

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Caracterización de elastómeros para modelado de actuadores blandos

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Luis Cruz Terán

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Alberto Caballero Ruiz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

Agradecimientos

Este proyecto fue realizado en el Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva y Digital (MADiT), con sede en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT), ubicado en Ciudad Universitaria, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), bajo la tutoría del Dr. Alberto Caballero Ruiz, con aportaciones importantes del Dr. Leopoldo Ruíz Huerta. Además se agradece el apoyo brindado por el Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) mediante el proyecto “Desarrollo de herramientas didácticas para impartir el tema de Actuadores Suaves en asignaturas relacionadas con sistemas mecatrónicos” con clave PE – 113019.

Agradecimientos

A mi madre por todo su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida, ya que sin ella no habría logrado nada; a mi hermano por su apoyo y por ser un ejemplo de disciplina y perseverancia; en memoria de mi padre, que a pesar de no estar conmigo, junto con mi madre y hermano han sido mi inspiración para ser mejor cada día.

A Dalia por todo el amor y apoyo que ella y su familia siempre mi brindó, gracias por dejarme compartir con ustedