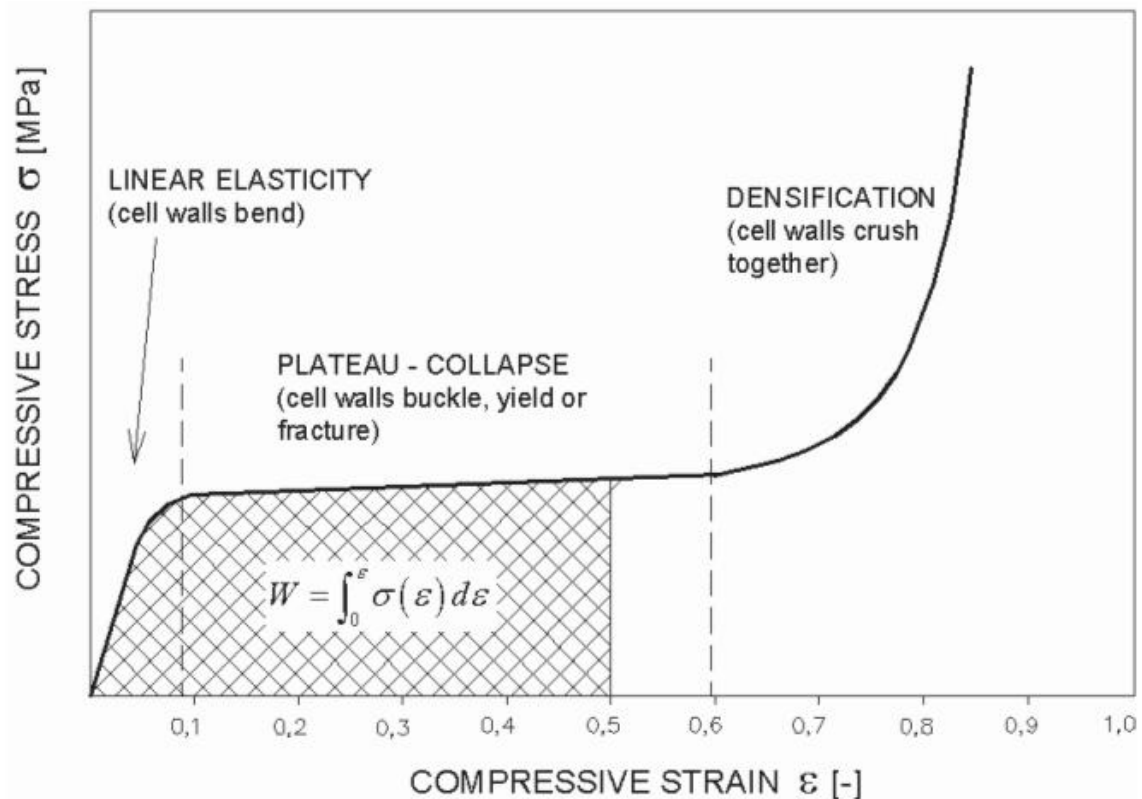


Figura 8.5 Energía de deformación a partir de una curva tensión-deformación.

En la Figura 8.5 se representa esquemáticamente el modo en que se hace la estimación de la energía absorbida por unidad de volumen,  $W$ , de una espuma flexible usando su curva tensión-deformación a compresión. La energía que la espuma absorbe por unidad de volumen,  $W$  puede obtenerse del área bajo dicha curva según la expresión (Irausquín, 2012) [10]:

$$W(\varepsilon_D) = \int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (8.13)$$

#### 8.4.2 Ensayo de cizalladura simple:

En el ensayo de cizalladura simple (Figura 8.6) se unen las superficies superiores e inferiores de la espuma a platos de metal plano. Para la muestra de espuma que se utiliza en este tipo de test, su altura debe permanecer constante, tal que el plato superior se debe mover paralelo al plato inferior. Esto se consigue usando unos rodamientos de forma lineal para restringir el movimiento del plato superior. Consecuentemente, así como habrá una fuerza tangencial a los platos,  $F_T$ , (Figura 8.6) también habrá una fuerza normal hacia los mismos,  $F_N$ .

La distribución de tensiones en la espuma depende del coeficiente largo/altura de la muestra, la magnitud de la deformación de cizalladura, y la respuesta del material. Primero se considera un análisis simple.

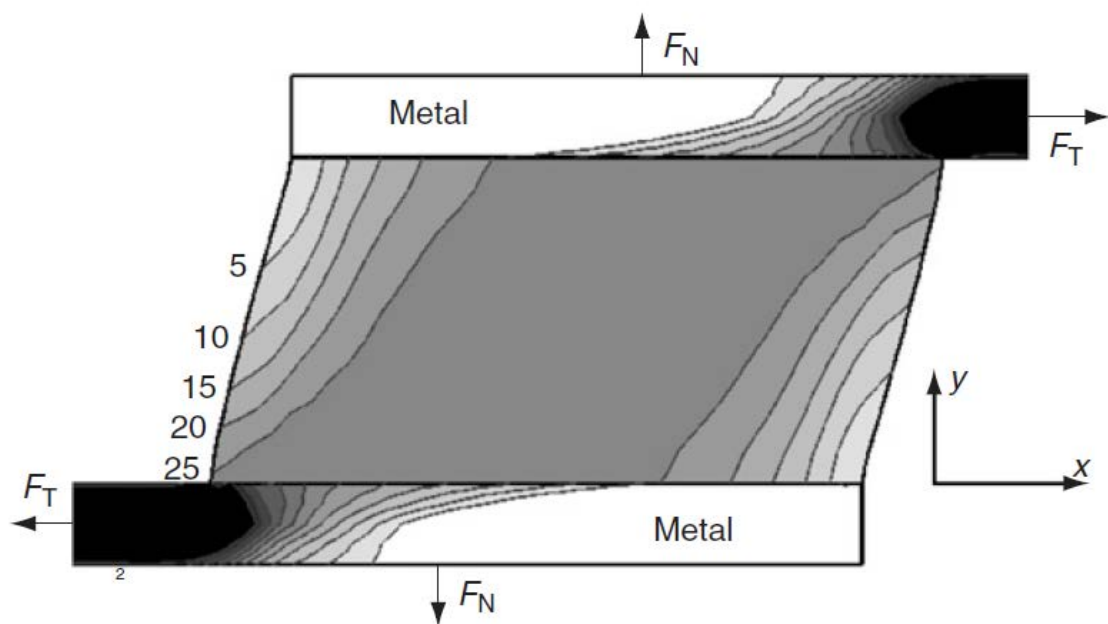


Figura 8.6: FEM de un ensayo de cizalladura de una espuma de aspecto de ratio 2:1 a una deformación de cizalladura media de 0.25, con contornos de tensión de cizalladura (kPa) (Mills 2007) [5].

#### 8.4.2.1 Análisis aproximado, asumiendo tensiones uniformes:

El análisis aproximado asume que la tensión de cizalladura es uniforme, con un valor igual a la tensión de cizalladura media  $\bar{\tau}$  en la muestra. Esta tensión se relaciona con la fuerza cortante  $F_T$ , la longitud de la muestra  $L$ , y su ancho  $w$  (Figura 8.6) por:

$$\bar{\tau} = \frac{F_T}{wL} \quad (8.14)$$

Sin embargo, en las superficies libres de la muestra, la tensión cortante es cero en los ejes del plano de superficie. A tensiones de cizalladura bajas, el plano está alineado con el eje  $y$ , tal que la tensión de cizalladura  $\tau_{xy} = 0$ . A un esfuerzo cortante moderado (Figura 8.6), las superficies finales han rotado, con lo que  $\tau_{xy}$  ya no es cero en la superficie final. Sin embargo  $\tau_{xy}$  es aún bajo cerca de la superficie libre de la espuma.

Conforme la longitud de la muestra,  $L$ , se incrementa, la influencia de los lados disminuye, hasta que, para una longitud infinita de muestra, no hay ningún efecto. La deformación por cizalladura  $\gamma$  está dada por:

$$\gamma = \frac{X}{h} \quad (8.15)$$

Donde  $X$  es la deformación y  $h$  es la altura del bloque de espuma. Esta es una aproximación para grandes deformaciones, donde la tensión de cizalladura puede ser ligeramente no uniforme (Figura 8.7).

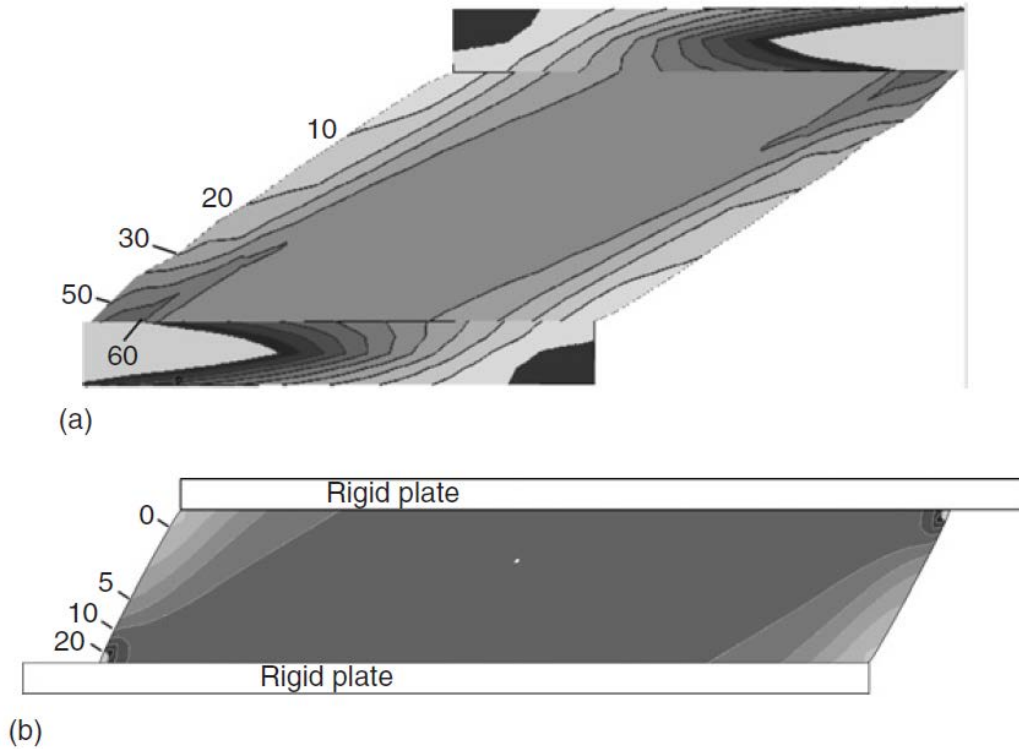


Figura 8.7: Predicciones hechas con MEF de contornos de tensiones cortantes (kPa) en bloques de espuma suaves: (a) ratio de aspecto 2:1 a deformación por cizalladura de 0.875 y (b) ratio de aspecto 5:1 con  $\gamma=0.525$  (Mills 2007) [5]

Debido a que las espumas poliméricas de células abiertas son más resistentes a esfuerzos a tracción que a compresión, los esfuerzos a tracción causan un endurecimiento cortante significativo.

#### 8.4.2.2 Distribución de tensiones a grandes deformaciones por cizalladuras:

Las altas tensiones de cizalladura causan que la forma a los lados del bloque de espuma cambie significativamente, reduciendo la concentración de tensiones en las esquinas. Para espumas de PU flexibles, usando un modelo híper elástico, el FEM muestra, para un ratio de aspecto de muestra (longitud dividido por su altura) de 2:1, la tensión cortante en su centro fue

significativamente menor que la dada por la ecuación (8.14) de la página 40, y hay una deformación a tracción en esta región. Sin embargo, para un ratio de aspecto 5:1 la tensión por cizalladura está cerca a la calculada en la ecuación (8.14) en gran parte de la muestra. Los platos del soporte de acero deben ser relativamente delgados para evitar que estos se doblen elásticamente. Por tanto, el ratio de aspecto debería ser al menos 5, para los ensayos de cizalladura sean significativos. Hay aún una gran concentración de tensiones en la parte inferior izquierda y superior derecha de las esquinas del bloque de espuma.

#### 8.4.3 Ensayos de flexión de tres puntos:

Los ensayos de flexión de 3 puntos sólo pueden ser usados con espumas más rígidas. Estos raramente son usados en espumas de PU flexibles que tienden a deformarse bajo su propio peso, y se envuelven alrededor del punto de carga central a grandes deformaciones. Al no ser usados con el material objeto de estudio, no se profundizará más sobre este tipo de ensayo.

## 9 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS APLICADO A LA DEFORMACIÓN EN ESPUMAS:

El método de elementos finitos (MEF) se utiliza para encontrar distribuciones de presiones en geometrías complejas. La elección del paquete MEF a usar puede venir determinada por su coste. ABAQUS, provee explicaciones detalladas de sus modelos de espumas. Otros como LS-DYNA, ofrecen un amplio rango de modelos para materiales de espuma, pero da poca información del origen de su trabajo interno. La industria de automóviles usa MEF para sus diseños de los cuerpos de sus coches, y el modelado de la protección de sus ocupantes con componentes de espuma rígida. Es una ventaja que en el mismo programa FEM se pueda modelar la deformación de la estructura de acero, los paquetes de espuma rígida, y la cinemática de sus ocupantes y los criterios de lesiones.

En este proyecto se usará la herramienta Creo Parametrics 2.0, para el diseño, y Creo Simulate 2.0, para el análisis de elementos finitos.

### 9.1 MEF ESTÁTICO O DINÁMICO:

Para El análisis estático, el método implícito itera la solución hasta que ésta converge, a cada paso de deformación del problema. Éste relaciona las fuerzas y las deformaciones, pero no considera la aceleración de las masas. Para problemas dinámicos, el método explícito estima las fuerzas, luego estas son aplicadas a las masas para calcular las aceleraciones en el siguiente paso de tiempo. El FEM explícito es necesario en modelos de vibración de componentes de espuma o en ondas de sonido de impacto. Aunque el FEM explícito parece el indicado para el estudio de problemas de impacto, Masso-Moreu y Mills (2003), [11], usaron el método implícito para analizar impactos en paquetes de espuma porque:

- La masa de la espuma era insignificante comparada con su producto de masas. Consecuentemente, la espuma actúa como un resorte no lineal,



sin masa, y la aceleración puede ser calculada después a partir de la fuerza sobre la espuma.

- Las espumas tales como el poliestireno (PE) son prácticamente independientes en cuanto a su ratio de deformación.
- En datos experimentales, hay muy pocas señales de ondas de esfuerzo elástico en la espuma.
- El método explícito puede predecir grandes oscilaciones de fuerza si las condiciones de contacto no son cuidadosamente seleccionadas, mientras que el método implícito tiende a predecir relaciones suaves de fuerza-deformación.

## 9.2 MODELOS DE MATERIALES PARA FEM:

Los modelos de materiales para FEM están muy bien establecidos para metales y caucho o goma, donde las ecuaciones constitutivas de deformación han sido estudiadas exhaustivamente. Algunas de estas ecuaciones han sido adaptadas para espumas sin ser completamente validadas. Los dos tipos principales de modelos de materiales de espuma son:

1. Elástico no lineal: Donde la respuesta está calculada a partir de la función de la energía de deformación. Tales modelos de materiales son llamados hiper-elásticos (ogden, 1997), [12], para diferenciarlos de los modelos elásticos lineales. Existen modelos alternativos que hacen el ajuste de la curva para tipos particulares de respuesta tensión-deformación.
2. Elasto-plásticos: Donde las tensiones de compresión sobrepasan el límite elástico y con ello causan una densificación permanente en la espuma.

Estos modelos son para materiales isotrópicos. Sin embargo, muchas espumas de PU son ligeramente anisotrópicas debido a la elevación de la espuma durante el proceso de producción. Debido a que los modelos FEM para espumas anisotrópicas no existen, los modelos para tales espumas son sólo una aproximación. Además, el factor extra a considerar es la viscoelasticidad, tratada anteriormente.

Aunque las espumas tienen microestructuras complejas a escala de tamaño celular (típicamente 0,5mm), éstas son homogéneas a una escala mayor. El método de elementos finitos las trata como materiales continuos debido a que sólo calcula las fuerzas entre los elementos en los puntos de mallado, y el tamaño de la malla es normalmente mucho mayor al tamaño de las células de espuma. El tamaño de la malla usado es un compromiso entre precisión,

requiriendo un mallado más fino, y una solución rápida, requiriendo una malla más rústica. Las dimensiones del producto, el módulo de Young del material y las densidades son datos de entrada para el programa FEM. La opción de estos programas para grandes deformaciones debe ser usada debido a que los cambios en la geometría de la espuma alteran la influencia de las fuerzas exteriores.

### 9.3 ESPUMAS ELÁSTICAS:

#### 9.3.1 Ajustes a la curva tensión-deformación:

La función de forma de Rusch (1970), [13], es un ajuste a la curva típico y empírico de los datos tensión  $\sigma$  vs. Deformación  $\varepsilon$  en un ensayo de compresión axial, usando:

$$F(\varepsilon) \equiv \frac{\sigma}{E\varepsilon} = a\varepsilon^p + b\varepsilon^q \quad (9.1)$$

Donde  $E$  es el módulo de Young y  $a, b, p, q$  son constantes.

Estas cinco constantes independientes son suficientes para hacer un ajuste razonable a la mayoría de datos. Los parámetros de ajuste a la curva no están relacionados con los mecanismos de deformación, por tanto, no pueden ser comparados con las variables de la microestructura de la espuma.

La respuesta a grandes deformaciones de espumas flexibles no se puede describir como un modelo elástico lineal. Una tensión de compresión igual al módulo de Young causaría que el alto del bloque de tal material decreciera hasta cero, con lo que la densidad infinita resultante es imposible físicamente. Sin embargo, la relación tensión-deformación para deformaciones uniaxiales debe ser no lineal, con una pendiente que se incrementa con el aumento de la magnitud de deformación. Tales espumas se pueden aproximar como sólidos hiper-elásticos, si sus propiedades mecánicas dependientes del tiempo y su histéresis son ignoradas. Sin embargo, los esfuerzos por descubrir las respuestas elásticas bajo grandes deformaciones de compresión de espumas de PU (Schrodt, 2005), [14], sometiendo a la espuma a ciclos repetitivos y esperar a su relajación del esfuerzo a su equilibrio, han fallado. Consecuentemente, cualquier modelo elástico es sólo una aproximación.

Una vez determinados los parámetros de la función de energía de deformación  $U$ , se obtienen los componentes de la tensión por derivadas parciales de  $U$

con respecto a las deformaciones principales en los eje principales (  $\lambda_i = \frac{L_i + \Delta L_i}{L_i} = 1 + \varepsilon_i$ ; donde la deformación ingenieril es:  $\varepsilon_i = (\Delta L / L_i)$  )

$$\sigma_i = \frac{\partial U}{\lambda_i} \quad (9.2)$$

Donde el sufijo  $i$  representa a los números del 1 al 3. Y  $\lambda_i$  son las deformaciones principales en donde no hay esfuerzos cortantes en los ejes principales. Cabe notar que la función de forma de Rusch no es una función de la energía de deformación.

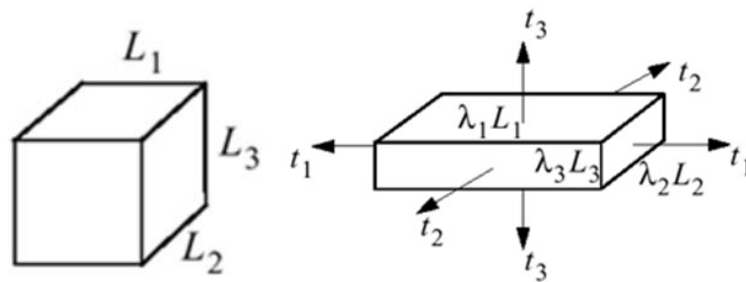


Figura 9.1 Volumen unitario y deformaciones principales. Donde  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  son las longitudes iniciales y los productos  $\lambda_1 L_1$ ,  $\lambda_2 L_2$  y  $\lambda_3 L_3$  las longitudes finales en los ejes principales antes y después de aplicada la carga.

Existen modelos micro-mecánicos que pueden predecir las respuestas de tensión-deformación de una espuma, pero éstas no dan como resultado ninguna forma particular de la función de deformación. Sin embargo, los parámetros de la función de la energía de deformación pueden ser ajustados para adaptarse a las predicciones de tensión-deformación del modelo.

### 9.3.2 Función de la energía de deformación para gomas y caucho.

#### 9.3.2.1 La función de energía de deformación para materiales de caucho:

Los materiales de caucho son efectivamente incompresibles en la mayoría de los casos, con lo que el coeficiente de Poisson puede tomar el valor de 0,5. El módulo de compresibilidad, determinado por la resistencia de las fuerzas de van der Waals entre las cadenas de polímeros, es cerca de 2 GPa. El módulo de cizalladura es determinado por la densidad de los enlaces, con lo que el rango va de 0,1 a 5 MPa. Rivlin (1948) propuso una función de la energía de

deformación  $U$ , expresado en términos de funciones invariantes  $I$  de las deformaciones principales. Invariante significa que su función no cambia con la elección de ejes. Él seleccionó tres funciones invariantes  $I$  que eran datos de entrada integrables de  $\lambda_i$

$$I_1 \equiv \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad I_2 \equiv \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad I_3 \equiv \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

Con  $I_3 \equiv \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1$  para materiales incompresibles,  $U$  es una función de  $I_1$  e  $I_2$ . Para un ensayo a tracción uniaxial en la dirección  $x$ , siendo ésta dirección principal, la tensión verdadera  $\sigma_x$  es calculada derivando la función  $U$

$$\sigma_x = (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \left[ \frac{\partial U}{\partial I_1} + \lambda^{-1} \frac{\partial U}{\partial I_2} \right] \quad (9.3)$$

Para materiales de caucho típicos, las derivadas parciales de la ecuación (9.3) son casi constantes, así que son dados los símbolos  $C_1$  y  $C_2$ , respectivamente.  $C_1$  está relacionado con la densidad de las cadenas de la red por unidad de volumen, mientras  $C_2$  está relacionado con la densidad de las cadenas colgantes (sólo conectadas a la red por un lado). Consecuentemente la relación tensión-deformación a tracción tiene la forma simple, llamada la ecuación de Mooney\_Rivlin (1948), [15]:

$$\sigma_x = C_1(\lambda^2 - \lambda^{-1}) + C_2(\lambda - \lambda^{-2}) \quad (9.4)$$

### 9.3.3 Función de energía de deformación de Ogden para espumas elásticas:

Ogden (1972) [16], propuso una función de energía de deformación, conteniendo datos de entrada no integrables de invariantes de deformación, para materiales de goma ligeramente compresibles. Esto ha sido subsecuentemente adaptado para espumas de baja densidad altamente compresibles. En el manual de usuario de ABAQUS (2004), la función está escrita como:

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[ (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \frac{1}{\beta_i} (J^{-\alpha_i \beta_i} - 1) \right] \quad (9.5)$$

En esta compleja ecuación,  $\lambda_i$  son las deformaciones principales, la medida del volumen relativo  $J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \sqrt{I_3}$ , los  $\mu_i$  son los módulos cortantes, N es un número entero, mientras los exponentes  $\alpha_i$  y  $\beta_i$  necesitan no ser integrales. El módulo cortante inicial es dado por

$$\mu = \sum_{i=1,N} \mu_i \quad (9.6)$$

La ecuación de Mooney Rivlin,(9.4), para materiales de caucho es un caso especial de la función de energía de deformación de Ogden con  $N = 2$ ,  $\alpha_1 = 2$ ,  $\alpha_2 = -2$  y  $\beta = \infty$ . EL segundo término entre corchetes en la ecuación (9.5) es para las deformaciones volumétricas. Los coeficientes  $\beta_i$  que determina la compresibilidad están relacionados con los coeficientes de Poisson  $\nu_i$  por

$$\beta_i = \frac{\nu_i}{1 - 2\nu_i} \quad (9.7)$$

Si el coeficiente de Poisson es cero, entonces también lo es  $\beta_i$ . El módulo de compresibilidad inicial  $k$  está dado por

$$k = \sum_{i=1,N} 2\mu_i \left( \frac{1}{3} + \beta_i \right) \quad (9.8)$$

Los parámetros no pueden ser predichos por las propiedades del polímero, la densidad de la espuma, y los mecanismos de deformación. En su lugar ellos deben ser calculados mediante el ajuste a la curva de datos experimentales de los tipos descritos en las secciones siguientes.

### 9.3.3.1 Respuesta uniaxial.

Para tracción o compresión uniaxial a lo largo del primer eje, la energía de deformación es

$$U = \frac{2\mu_1}{\alpha_1^2} \left[ (\lambda_1^{\alpha_1} - 3) + \frac{1}{\beta_i} (J^{-\alpha_i \beta_i} - 1) \right] \quad (9.9)$$

Con lo que derivando se obtiene la tensión aplicada que es

$$\sigma_1 = \frac{\partial U}{\partial \lambda_1} = \frac{2}{\lambda_1} \sum_{i=1,n} \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} - J^{-\alpha_i \beta_i}) \quad (9.10)$$

Para espumas de células abiertas bajo compresión uniaxial, es razonable la aproximación para el coeficiente de Poisson  $\nu = 0$ , con lo cual  $\beta = 0$ . Por tanto la tensión viene dada por:

$$\sigma_1 = \frac{2}{\lambda_1} \sum_{i=1,n} \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} - 1) \quad (9.11)$$

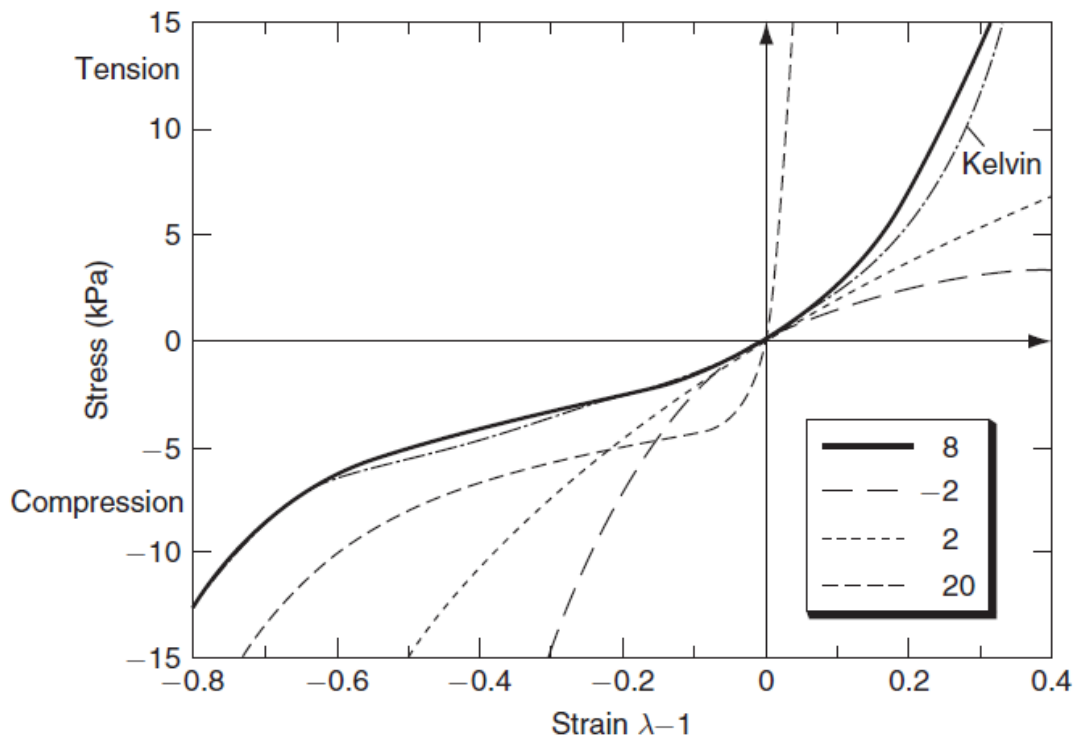


Figura 9.2: Predicciones de ensayos de compresión uniaxial y a tracción con  $N = 1$  con el modelo Ogden, para  $\mu = 10 \text{ KPa}$ ,  $\alpha = -2; 2$ , y  $8$  para  $\mu = 40 \text{ KPa}$ ,  $\alpha = 20$ , comparados con el modelo de predicciones de Kelvin para  $R=0,025$  y  $E=50 \text{ Mpa}$  (Mills y Gilchrist, 2000) [17]

Si  $\alpha = 2$ , la ecuación (9.11) predice una respuesta a tracción casi lineal pero una respuesta a compresión no lineal (Figura 9.2). Cuando  $\alpha = 8$ , la tensión se dispara a bajas deformaciones a tracción, pero a compresión lo hace para deformaciones  $< -0,5$ . Si  $\alpha = -2$ , hay una meseta plana de tensión a tracción y una respuesta no lineal a bajas deformaciones a compresión.

### 9.3.3.2 Respuesta a cizalladura simple:

Para ensayos de cizalladura simple, donde no hay cambio de volumen, la tensión cortante  $T$  y la tensión normal  $T$  (ver Figura 8.6) están relacionadas con la deformación por cizalladura  $\gamma$  por:

$$\tau = \frac{\partial U}{\partial \gamma} = \sum_{j=1,2} \left\{ \frac{2\gamma}{2(\lambda_j^2 - 1) - \gamma^2} \sum_{i=1,n} \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_j^{\alpha_i} - 1) \right\} \quad (9.12)$$

$$T = \frac{\partial U}{\partial \varepsilon} = \sum_{j=1,2} \left\{ \frac{2(\lambda_j^2 - 1)}{2\lambda_j^4 - \lambda_j^2(\gamma^2 + 2)} \sum_{i=1,n} \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_j^{\alpha_i} - 1) \right\} \quad (9.13)$$

Donde las deformaciones principales,  $\lambda_j$  en el plano de corte están relacionadas con la deformación por cizalladura  $\gamma$  por:

$$\lambda_{1,2} = \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{2} \pm \gamma \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4}}} \quad (9.14)$$

Las contribuciones de la tensión normal en la ecuación (9.13), para  $j = 1$  y  $2$ , son funciones raras de la deformación. La tensión normal es positiva, incluso es función de la deformación cuando  $\alpha > 2$ , es cero cuando  $\alpha = 2$ , y es negativa, incluso es función de la deformación cuando  $\alpha < 2$ .

### 9.3.3.3 Respuesta a la compresión hidrostática.

La presión  $p$  está relacionada con la deformación principal isotrópica  $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$  por:

$$p = \frac{2}{\lambda^3} \sum_{i=1,n} \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda^{\alpha_i} - \lambda^{-3\alpha_i\beta_i}) \quad (9.15)$$

### 9.3.3.4 Ajustando los datos para una compresión uniaxial.

La mayoría de autores usan la función de Ogden con  $N = 2$  y el módulo de cizalladura positivo para ajustar los datos en espumas flexibles. El mejor ajuste a la curva se puede conseguir usando  $N > 2$ , pero la respuesta tensión-

deformación predicha puede desviarse demasiado del comportamiento esperado cuando es extrapolado fuera del rango de datos, particularmente si se usa un módulo de cortadura negativo. Por ejemplo Lemmon (1997), [18], usó  $N = 3$  y dos módulos de cizalladura negativos para describir la respuesta a compresión uniaxial de la espuma de calzado de acetato de vinil- etileno; la tensión predicha se volvió a tracción a grandes deformaciones de compresión. No hay mecanismos de deformación físicamente realistas que se puedan producir con un módulo de cizalladura negativo.

Setyabudhy (1997), [19], ajustó los datos de compresión uniaxial para una espuma de asiendo de PU de densidad  $41 \text{ kgm}^{-3}$ , con  $\alpha_1 = 17.4$ ,  $\mu_1 = 18.8 \text{ KPa}$ ,  $\alpha_2 = -2.0$ , y  $\mu_2 = 0.21 \text{ KPa}$ . El término  $\mu_2$  tiene un efecto significativo en la predicción de la tensión a grandes deformaciones de compresión. Mills y Gilchrist (200b) ajustaron ensayos de un rango de cizalladura, compresión y ensayos intermedios de una espuma de fabricación en cinta de células abiertas, de densidad  $38 \text{ Kgm}^{-3}$  (abreviado como PU38) usando valores similares:  $\alpha_1 = 20$ ,  $\mu_1 = 20 \text{ KPa}$ ,  $\alpha_2 = -2.0$ ,  $\mu_2 = 0.2 \text{ KPa}$ , y  $\nu = 0$ . Los datos de compresión uniaxial fueron medidos a lo largo de la dirección de crecimiento a unos  $24^\circ\text{C}$ , a una velocidad de deformación de compresión de  $3.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  como muestra la Figura 9.3. Hay una histéresis considerable entre las respuestas de carga y descarga, y una meseta de tensión, para unas deformaciones de compresión  $>10\%$ , que no pueden ser ajustadas por el modelo. Lyn y Mills (2001), [20], usaron valores de  $\alpha_1 = 8$ ,  $\alpha_2 = -2$  para una espuma de PU reciclado de una densidad de  $57 \text{ Kgm}^{-3}$ , la cual tiene una respuesta a compresión más lineal que la espuma PU38. Por tanto, los valores de  $\alpha$  para la espuma de PU son una función de la microestructura.



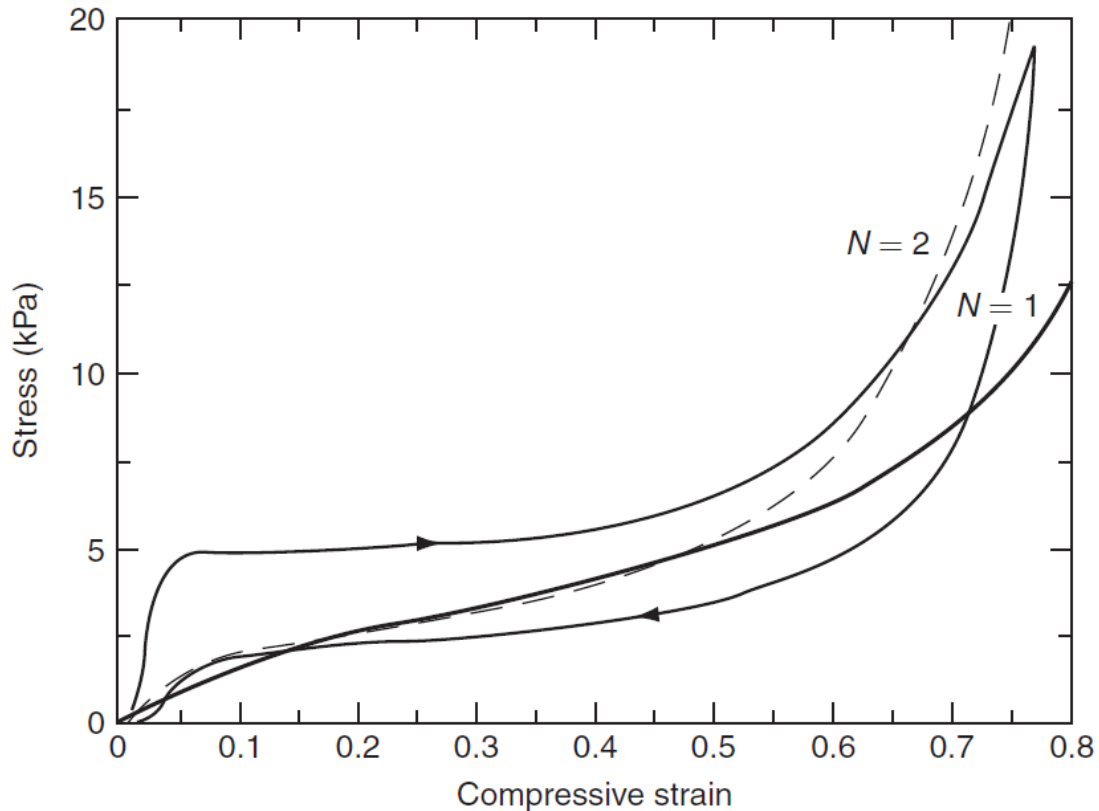


Figura 9.3: Datos tensión-deformación de compresión uniaxial (curvas finas) para una espuma PU38 a 24°C, para una velocidad de deformación de  $3,3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$  comparados con predicciones de la función de Ogden para  $N = 1$ ,  $\mu = 10 \text{ kPa}$ ,  $\alpha = 8$  y para  $N = 2$ ,  $\alpha_1 = 20$ ,  $\mu_1 = 20 \text{ kPa}$ ,  $\alpha_2 = -2.0$ , y  $\mu_2 = 0,2 \text{ kPa}$  (Mills y Gilchrist, 2000) [17].

La aproximación para el coeficiente de Poisson de cero es usada ampliamente. Para una espuma de PU de baja densidad es 0,10,2 para deformaciones a compresión pequeñas, luego la deformación lateral se convierte en constante a grandes deformaciones. Sin embargo, es cerca de 0,5 a tracción (Mills y Gilchrist, 2000) [21].

### 9.3.3.5 Ajustando datos para un ensayo a cizalladura y compresión:

El manual de problemas de ABAQUS (1998), [22], mostraba cómo ajustar un conjunto particular de datos a compresión y cizalladura simple “experimental” (fuente desconocida) con un modelo de hyper-espuma (hyperfoam), usando los parámetros  $\alpha_1 = 8,88$ ,  $\mu_1 = 1,65$ ,  $\alpha_2 = -4,82$ , y  $\mu_2 = 0,0023$ . Los datos presumiblemente son para una espuma de PU, con unas unidades de los módulos probablemente dados en  $\text{kgcm}^{-2}$ , esto es,  $\mu_1 = 1,65 \text{ kPa}$ . Hay

desviaciones significativas a la hora de ajustar los datos de tensión de cizalladura, mientras que el ajuste de los datos de compresión uniaxial es bueno.

Para una deformación a cizalladura simple, la Figura 9.4 muestra la variación de tensiones a tracción y cizalladura para una espuma PU38. Las predicciones se acercan a los datos experimentales para deformaciones  $\epsilon < 0,25$ , pero son demasiado altos a grandes deformaciones (Figura 9.4b). El término  $\alpha_1 = 20$  domina la respuesta no lineal a tracción, principalmente debido al estiramiento de los bordes de las células, mientras que el término  $\alpha_2 = -2$  domina la respuesta no lineal a compresión, debido a que los bordes se tocan a grandes deformaciones. Para los tres ensayos, hay un mejor ajuste para los datos de descarga que de carga.

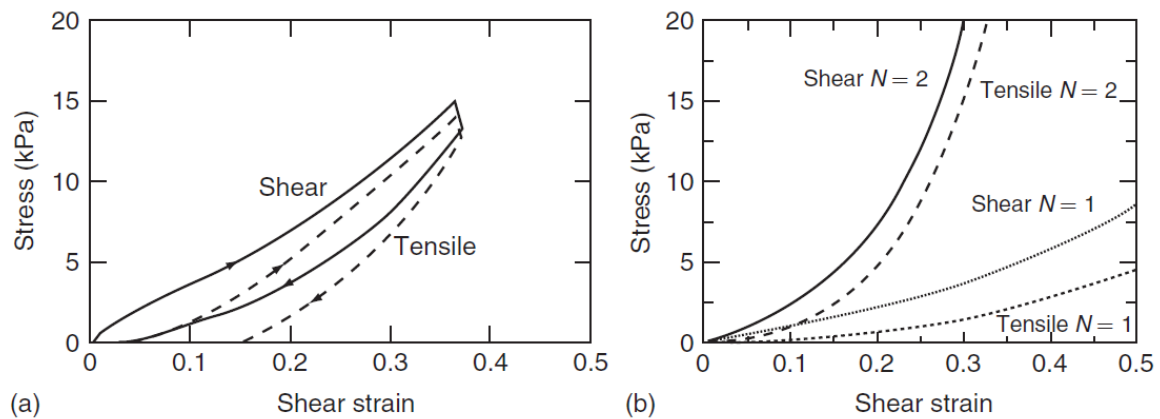


Figura 9.4: (a) Datos de tensiones a cizalladura y a tracción para una carga y descarga de cizalladura simple de una espuma PU38 y (b) predicciones de modelos de Ogden para la figura 6.2 (Mills y Gilchrist, 2000b).

La función de Ogden con  $N = 1$ ,  $\mu = 10$  kPa,  $\alpha = 8$ , la cual representa las respuestas a tracción y compresión uniaxial del modelo micro-mecánico de la espuma de Kelvin para deformaciones en la dirección [100] (Figura 9.2), no se ajusta a los datos para la espuma PU38 ni tampoco para el modelo con  $N = 2$ .

#### 9.3.4 Validación MEF: ensayo de hendidura de deformación plana (plane-strain indentation) para espumas flexibles:

El ensayo de hendidura de deformación plana (plane-strain indentation) de una espuma PU flexible hecho con un cubo (Mills y Gilchrist, 2000), [17], fue usado

para validar un modelo hiper-elástico. EL bloque de espuma tenía una relación de ancho:profundidad:alto de 3:1:1 y el lado del cubo penetrador igual a la altura de la espuma. La superficie frontal de la espuma se mantuvo plana, debido a que el coeficiente de Poisson a compresión de la espuma es cero. Los elementos de la deformación plana en forma de cubo fueron usados en ABAQUS 5.9 estándar, con parámetros para materiales de hiper-espuma (hyperfoam)  $\alpha_1 = 20$ ,  $\mu_1 = 20$  kPa,  $\alpha_2 = -2$ , y  $\mu_2 = 0,2$  kPa, con  $\nu = 0$ . Hay un plano vertical de simetría a través del centro del elemento de ensayo, del elemento penetrador. Un coeficiente de fricción de  $\lambda = 0,75$  fue medido desde un ángulo crítico en el cual el bloque de espuma de PU se deslizaba desde el plato de metal suave inclinado. Sin embargo, para obtener soluciones estables, la superficie inferior del penetrador fue unido a la superficie superior de la espuma (poco después MEF dinámicos permitieron el deslizamiento de la superficie, con casi las mismas predicciones). Para un contacto entre las otras superficies del metal y la espuma, fue usado un  $\lambda = 0,75$ .

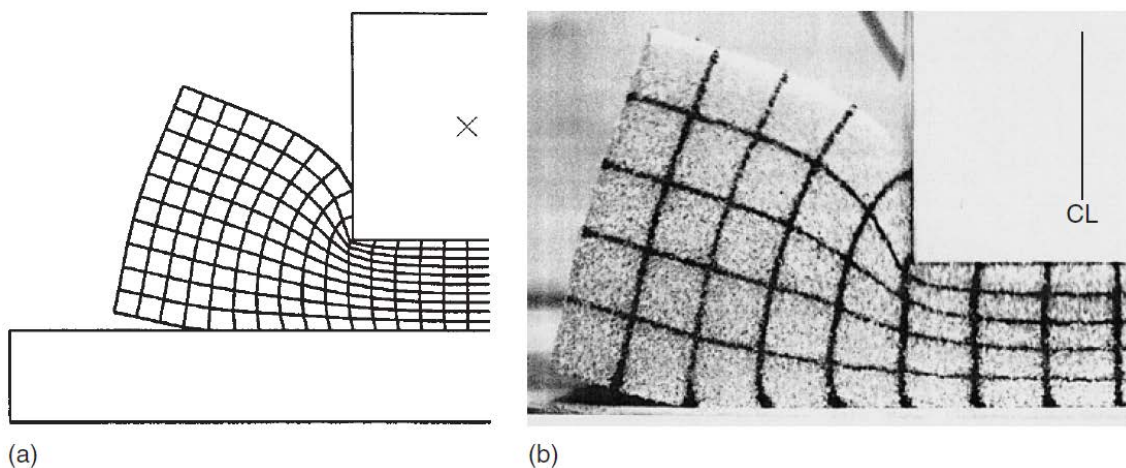


Figura 9.5: Campo de deformaciones para un ensayo de hendidura de deformación plana (plane-strain indentation): (a) predicciones para  $\alpha = 8$ ,  $\mu = 10$ ,  $\nu = 0,75$ , a una deformación  $\varepsilon = -0,6$  y (b) datos para una espuma PU38 con  $\varepsilon = -0,6$  (LC es la línea central de la muestra) (Davies 2000) [23].

Las formas predichas de los elementos deformados (Figura 9.5a) comparados con las fotografías de las líneas dibujadas en la superficie frontal de la espuma (Figura 9.5b). En la superficie de la mesa de soporte, las líneas dibujadas en la espuma deformada no son verticales, debido a que la fricción produce esfuerzos cortantes en la interacción espuma-metal. Las grandes deformaciones por cizalladura a los lados del penetrador permiten a la espuma envolverse a sí misma alrededor de los lados verticales del penetrador, y los lados de la espuma

se elevan desde la mesa de soporte. Las líneas verticalmente dibujadas se abomban ligeramente hacia los lados del penetrador, conforme la espuma se expande lateralmente desde debajo del penetrador.

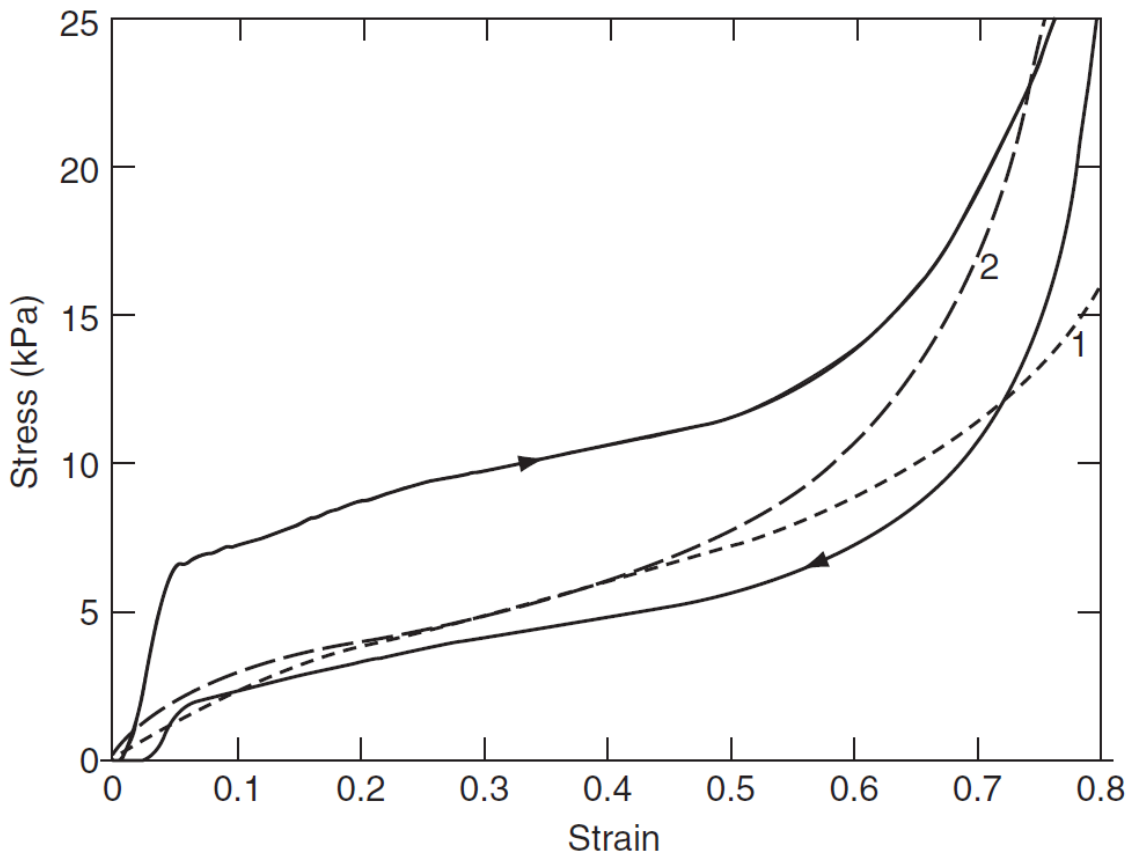


Figura 9.6 Tensión de IFD predicho frente a la media de deformación de compresión, (líneas punteadas) para los modelos de Ogden de la Figura 9.3, comparados con los datos de carga-descarga para una espuma PU38 (curvas sin puntear) (Mills y Gilchrist, 2000) [17]

La variación de la tensión media de hendidura (average indentation stress)  $\bar{\sigma}$  (fuerza/área del penetrador), para una espuma PU38, con una deformación a compresión es mostrada en la Figura 9.6. La predicción se acerca a los datos de descarga experimentales, pero cerca de 5 kPa por debajo de los datos de carga experimentales, para deformaciones  $< 0,5$ . Para deformaciones  $> 0,6$  la predicción se eleva hacia la curva de datos de carga experimentales. La tensión del ensayo (indentation stress) es subestimada debido a que los parámetros subestiman la meseta inicial parte de la curva de carga de compresión de la espuma cerca de unos 5 kPa (Figura 9.3). La histéresis experimental, debido a la viscosidad (no lineal) del polímero en los lados doblados de la espuma, no pueden ser predichos por un modelo hiper elástico.

El coeficiente de tensión del ensayo (indentation stress ratio)  $H$  es definido por

$$H \equiv \frac{\sigma(\varepsilon)}{\sigma_v(\varepsilon)} \quad (9.16)$$

Donde  $\sigma_v$  es la tensión para un ensayo de compresión uniaxial a la misma deformación nominal  $\varepsilon$ . El modelo predice un pico  $H$  a una deformación  $\approx 0,4$ , una subestimación de cerca de un 20% (Tabla 9.1). A pequeñas deformaciones, la principal región que sufre tensiones está directamente debajo del penetrador, y con un  $H \approx 1,4$ . A deformaciones medias, el bloque de espuma está altamente distorsionado, y las deformaciones en la espuma a un lado del penetrado causan que  $H$  se incremente. A grandes deformaciones, la espuma altamente cargada directamente debajo del penetrador transmite la mayor parte de la carga, con lo cual  $H$  desciende hasta el valor unidad. El coeficiente de fricción asumido  $\lambda$  tiene un efecto muy pequeño en el valor predicho de  $H$  (Tabla 9.1), pero con  $\lambda = 0$  los lados del bloque de espuma deformado se elevan más que con  $\lambda = 0,75$ .

Friction coefficient	Experiment PU38	FEA (N = 2)
0		1.58
0.75	1.85, 1.95	1.59
Tied surface		1.60

Tabla 9.1: Pico de coeficiente de fuerza de hendidura (indentation force ratio) en un ensayo de hendidura de deformación plana (plane-strain indentation).

### 9.3.5 Validación de modelos MEF:

La mejor forma de validar modelos de materiales MEF es comparándolos con las respuestas predichas para estos productos con campos de tensiones complejas con datos experimentales. Los parámetros del modelo de material debería ser medido, más que comparado empíricamente, para mejorar las predicciones. Si sólo una forma de producto es simulada, los ajustes de parámetros pueden dar con una concordancia razonable con los datos del ensayo. Dos ejemplos ilustran algunos obstáculos en la validación.

Puso y Govinjee (1995), [24], consideraron los impactos sobre un bloque de espuma de PU, usando la geometría IFD. Como el diámetro del penetrador de 150mm era comparable con el ancho del bloque de espuma de 254mm, y el grosor de la parte baja de la espuma (62mm), MEF de tal geometría sugiere que el valor  $H$  de la ecuación (9.5) no  $\gg 1$ , esto significa que la espuma debajo del penetrador está aproximadamente bajo compresión uniaxial. Ellos caracterizaron la espuma de PU bajo compresión uniaxial y predijeron la tensión media para el ensayo de IFD dentro de un 10%. Sin embargo, el campo de tensiones de la validación de este experimento no fue exigente.

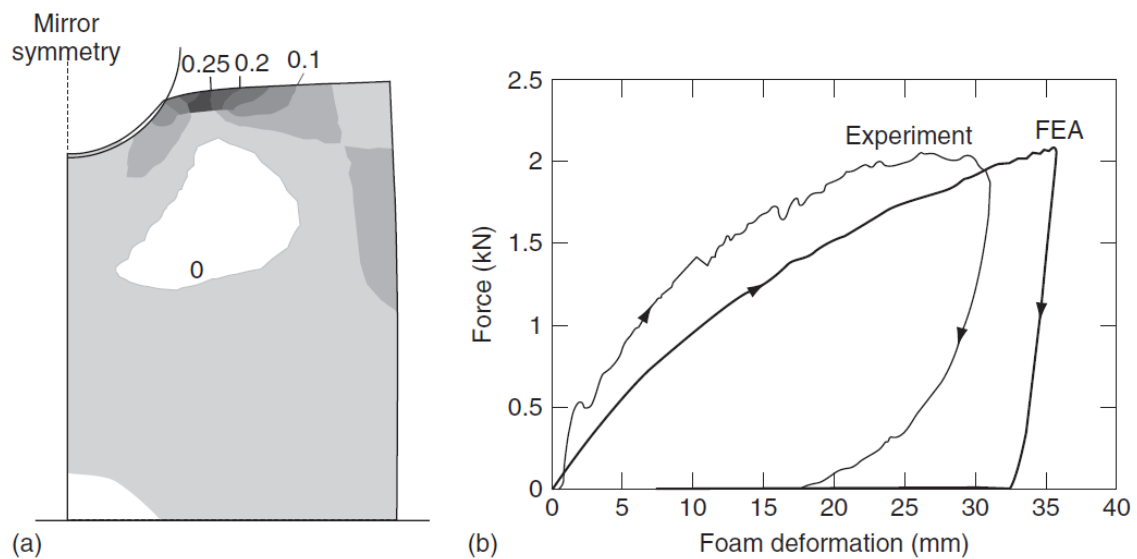


Figura 9.7: (a) Forma de un bloque de espuma PS35, predicho por un MEF dinámico, 2,8 ms después del impacto de un cilindro de 39 mm de diámetro, con contornos de tensiones principales a tracción (MPa). (b) Predicción fuerza vs distancia (sin publicar) comparado con datos de una espuma PS35 (Gilchrist y Mills, 2001).

Gilchrist y Mills (2001), [25], llevaron a cabo un ensayo de impacto de deformación plane-strain sobre una espuma de XPS de densidad nominal  $38 \text{ kgm}^{-3}$ . Un bloque de EPS de una altura de 75mm, ancho 118mm, y profundidad de 70 mm, fue objeto de un impacto con el lado de un cilindro de diámetro 39 mm, a una velocidad de  $5 \text{ ms}^{-1}$ . Una rejilla cuadrada, con un espaciado de 5mm entre las líneas, fue marcada en la cara anterior de la muestra. Su MEF estático fue repetido recientemente usando un MEF dinámico. Una plano de simetría vertical a través del centro de la espuma redujo el tamaño del problema. La geometría de la espuma predicha después de 2,8 ms del impacto es mostrada en la Figura 9.7a. En este escenario, la tensión principal sobre la superficie superior de la espuma, justo por fuera del área de contacto, alcanzó un máximo de 0,25 Mpa, debido a la flexión localizada. Un vídeo de alta

velocidad (Figura 9.8) muestra la superficie una hendidura iniciada en el mismo instante a los 3 ms, y crece en longitud a los 10-20 mm. La fuerza de hendidura experimental es una función no lineal de la profundidad de penetración, con una curva negativa (Figura 9.7b). Esta fuerza es cerca de 0,3kN más alta que la predicha por la curva. Como el agrietamiento reduciría la fuerza, esto sugiere que el MEF está subestimando algún aspecto del campo de tensiones, como las tensiones cortantes a los lados del agrietamiento. La recuperación de la energía predicha sobre la descarga fue más pequeña que la observada.

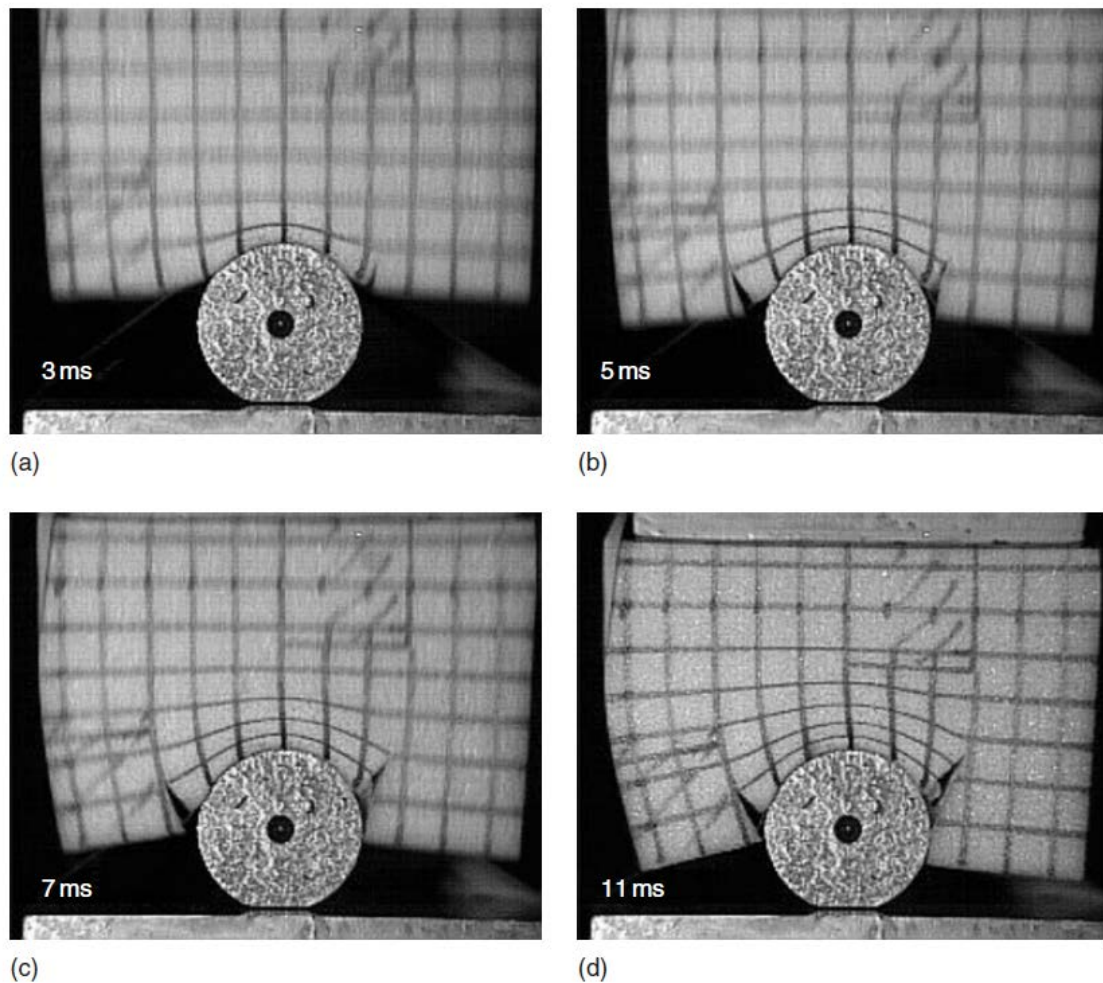


Figura 9.8: Fotogramas de vídeo de una espuma XPS35 siendo penetrado por un cilindro de diámetro de 39 mm, a los tiempos indicados (Gilchrist y Mills, 2001) [25].

### 9.3.6 Resumen:

Los modelos hiperelásticos MEF para espumas flexibles, con parámetros que describen un rango de tipos de datos de ensayos, se pueden usar para analizar

un campo de deformaciones complejo como aquellos de los ensayos de agrietamiento. Para modelar los comportamientos de histéresis o que dependen del tiempo, los comportamientos viscoelásticos se pueden asociar a un modelo hiperelástico en ABAQUS Explícito.

La respuesta de modelos de espuma de impacto en ABAQUS difiere de los de XPS de baja densidad, especialmente cuando la espuma es descargada o durante deformación cortante o a tracción. La espuma actúa como si un mecanismo de endurecimiento volumétrico elástico (debido a la presión del gas de las células) fuese en paralelo con el mecanismo de plasticidad (que endurece en cizalladura simple, pero no a compresión). Las espumas se suavizan más en descarga que en carga, debido a que las caras de las células han formado articulaciones durante la carga a compresión. Las predicciones MEF son sólo aproximaciones debido a que:

- a) Muchas espumas rígidas son ligeramente anisotrópicas, mientras que el MEF es para materiales isotrópicos.
- b) Los modelos de espuma para impactos tienen el mismo endurecimiento a compresión uniaxial e hidrostática. Si se usa el primero como dato del material, la superficie donde el material se endurece se expande excesivamente debido a que los estados tensionales están cerca a la compresión hidrostática.
- c) La elipticidad de la superficie de límite elástico inicial varía desde 1,1 a 3,5 para diferentes polímeros. Dada la similitud en cuanto a microestructura, los valores deberían ser más consistentes. Sin embargo, la cantidad de ductilidad a tracción varía con el polímero y la anisotropía de la espuma varía con el tipo de proceso de fabricación.

Se espera a que en el futuro haya nuevos modelos de materiales que puedan combinar el comportamiento de espumas hiperelásticas con modelos de espumas rígidas sometidas a impacto (Mills N.J. 2007) [5].



## 10 ESTUDIOS SOBRE ASIENTOS:

### 10.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo explora la biomecánica del asiento, y las espumas disponibles para hacer asientos confortables. Primero se introducen la biomecánica de la causa de las úlceras de la piel debido a la presión y la interacción entre el tejido humano y la espuma del asiento. La postura corporal es de consideración, dado que ésta afecta a la distribución de presiones en la superficie de los glúteos. Los criterios de confort son complejos, incluyendo factores como la transmisión de la humedad y el flujo de calor.

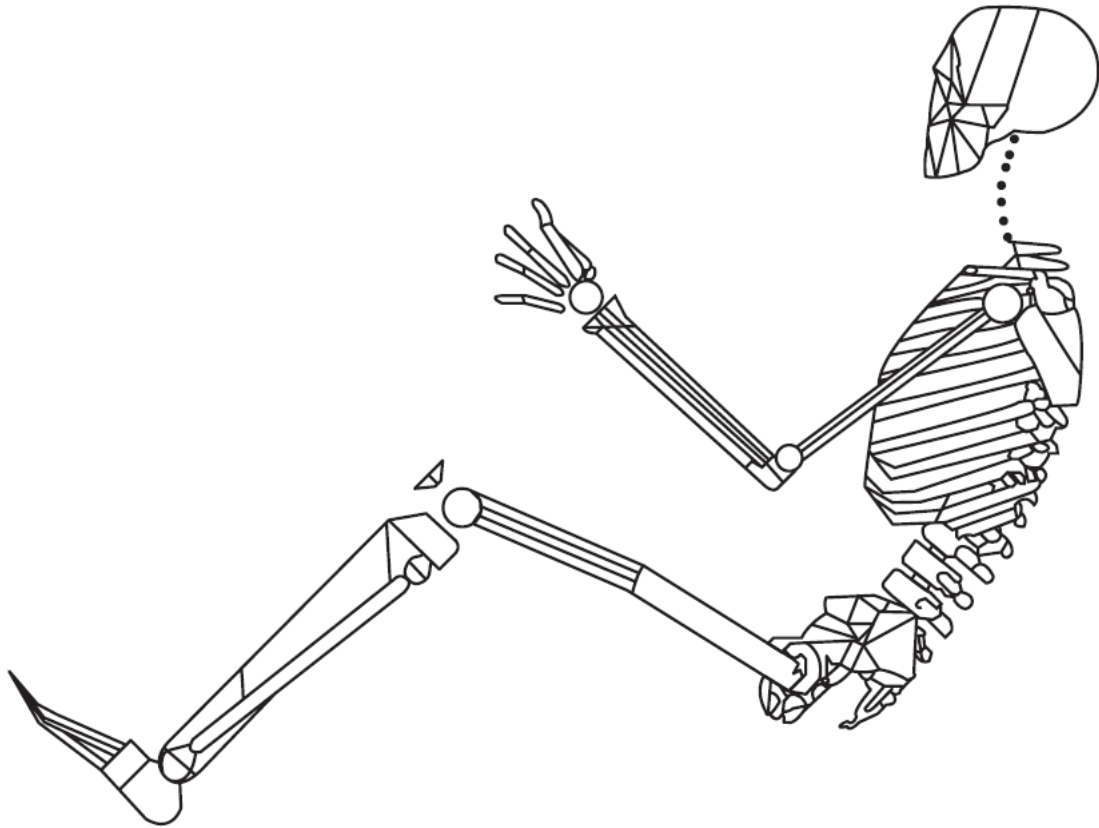
La segunda parte de este capítulo considera la mecánica de los asientos de espuma. Los requerimientos de los asientos de los vehículos son más complejos que los asientos domésticos, debido a que las vibraciones del vehículo son parcialmente transmitidas a través del asiento a sus ocupantes, y el asiento juega un papel importante en el sistema de protección contra accidentes. Formas complejas, moldeadas para asientos de coches requieren diferentes formulaciones de PU así como distintos equipos de procesamiento para conseguir tiempos de ciclo bajos; consecuentemente las estructuras de espuma y sus propiedades difieren de aquellas espumas fabricadas en una cinta continua usadas para asientos domésticos y camas.

### 10.2 LA BIOMECÁNICA DE SENTARSE EN SILLAS:

#### 10.2.1 La postura al sentarse y los maniquís:

Lueder (1994), [26], consideró el diseño ergonómico en el diseño de sillas de oficina. La parte baja de la espina dorsal debería formar una S más que una C para una forma de sentarse que dé comodidad, lo que significa que la pelvis debería rotarse hacia adelante. La posición ideal en una silla de oficina es distinta a la de un asiento de coche en una posición semi-recostada. Los últimos usan asientos traseros en un ángulo de  $20^\circ$  o más desde la vertical, con lo que el nivel del techo puede ser menor (Figura 10.1). La altura del asiento desde el suelo del coche suele ser menor que la de un asiento doméstico (típicamente 0,45 m para una silla de comer y 0,4 m para un sofá). Es necesario que la espina dorsal se doble hacia adelante, y la posición del conductor se mantenga sin

cambios en prolongados espacios de tiempo; la posibilidad de que la espina dorsal se agarrote es mayor que en una silla vertical.



*Figura 10.1: Posición de asiento semi-recostada adoptada en la mayoría de vehículos, Ilustrado por el muñeco "John" (Hubbard, 1993 ©SAE).*

Hubbard (1993), [27], describió modelos antropométricos que representaban los extremos de la población conductora de coches; sin embargo, los dummies se sientan en los coches con posturas no lo bastante realistas (Stablerk, 1996), [28]. Los conductores tienen tendencia a sentarse muy hacia adelante, para observar mejor el mundo exterior.

Las bases de datos antropométricas, tales como *Peoplesize*, contienen las dimensiones de diferentes poblaciones, pero detalles insuficientes para el diseño de asientos de coches. La Figura 10.2 muestra la anatomía de una pelvis.

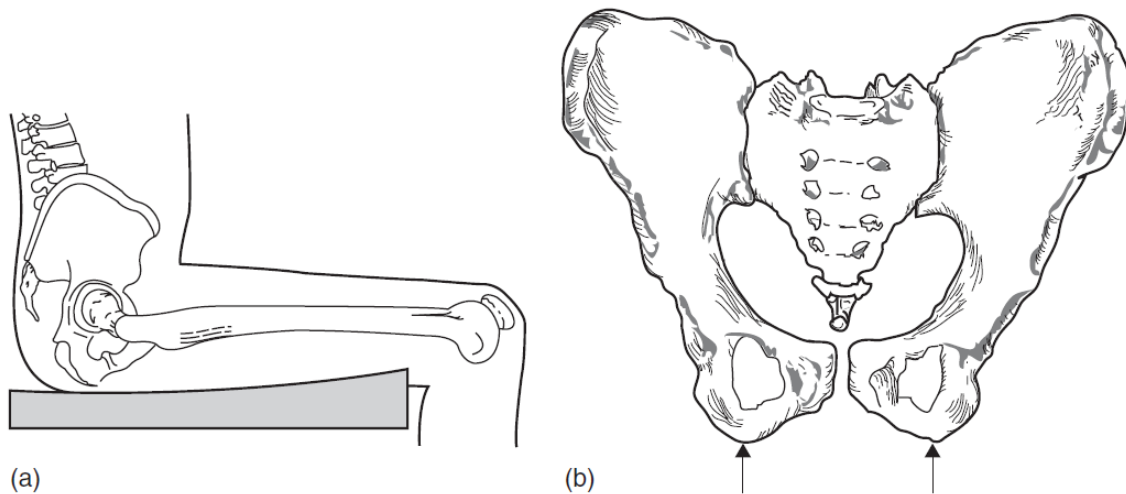


Figura 10.2: (a) vistas de lado y (b) frontal de la pelvis de una persona sentada, con las tuberosidades isquiáticas señaladas con flechas (Mills N.J. 2007) [5].

### 10.2.2 Úlceras de la piel por presión e isquemia:

Cuando una persona está sentada sobre un banco plano de madera, las tensiones pico sobre los glúteos son mayores que cuando está sentada en una almohada de espuma suave. Tales presiones altas son tolerables por cortos periodos de tiempo, y pueden ser aliviadas mediante un cambio en la postura. Para aquellas personas confinadas en una cama o una silla de ruedas, existe el riesgo de padecer de úlceras en la piel debido a la presión. El término isquemia significa que el suministro de sangre, desde los capilares del sistema circulatorio de la sangre hacia los músculos, es cortado cuando los vasos se obstruyen (se cierran). La presión de la superficie puede cerrar los capilares en los músculos, de un modo similar a un brazalete inflado sobre la parte superior del brazo corta el flujo de sangre en las venas, cuando se mide la presión sanguínea. Cuando la circulación sanguínea se detiene, parte de los productos tóxicos del metabolismo de las células se acumulan en el tejido, y eventualmente pueden causar daño celular (Brienza y Geyer, 2001) [29].

Estudios posteriores al 2000 tienden a enfatizar la presión como causa de las úlceras. Ferguson-Pell (1990), [30], relacionaron el riesgo de padecer de úlceras en la piel a los valores de presión pico en la piel de un paciente sentado, a la tensión cortante, y factores relacionados con el paciente (edad, nutrición, presión sanguínea, si fumaba o no y su movilidad), y factores ambientales (humedad). Cabe destacar que la presión hidrostática no causa isquemia. Los tejidos blandos están formados principalmente por agua, la cual tiene un módulo volumétrico elevado de cerca de 2 GPa. 100kPa de presión hidrostática, a una profundidad de 10 m. Dentro del mar, no causan ningún cambio de forma

en los tejidos blandos ni afecta al suministro de sangre. La presión superficial es una tensión a compresión uniaxial, actuando perpendicularmente sobre la superficie de la piel. Si la presión actúa sólo sobre una parte de la piel, los tejidos blandos cambian de forma. Los eventos vasculares isquémicos pueden también ocurrir a una distancia debajo de la piel, cerca de protuberancias óseas. El estado de tensiones en tales lugares es más complejo que una tensión a compresión uniaxial. Las protuberancias óseas relevantes para el caso de una persona sentada son las tuberosidades isquiáticas (Figura 10.2). Aissaoui (2001), [31], midió su longitud de más de 8 cm con un espesor 2-4cm. El sacro, en la base de la espina dorsal, puede también causar picos de tensión.

Goosens (1994), [32], midió la tensión del oxígeno en la piel con un pequeño electrodo, cuando fueron aplicadas tensiones de compresión y cortadura sobre la espalda de voluntarios jóvenes saludables. Sus presiones sanguíneas sistólicas y diastólicas, respectivamente, fueron en promedio 15,9 y 10,7 kPa (las presiones necesarias para parar y reestablecer el flujo sanguíneo). Ellos definieron la presión superficial de corte como la cual reduce la presión del oxígeno en la piel a 1,3 kPa, desde un valor inicial de alrededor de unos 10 kPa. La presión de corte de 11,6kPa, sin aplicar tensiones cortantes, reducida a 8,7 kPa cuando la tensión cortante era de 3,1 kPa. Por lo tanto, las tensiones cortantes causan isquemia, así como las tensiones a compresión. Tanto el funcionamiento de las paredes venosas como su velocidad de recuperación de forma después de una oclusión, se reducen con la edad, así como la proporción de colágeno y elastina en las paredes venosas se incrementa. Por tanto, la tolerancia a la presión superficial se reduce con el incremento de la edad.

Bouten (2003), [33], criticó la tradicionalmente citada presión umbral de 4,3 kPa para el daño de los tejidos. Ellos señalaron que el cierre capilar depende de los gradientes de presión locales a través de las paredes de los vasos sanguíneos, y no sólo de la presión sobre la piel. Ellos argumentaron que las úlceras de presión profundas, las cuales pueden ocurrir cerca de la interacción hueso/músculo, pueden ser causadas debido a la deformación del tejido más que a la presión. Stekelenburg (2006), [34], usó imágenes de resonancia magnética para detectar daño en los tejidos de ratas debido a la penetración local del músculo, esto fue hecho para simular la penetración producida en el tejido muscular por parte de huesos prominentes.

### 10.2.3 Distribución de presiones en una postura sentada:

A pesar del debate sobre la causa de las úlceras de la piel, una casi uniforme distribución de presiones en la piel es el objetivo del diseño de todo asiento. Las distribuciones de presiones en una posición sentada dependen de la forma del asiento y el material, del peso, la forma de la pelvis y el espesor del tejido blando del individuo.

A pesar de que hay distintos tipos de sensores en el mercado, ningún sensor es ideal, debido a que su respuesta es levemente dependiente del tiempo. La Figura 10.3 muestra el contorno de presiones usando el sistema FSA, mallas de sensores de 2mm de espesor, sobre una almohada fina de espuma (100 mmHg = 13,3 kPa). El objetivo es una presión uniforme con valores menores a 12 kPa. Las distribuciones de presiones son también relevantes para el confort de la población general sentada o echada sobre productos de espuma.

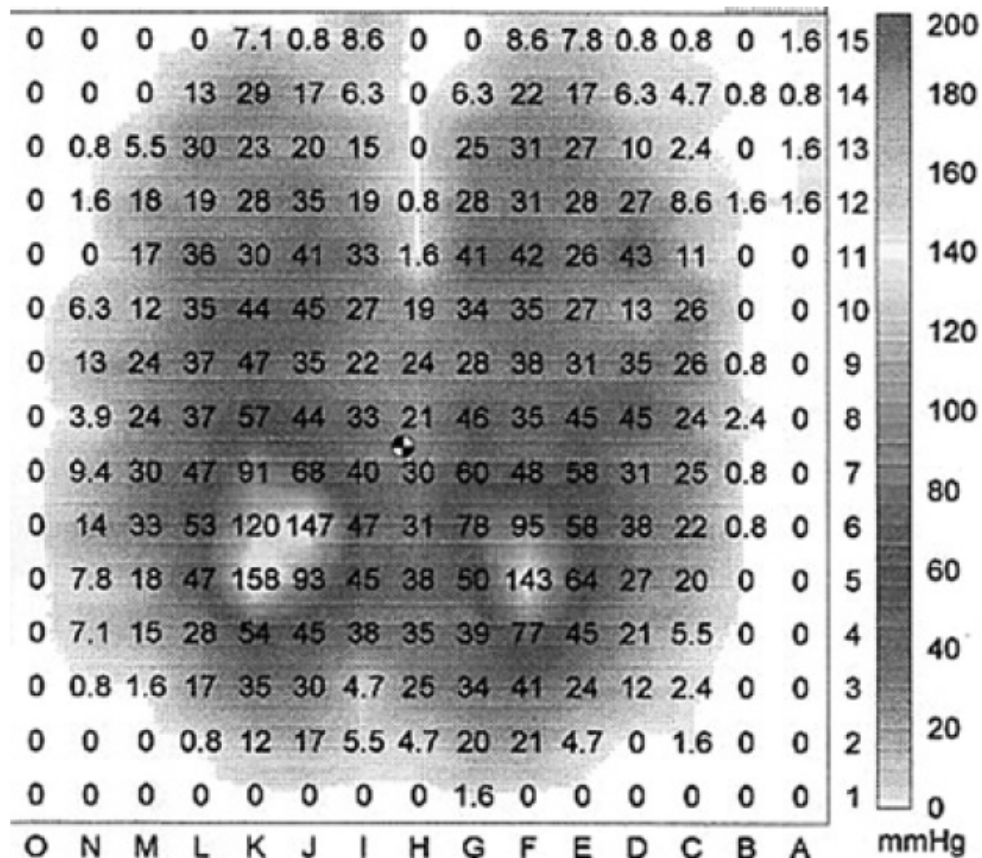


Figura 10.3: Distribución de presiones con sensores de un estudiante sobre una espuma de PU de 25mm de espesor, con las rodillas a lo alto de la figura, y los picos de presiones sobre las tuberosidades isquiáticas. (Mills N.J. 2007) [5]

#### 10.2.4 Comparativa entre la deformación de muslos y espuma:

La deformación de la pierna o los glúteos depende de la distribución de presiones sobre la piel y sobre la actividad muscular. Setyabudky (1997), [19], midió la forma de la interacción muslos/asiento con voluntarios sentados sobre un cojín de espuma de PU de  $41 \text{ kgm}^{-3}$  de densidad, con una superficie superior plana. Las rodillas y la cadera del sujeto fueron fijadas, con lo que el fémur no se movió. Los resultados dependen del ángulo de la rodilla: Cuanto más bajo el valor, más alta era la tensión sobre los músculos y tendones sobre la parte posterior del muslo. Las viscoelasticidades de la espuma y de los muslos fueron ignoradas, con medidas hechas 30 s después de sentarse el sujeto. Las líneas verticales a través del cojín de 100 mm de espesor indicaban la posición de la superficie de la pierna. La deformación del mismo, hallado sustrayendo la deformación de la espuma de la deformación total, era más larga que la deformación de la espuma (Figura 10.4). Sin embargo, para fuerzas de más de 60N, la rigidez de la espuma excedía a la rigidez de los muslos. Ambos materiales son no lineales, pero el coeficiente de Poisson de la espuma es mucho menor que el de los muslos. La distancia inicial entre la piel y el fémur puede ser estimado mediante los datos obtenidos de la base de datos de *Peoplesize* de cerca de 70 mm. Por tanto la tensión de compresión máxima en el tejido del muslo, cuando la deformación es de 40 mm, es cerca del 57% (Setyabudky 1997) [19].

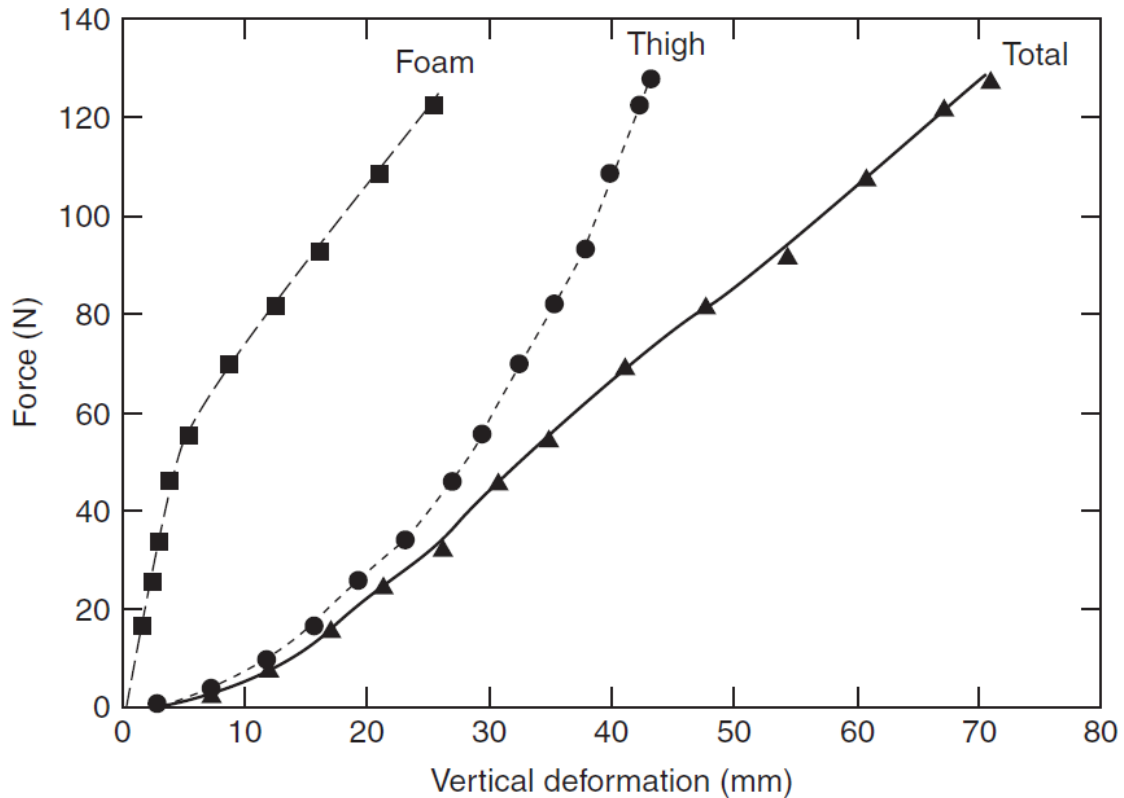


Figura 10.4: Deformación del muslo y un asiento de espuma vs. La fuerza aplicada. Ángulo de la rodilla:  $100^{\circ}$ , densidad de la espuma de  $41 \text{ kg m}^{-3}$  (Setyabudky, 1997 ©SAE) [19]

Si las dimensiones del tejido blando, la presión superficial y las deformaciones de la piel fuesen todas monitoreadas, subsecuentes MEF permitirían parámetros de materiales mejores derivados de este monitoreo.

#### 10.2.5 Comodidad en asientos de coches:

Milivojevich (2000), [35], estudió los dos mejores coches de su tipo y tres asientos de vehículos de lujo, usando sujetos que variaban en altura, peso y sexo. Había una correlación entre los puntajes de confort psicométrico altos mientras conducían y los valores bajos de picos presión isquiática media, baja presión media en el muslo y una alta área de contacto entre el asiento y conductor (Tabla 10.1). Andreoni (2002), [36], correlacionó las distribuciones de presión en el asiento con la postura; algunos conductores alcanzaron una presión uniforme a través de los trocánteres, parte superior de los huesos de las piernas que sobresalen en los lados de las caderas, y las tuberosidades isquiáticas, mientras que otros tuvieron picos de presión isquiática.

Seat	Comfort score	Mean ischial pressure (mmHg)	Mean thigh pressure (mmHg)	Total contact area (cm <sup>2</sup> )
1	1.0	77	34	1124
2	4.5	67	27	1220
3	2.1	69	30	1166
4	6.7	57	26	1357
5	10	53	25	1316

Tabla 10.1 Puntuaciones de confort y distribuciones de presión corporales (Milivojevic 2000)

### 10.2.6 Transmisión de vibraciones:

El asiento aísla al ocupante de la aceleración lateral y vertical del cuerpo del coche. La Figura 10.5b muestra la transmisibilidad, eje Y, definida como la amplitud vertical de la superficie del asiento dividida por la amplitud de la fuerza de excitación, de un asiento de coche (europeo) y la frecuencia, eje X. Hay una resonancia a los 4 Hz y un aislamiento parcial a las vibraciones a frecuencias más altas. La resonancia ocurre en el rango de 2,5-3 Hz en coches americanos (Cavender y Kinkear, 1996) [37].

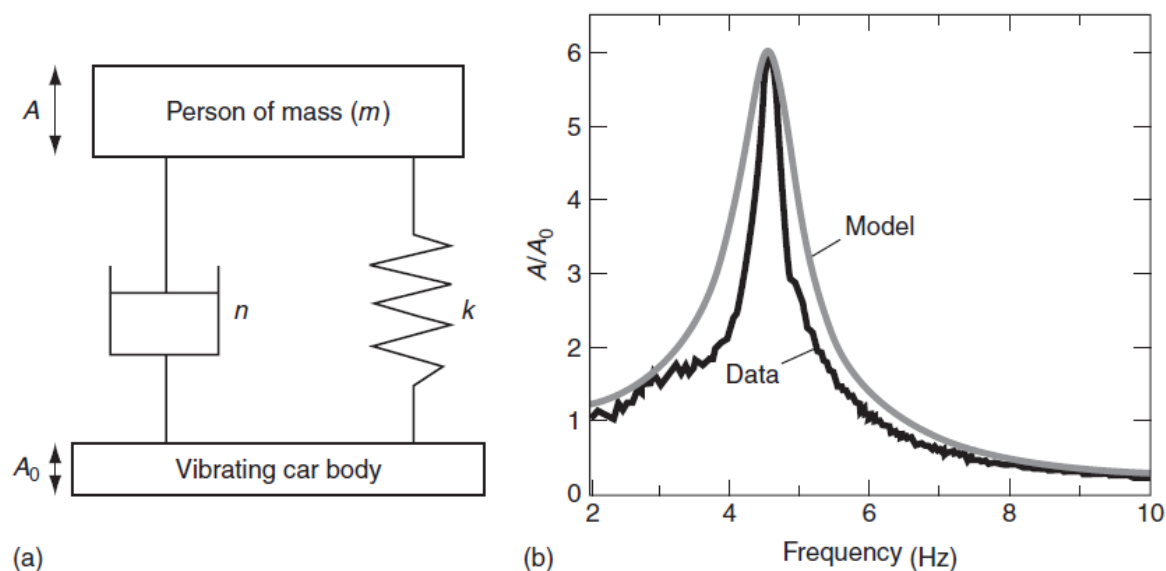


Figura 10.5: (a) Modelo de masa  $m$  sobre un muelle con amortiguación de constante  $k$  y (b) transmisibilidad de un asiento de coche vs. La frecuencia, siendo estos datos comparados con la respuesta del modelo (redibujado de Kinkellar, 1998 © Sae [38]).



Si el asiento transmite vibraciones de amplitud grandes a un rango de frecuencias de 2-20 Hz, los pasajeros podrían sentir cierto malestar, el estómago tiene una frecuencia de resonancia en este rango. Griffin (1990), [39], relacionó el malestar debido al movimiento en los coches con la vibración horizontal de la cabeza, afectando al oído y al sentido del equilibrio, más que a la amplitud de las oscilaciones verticales de la cabeza. Él encontró que muchos asientos de coches transmiten unos niveles similares de aceleraciones corporales en un rango de frecuencias de 0,1-1 Hz. Por tanto, la sensación de náuseas en pasajeros jóvenes puede evitarse mirando al exterior, con lo que el cerebro puede calcular el movimiento de la cabeza, y minimizando la aceleración lateral a la hora de conducir.

El modelo más simple de aislamiento a la vibración de un asiento de coche usa una masa  $m$  sobre un muelle de asiento de constante  $k$ , con un amortiguador en paralelo de constante  $n$ . El sistema tiene sólo un grado de libertad, la posición vertical de la masa. Si la constante del muelle es relativamente baja, la frecuencia de resonancia del sistema  $\omega_0$  viene dada por

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (10.1)$$

La respuesta a la frecuencia de conducción  $\omega$  se muestra en la Figura 10.5b. Una espuma con elevada amortiguación reduce la transmisibilidad, definida como  $A/A_0$ , por debajo de la frecuencia de resonancia. Todas las espumas comerciales de PU tienen una amortiguación significativa, con lo que los asientos no provocan una resonancia de amplitud elevada. Si la frecuencia de conducción excede la frecuencia de resonancia, hay menos transmisión cuando la amortiguación de la espuma es baja. El factor de aislamiento mejora marcadamente con el aumento de la frecuencia, si la frecuencia está por encima del valor de resonancia. Se suelen usar asientos más suaves para reducir la frecuencia de resonancia.

La transmisibilidad de un asiento de coche es una función de la amplitud de la aceleración aplicada, mientras que el modelo mostrado en la Figura 10.5a es independiente de la amplitud. Patten (1998), [40], usó un modelo de tensión-deformación no lineal para un a espuma de PU, y logró predecir la dependencia que tiene la amplitud de la transmisibilidad.

Puede haber múltiples ciclos de magnitudes similares, cuando un coche pasa sobre un pavimento desigual, o un solo ciclo mayor cuando el neumático de un coche atraviesa un bache. La aceleración vertical un pasajero puede ser mayor a

2g, con lo que el cuerpo ejerce tres veces su fuerza estática sobre el asiento (Mills N.J. 2007) [5].

### 10.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE ESPUMA:

La espuma debería tener un módulo de Young del orden de 20kPa para que sea comparable al tejido suave humano. Esto sólo se consigue con espumas de células abiertas. Las espumas de células cerradas tienen un módulo de Young que excede los 100kPa, debido a la compresión del aire atrapado en las células, por lo que son rara vez usados.

#### 10.3.1 Factores de selección de la espuma:

Los factores principales a la hora de seleccionar la espuma para el asiento de un coche son:

- a) Coste;
- b) Densidad baja;
- c) Aislamiento de la vibración;
- d) Evitar presiones excesivas, bajo influencias de cargas tanto estáticas como dinámicas;
- e) Durabilidad.

La espuma debería tener una densidad mínima. Dado que el módulo de Young de la espuma  $E_f$  está relacionado con la densidad relativa  $R$ , y el módulo de Young del polímero  $E$  por (Mills N.J. 2007) [5]:

$$E_f \cong 1,0ER^2 \quad (10.2)$$

La densidad de la espuma más baja, que dé con la especificación de  $E_f$ , está hecha de un polímero con un valor de  $E$  más alto. El módulo de Young de un PU semi-cristalino puede ser de 50 MPa. La espuma debe recuperar su forma completamente después de una gran deformación. Como las deformaciones poliméricas en las espumas de células abiertas es de la misma magnitud que en deformaciones a compresión de la espuma (Mills N.J. 2007) [5], el polímero debe comportarse elásticamente para deformaciones de hasta un 80%. Esto excluye al polietileno (PE) y al polipropileno (PP) los cuales tienen una deformación límite de cerca de un 10%.

El aislamiento de vibraciones es importante. Para una frecuencia de resonancia típica de  $f_0 = 4$  Hz y un ocupante de masa  $m = 60$  kg, la ecuación (10.1) de la página 68 da como resultado una constante de rigidez del muelle de  $k = 40$  nNm<sup>-1</sup>.

#### 10.4 EJEMPLO DE DISEÑO DE UN ASIENTO:

A continuación se va a proceder a describir el diseño de un asiento de dimensiones sencillas a partir del área de los glúteos, la constante del muelle y de la frecuencia de resonancia.

##### 10.4.1 Compresión uniaxial uniforme:

Esta sección y la siguiente tratan sobre el mecanismo de una persona sentada sobre una superficie de espuma soportada sobre una base rígida (aproximación de las cargas estáticas de todo asiento de coche hecho de cualquier tipo de espuma), usando modelos cada vez más complejos. El modelo más simple toma a los glúteos como una superficie plana de un área igual al área del cojín de la espuma. Esto provee un orden de magnitud para estimar el módulo de Young de la espuma y el espesor del cojín, ignorando la no linealidad y la dependencia del tiempo de respuesta de la espuma. El área de los glúteos  $A$  es aproximadamente 0,3m por 0,3m con lo que  $A=0,009\text{m}^2$ . La constante del muelle  $k$  de un bloque de espuma comprimido uniformemente está relacionado, usando las definiciones de tensión  $\sigma$  y deformación  $\varepsilon$  uniformes, con el espesor del bloque  $t$  y el módulo de Young  $E_f$  de la espuma por:

$$k \equiv \frac{F}{x} = \frac{\sigma A}{\varepsilon t} = \frac{E_f A}{t} \quad (10.3)$$

Tomando como referencia una persona de 60Kg de peso, las cantidades de  $E_f$  y  $t$  vienen determinadas por una condición para la frecuencia de resonancia, y una condición para que el asiento no toque el fondo para una aceleración vertical del sujeto de 2,5g, aproximación de la aceleración vertical de una persona cuando un autobús atraviesa un bache [5]; con lo que el pico de fuerza será el producto de la masa, 60kg, por la aceleración, compuestas por la fuerza  $g$  de la gravedad más la fuerza 2,5g debida a la aceleración vertical producida por el bache, dando como resultado:

$$F = (2,5g + g)60kg = 3,5 * g * 60kg = 3,5 * 10m / s^2 * 60kg = 2KN \quad (10.4)$$

Con esta fuerza, asumiendo una respuesta lineal, la deformación es  $x=t$ , con  $F=E_f A$ . Usando  $A=0,009m^2$ , da un valor de módulo de Young de la espuma de  $E_f=22kPa$ . De la página anterior, la condición de frecuencia de resonancia daba un valor de  $k=40kNm^{-1}$ . Por tanto, con la ecuación (10.3) de la página 70 y despejando  $t$ , ésta da un valor de:  $t=0,05m$ .

$$t = \frac{E_f A}{k} = \frac{22e3Pa * 0,009m^2}{40KNm^{-1}} = 0,05m \quad (10.5)$$

Si el módulo de Young del PU sólido es de  $E=40MPa$ , para obtener un módulo de  $E_f=22kPa$  se requiere una densidad relativa de: (ver ecuación (10.2) de la página 69):

$$R = \sqrt{\frac{E_f}{E}} = \sqrt{\frac{22e3Pa}{40e6Pa}} = 0,025 \quad (10.6)$$

Como la densidad de un sólido de PU es de  $1200kgm^{-3}$ , la espuma de PU debería tener una densidad de  $30kgm^{-3}$ : (Ver ecuación (7.1) de la página21)

$$\rho_f = R * \rho_p = 0,025 * 1200Kg / m^3 = 30Kg / m^3 \quad (10.7)$$

#### 10.4.2 Ensayo IFD con penetrador con forma de glúteos:

Shen y Vertiz (1997), [41], midieron la relación de la fuerza de hendidura (Indentation Force), Figura 10.6, con un penetrador en forma de glúteo que fue usado con asientos de tres coches americanos. Sin embargo, la forma de los glúteos de un sujeto depende de la dureza del asiento y cambia bajo carga. Con lo que el penetrador de madera con forma de glúteo sólo era una pobre aproximación para parte del rango de cargas.

Ellos encontraron una deflexión típica de 50 mm para una carga de 700N, lo cual significa una rigidez media (fluencia) de  $14kNm^{-1}$ . EN las etapas iniciales de compresión, la rigidez del asiento es menor. El asiento no debería tocar fondo con las aceleraciones verticales de los pasajeros de 2,5g, un pico de fuerza sobre el asiento de  $3,5 * 600 = 2kN$ , aceleraciones verticales más gravedad. Mientras la relación fuerza-distancia del asiento mantenga una curvatura positiva, esta condición debería cumplirse con un espesor total de asiento de cerca de 120

mm. Las relaciones fuerza-distancia fueron más lineales que las curvas tensión-deformación de espuma a compresión.

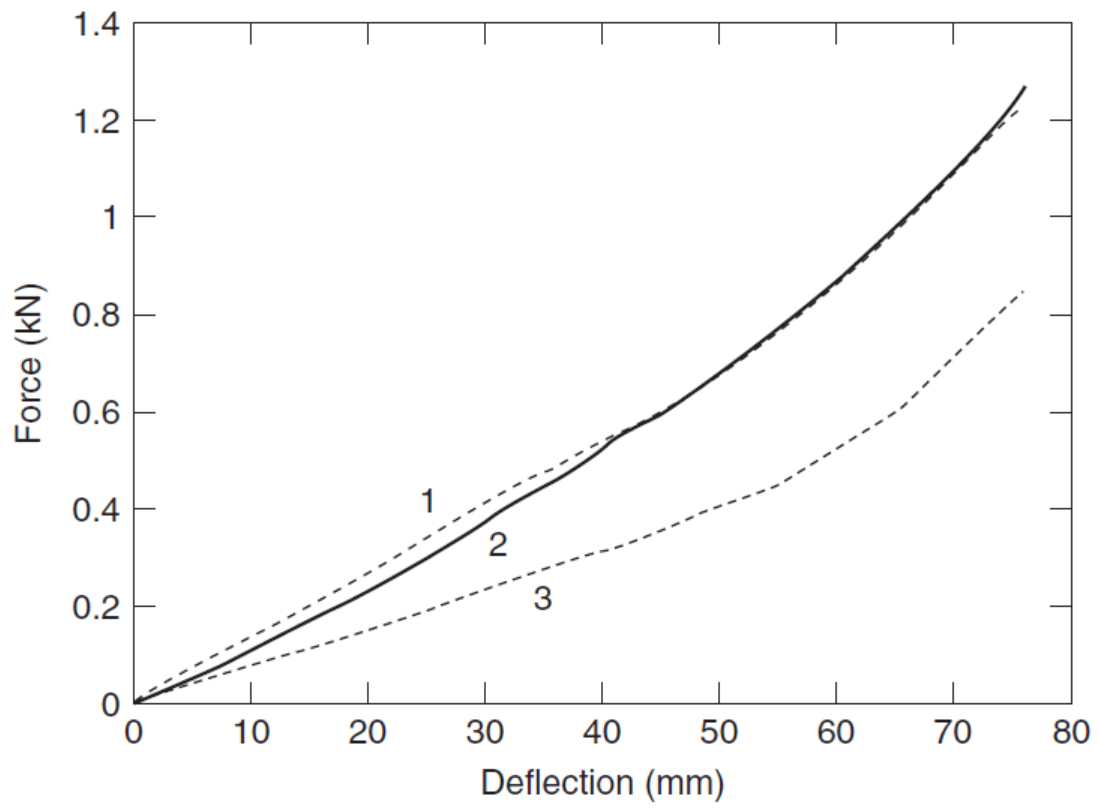


Figura 10.6: Gráficos de fuerza-deflexión de tres asientos de coche americanos (Shen y Vertiz, 1997 © SAE) [41]

### 10.4.3 MEF de deformación de glúteos y espuma.

Un estudio antiguo de los glúteos sobre un cojín de espuma usó modelos 2-D (Dahnichki, 1994), [42], con lo que no podía simular aspectos importantes de la geometría. Bouten (2003), [33], usó tal modelo, con capas de espuma, piel, grasa y músculo como muestra (Figura 10.7) que había máximos de tensión de von Mises (tensiones cortantes máximas) localizados en las capas subcutáneas de grasa y músculo, donde las úlceras de presión pueden ocurrir. Sin embargo, no dieron detalles sobre los parámetros de los materiales, y las unidades de tensión, dadas en mPa, eran probablemente 10kPa.

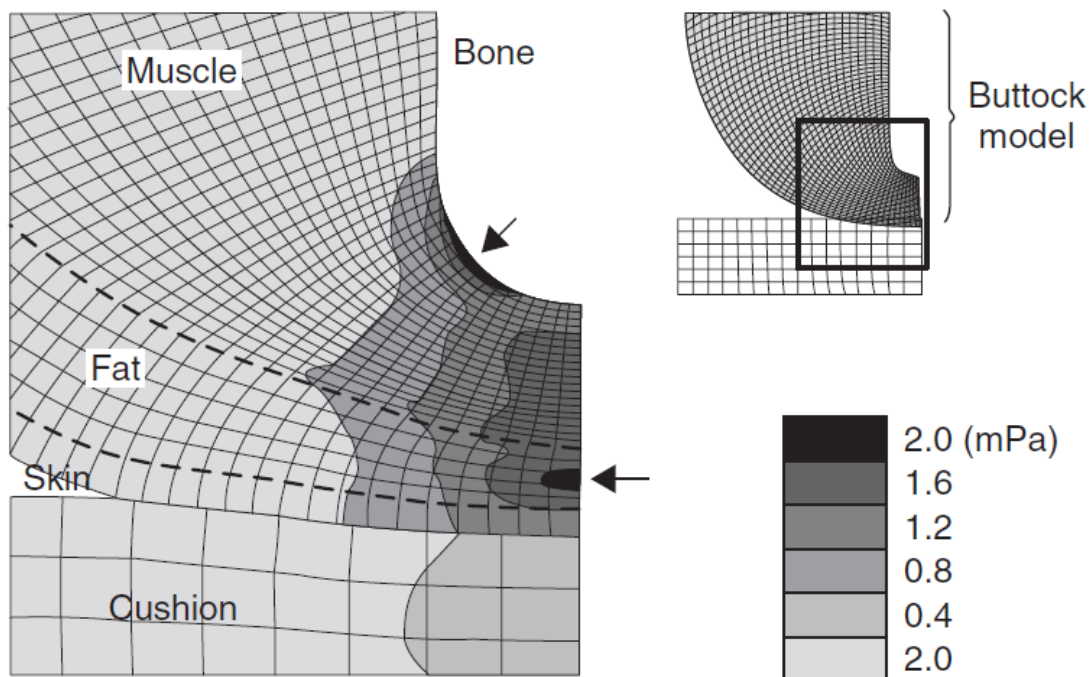


Figura 10.7: Modelo por ordenador en 2-D de un glúteo deformado de un hombre de 80kg sobre un cojín de espuma con contornos de tensión de von Mises (Bouten, 2003, [33], @ American Congress of Rehabilitation Medicine).

Verver (2004), [43], usó un modelo en 3-D (Figura 10.8). Las tensiones a compresión principales predichas son de 60 kPa. Cerca de las tuberosidades isquiáticas, pero sólo de 20 kPa. En la superficie de contacto glúteos/cojín. La espuma fue modelada como un material linealmente elástico con un módulo de Young de  $E = 200$  kPa, mientras que el tejido suave fue modelado como un sólido Mooney-Rivlin con  $C_1 = 1,65$  kPa,  $C_2 = 3,35$ , y  $\nu = 0,49$ . Las tensiones máximas dentro del tejido de los glúteos indican el lugar probable de formación

de úlceras de presión. Sin embargo, las presiones superficiales medidas sobre los glúteos pueden no revelar tensiones que causan úlceras. La distribución de presiones predicha sobre la superficie de la espuma (Figura 10.8b) tiene las características principales de un patrón experimental (Figura 10.3). Sin embargo, la espuma sería modelada mejor como un material de hiper-espuma (*hyperfoam*) de Ogden (Mills N.J. 2007), [5].

El material *hypefoam* de Ogden está disponible en ABAQUS, ANSYS o PATRAN. Sin embargo, no está disponible en Creo-Simulate. Por tanto, no se podrá en este proyecto trabajar con él. Sin embargo, Creo-Simulate tiene incorporados otro tipo de materiales hyper-elásticos, es decir, funciones similares a la de Ogden, ecuación (9.5) en la página 47, con los que también se pueden hacer ajustes a la curva tensión-deformación.

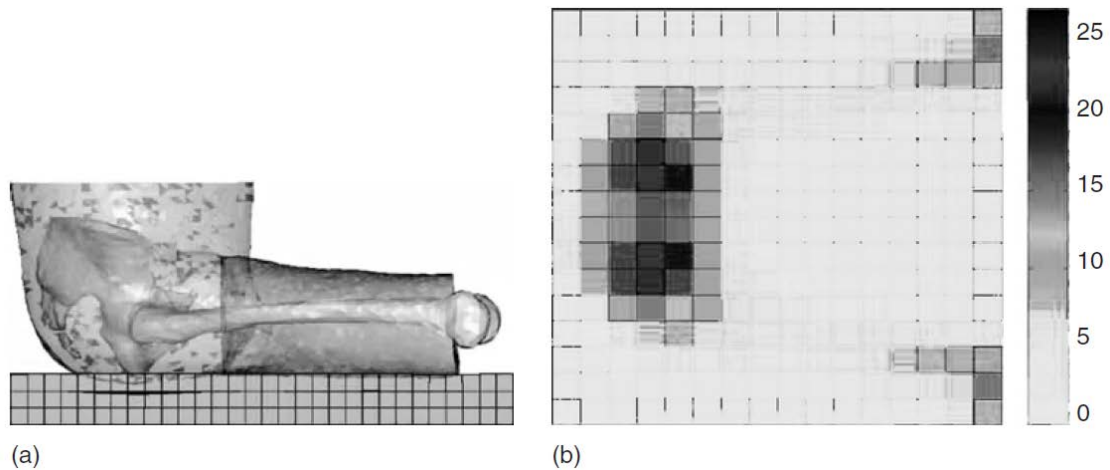


Figura 10.8: (a) Modelo en 3-D de una persona sentada sobre un cojín de espuma y (b) mapa de presiones predicha sobre la superficie de la espuma, con la presión en Kpa. (Verver, 2004 © Taylor & Francis) [43].

## 10.5 OTRAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ESPUMA:

### 10.5.1 Fatiga mecánica:

La durabilidad de los asientos de coches es importante, dado que los consumidores esperan que la prestación no se vea disminuida después de, al menos, 10 años. Los ensayos de durabilidad aceleran el proceso de deterioro del producto. La fatiga mecánica utiliza cargas de repetición elevada; un rodillo cilíndrico puede oscilar horizontalmente a lo largo de un producto, y su pérdida de altura ser medida después de unos 75 000 ciclos. Esto simula una carga alta

aplicada 40 veces por noche durante unos 10 años. La pérdida de altura en espumas y pérdida de los valores en un IFD son mayores para espumas de baja densidad. La deformación máxima a compresión de la espuma en ensayos de fatiga afecta a la cantidad de daños celulares, la fractura de los bordes de las células, y permanente reblandecimiento del polímero dentro de la espuma. Espumas de baja densidad no pueden ser usadas para asientos de coche debido a sus inferiores propiedades de fatiga. El tipo de espuma de PU es adaptado al área de uso dentro de un coche (Casati, 1999), [44]. Las espumas de alto rendimiento pueden ser usados en los asientos delanteros, mientras que espumas de baja densidad son usados en los respaldos y para asientos de tipo banco traseros.

#### 10.6 RESUMEN:

El diseño de asientos de coche usando MEF es sólo una aproximación, debido a que un modelo completo por ordenador, con una geometría anatómica y de espuma detallada, no es factible de momento. Esto es debido a modelos de materiales inadecuados para el tejido blando, el cual tiene parámetros que varían con la tensión muscular. Sin embargo, dada la variabilidad de altura y tamaño entre la población, un asiento ideal para una persona podría no ser adecuada para muchas otras. La espuma de un asiento debe ser lo suficientemente gruesa para no tocar el fondo de ésta, y su módulo de Young a compresión debe ser del mismo orden de magnitud que de la del tejido blando, la del músculo. Las espumas para asientos, los cuales se usan ampliamente en la fabricación de muebles domésticos, no proveen una distribución de presiones ideal. Sin embargo, incluso asientos complejos de muchos materiales no producen una distribución de presiones uniforme.



## 11 ACERCA DE CREO SIMULATE:

No todos los programas de elementos finitos funcionan del mismo modo. Creo simulate utiliza un tipo de elementos diferente de los demás paquetes informáticos MEF. De hecho el tipo de elemento es la mayor diferencia entre Creo y la mayoría de estos programas.

### 11.1 CONVERGENCIA DE ELEMENTOS-H (EL PLANTEAMIENTO CLÁSICO):

Siguiendo el planteamiento clásico, la mayoría de los programas a menudo usan un orden de polinomio bajo a la hora de interpolar en cada elemento. En un análisis de tensiones las variables de solución primarias son los desplazamientos en los nodos. Las funciones de interpolación son típicamente lineales (de primer orden) dentro de cada elemento. La deformación se obtiene tomando las derivadas del campo de desplazamientos y la tensión se calcula a partir de la deformación del material. Para una interpolación de primer orden de polinomio dentro del elemento, esto significa que los componentes de la deformación, y por tanto de la tensión, son constantes dentro de cada elemento. Elementos de orden inferior conllevan a inexactitudes muy grandes precisamente en las regiones de principal interés, a menudo donde hay grandes gradientes dentro del objeto real.

Por ello, cuando se usan elementos de primer orden, para obtener unas estimaciones más exactas de la tensión, es necesario usar elementos mucho más pequeños, un proceso llamado *refinamiento de la malla (mesh refinement)*. No siempre es posible identificar fácilmente estas regiones donde se requiere un refinamiento de la malla y a menudo el mallado entero tiene que ser modificado. El proceso de refinamiento de la malla continúa hasta que una mayor división y refinamiento de la malla no provocan cambios significativos en la solución obtenida. El proceso de refinar la malla continuamente deriva a una “buena” solución la cual es llamada *análisis de convergencia*. Por supuesto, en el proceso de refinar la malla, el problema de cálculo crece más y más y se puede alcanzar un límite para problemas prácticos (debido a límites de tiempo y/o memoria) antes de que haya convergido exitosamente hacia una solución aceptable.

En FEM, la  $h$ , hace referencia al tamaño de los elementos. Los elementos, siempre de un orden bajo, se llaman “*elementos-h*”, y el procedimiento de refinamiento de la malla se denomina “*convergencia-h*”. Esta situación se

muestra en los apartados (a) y (b) de la Figura 11.1, donde se usa una serie de pasos de altura constante para aproximarse a una función continua suave. Cuanto más estrechos los pasos, más cerca se podrá aproximar a la función con suavidad.

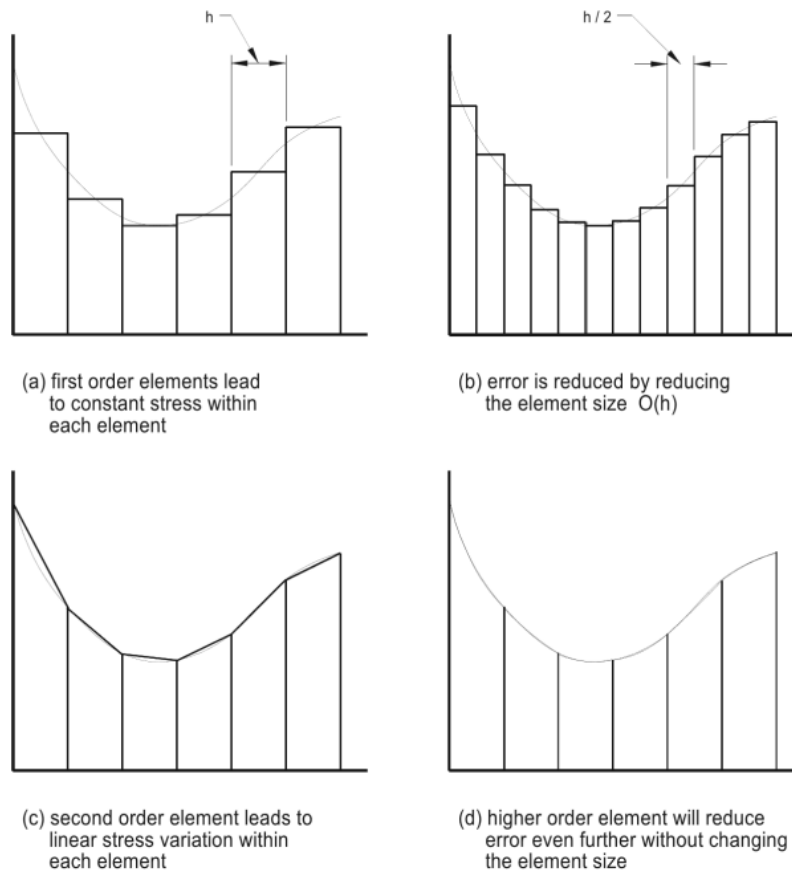
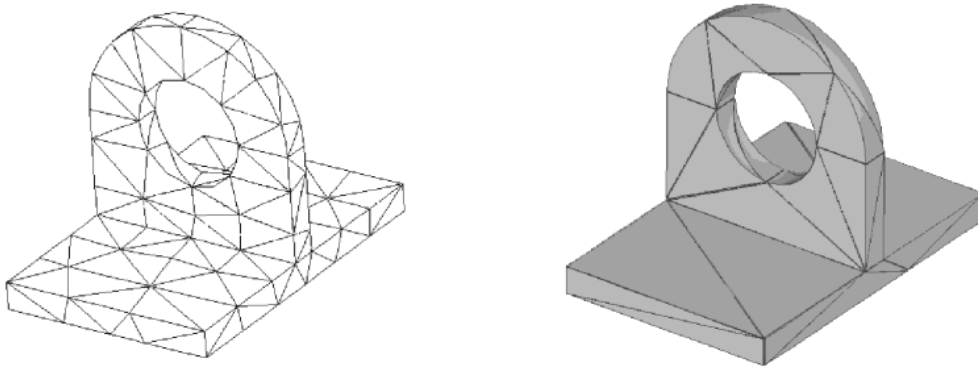


Figura 11.1 Aproximaciones de la función tensión en un modelo. (Toogood 2012) [45]

## 11.2 CONVERGENCIA DE ELEMENTOS-P (PLANTEAMIENTO DE CREO):

A diferencia de los demás paquetes de software FEM, en lugar de refinar y recalcularse cada vez más finas, la convergencia se obtiene incrementando el orden del polinomio de interpolación sobre cada elemento. El mallado se mantiene igual en cada iteración, llamada *paso de bucle-P*, *p-loop pass*. El uso de órdenes de polinomio de interpolación más altos para análisis de convergencia conlleva a la clase de *elementos-p* de métodos MEF, donde la “*p*” denota polinomial. Este método se muestra en las partes (c) y (d) de la Figura 11.1. Sólo en los elementos de las regiones de grandes gradientes, se usa un orden mayor de polinomio. De hecho, examinando los efectos de usar cada vez

polinomios de grados mayores, Creo puede monitorizar los errores esperados en la solución, y automáticamente incrementar el grado del polinomio sólo en aquellos elementos donde se necesite. Con lo que análisis de convergencia es más bien automático, calculando la solución hasta llegar a un límite de exactitud (proporcionado por el usuario, en Creo el límite en el grado de polinomio es de 9).



*Figura 11.2 (a) Mallado tetraédrico (4 nodos) de elementos-h de un sólido. (b) Mallado tetraédrico de elementos-P producido por Creo.*

El uso de *elementos-p* que hace Creo Simulate hace que tenga las siguientes ventajas:

- La misma malla puede utilizarse a través del análisis de convergencia, en lugar de refinar en algún lugar concreto el mallado usando códigos-h.
- El mallado es siempre más grueso y contiene muchos menos elementos que los códigos-h. Como ejemplos se muestran los casos (a) y (b) de la Figura 11.2. Esto reduce la carga de cálculo, pero una vez que el grado del polinomio aumenta, esta ventaja comienza a desaparecer.
- Las restricciones sobre el tamaño de los elementos y su forma no son tan elevadas cuando se usan elementos-h.
- Los generadores de malla automáticos, que a veces producen mallados bastante pobres para elementos-h, son mucho más efectivos para elementos-p, debido a los reducidos requerimientos y limitaciones sobre la geometría de la malla.
- Debido a que la misma malla es usada durante todo el análisis, esta malla puede ser asociada directamente a la geometría, lo que supone una gran ventaja en estudios de sensibilidad y optimización.

### 11.3 CONVERGENCIA Y EXACTITUD EN LA SOLUCIÓN:

Debido al número de suposiciones simplificadas necesarias para obtener resultados con MEF, se deberían tomar precauciones a la hora de tener en cuenta los resultados obtenidos. No se deben aceptar soluciones FEM sin examinar las propiedades de convergencia.

Para elementos-h, esto generalmente significa realizar la simulación muchas veces con elementos cada vez más pequeños y monitorizar los cambios en las soluciones. Si con disminuir el tamaño del elemento se obtiene como resultado un cambio en la solución aceptablemente pequeño, entonces se puede decir que el resultado FEM es satisfactorio y se ha exprimido toda la información que se podía al modelo.

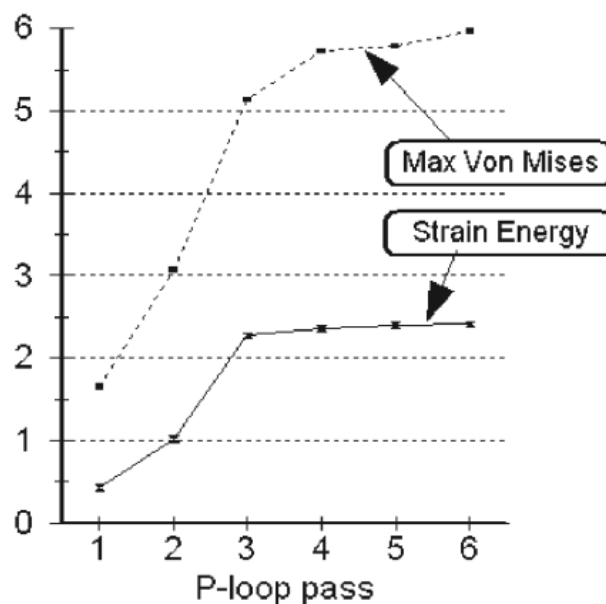


Figura 11.3 Dos medidas de convergencia comunes usando elementos-p. (Toogood 2012) [45]

Con los elementos-P, el análisis de convergencia está integrado en el programa. Como la geometría de la malla no cambia, no se requiere un nuevo mallado con el consiguiente ahorro de tiempo. Además, cada solución sucesiva (llamada paso de bucle-P, *P-loop pass*), se realiza incrementando el grado de polinomio (sólo en los elementos donde es requerido) hasta que el cambio entre las iteraciones es “suficientemente pequeño”. La Figura 11.3 muestra el

comportamiento de la convergencia de dos medidas comunes usadas para monitorizar la convergencia en Creo. Estas son la máxima tensión de Von Mises y la energía total de deformación. Generalmente la tensión de Von Mises suele incrementarse durante el test de convergencia, pero a veces se puede comportar erráticamente. Debido a que la tensión de Von Mises es una medida local, la energía de deformación es probablemente una medida mejor a la hora de monitorizar la convergencia.

#### 11.4 MÉTODOS DE CONVERGENCIA:

Tal como fue discutido anteriormente, usar el método de código P permite a Creo Simulate monitorizar la solución y modificar el orden polinomial hasta que se alcance una solución con una exactitud específica. Creo Simulate está implementado con tres opciones de convergencia:

##### 11.4.1 Quick Check:

Este no es realmente un método de convergencia debido a que el modelo es simulado sólo a un orden polinomial fijo bajo, normalmente 3. **Los resultados de un Quick Check no deberían nunca ser tomados en cuenta.** El Quick Check, chequeo rápido, está hecho para simular rápidamente el modelo a través del solver con la finalidad de señalar cualquier error que pueda haberse cometido, como por ejemplo en las restricciones o condiciones de contorno. Un vistazo rápido a los resultados indicará también si algún error considerable en el modelado ha sido cometido indicando potenciales áreas problemáticas en el modelo.

##### 11.4.2 Single Pass Adaptive (SPA):

Más que un Quick Check, pero menos fiable que una simulación de convergencia completa, el método single pass adaptive realiza un paso a un orden polinomial bajo, evalúa la exactitud de la solución, modifica los niveles p de “elementos problemáticos”, y hace un paso final aumentando el orden de algunos elementos de forma que debería proveer resultados razonables. Si el modelo es muy intenso a nivel de cálculo y/o tiene un buen comportamiento y éste se entiende, este método de convergencia puede ahorrar mucho tiempo.

El SPA es un buen compromiso entre un resultado exacto, tiempo de cálculo y recursos. Éste está recomendado para analizar partes y montajes que contienen materiales con propiedades muy similares. Hay que tener cuidado si se tienen montajes con altas diferencias locales en cuanto a dureza, por ejemplo, cuando se usan dos material cuyos módulos de Young difieren en exceso, parcialmente un material ortotrópico suave, o un elastómero conectado a un acero. En este caso, puede que los niveles  $P$  se incrementen allí, con lo que es recomendable monitorizar los niveles- $p$ . Esto es importante dado que se va a simular contactos entre masa muscular y hueso y entre espuma y un sólido rígido. Con lo cual se podrían esperar posibles errores en dichas interacciones.

El SPA usa el resultado un único *paso- $p$* , con todos los bordes del modelo inicialmente puestos a  $P=3$ . Las tensiones se suavizan utilizando una técnica global. Estas tensiones suavizadas se comparan con la tensión bruta o con una tensión calculada directamente en varios puntos de cada elemento para calcular un error. Si este *RMS stress error, error cuadrático medio de tensión*, excede una tolerancia (por defecto un 8%), el tamaño del error se usa para calcular una estimación de cuántas funciones adicionales son necesarias en el elemento. Desde el número de funciones necesarias en el elemento, Simulate determina un incremento en el grado del polinomio para cada borde. Con lo que un elemento con un error elevado, el *grado- $p$ ,  $p$ -order*, de esos bordes podrían saltar de 3 a tan alto como 9.

#### 11.4.3 Multi-Pass Adaptive (MPA):

Es lo último en análisis de convergencia. El solver efectúa múltiples pasos en forma de “bucles  $P$ ” con un orden polinomial de “elementos problemáticos” siendo incrementados por uno o dos con cada paso. Este enfoque iterativo continua hasta que converge alguna solución a una exactitud específica o hasta que se alcanza un orden máximo especificado (por defecto 6, máximo 9). La convergencia se monitoriza mediante la observación de una o más “medidas”, o aspectos numéricos de la solución. Las medidas típicas son el máximo de la tensión de Von Mises, o la energía de deformación (ver Figura 11.3 de la página 79). Las medidas por defecto para un análisis de estrés estático son el desplazamiento nodal, la energía de deformación local, y la tensión global RMS (siglas en inglés de cuadrado de la raíz cuadrática media). Al término de la simulación, las medidas de convergencia pueden ser examinadas. (Toogood 2012) [45]

De los tres métodos de convergencia, el único que admite Creo Simulate para grandes deformaciones, como es el caso de este proyecto, es el método de convergencia ***Single Pass Adaptive***. Con lo cual éste será el método de convergencia usado, visto, y analizado, en las simulaciones posteriores.

## 12 DATOS GENERALES DE LAS SIMULACIONES:

Se llevarán a cabo distintas simulaciones, primero una en donde interactúan la masa ósea, la masa muscular y una espuma la cual hace de asiento de autobús.

Luego se simulará nuevamente la simulación comentada anteriormente pero con un nuevo elemento, el asiento suplementario, entre la masa muscular y el asiento de autobús y se estudiarán las diferencias en cuanto a tensiones y deformaciones en la masa muscular.

Por último, se llevarán a cabo varias simulaciones en las cuales interactúan el hueso, masa muscular, asiento de autobús y asiento complementario, variando el espesor del asiento complementario para así estudiar sus variaciones de tensiones y deformaciones con respecto al espesor del asiento complementario.

### 12.1 MATERIALES A USAR PARA LAS SIMULACIONES:

A continuación se describen los datos para materiales y simulaciones que se usarán en todas las simulaciones descritas anteriormente:

### 12.2 MATERIAL PARA LA MASA MUSCULAR:

Para el modelo de masa muscular se usarán los parámetros hiperelásticos obtenidos a partir de la patente de Tang y Sui (2006) [46] a la cual hacen referencia los mismos autores en el documento del 2010 [47], los cuales modelaron la masa muscular usando un material hiperelástico basado en una fórmula polinómica de orden 2 con los datos que se especifican en la ventana de la Figura 12.1.



Figura 12.1 Características del material usado para la masa muscular.

Los números relativos a C10, C01, C20, C02, C11, D1, D2, son parte de una fórmula polinomial de orden 2 la cual se ajusta la curva tensión-deformación obtenida en [46].

El material para el músculo será el mismo para todas las simulaciones donde intervenga la masa muscular.

### 12.3 MODELO DE MATERIAL USADO PARA EL ASIENTO SUPLEMENTARIO:

El material usado para el asiento suplementario presentado en este proyecto se ha obtenido a partir de la curva de tensión deformación de la espuma de poliuretano PU38, de  $38 \text{ Kg/m}^3$  de densidad, de la Figura 9.3 de la página 52 de

este proyecto. El procedimiento seguido para conseguir los puntos de tensión-deformación es el siguiente:

- Se imprimió la figura de la curva tensión deformación (línea discontinua) ampliada en un folio A4.
- Se dibujaron líneas horizontales y verticales correspondientes a los valores de tensión y deformación en los ejes X e Y.
- Se obtuvieron los puntos de tensión-deformación que corresponden a los de la siguiente tabla:

	<b>Deformación</b>	<b>Tensión(Kpa)</b>
<b>1</b>	0	0
<b>2</b>	-0,05	-1,3
<b>3</b>	-0,1	-2
<b>4</b>	-0,15	-2,2
<b>5</b>	-0,2	-2,75
<b>6</b>	-0,25	-3
<b>7</b>	-0,3	-3,25
<b>8</b>	-0,35	-3,6
<b>9</b>	-0,4	-4
<b>10</b>	-0,45	-4,7
<b>11</b>	-0,5	-5,25
<b>12</b>	-0,55	-6,25
<b>13</b>	-0,6	-7,6
<b>14</b>	-0,65	-10,3
<b>15</b>	-0,7	-14,1
<b>16</b>	-0,75	-20

*Tabla 12.1 Datos de los puntos tensión-deformación para el material PU38. (Ver Figura 9.3 de la página 52)*

Estos datos se introducen en Creo Simulate para la creación de un nuevo modelo de material definido por un ensayo uniaxial en la tabla que aparece en la parte izquierda en la Figura 12.2.

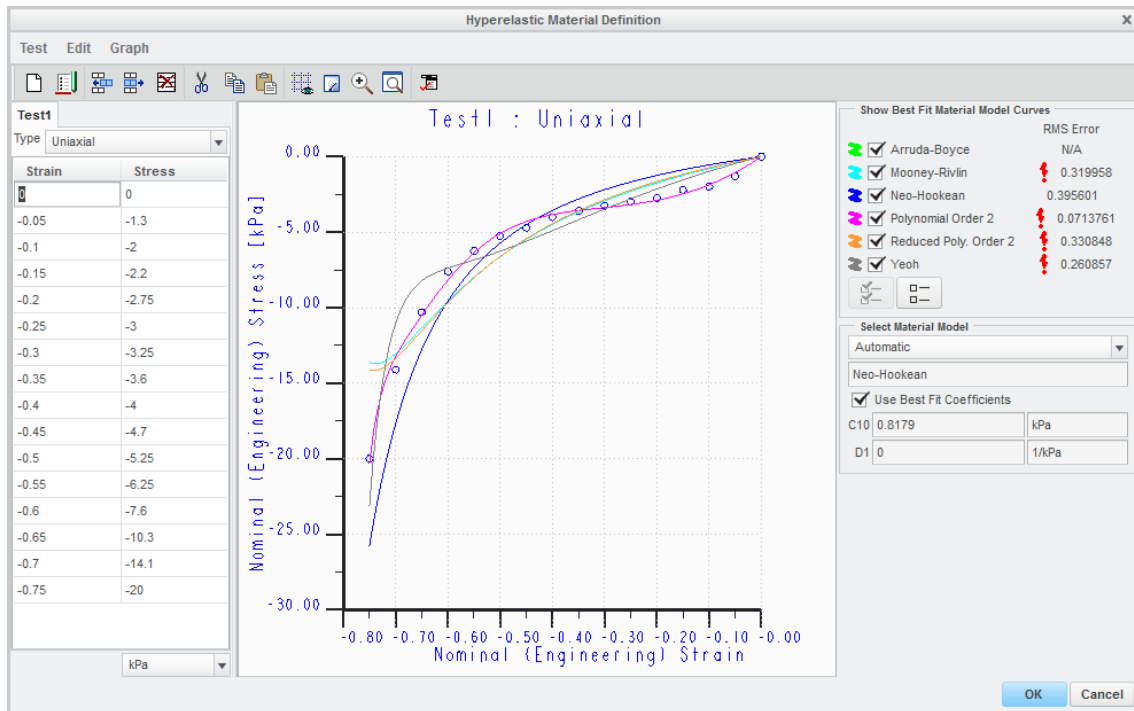


Figura 12.2 Introducción de datos de puntos tensión-deformación de un ensayo uniaxial para el material PU38, en Definición de material Hiperelástico dentro de Creo Simulate.

Al introducir estos datos en el programa, éste hace un ajuste automático mediante 6 fórmulas distintas usadas para materiales hiperelásticos (ver parte derecha de la Figura 12.2). Las fórmulas matemáticas son las siguientes: Arruda Boyce, Mooney-Rivlin, Neo-Hookean, Polinómica de orden 2, polinómica reducida de orden 2 y Yeoh. A partir de estas fórmulas, el programa ajusta los datos automáticamente a la fórmula que mejor se adapta a ella. En este caso, la fórmula que mejor se adapta a la curva tensión-deformación del PU 38 es la Neo\_hookean, adaptando los valores de  $C10 = 0.8179$  Kpa y  $D1 = 0$  1/Kpa. Con estos valores de dicha fórmula el modelo de material queda definido por Creo Simulate.

#### 12.4 MODELO DE MATERIAL USADO PARA EL ASIENTO DE AUTOBÚS:

Con el fin de obtener un modelo de material parecido a un asiento de conductor profesional de autobús, incluyendo el deterioro y endurecimiento que éste adquiere con los años, se utilizaron los datos deformación-tensión de un material de espuma mucho menos deformable que el anterior. Cuyos datos se obtuvieron a partir de la referencia [48] y que son los de la tabla siguiente:

	<b>Deformación</b>	<b>Tensión(Mpa)</b>
<b>1</b>	0	0
<b>2</b>	-0,05	-0,0217
<b>3</b>	-0,1	-0,0317
<b>4</b>	-0,15	-0,0367
<b>5</b>	-0,2	-0,0402
<b>6</b>	-0,25	-0,0433
<b>7</b>	-0,3	-0,0467
<b>8</b>	-0,35	-0,0504
<b>9</b>	-0,4	-0,0542
<b>10</b>	-0,45	-0,0604
<b>11</b>	-0,5	-0,0668
<b>12</b>	-0,55	-0,0759
<b>13</b>	-0,6	-0,0909
<b>14</b>	-0,65	-0,1083
<b>15</b>	-0,7	-0,141
<b>16</b>	-0,75	-0,1933
<b>17</b>	-0,8	-0,2896

*Tabla 12.2 Datos de los puntos tensión-deformación usados para definir el modelo de material que se usará modelar el asiento de autobús.*

Tal como se hizo con los datos del PU38, los puntos tensión-deformación se introducen en Creo Simulate en el apartado de materiales hiperelásticos como datos de un ensayo uniaxial de la forma mostrada en la Figura 12.3. Con lo cual, el modelo de material para el asiento de autobús queda definido de esta forma con los valores de  $C10 = 0,0084334$  Mpa y  $D1 = 0$  1/Mpa.

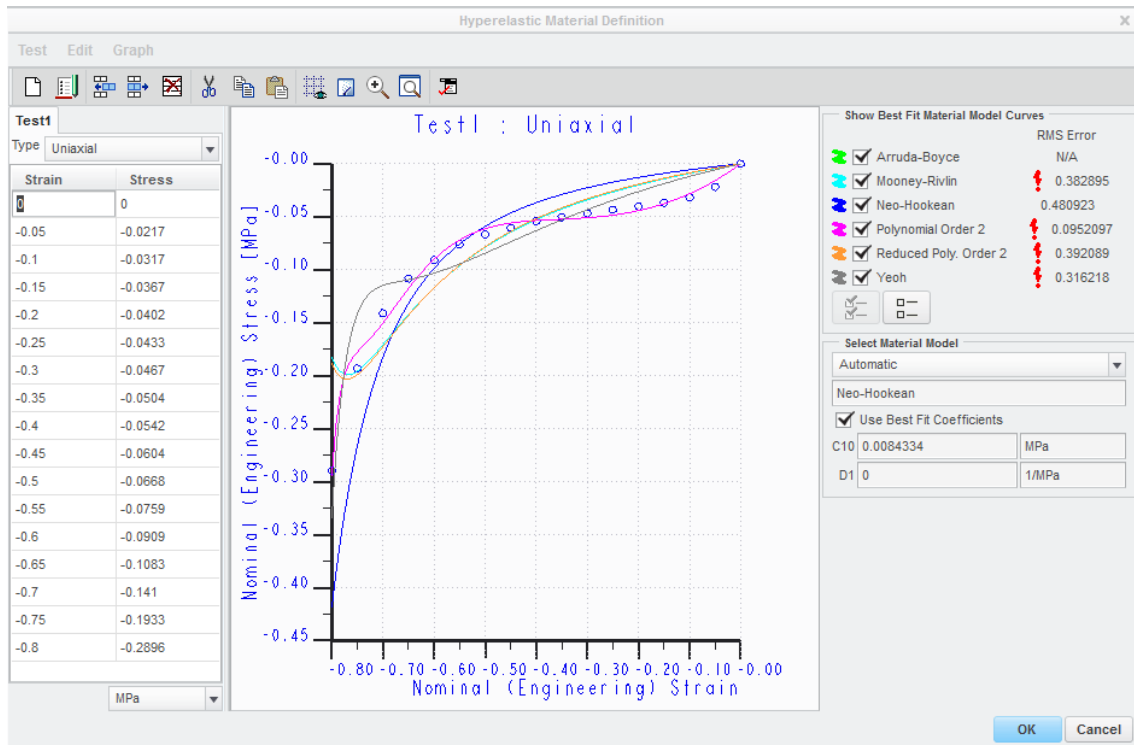


Figura 12.3 Introducción de datos de puntos tensión-deformación de un ensayo uniaxial para el material usado como asiento de autobús, en Definición de material Hyperelástico dentro de Creo Simulate.

## 12.5 MATERIAL USADO PARA EL HUESO:

El material usado en las simulaciones para la parte ósea será el aluminio AL2014, cuyas propiedades son mostradas en la Figura 12.4. Se ha optado por el aluminio dado que el objeto de estudio serán las tensiones de la masa muscular. Por tanto, se despreciarán las tensiones en la masa ósea y se centrará la atención en las tensiones y deformaciones del músculo.

Material Definition		X	
Name			
AL2014			
Description			
Density		2793.55	kg/m <sup>3</sup>
<b>Structural</b>   Thermal   Miscellaneous   Appearance   User Defined			
Symmetry		Isotropic	
Stress-Strain Response		Linear	
Poisson's Ratio	0.33		
Young's Modulus	73084.4	MPa	
Coeff. of Thermal Expansion	2.304e-05	/C	
Mechanisms Damping		sec/mm	
<b>Material Limits</b>			
Tensile Yield Stress		MPa	
Tensile Ultimate Stress		MPa	
Compressive Ultimate Stress		MPa	
<b>Failure Criterion</b>			
		None	
<b>Fatigue</b>			
		None	
Ok		Cancel	

Figura 12.4 Datos del aluminio AL2014 usado para la masa ósea en las simulaciones.

## 12.6 TIPO DE SIMULACIÓN:

Las simulaciones llevadas a cabo se hicieron usando el tipo de simulación 2D Plane-Strain la cual considera, para la idealización del modelo, una profundidad infinita y una deformación en el eje z nula.

## 12.7 PASOS DE CARGA Y MÉTODO DE CONVERGENCIA:

Se utilizan dentro del análisis estático 10 pasos de carga, lo que significa que por cada paso, Creo Simulate calculará la deformación y el área de contacto, los cuales serán usados para el cálculo de la deformación y el área de contacto del paso siguiente. Por último el programa usará la carga completa definida por el usuario para calcular las tensiones y deformaciones del modelo.

<b><i>Pasos de carga</i></b>	<b><i>Factor de carga</i></b>
1	0.001
2	0.002
3	0.005
4	0.01
5	0.02
6	0.05
7	0.1
8	0.2
9	0.5
10	1

*Tabla 12.3 Pasos de carga para las simulaciones 2D Plain-Strain.*

El método de convergencia empleado en las simulaciones es el Single-Pass Adaptive, el cual es el único método de convergencia que permite usar Creo Simulate para simulaciones no lineales y grandes deformaciones como en estos casos.

## 13 SIMULACIONES:

### 13.1 SIMULACIÓN DONDE INTERACTÚAN EL HUESO, LA MASA MUSCULAR Y EL ASIENTO DE AUTOBÚS:

Esta simulación se hace con el objetivo de estudiar la interacción entre el hueso y la masa muscular, y la interacción entre el músculo y el asiento de autobús, de una manera sencilla; analizar las deformaciones, y sobre todo las tensiones, que se producen en el músculo como consecuencia de esta interacción. Se verá si las tensiones tanto en la masa muscular como en la superficie de contacto en la interacción músculo-asiento están dentro del objetivo de confort de 12Kpa, presión a partir de la cual se reduce la presión sanguínea, marcado por Goosens (2004), [32].

A continuación se detallarán las dimensiones y las razones por las cuáles se han usado dichas dimensiones en el modelo para cada una de las partes del mismo. Estas dimensiones son las usadas en todas las simulaciones hechas. Las siguientes simulaciones sólo variarán en la presencia o no de una espuma adicional, entre la masa muscular y el asiento de autobús, que hará de asiento suplementario, y cuando este asiento suplementario esté presente, sólo variará el espesor de este último:

#### 13.1.1 Dimensiones de las partes del modelo:

##### 13.1.1.1 Hueso (fémur), y músculo (muslo):

Dentro de la anatomía humana, el fémur es el hueso más largo en el cuerpo humano y es uno de los más fuertes, el más fuerte es el hueso temporal ubicado en el cráneo. La medida del fémur de un hombre adulto es de unos 48 cm de largo y de un diámetro de en torno a 2,4cm, según la referencia [49]. Éste último diámetro es el que se ha tenido en cuenta para las dimensiones del hueso.

En cuanto al muslo, se ha tenido en cuenta el dato proporcionado por *peoplesize* al que hace referencia Mills 2007 [5], en donde la distancia máxima del exterior del muslo al hueso es de 70mm. Teniendo en cuenta la sección media del muslo, haciendo una aproximación en donde la distancia mínima del



exterior del muslo al hueso es en torno a los 30mm, la sección media es de unos 50mm.

#### 13.1.1.2 Asiento:

La medida del espesor del asiento se ha fijado en 50mm de acuerdo a los cálculos establecidos para el espesor mínimo de asiento según la ecuación (10.5) de la página 71.

El ancho del asiento es de 150mm, de tal manera que la pierna descansa cómoda sobre el mismo, sin que le falte espacio.

#### 13.1.2 CARGAS:

Teniendo en cuenta que el hombre español medio pesa unos 80 kg [50], de los cuales unos 54 kg corresponden a la parte superior del cuerpo y 26 kg a la inferior, [47] obtenido del libro de Huston (2008) [51], y dado que se va a repartir el peso de la parte superior del cuerpo en dos piernas, hacen un total de  $540N / 2 = 270N$  de fuerza por cada pierna, teniendo en cuenta la gravedad  $g = 10m/s^2$ .

Aprovechando la geometría simétrica del modelo, es decir, sólo se modelará la mitad de una de las dos piernas y se dividirá entre dos la carga por pierna, la pierna, dentro del modelo, soportará una carga de  $270N / 2 = 135N$ .

En las simulaciones 2D Plain-Strain, la carga a añadir se reparte por metro lineal. Por tanto, para que el modelo soporte los 135N en los 48 cm de longitud que tiene el fémur, se divide la carga por la longitud del hueso [49]:

$$\frac{135N}{0.48m} \cong 280N \quad (13.1)$$

Por tanto, el modelo soportará una carga de 280N la cual se aplicará como carga puntual en la parte superior del hueso en el eje de simetría.

### 13.1.3 Condiciones de contorno:

#### 13.1.3.1 Restricciones:

Se restringen todos los grados de libertad del borde inferior del asiento, borde fijo, y en el borde izquierdo del modelo se restringen los desplazamientos en el eje X pero no del Y, con lo que el movimiento vertical no está impedido, ver la Figura 13.1, dado que se aprovecha la simetría del modelo, se establece de esta forma un borde simétrico, ver Figura 13.1 de la página 94.

#### 13.1.3.2 Contactos:

Para la interacción entre el hueso y el músculo, se aplica un tipo de contacto **bonded**, dado que los dos materiales van pegados y hay un cambio de Módulo de Young cuando se pasa de uno a otro pero no permite una interpenetración entre ellos.

Para la interacción entre el músculo y el asiento, se aplica un tipo de contacto **contact**, el cual no permite un interpenetración entre ellos pero a la vez actúa como si no estuvieran pegados el uno con el otro.

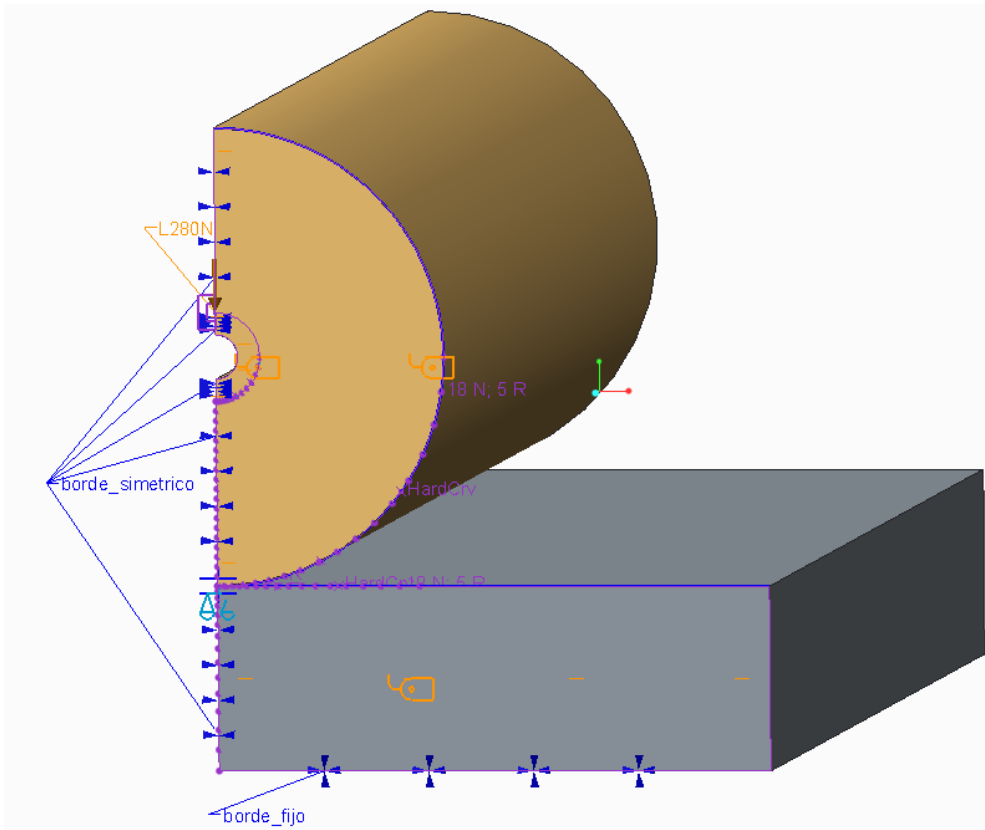
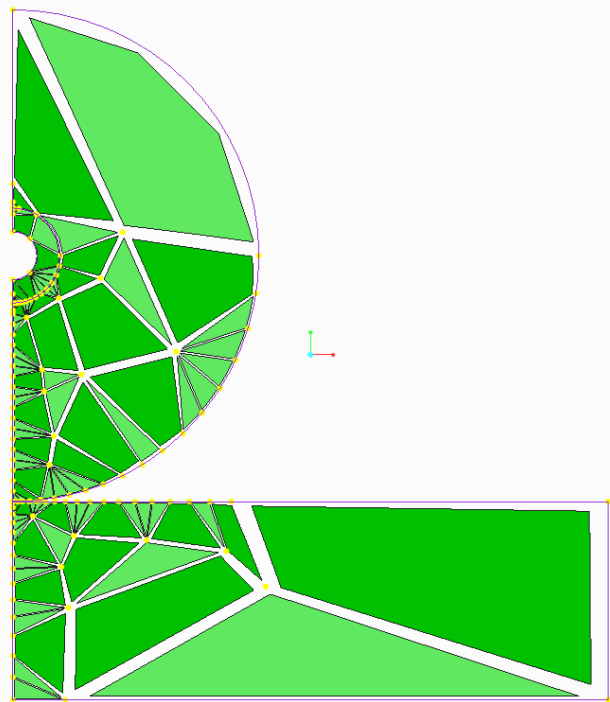


Figura 13.1 Vista general de la simulación donde interactúan el hueso, la masa muscular (ambos en color carne) y el asiento de autobús (gris oscuro).

#### 13.1.4 Mallado:

Se aplican puntos de control en la geometría tal que en el borde donde el modelo va a sufrir más deformaciones, existirán más elementos. Así como en las interacciones hueso- músculo y músculo-asiento en donde habrá más tensiones, ver Figura 13.2.



*Figura 13.2 Mallado de la primera simulación en donde interactúan el hueso, el músculo y el asiento de autobús.*

#### 13.1.5 Resultados:

Una vez finalizada la simulación con los parámetros establecidos, se puede apreciar que tanto la tensión de Von Mises, 18,7Kpa, como la presión de contacto, 13,8Kpa, superan el objetivo de confort marcado en los 12Kpa como muestran la Figura 13.3 y la Figura 13.4 respectivamente.

Cabe destacar que la tensión máxima de Von Mises se da en la interacción del músculo con el hueso y como se verá en las simulaciones siguientes, es en esta zona donde se darán las tensiones máximas.

Además de esta zona, se distingue la tensión máxima, fuera de la interacción hueso-músculo, de Von Mises en la zona de la masa muscular de 14,4Kpa la cual también está fuera del objetivo de los 12 Kpa marcados.

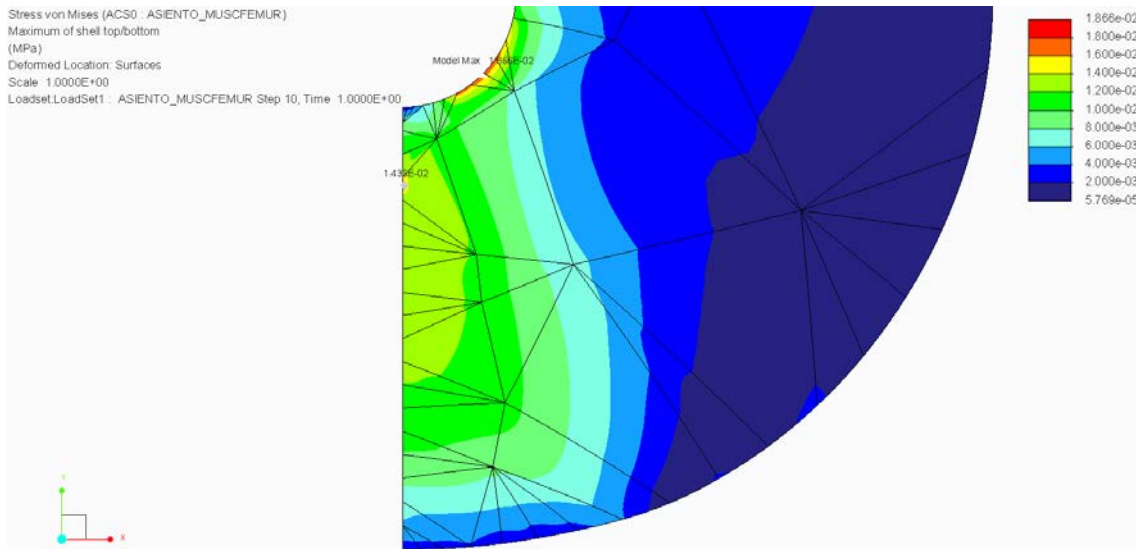


Figura 13.3 Tensiones en la masa muscular de la interacción hueso-músculo-asiento, donde la tensión de Von Mises máxima es de 18,7Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort.

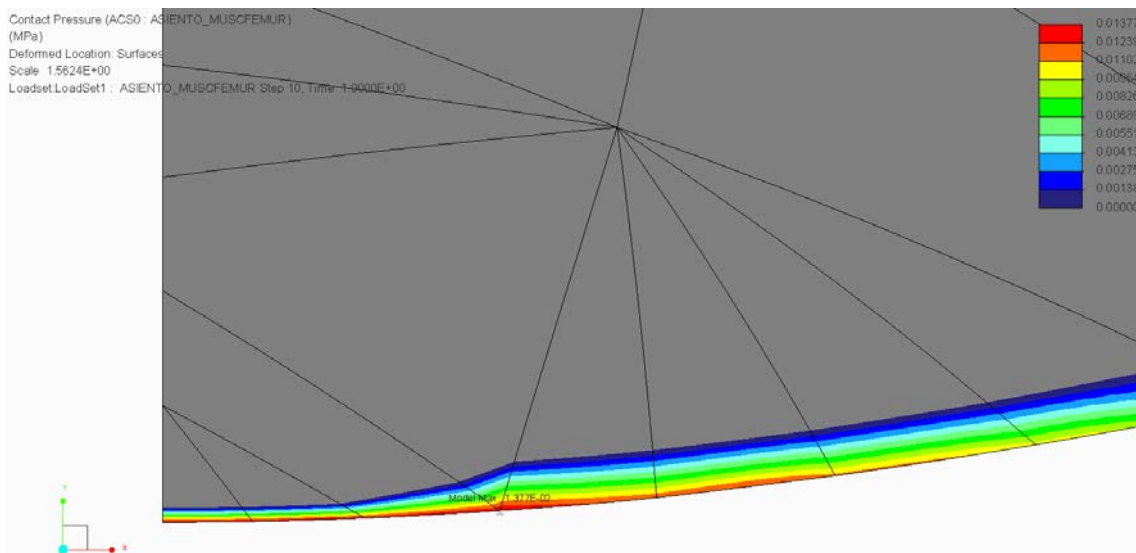


Figura 13.4 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento en donde la tensión máxima de 13.8Kpa supera el objetivo de confort de 12Kpa.

En la Figura 13.5 se aprecian las deformaciones tanto del músculo como del asiento en la simulación. Como se puede apreciar las deformaciones son

acordes a la geometría de simetría del modelo y a las cargas no observándose ningún error o anomalía.

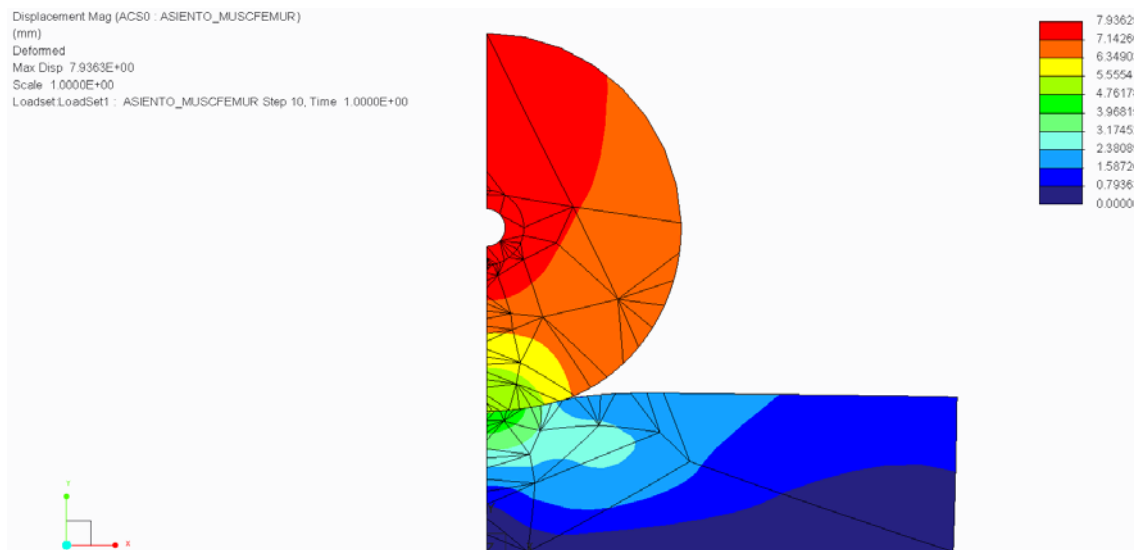


Figura 13.5 Deformaciones de la interacción hueso, músculo, asiento.

### 13.1.6 Comentario sobre los niveles P:

Por último comentar el gráfico de niveles P, Figura 13.6. Estos valores van del uno al nueve y hacen referencia a los grados de polinomio alcanzados en los elementos del modelo.

Cuanto mayor es el nivel P de un determinado borde de malla, más le va a costar al mismo obtener una divergencia y más alto será el grado de polinomio necesario para alcanzarla. Por tanto, este gráfico es importante a la hora de buscar un mejor mallado y en qué zonas hace falta afinar más la malla para obtener una divergencia con un menor grado de polinomio.

En la Figura 13.6 se aprecia que el valor P más alto se produce en el asiento en la zona de contacto con la pierna teniendo un valor de  $P=9$ . Es aquí donde, el grado de polinomio será mayor lo cual redundará en más tiempo de cálculo en estos elementos.

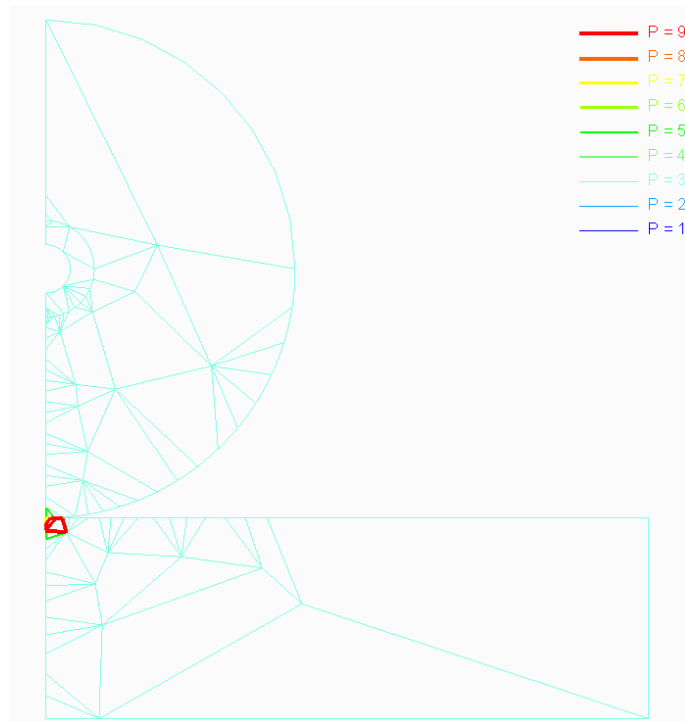


Figura 13.6 Niveles P de la primera simulación, donde interactúan hueso, músculo y asiento.

## 13.2 SIMULACIÓN DONDE INTERACTÚAN EL HUESO, LA MASA MUSCULAR, EL ASIENTO SUPLEMENTARIO Y EL ASIENTO DE AUTOBÚS:

Todos los datos del modelo anterior son aplicados a este modelo. Es decir, tanto las cargas, las dimensiones, la geometría, como las condiciones de simetría, etc. Se mantienen para este modelo. LO único que varía es la adición de un elemento nuevo que es el asiento suplementario. A continuación se detallan las dimensiones del mismo.

### 13.2.1 Asiento suplementario:

El espesor del asiento suplementario tiene un espesor de 25mm. A partir de este espesor se harán comparaciones con el modelo que no lleva asiento suplementario y a continuación se harán estudios con diversos espesores del mismo.

### 13.2.2 Condiciones de contorno:

#### 13.2.2.1 Contactos:

Para la interacción entre el hueso y el músculo, se aplica un tipo de contacto **bonded**, dado que los dos materiales van pegados y hay un cambio de Módulo de Young cuando se pasa de uno a otro pero no permite una interpenetración entre ellos, tal y como se usó en el modelo anterior.

Para la interacción entre el músculo y el asiento suplementario, se aplica un tipo de contacto **contact**, el cual no permite una interpenetración entre ellos pero a la vez actúa como si no estuvieran pegados el uno con el otro.

Para la interacción entre el asiento suplementario y el asiento de autobús se aplicará también un tipo de contacto **contact**, como en la interacción músculo-asiento suplementario, dado que cuando se coloca la invención encima del asiento de autobús, este no va pegado ni hay interpenetración entre ellos.



### 13.2.2.2 Restricciones:

Se restringen todos los grados de libertad del borde inferior del asiento, borde fijo, tal como se hizo en el modelo anterior, y en el borde izquierdo del modelo se restringen los desplazamientos en el eje X pero no del Y, incluyendo también el asiento suplementario, ver la Figura 13.7, para aprovechar la simetría del modelo.

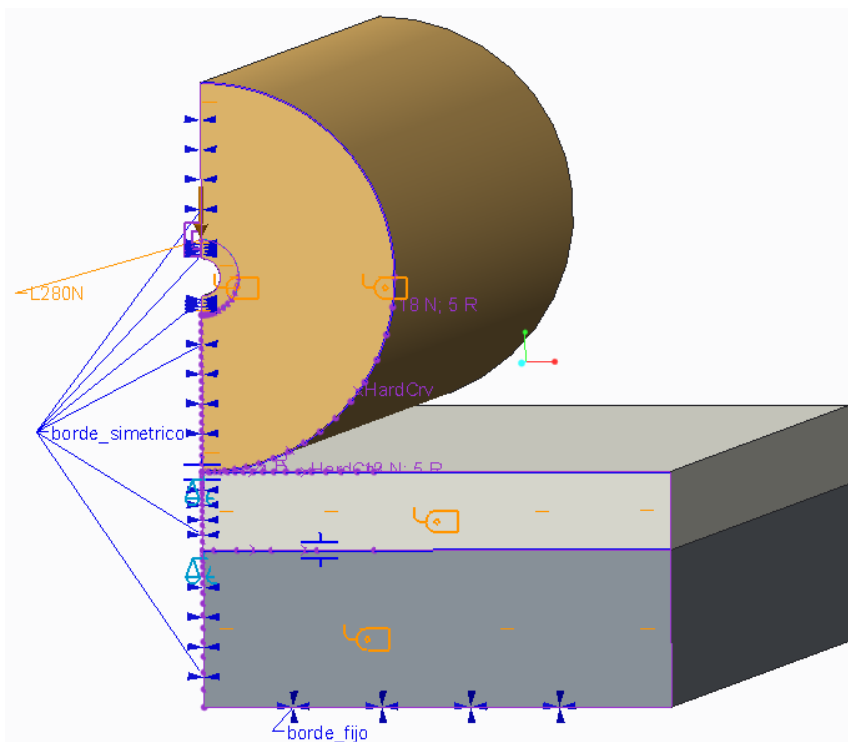
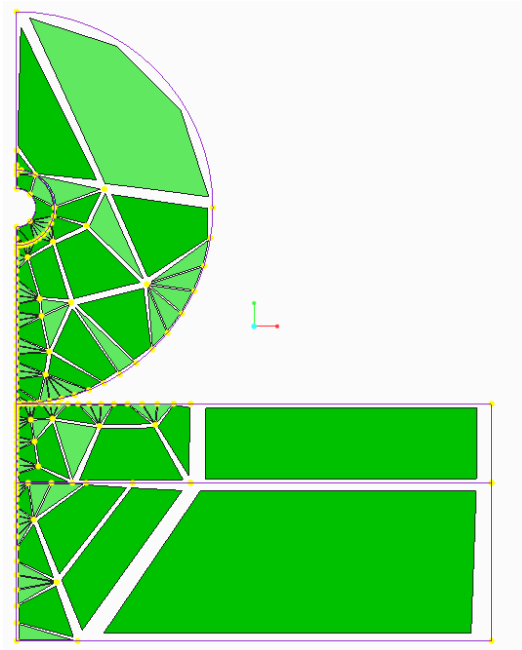


Figura 13.7 Vista general de la simulación donde interactúan el hueso, la masa muscular (ambos en color carne), el asiento suplementario (color gris claro) y el asiento de autobús (gris oscuro).

### 13.2.3 Mallado:

Se aplican controles de nodos en el eje de simetría, incluyendo el asiento suplementario, y en las zonas de contacto de los distintos elementos tal como se muestra en la Figura 13.8.



*Figura 13.8 Mallado de la segunda simulación en donde interactúan el hueso, el músculo el asiento suplementario y el asiento de autobús.*

#### 13.2.4 Resultados:

La tensión máxima de Von Mises en la masa muscular fue de 17,5 Kpa y esta se dio en la zona de contacto con el músculo como se comentó en la simulación anterior, ver Figura 13.9. Esta tensión está fuera del objetivo de confort marcado de 12 Kpa.

Cabe destacar también que fuera de la zona de contacto con el hueso, la tensión máxima de Von Mises en la zona muscular fue de 12,6 Kpa, la cual también supera el límite de confort establecido.

En cuanto a la presión de contacto, ver Figura 13.10, en este caso se obtiene un valor máximo de 10,2 Kpa en la zona de contacto entre el músculo y el asiento suplementario. Dicho valor sí que está dentro del objetivo marcado de los 12 kPa.

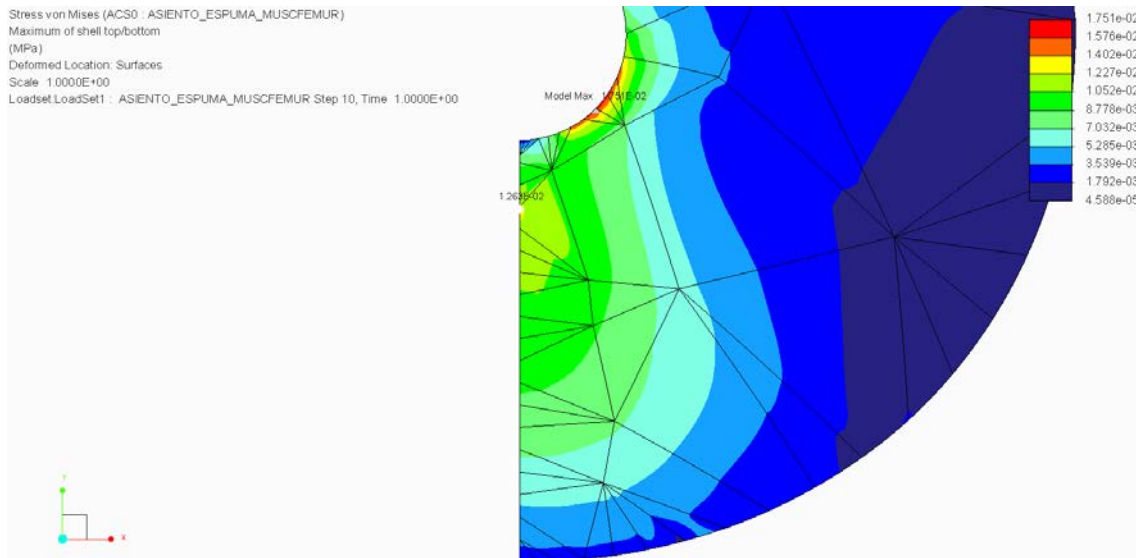


Figura 13.9 Tensiones en la masa muscular de la interacción hueso-músculo-asiento suplementario, donde la tensión de Von Mises máxima es de 17,5Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort.

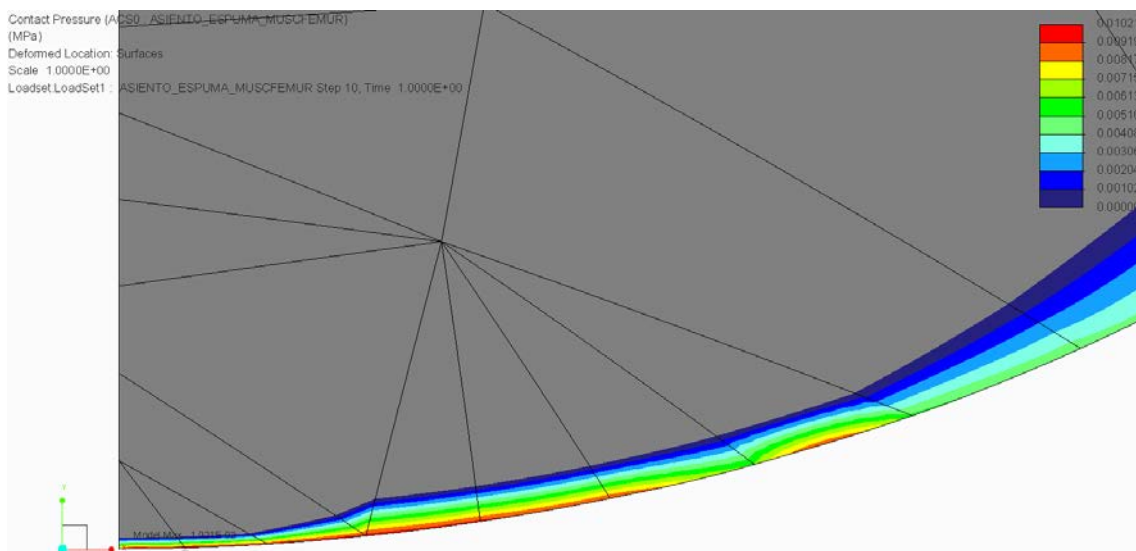
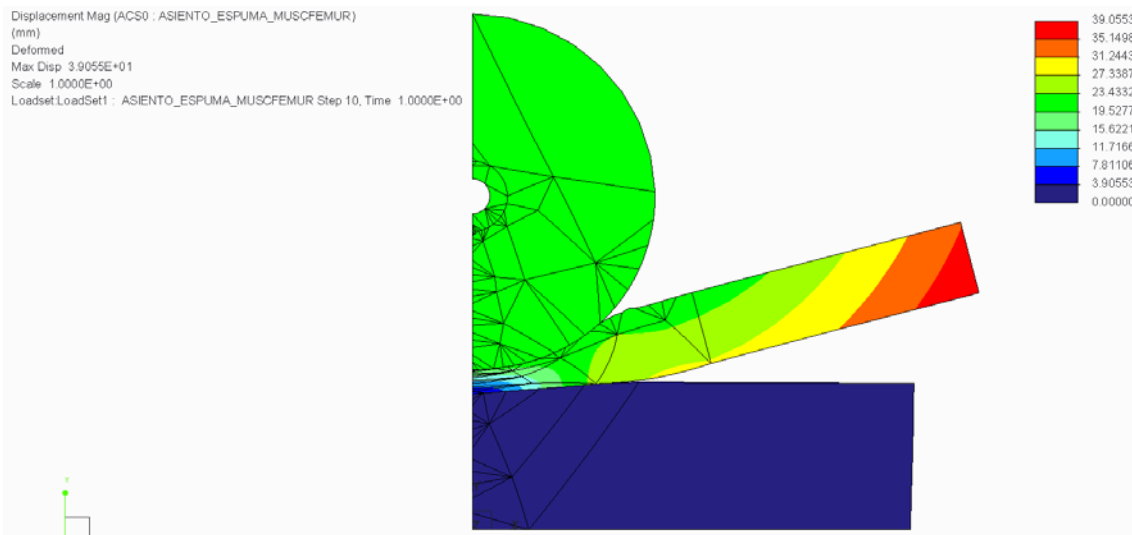


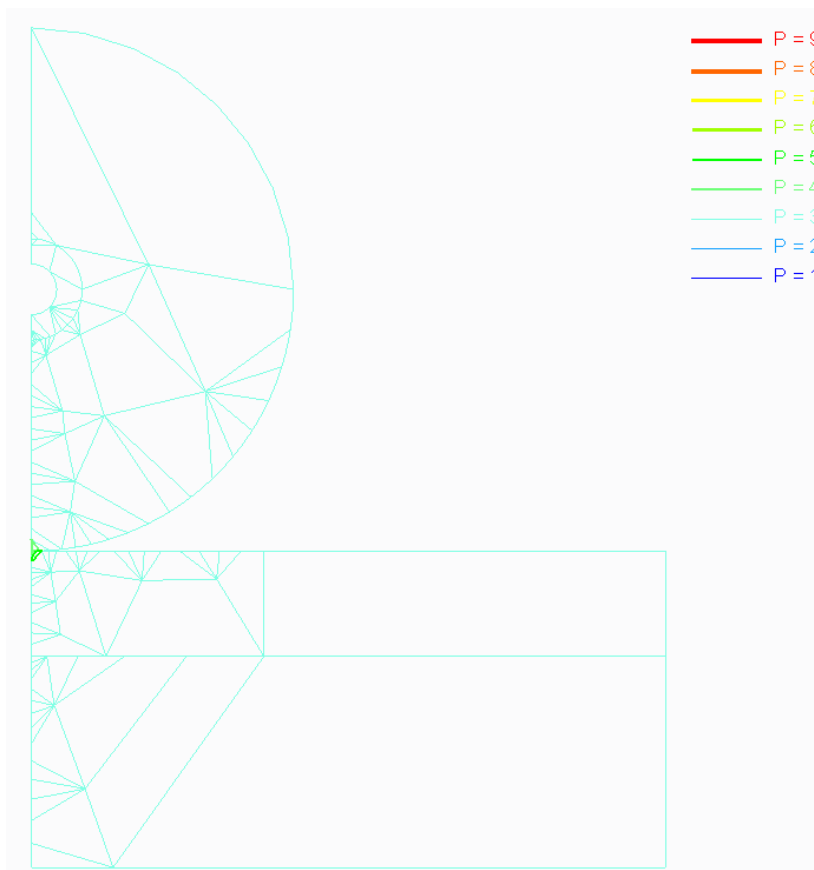
Figura 13.10 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario en donde la presión de contacto máxima de 10.2Kpa está por debajo del objetivo de confort de 12Kpa.

En cuanto a las deformaciones, se puede observar en la Figura 13.11 que éstas están acordes con la simetría del modelo, es decir que se aprecia la deformación vertical en el eje de simetría y no así en el eje horizontal. Además, se puede decir que las deformaciones van acordes con la dirección de la carga vertical.



*Figura 13.11 Deformaciones de la interacción hueso, músculo, asiento suplementario y asiento de autobús.*

Por último, comentar los niveles P de este modelo, el cual tiene un valor máximo de 5, en la línea de simetría en la zona de interacción entre el músculo y el asiento suplementario. Dicho valor es menor que en modelo anterior debido a la mayor cantidad de puntos de control por unidad de longitud en la línea de simetría incluidos en el asiento suplementario.



*Figura 13.12 Niveles P de la segunda simulación, donde interactúan hueso, músculo, asiento suplementario y asiento de autobús.*

### 13.2.5 Comparativa de tensiones en la zona muscular con y sin asiento suplementario:

Como se puede observar en ambos modelos, todas las tensiones máximas disminuyeron al incluir el asiento suplementario. Esto es un resultado esperado dado que el material usado para el asiento suplementario es menos denso y con propiedades más elásticas que el que se ha usado para modelar el material en el asiento de autobús.

En cuanto a las tensiones máximas de Von Mises en el músculo, éstas han disminuido de 18,7Kpa en el modelo sin asiento suplementario, a los 17,5 Kpa en el modelo con asiento suplementario, aunque aún está la segunda fuera del objetivo de confort marcado de los 12 Kpa, y ambas tensiones dadas en la zona de contacto con el hueso.

Las tensiones máximas de Von Mises en la zona propiamente dicha del músculo, es decir, fuera de la zona de contacto con el hueso, las tensiones máximas disminuyeron de 14,4 Kpa a los 12,6 Kpa al incluir el elemento de

confort. Aunque este valor está aún fuera de la zona de confort se puede decir que está muy cerca de él.

En el caso de las presiones de contacto máximas en la zona de contacto entre el músculo y el asiento de autobús, en el primer caso, y el asiento suplementario, en el segundo, la presión máxima de contacto disminuyó de los 13,8 Kpa hasta los 10,2 Kpa. Este valor está ya dentro del límite de confort marcado de 12 Kpa. Esto es lo que se busca con la inclusión del asiento suplementario, que las tensiones estén por debajo del límite establecido.

	<b>Presión de contacto máxima (Kpa)</b>	<b>Máx tensión VM en músculo (Kpa)</b>	<b>Tensión Máx VM lejos del hueso(Kpa)</b>
<b>Sin asiento suplementario</b>	13,8	18,7	14,4
<b>Con asiento suplementario de 25mm</b>	10,2	17,5	12,6

*Tabla 13.1 Comparativa de las tensiones máximas sin y con asiento suplementario.*

### 13.3 ESTUDIOS ESTÁNDAR BASADOS EN LA VARIACIÓN DEL ESPESOR DEL ASIENTO SUPLEMENTARIO:

Con el objetivo de aliviar tensiones y ayudar a mejorar el diseño del asiento suplementario, se harán diversos estudios estándar en los cuales se variará el espesor del asiento suplementario. Se usará un rango que va desde los 10mm hasta los 50mm., dentro del cual, se variará el espesor cada 5mm.

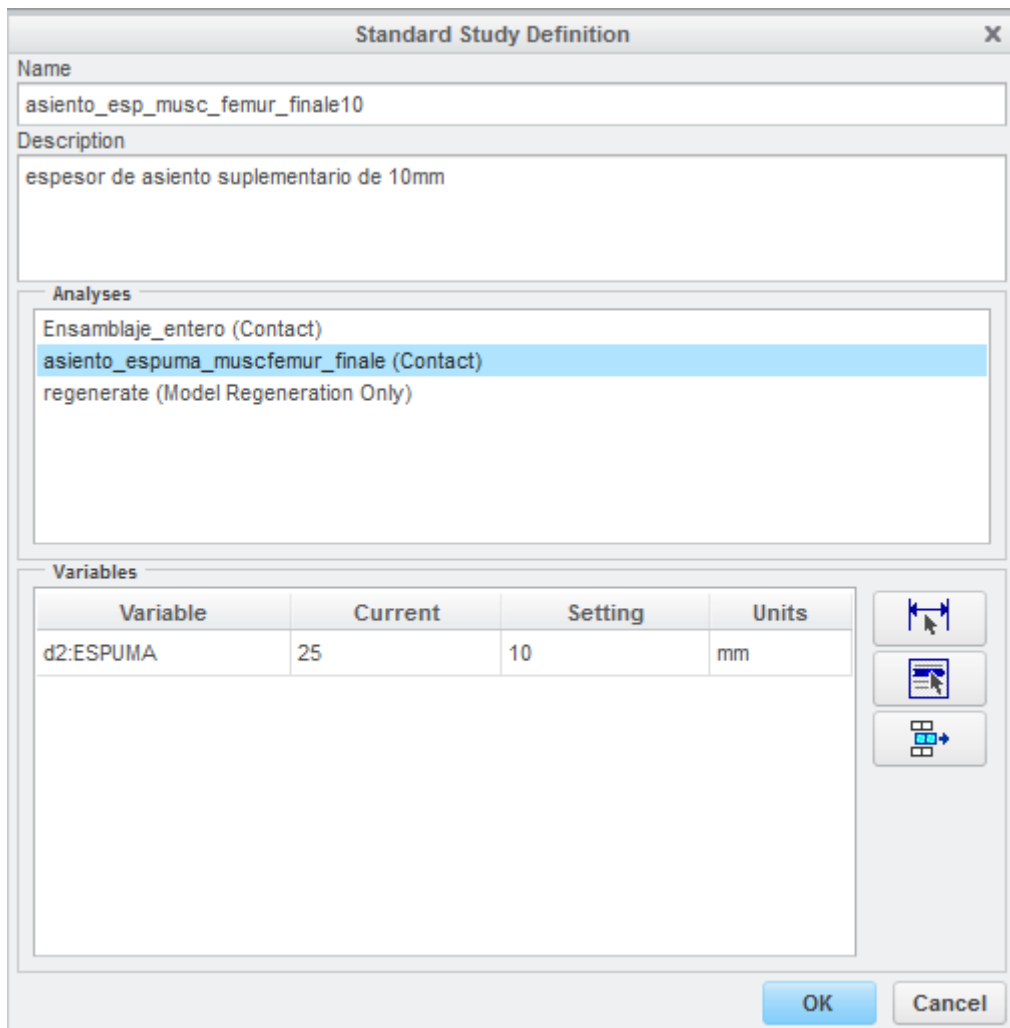


Figura 13.13 Ejemplo de definición de estudio estándar, basado en la variación del espesor del asiento suplementario, en este caso, se simulará el modelo con un espesor de 10mm. De asiento suplementario.

Un estudio estándar es un estudio de una simulación en donde, basándose en un estudio estático anterior, se varía una variable del mismo. En la Figura 13.13 se muestra el cuadro de diálogo en donde se define un estudio estándar para un espesor de asiento suplementario de 10mm. El estudio estático al que hace

referencia este estudio estándar es el estudio hecho anteriormente en donde el espesor del asiento suplementario es de 25mm.

Lo que se pretende es obtener distintos valores de tensiones para modelos en los que varía el espesor del asiento suplementario de autobús. En todos estos análisis, todos los demás factores, tanto la carga, como las condiciones de contorno son exactamente las mismas, variando únicamente el espesor del elemento suplementario.

### 13.3.1 Resultados de los estudios estándar:

Una vez obtenidos los resultados de los distintos estudios estándar, cuyas imágenes se pueden ver en el anexo, se puede apreciar, que todas las tensiones obtenidas en los estudios estándar disminuyen conforme el espesor de asiento suplementario aumenta, ver Tabla 13.2 de la página 108. Esto es debido a que el modelo de material usado para el asiento suplementario, el PU38 es más deformable y menos denso,  $38\text{Kg/m}^3$  de densidad, que el modelo de material usado para el asiento de autobús,  $120\text{Kg/m}^3$ .

También se puede observar que, en caso de la presión máxima de contacto, bastaría con usar un espesor de asiento suplementario de 15mm de espesor para que los valores de presión estén dentro del límite de confort de 12Kpa.

Otra conclusión a la que se puede llegar es que aunque todas las tensiones máximas de Von Mises en la masa muscular superan los 12Kpa de límite de confort, estos se dan en la zona de contacto con el hueso pero no en el músculo propiamente dicho. Las tensiones máximas de Von Mises dadas fuera de la zona de contacto con el hueso son menores obteniendo como resultado que con un espesor de 35mm de asiento suplementario se estaría al límite de la zona de confort.

### 13.3.2 Comparativa de tensiones de todos los estudios realizados:

La Tabla 13.2 muestra los resultados de tensiones máximas de todos los estudios hechos anteriormente.



Espesor de asiento suplementario(mm)	Presión de contacto máxima (Kpa)	Máx tensión VM en músculo (Kpa)	Tensión Máx VM lejos del hueso(Kpa)
0	13,8	18,7	14,4
10	12,3	18,2	13,3
15	10,7	17,9	12,9
20	10,7	17,7	12,8
25	10,2	17,5	12,6
30	9,6	17,3	12,2
35	9,8	17,1	12
40	8,9	16,9	11,9
45	9,2	16,7	11,7
50	8,7	16,6	11,4

Tabla 13.2 Tabla de resultados y comparativa de tensiones de los distintos estudios realizados.

A pesar de que ninguno de los valores de Von Mises máximos en la masa muscular entra dentro del límite de confort marcado de 12Kpa, ver Figura 13.14 del anexo, estos valores corresponden a la zona de contacto con el hueso. Por consiguiente, se tomará como referencia el máximo valor de tensión Von Mises dado en la zona del músculo propiamente dicha, esto es, lejos de la zona de contacto con el hueso.

Teniendo en cuenta las tensiones de Von Mises en esta zona muscular, es decir, alejada de la zona de contacto, los valores que están dentro o al límite del valor de confort, 12Kpa, son las correspondientes a partir de los 35mm de espesor de asiento suplementario. Es decir, que para que el asiento suplementario sirva para superar los niveles de confort, éste debe tener un espesor mínimo de 35mm. Ver Figura 13.15.

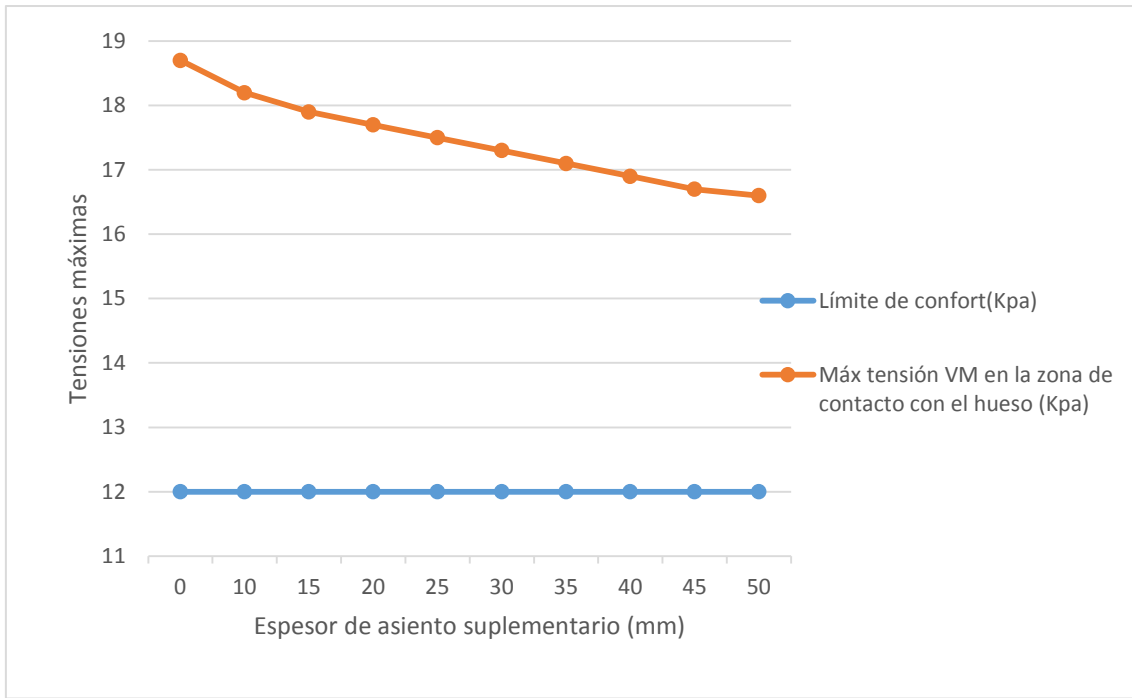


Figura 13.14 Tensiones máximas de Von mises del músculo en la zona de contacto con el hueso. Ninguno de estos valores está dentro de los límites de confort marcados en 12Kpa.

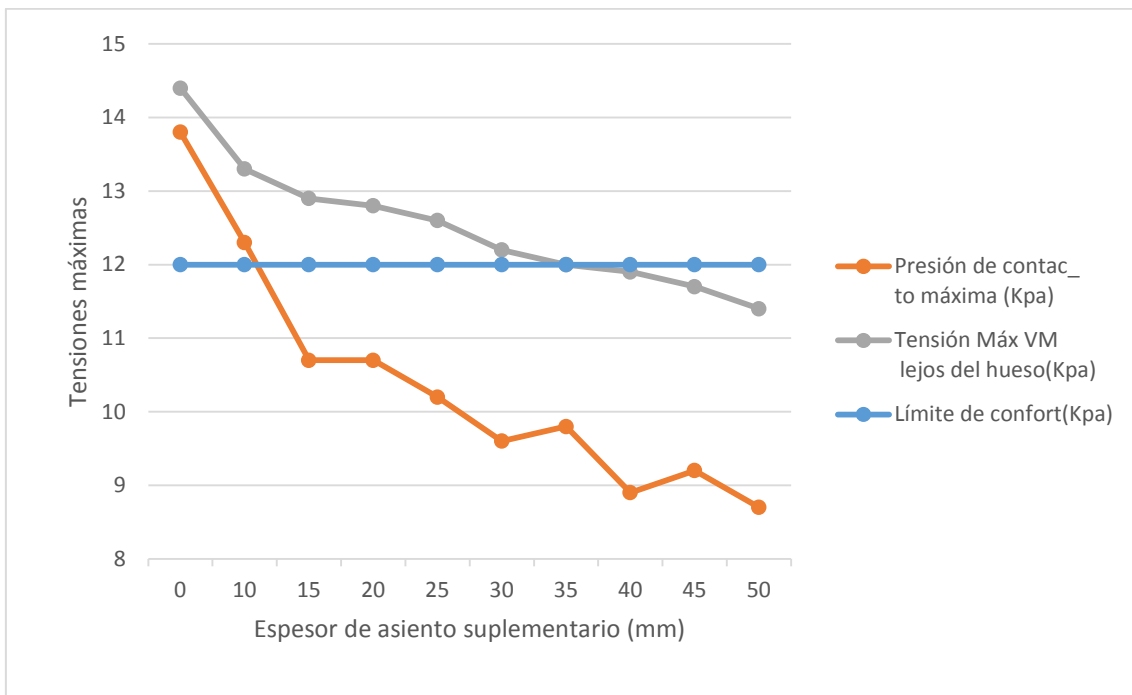


Figura 13.15 Presiones de contacto en la interacción músculo-espuma y valores máximos de tensión de Von Mises en la zona muscular propiamente dicha.

## 14 CONCLUSIONES:

- Se ha realizado una exhaustiva recopilación de la bibliografía y documentación existente acerca de las propiedades materiales de los elementos involucrados en la interacción cuerpo humano- asiento (hueso, músculo, espumas).
- Con esta documentación se ha conseguido generar las tablas de las propiedades de los materiales usados en modelos de elementos finitos.
- Con el fin de estudiar la influencia de un asiento suplementario situado entre el asiento de autobús y el conductor, se han realizado dos modelos de elementos finitos:
  - Hueso-músculo-asiento.
  - Hueso-músculo-suplemento-asiento.
- Se han comparado las tensiones en los modelos con y sin suplemento y se han estudiado las tensiones máximas con el espesor del asiento suplementario.
- Se consigue apreciar en los resultados de las simulaciones que con el asiento suplementario disminuyen las tensiones en porcentajes que dependen del espesor de dicho asiento suplementario. Ver Tabla 14.1.

<b>Espesor de asiento suplementario (mm)</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>50</b>
<b>% de reducción de las presiones de contacto máximas en la zona de contacto entre músculo y asiento</b>	11	22	22	26	30	29	36	33	37
<b>% de reducción de las tensiones máximas de VM en la masa muscular propiamente dicha</b>	8	10	11	13	15	17	17	19	21

*Tabla 14.1 Porcentaje de las reducciones de presión de contacto y tensión máxima en la zona muscular propiamente dicha obtenidas con distintos espesores de asiento suplementario con respecto a las tensiones de la simulación sin asiento suplementario.*

- Teniendo en cuenta la comparativa de la Tabla 13.2 y la Figura 13.15, de las páginas 108 y 109 respectivamente, para estar dentro de los niveles de confort marcados con una tensión máxima de 12Kpa el espesor del asiento suplementario debe ser, como mínimo, de 35mm.

## 15 PRESUPUESTO

El proyecto se ha dividido en cuatro fases las cuales tienen una duración aproximada de horas comentadas en la Tabla 8.1.

Fases del proyecto	Horas
Recopilación de información	120
Diseño y simulación con Creo 2.0	60
Análisis y estudio de resultados	50
Redacción del proyecto	130

Tabla 15.1 Fases del proyecto y duración aproximada de la misma.

El número total de horas asignado a este proyecto fin de carrera asciende a un total de 360 horas.

Con esta información y teniendo en cuenta la proporcionada por la universidad, se confecciona la Tabla 15.2 para calcular el coste de mano de obra.

Apellidos y nombre	Categoría	Dedicación (hombres mes) <sup>a)</sup>	Coste hombre mes	Coste (Euro)	Firma de conformidad
Minchola Rentería, Erick	Ingeniero	2,74	2.694,39	7.390,33	
Hombres mes		<b>2,74</b>	<b>Total</b>	7.390,33	

Tabla 15.2 a) 1 Hombre mes = 131,25 horas. Máximo anual de dedicación de 12 hombres mes (1575 horas)

Los costes correspondientes al equipo o material informático se desglosan en la siguiente Tabla 15.3:

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable <sup>d)</sup>
Ordenador de segunda mano	150	100	6	60	15,00
Licencia Microsoft Office 2013	269,95	100	6	60	27,00
Total					42,00

Tabla 15.3 Costes de equipo informático.

<sup>a)</sup> Fórmula de cálculo de la Amortización:

$\frac{A}{B} \times C \times D$	<b>A</b> = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado
	<b>B</b> = periodo de depreciación (60 meses)
	<b>C</b> = coste del equipo (sin IVA)
	<b>D</b> = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

*Tabla 15.4 Fórmula de cálculo de la amortización.*

Al sumar todos los costes, no se han subcontratado otras tareas, y aplicando un 20% en concepto de costes indirectos, se obtiene la Tabla 15.5.

Costes		cantida (€)
<b>Directos</b>	Mano de obra	7.390,33
	Equipo	42
<b>Costes indirectos (20%)</b>		1.486,46
<b>Coste Total</b>		8.918,79

*Tabla 15.5 Costes finales del proyecto.*

“El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de 8918,79 EUROS (OCHO MIL NOVECIENTOS DIECIOCHO CON 79 EUROS).

Leganés a 10 de octubre de 2015

El ingeniero proyectista

Fdo. Erick Minchola Rentería

## 16 TRABAJOS FUTUROS:

Con el objetivo de seguir por esta línea de investigación y llegar a un nivel de detalle que permita ayudar a mejorar el diseño de este asiento suplementario basándose en la disminución de tensiones sufridas en la masa muscular, se recomienda realizar los siguientes estudio:

- Hacer un estudio estático del modelo teniendo en cuenta las aceleraciones verticales máximas sufridas debido a posibles irregularidades en la carretera.
- Hacer un estudio dinámico del modelo teniendo en cuenta los modos de vibración del mismo.
- Hacer un estudio estático de un modelo con elementos en tres dimensiones.
- Sería conveniente realizar estudios similares con otro programa de elementos finitos basados en refinamientos de malla (método H) que además tengan otras capacidades como la capacidad de simular un modelo de material con características viscoelásticas, como por ejemplo Abaqus.

## 17 GLOSARIO:

CLD	
Compresión carga deflexión (Compression load deflection .....	37
creep	
Deformación con fluencia lenta .....	27
FSA	
Force Sensitive Applications. Sistema de sensores de mapeo de presiones .....	64
IFD	
Indentation Force Deflection, siglas en inglés del español	
Penetración fuerza deflexión. ....	15
MEF	
Método de Elementos Finitos .....	24
OIT	
Organización Internacional del Trabajo .....	4
PE	
Poliestireno .....	44
<i>Peoplesize</i>	
Software con base de datos de referencias visuales antropométricas.....	61
PP	
Polipropileno .....	69
PU	
Poliuretano.....	13
PVC	
Cloruro de polivinilo .....	33
SEM	
Scanning electron microscope. Siglas en inglés de Escaneo de un microscopio electrónico .	20
SME	
Síndrome músculo-esquelético.....	4
TME	
Transtorno Músculo-esquelético .....	4

## 18 BIBLIOGRAFÍA:

- [1] H. Pinzón, «Asiento portatil para conductores profesionales». España Patente U201400719, Septiembre 2014.
- [2] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 4th ed., Burlington: Elsevier Ltd., 2011.
- [3] c. MrFoamMan's, «Continuous Foam Production Machine,» 10 Octubre 2009. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=pcEs44ECdnl>. [Último acceso: Febrero 2015].
- [4] ADMET Testing Systems, «Indentation Force Dflection test on Polyurethane Foam(Youtube.com),» 14 Diciembre 2009. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=7UgOj-cJulg>. [Último acceso: Febrero 2015].
- [5] N. J. Mills, *Polymer Foams Handbook. Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide*, Butterworth-Heinemann, 2007.
- [6] MrFoamMan's channel, «Batch Foam Plant for Manufacturing/Production of Flexible Foam,» 10 octubre 2009. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=WrgXaUvhQ9A>. [Último acceso: Febrero 2015].
- [7] J. Ferry, *Viscoelastic Properties of Polymers*, New York: Wiley, 1970.
- [8] H. Zhu y N. Mills, «Modelling the creep of open-cell polymer foams,» *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, pp. 1437-1457, 1999.
- [9] D. Eaves, *Handbook of Polymer Foams*, Rapra Technology, 2004.
- [10] I. A. Irausquín Castro, *Caracterización Mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía.*, Leganés.: UC3M, Tesis doctoral., 2012.
- [11] Y. Masso-Moreu y N. Mills, «Impact compression of polystyrene foam pyramids,» *International Journal of Impact Engineering*, vol. 28, nº 6, pp. 653-676, 2003.
- [12] R. Ogden, *Non-linear Elastic Deformations*, New York: Dover, 1997.
- [13] K. Rusch, «Load- compression behavior of brittle foams,» *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 14, nº 5, pp. 1263-1276, 1970.
- [14] M. Schrodtt y G. Benderoth, «Hyperelastic description of polymer soft foams al finite deformations,» *Technische Mechanik*, vol. 25, pp. 163-173, 2005.
- [15] R. Rivlin, «Large Elastic Deformations of Isotropic Materials. I. Fundamental Concepts,» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 240, nº 822, pp. 459-490, 1948.
- [16] R. Ogden, «Large deformation isotropic elasticity: on the correlation of theory and experiment for compressible rubberlike solids,» *Proceedings of the Royal Society of*



London, vol. A328, pp. 567-583, 1972.

- [17] N. Mills y A. Gilchrist, «Modelling the indentation of low density polymer foams,» *Cellular Polymers*, vol. 19, pp. 389-412, 2000.
- [18] D. Lemmon, T. Shiang, H. A., J. Ulbrecht y P. Cavanagh, «The effect of insoles in therapeutic footwear--a finite element approach,» *Journal of Biomechanics*, vol. 30, nº 6, pp. 615-620, 1997.
- [19] R. Setyabudhy, A. Ali, R. Hubbard y C. Beckett, «Measuring and Modeling of Human Soft Tissue and Seat Interaction,» *Progress with Human Factors in Automotive Design*, vol. 106, nº 6, pp. 135-142, 1997.
- [20] G. Lyn y N. Mills, «Design of foam crash mats for head impact protection,» *Sports Engineering*, vol. 4, nº 3, pp. 153-163, 2001.
- [21] N. Mills y A. Gilchrist, «High strain extension of open cell foams,» *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. ASME 122, pp. 57-63, 2000.
- [22] Hibbit, Karlsson y Sorensen, ABAQUS Standard Examples Problem Manual, Warrington, 1998.
- [23] O. Davies, A. Gilchrist y N. Mills, «Seating pressure distributions using slow-recovery PU foams,» *Cellular Polymers*, vol. 19, pp. 1-24, 2000.
- [24] M. Puso y S. Govinjee, «A phenomenological constitutive equation for rigid polymeric foam,» *Mechanics of plastics and plastic composites*, ASME, Vols. %1 de %2MD-68, 1995.
- [25] A. Gilchrist y N. Mills, «Impact deformation of rigid polymeric foams: experiments and FEA modelling,» *International Journal of Impact Engineering*, vol. 25, nº 8, pp. 767-786, 2001.
- [26] R. Lueder y K. Noro, *Hard Facts About Soft Machines: The Ergonomics Of Seating*, London: Taylor & Francis, 1994.
- [27] R. Hubbard, «New biomechanical models for automotive seat design,» 1993.
- [28] K. Stabler y E. Cullen, «How people sit in cars,» de *IRCOBI Conference*, Bron, 1996.
- [29] R. Brienza y M. Geyer, «Understanding support surface technologies,» *Advanced Skin Wound Care*, 2001.
- [30] Ferguson y M. Pell, «Seat cushion selection,» *J. Rehabil. Res. Dev. Clin. Suppl.*, pp. 49-73, 1990.
- [31] R. Aissaoui, «Analysis of pressure distribution at the body-seat interface,» *Med. Eng. Phys.*, vol. 23, pp. 359-367, 2001.
- [32] R. Goosens y R. Zegers, «Influence of shear on skin oxygen potential,» *Clin. Physiol.*, vol. 14, p. 111, 1994.
- [33] C. Bouten y C. Oomens, «The etiology of pressure ulcers: skin deep or muscle bound?,»

*Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 84, pp. 616-619, 2003.

- [34] A. Stekelenburg y C. Oomens, «Compression induced deep tissue injury examined with magnetic resonance imaging and histology,» *Journal of Applied Physiology*, vol. 100, pp. 1946-1954, 2006.
- [35] A. Milivojevich y A. Stanciu, «Investigating psychometric and body pressure distribution responses to automotive seating comfort,» de *Human Factors in 2000*, 2000.
- [36] G. Andreoni y G. Santambrogio, «Method for the analysis of posture and interface pressure of car drivers,» *Applied Ergonomics*, vol. 33, pp. 511-522, 2002.
- [37] K. Cavender y M. Kinklear, «Real time dynamic comfort and performance factors of polyurethane foam in automotive seating,» *Automotive Design Advancements in Human Factors*, Vols. %1 de %2SAE SP-1155, pp. 53-68, 1996.
- [38] M. Kinkellar, K. Cavender y G. Crocco, «Vibrational characterization of various polyurethane foams employed in automotive seating applications,» *Journal of Cellular Plastics*, vol. 34, pp. 155-173, 1998.
- [39] M. Griffin, *Handbook of Human Vibration*, London: Academic Press, 1990.
- [40] W. Patten, S. Sha y C. Mo, «A vibrational model of open celled polyurethane foam automotive seat cushions,» *Journal of Sound and vibration*, vol. 217, pp. 145-161, 1998.
- [41] W. Shen y A. Vertiz, «Redefining seat comfort,» de *Progress in Human Factor in Automotive Design*, SAE SP-1242, 1997, pp. 161-168.
- [42] P. Dahnichki, A. Crocombe y S. Hughes, «Deformation and stress analysis of supported buttock contact,» *Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 208, pp. 9-17, 1994.
- [43] M. Verver y J. van Hoof, «A FE model of the human buttocks for prediction of seat pressure distributions,» *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, vol. 7, pp. 193-203, 2004.
- [44] F. Casati, R. Berthevas y F. Casata, «The contribution of moded PU foam characteristics to comfort and durability of car seats,» *SAE Trans. J. Mater: Manuf.*, vol. 108, pp. 493-509, 1999.
- [45] R. Toogood, *Creo Simulate Tutorial Releases 1.0 & 2.0 (Structure and Thermal)*, Edmonton: SDC Publications, 2012.
- [46] C. Y. Tang y C. P. Tsui, «Method of Modeling Muscular Tissue With Active Finite Elements». Hong Kong/China Patente US 7096166 B2, 2006.
- [47] C. Tang, W. Chan y C. Tsui, «Finite Element Analysis of Contact Pressures between Seat Cushion and Human Buttock-Thigh Tissue,» *Engineering*, vol. 2, pp. 720-726, 2010.
- [48] R. Sukhadeve, «Indentation of an elastomeric foam(Youtube.com),» 28 Mayo 2014. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=80ldBHjFBvl>. [Último acceso:

Septiembre 2015].

- [49] The orthopaedic Knowledge Network, «[www.orthopaedicsone.com](http://www.orthopaedicsone.com),» abril 2010. [En línea]. Available: [www.orthopaedicsone.com/display/Review/Femur](http://www.orthopaedicsone.com/display/Review/Femur). [Último acceso: septiembre 2015].
- [50] Instituto de Biomecánica de Valencia, «[www.ibv.org](http://www.ibv.org),» marzo 2015. [En línea]. Available: <http://www.20minutos.es/noticia/2402794/0/espanol-medio-estatura/altura-peso/media/>. [Último acceso: septiembre 2015].
- [51] j. Huston, Principles of Biomechanics, CRC Press, 2008.
- [52] P. Stevenson, Foam Engineering. Fundamentals and Applications., Wiley, 2012.
- [53] Hibbitt, Karlsson y Sorensen, ABAQUS Users Manual Version 6.4, Warrington, 2004.
- [54] R. H. Shih, Introduction to Finite Element Analysis Using Creo Simulate 1.0, SDC Publications, 2011.

## 19 ANEXOS: RESULTADOS DE ESTUDIOS ESTÁNDAR CON DIFERENTES ESPESORES DE ASIENTO SUPLEMENTARIO:

### 19.1 RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO SUPLEMENTARIO DE 10MM:

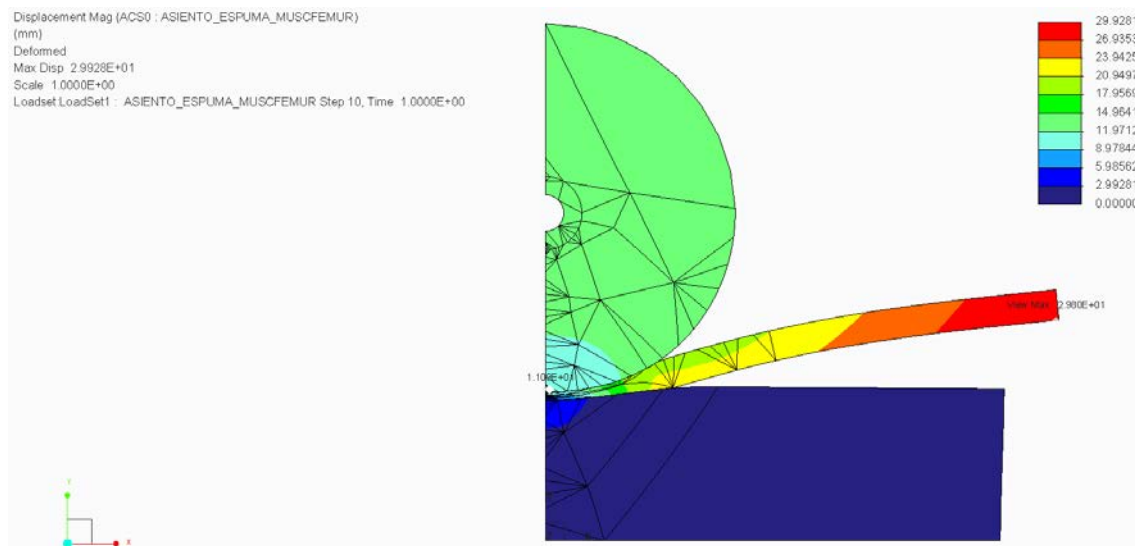


Figura 19.1 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 10mm.

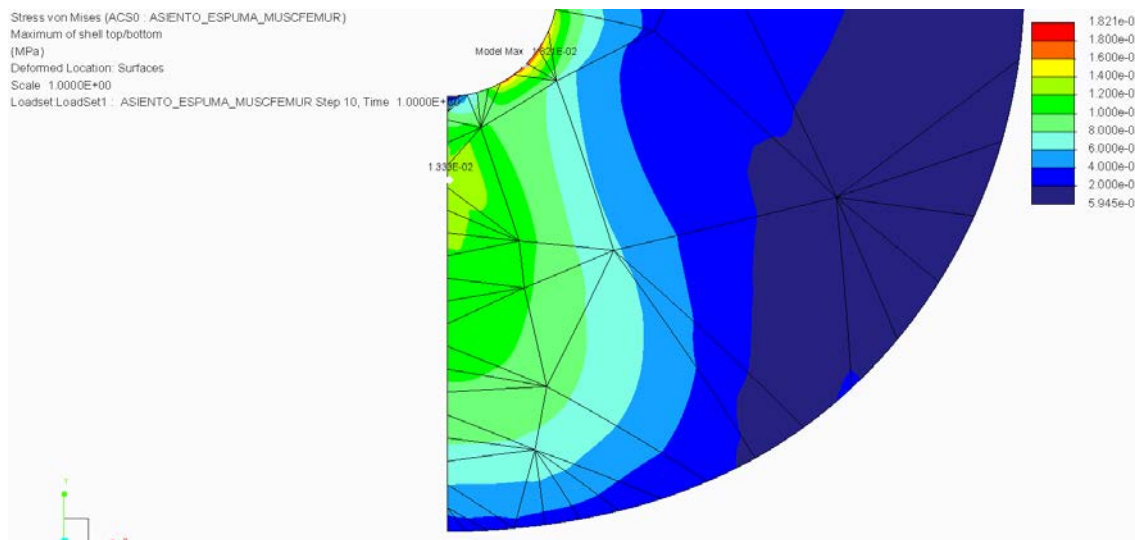


Figura 19.2 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 10mm. Donde la tensión de Von Mises máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 18,2Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 13.3Kpa, la cual también está fuera del objetivo de confort marcado.

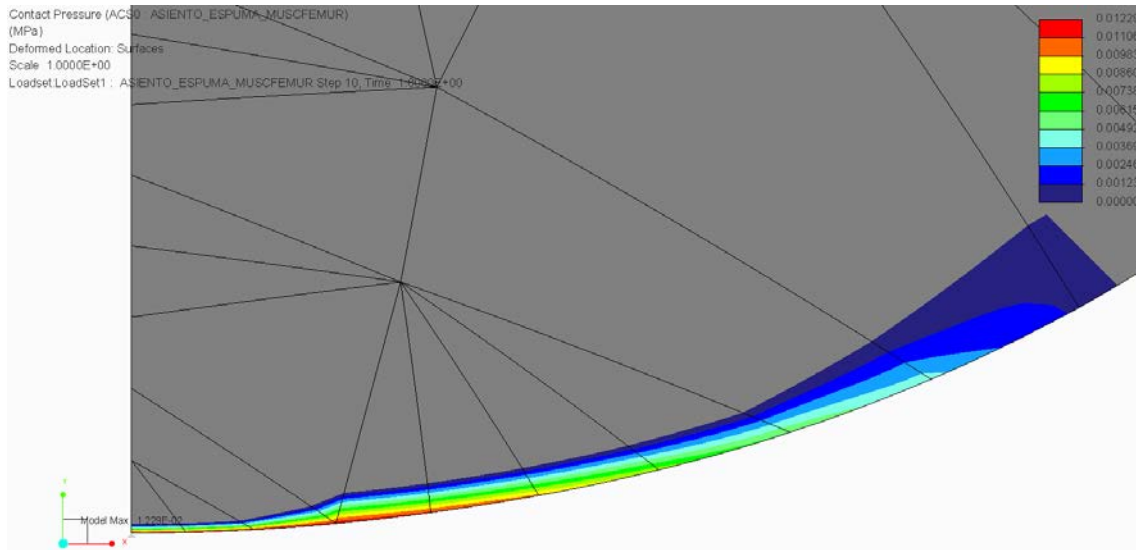


Figura 19.3 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 10mm. En donde la presión de contacto máxima de 12.3Kpa está fuera del objetivo de confort de 12Kpa.

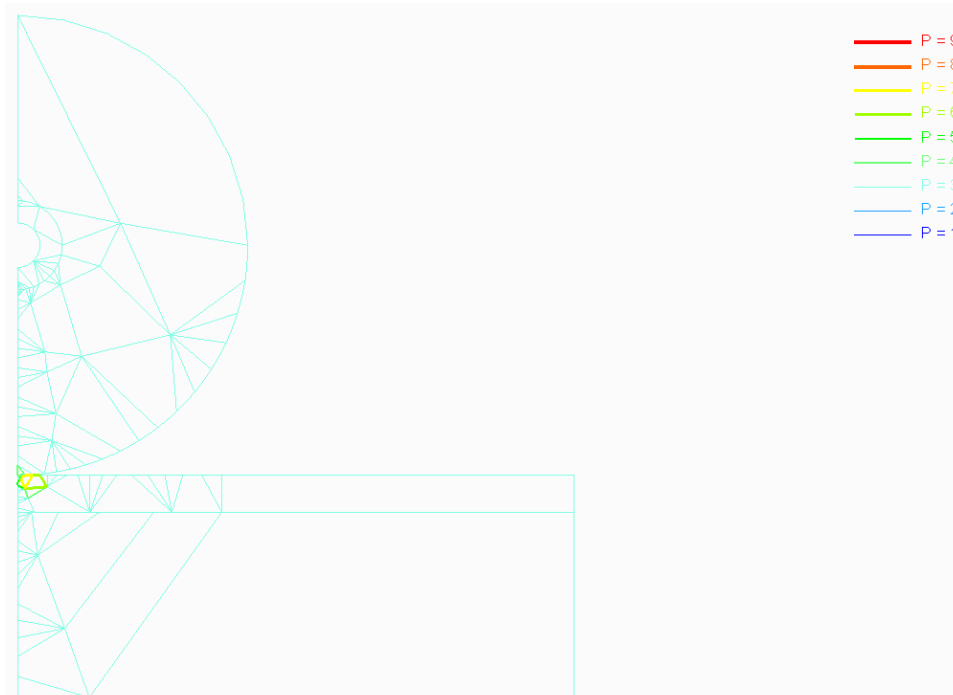


Figura 19.4 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 10mm.

## 19.2 RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO SUPLEMENTARIO DE 15MM:

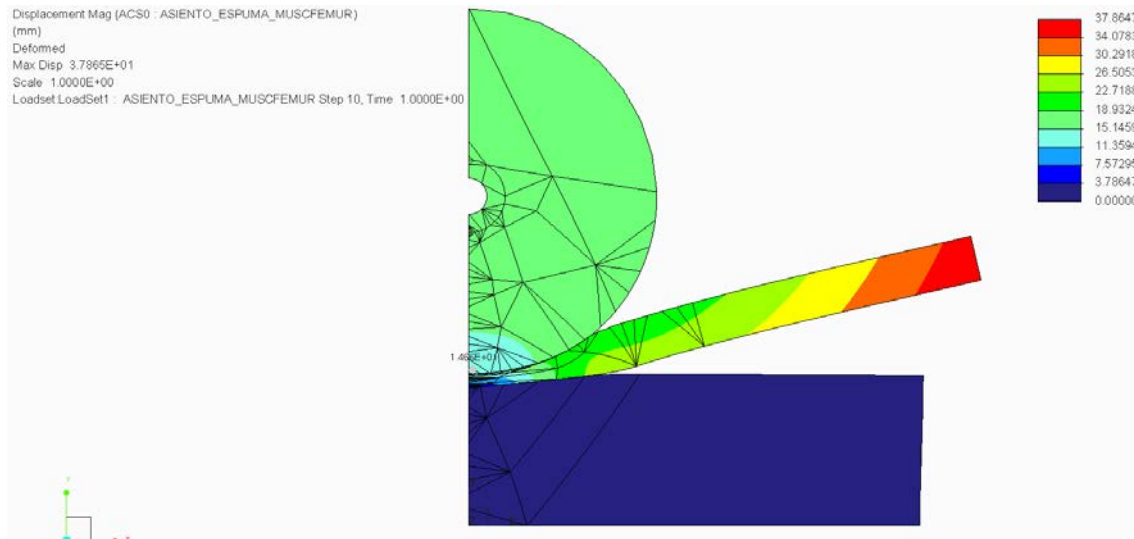


Figura 19.5 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 15mm.

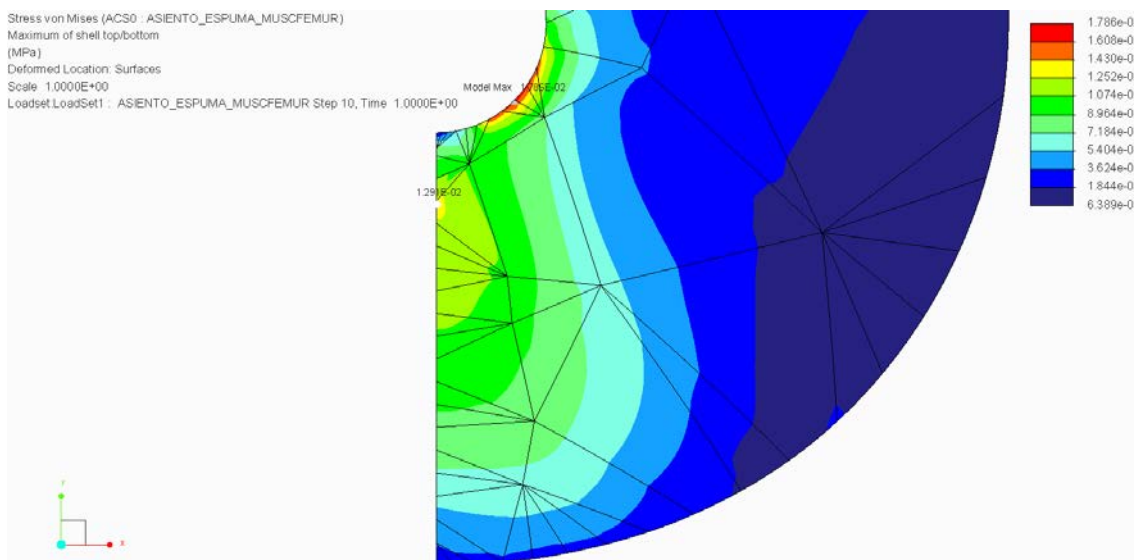


Figura 19.6 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 15mm. Donde la tensión de Von Mises máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 17,9Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 12.9Kpa, la cual también está fuera del objetivo de confort marcado.

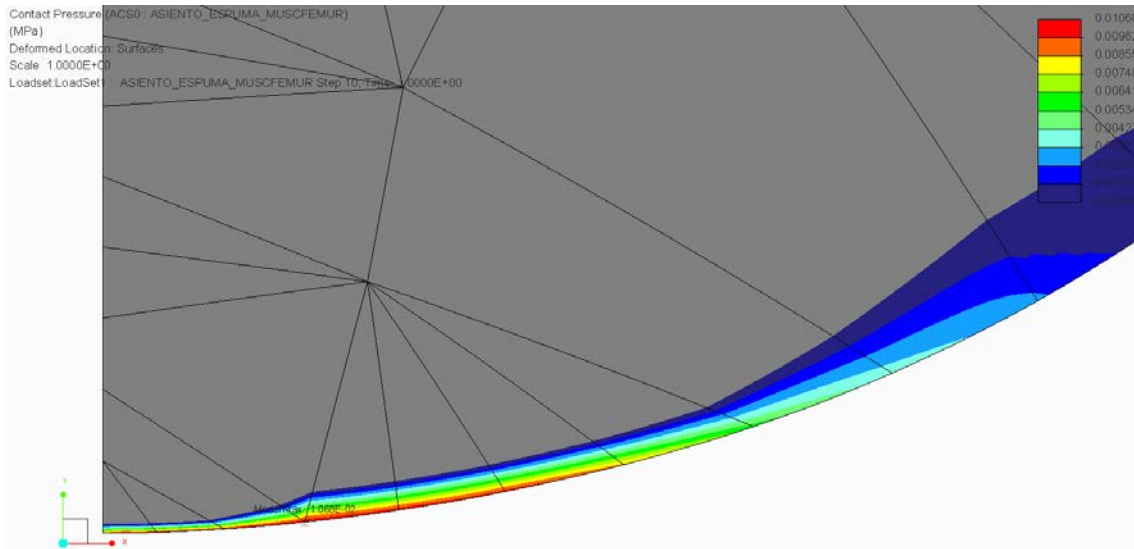


Figura 19.7 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 15mm. En donde la presión de contacto máxima de 10.7Kpa está dentro del objetivo de confort de 12Kpa.

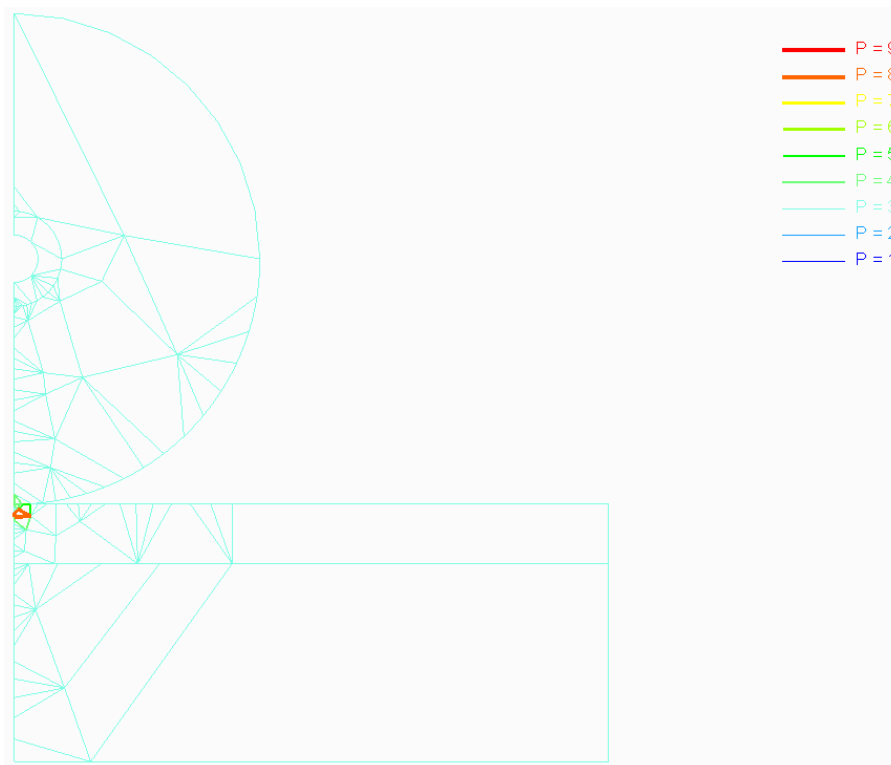


Figura 19.8 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 15mm.

### 19.3 RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO SUPLEMENTARIO DE 20MM:

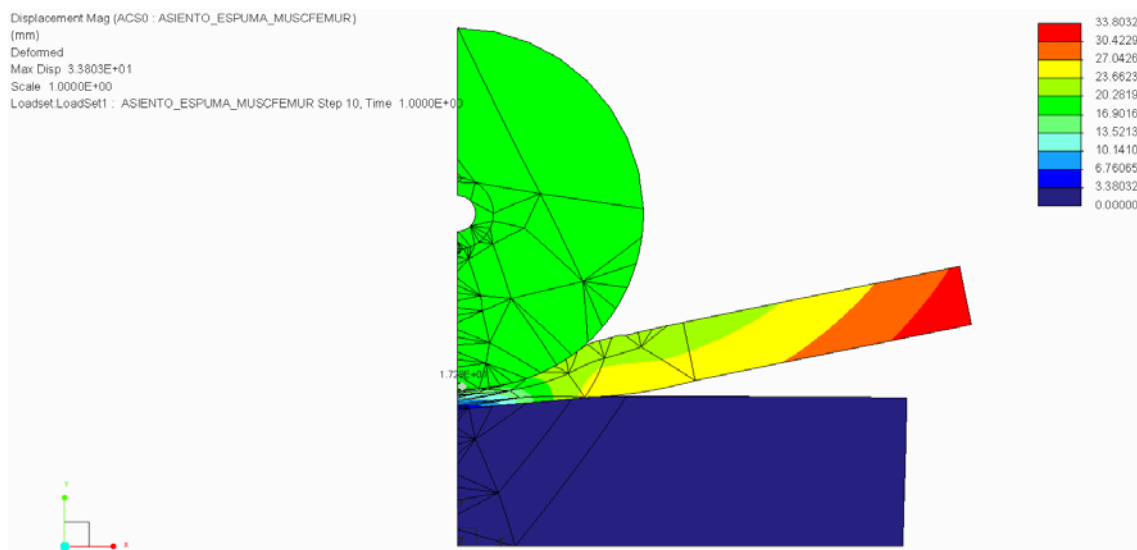


Figura 19.9 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 20mm.

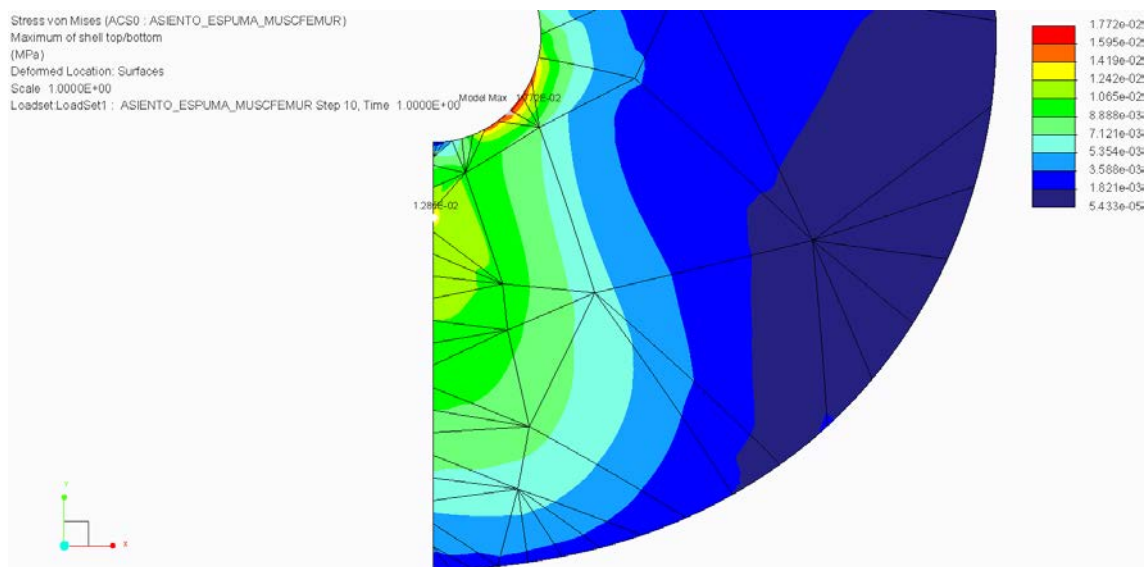


Figura 19.10 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 20mm. Donde la tensión de Von Mises máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 17,7Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 12.8Kpa, la cual también está fuera del objetivo de confort marcado.



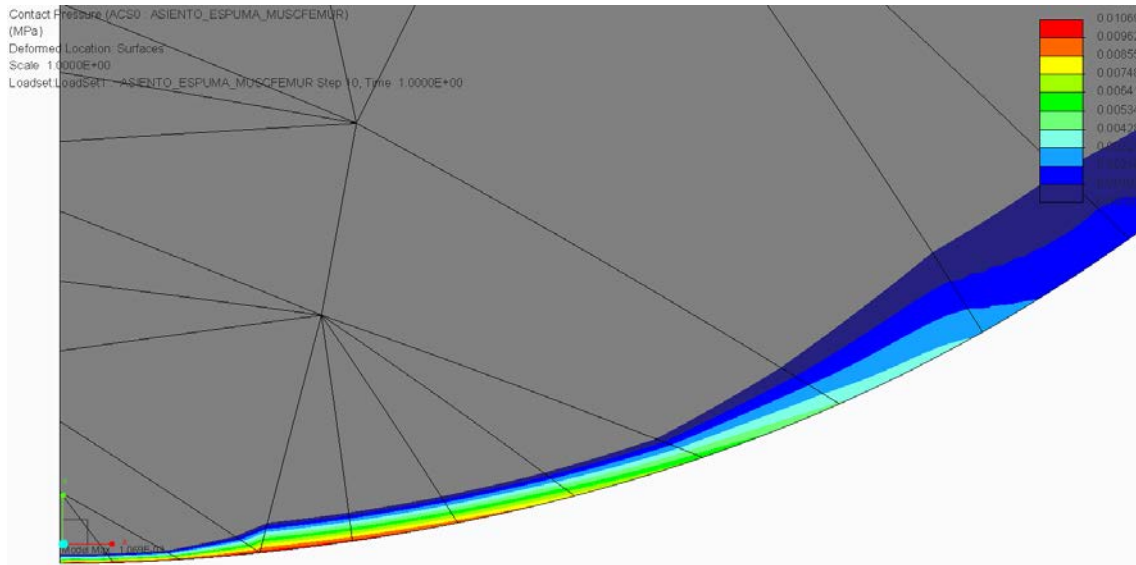


Figura 19.11 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 20mm. En donde la presión de contacto máxima de 10.7Kpa está dentro del objetivo de confort de 12Kpa.

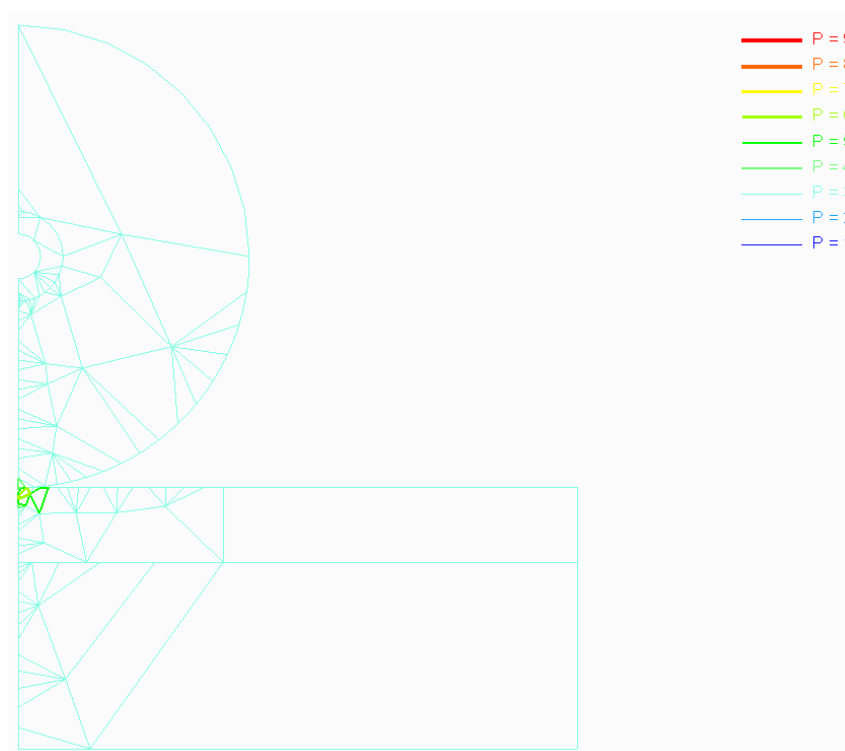


Figura 19.12 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 20mm.

## 19.4 RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO SUPLEMENTARIO DE 30MM:

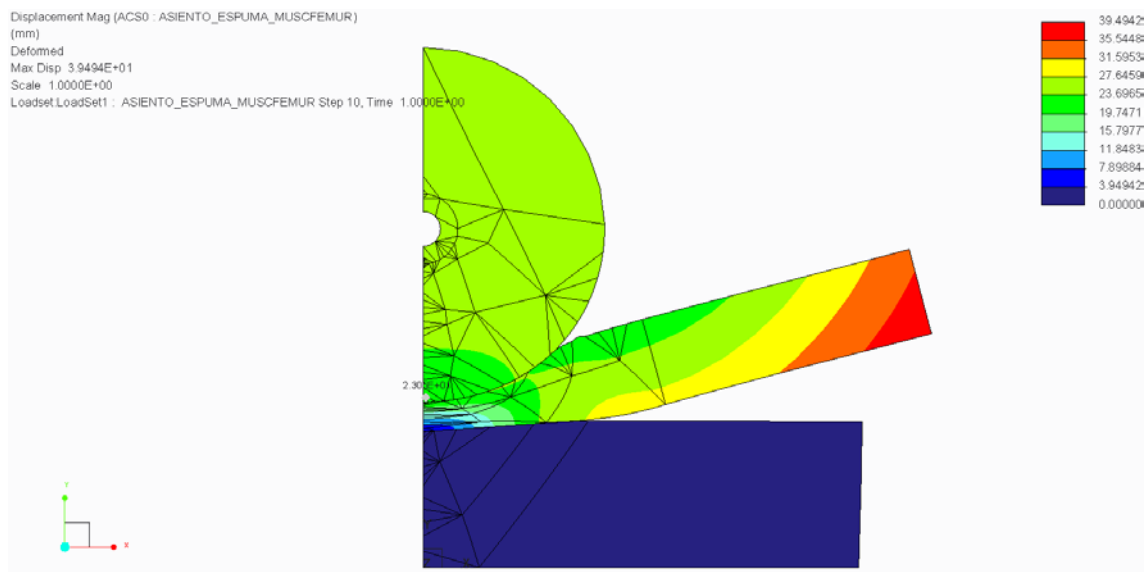


Figura 19.13 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 30mm.

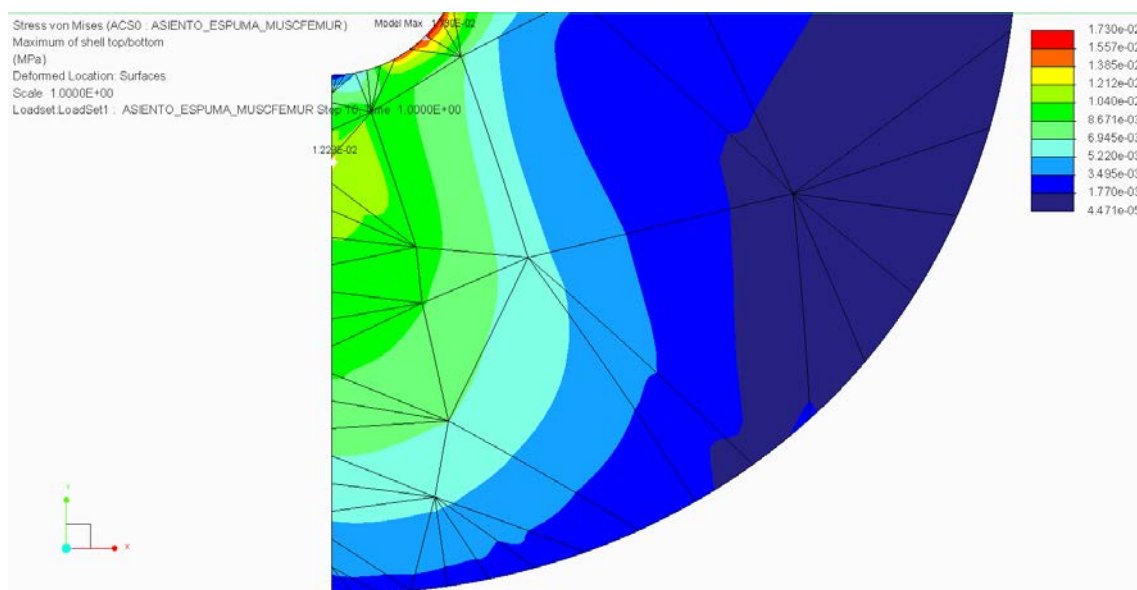


Figura 19.14 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 30mm. Donde la tensión de Von Misses máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 17,3Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 12.2Kpa, la cual también está fuera del objetivo de confort marcado.

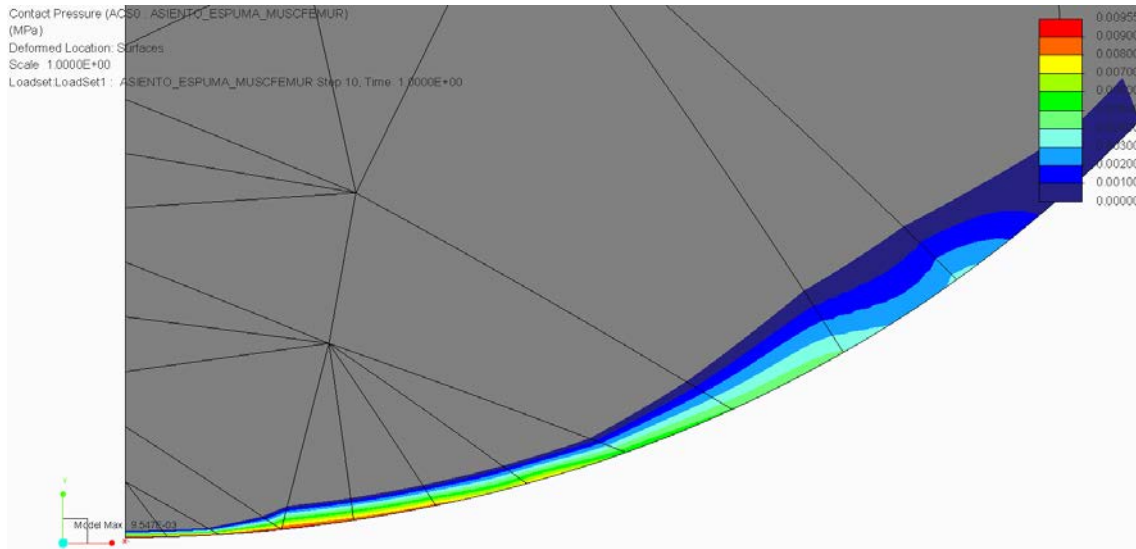


Figura 19.15 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 30mm. En donde la presión de contacto máxima de 9.6Kpa está dentro del objetivo de confort de 12Kpa.

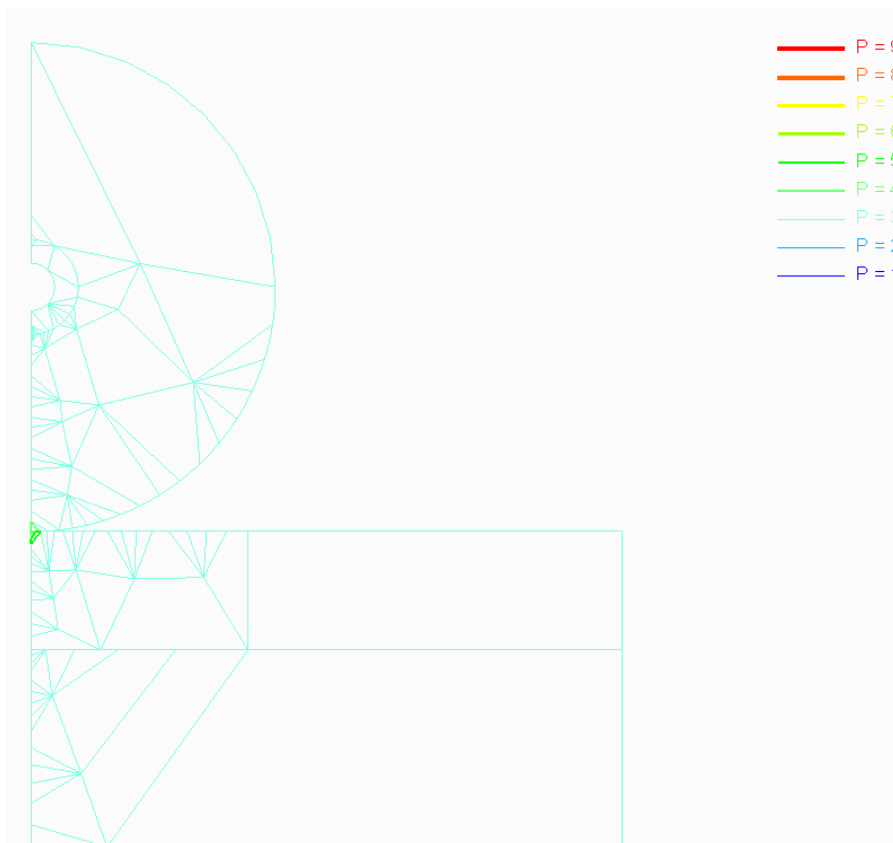


Figura 19.16 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 30mm.

## 19.5 RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO SUPLEMENTARIO DE 35MM:

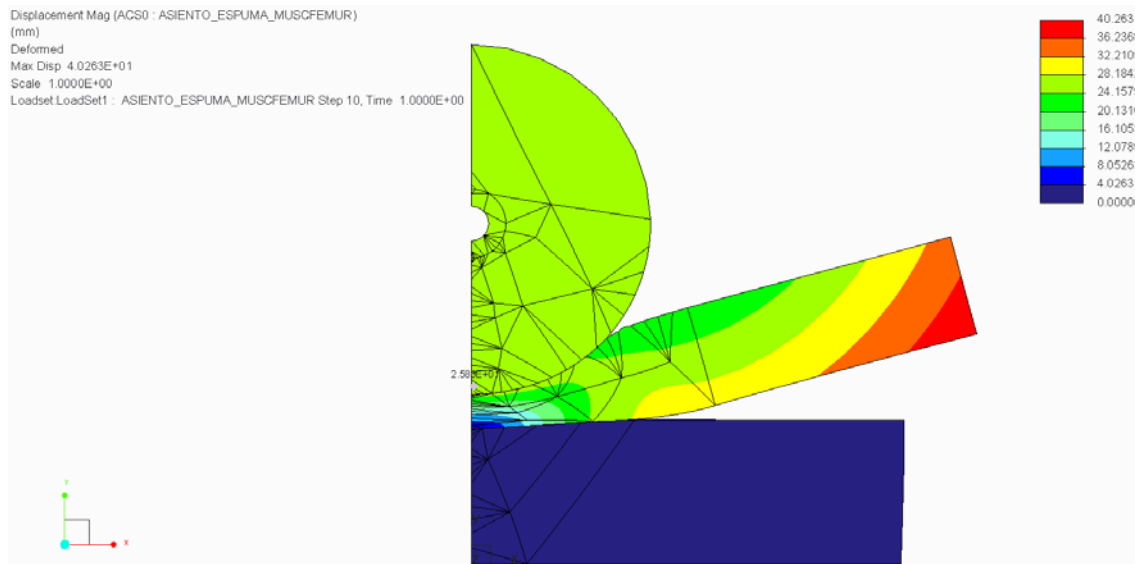


Figura 19.17 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 35mm.

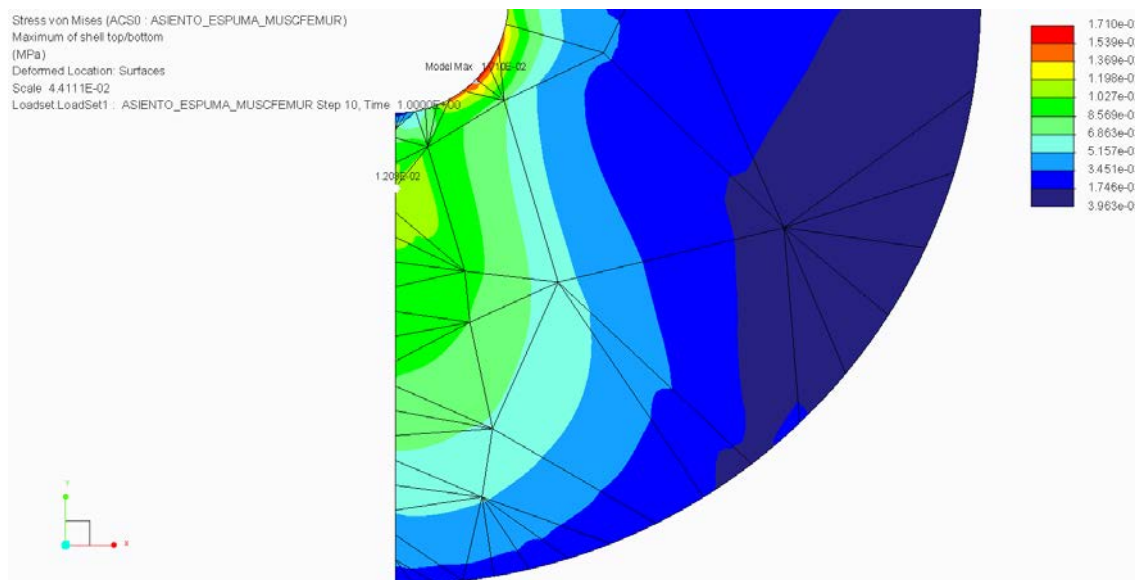


Figura 19.18 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 35mm. Donde la tensión de Von Mises máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 17,1Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 12.0Kpa, la cual está al límite del objetivo de confort marcado.

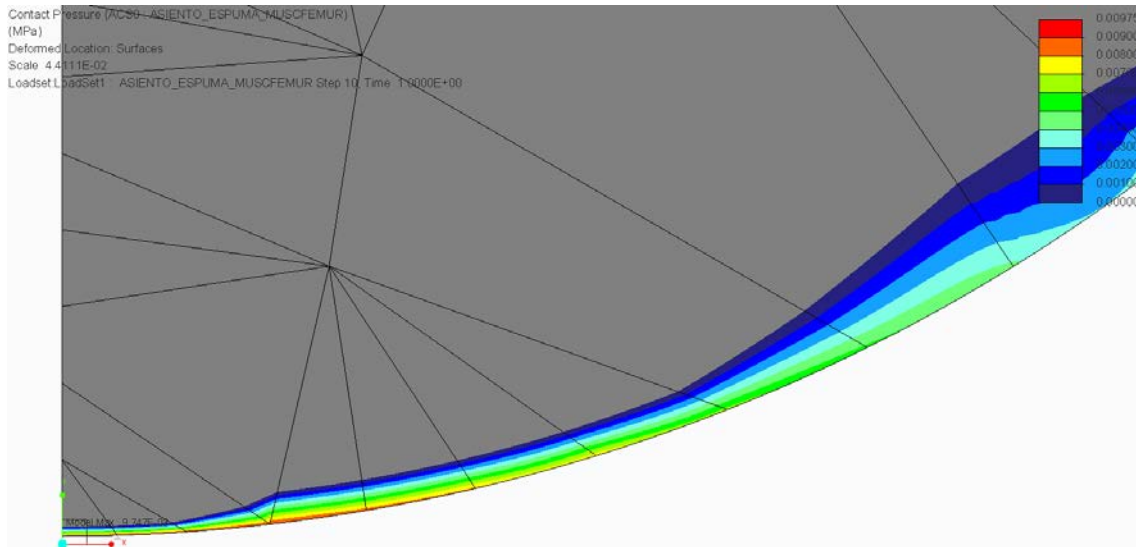


Figura 19.19 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 35mm. En donde la presión de contacto máxima de 9.8Kpa está dentro del objetivo de confort de 12Kpa.

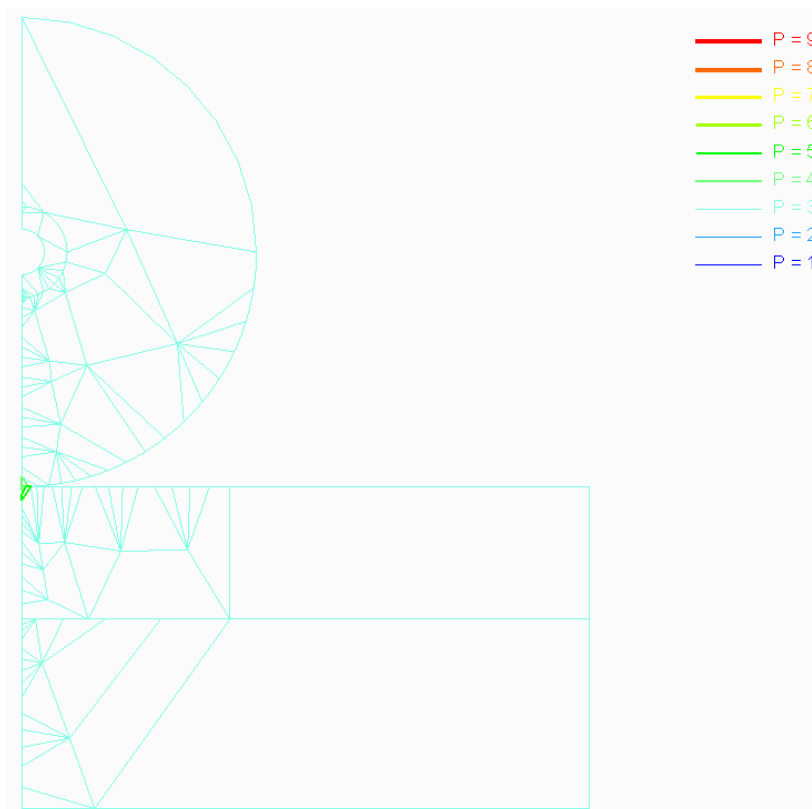


Figura 19.20 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 35mm.

## 19.6 RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO SUPLEMENTARIO DE 40MM:

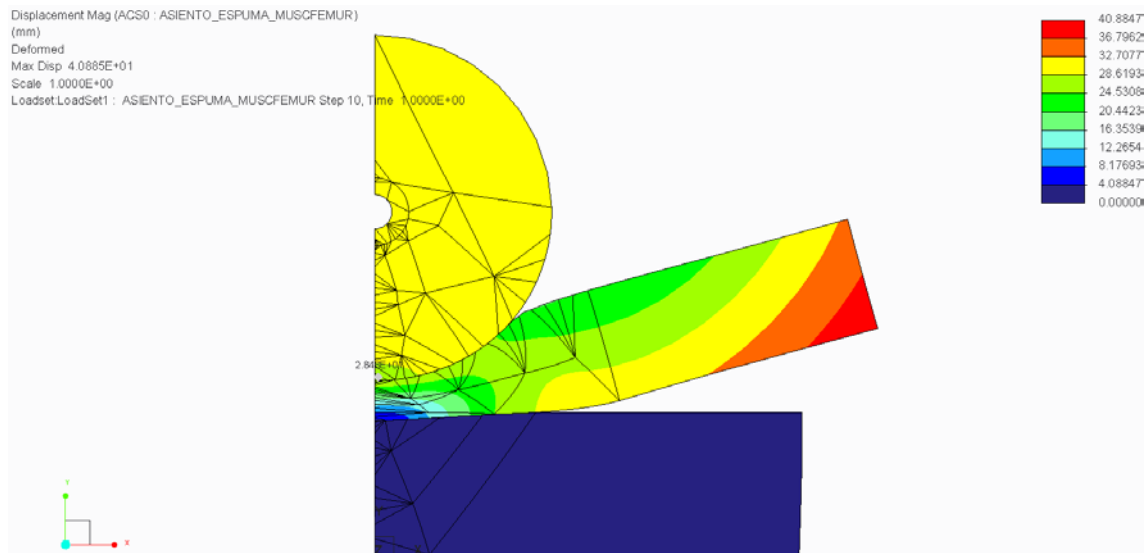


Figura 19.21 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 40mm.

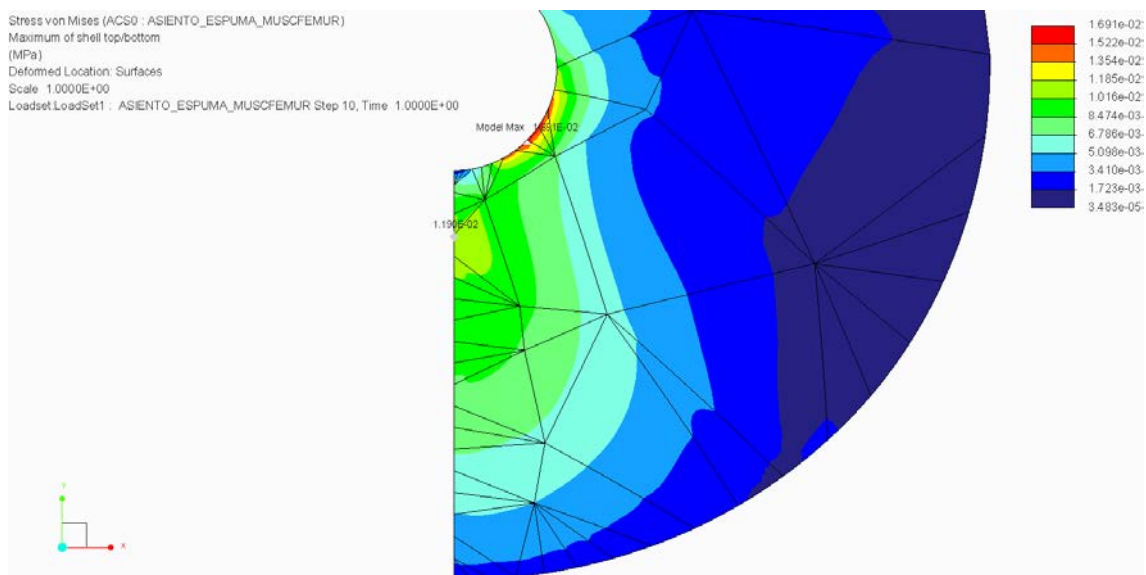


Figura 19.22 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 40mm. Donde la tensión de Von Misses máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 16,9Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 11.9Kpa, la cual está dentro del objetivo de confort marcado.

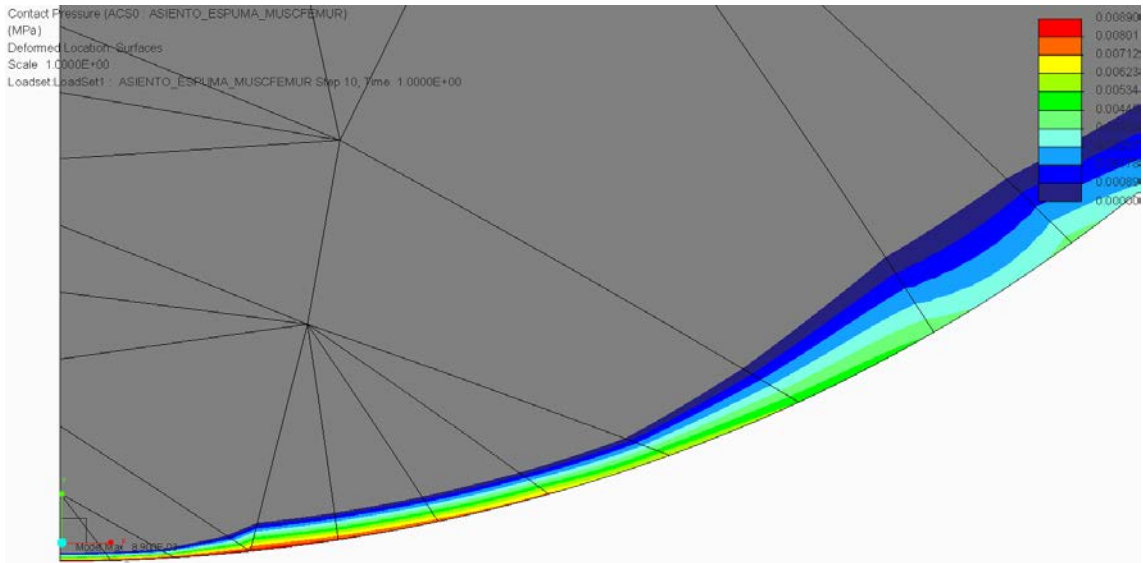


Figura 19.23 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 40mm. En donde la presión de contacto máxima de 8.9Kpa está dentro del objetivo de confort de 12Kpa.

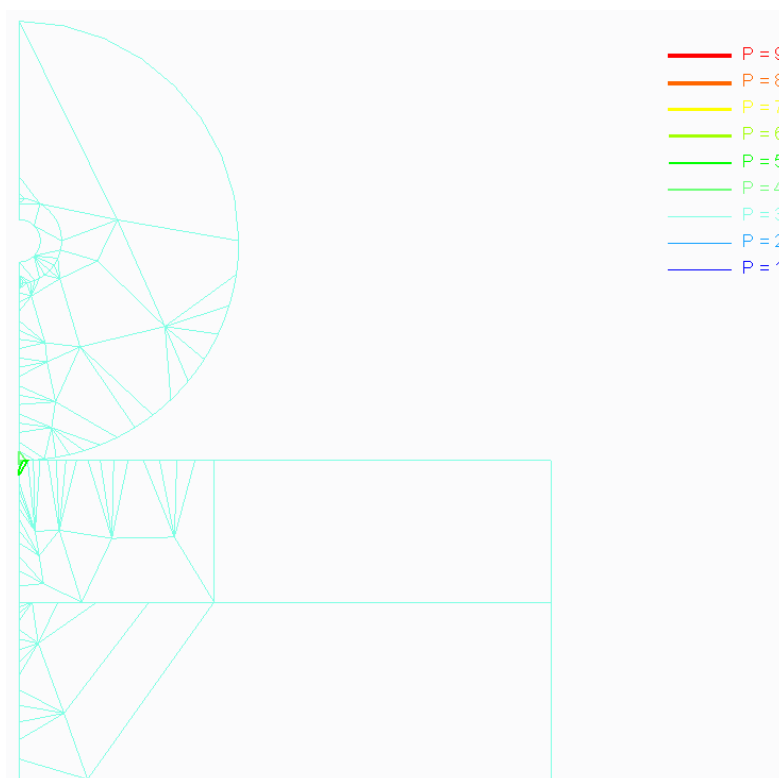


Figura 19.24 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 40mm.

## 19.7 RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO SUPLEMENTARIO DE 45MM:

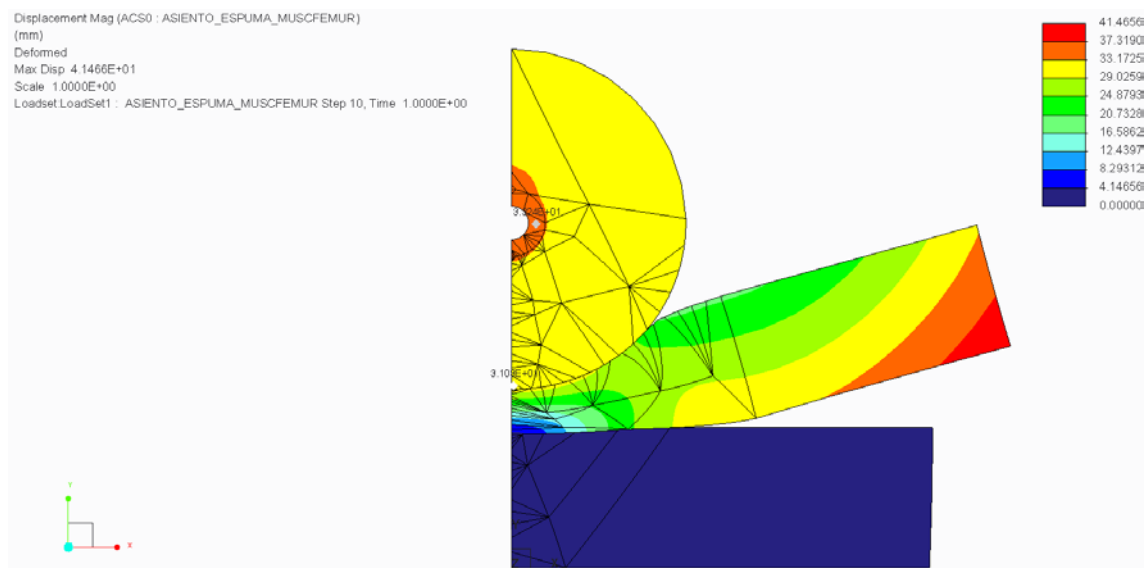


Figura 19.25 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 45mm.

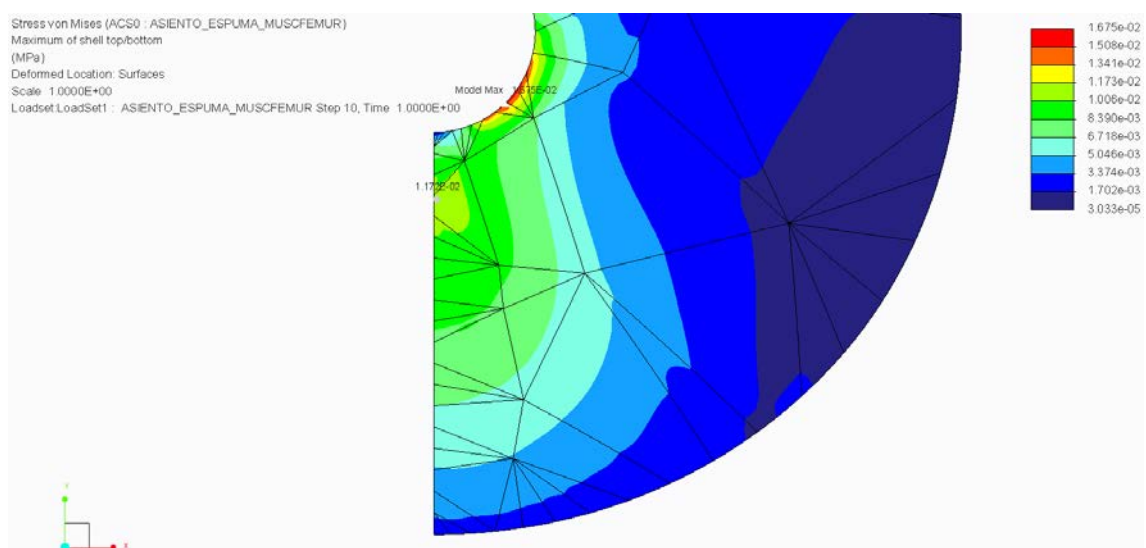


Figura 19.26 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 45mm. Donde la tensión de Von Mises máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 16,7Kpa estando por encima de los 12Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 11.7Kpa, la cual está dentro del objetivo de confort marcado.



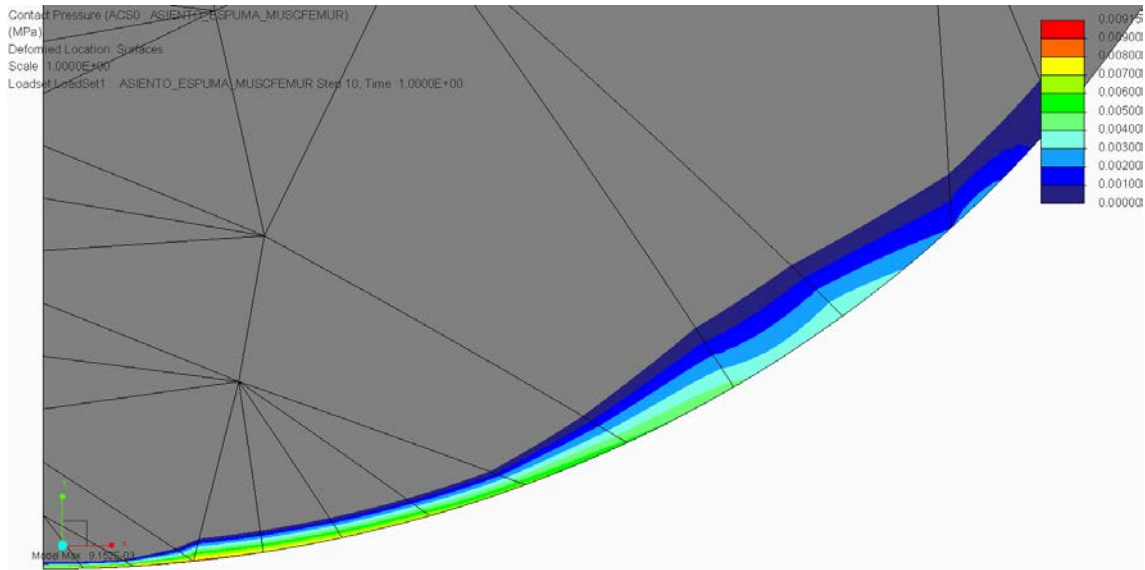


Figura 19.27 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 45mm. En donde la presión de contacto máxima de 9.2Kpa está dentro del objetivo de confort de 12Kpa.

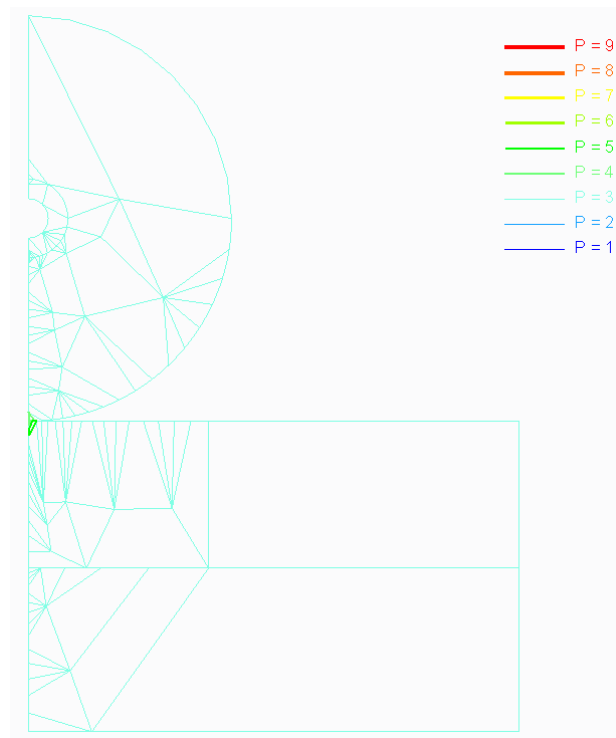


Figura 19.28 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 45mm.

## 19.8 RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁNDAR CON UN ESPESOR DE ASIENTO SUPLEMENTARIO DE 50MM:

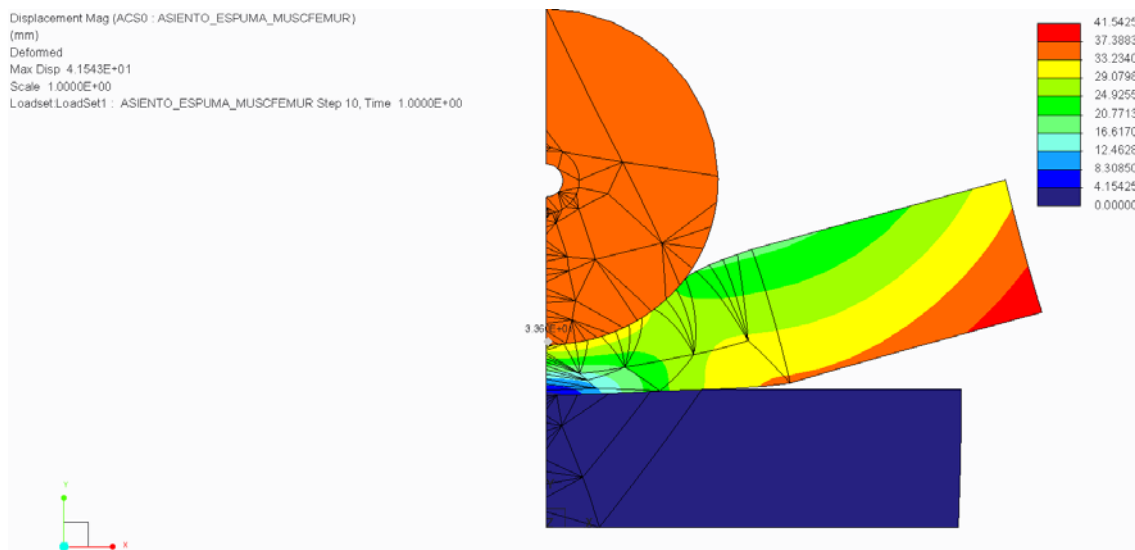


Figura 19.29 Deformaciones en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 50mm.

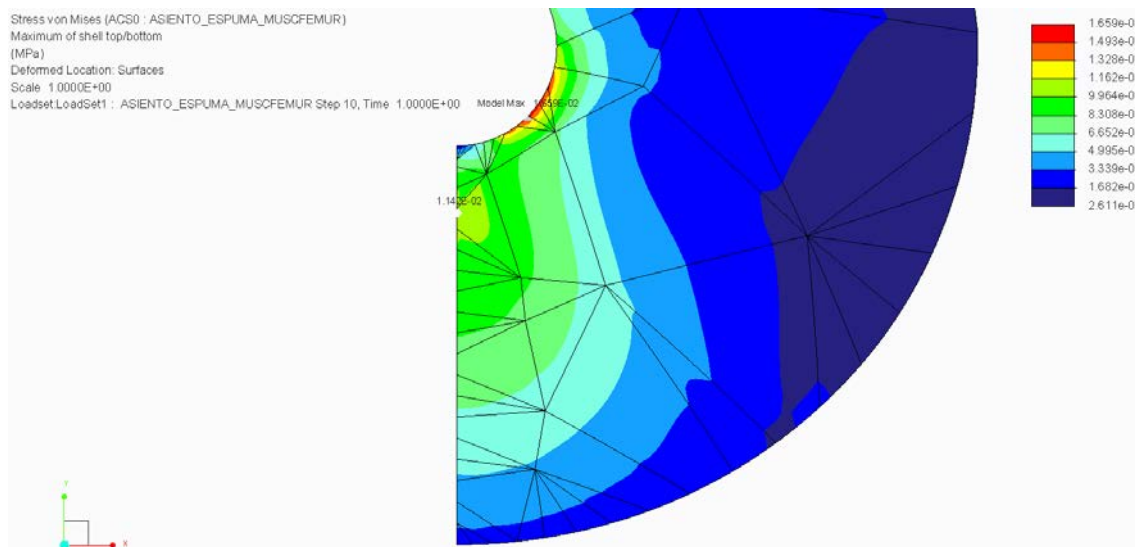


Figura 19.30 Tensiones de Von Mises en la masa muscular en la simulación con un espesor de asiento suplementario de 50mm. Donde la tensión de Von Mises máxima se da en la zona de contacto con el hueso y es de 16,6Kpa estando por encima de los 11.4Kpa de objetivo de confort. La siguiente tensión máxima, fuera de las zonas de contacto, es decir en la masa muscular propiamente dicha, es de 11.4Kpa, la cual está dentro del objetivo de confort marcado.

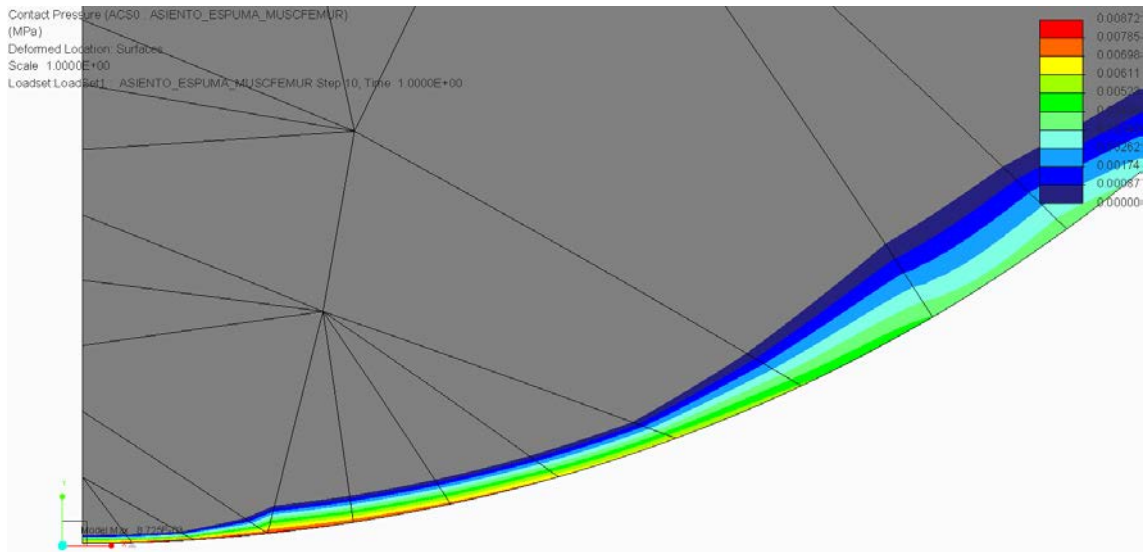


Figura 19.31 Presión de contacto en la interacción músculo-asiento suplementario, para un espesor de este último de 50mm. En donde la presión de contacto máxima de 8.7Kpa está dentro del objetivo de confort de 12Kpa.

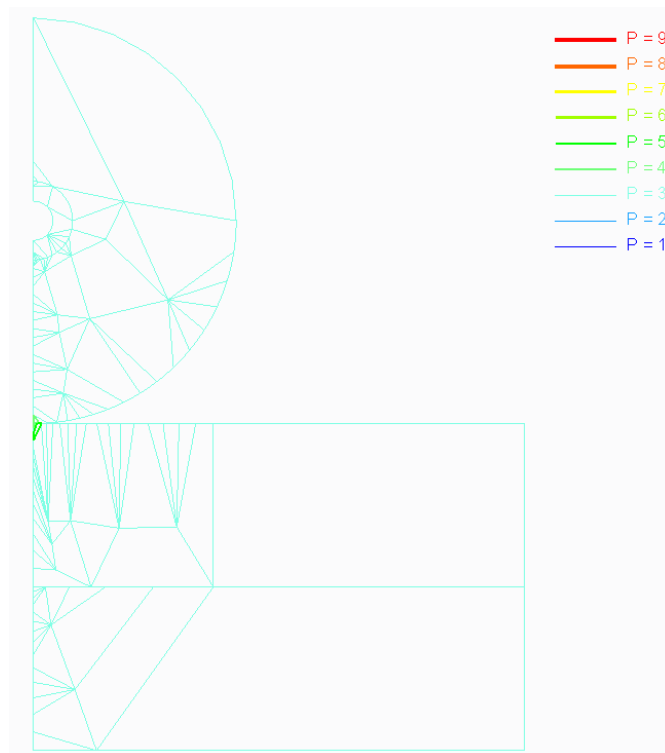


Figura 19.32 Niveles-P para la simulación con un espesor de asiento suplementario de 50mm.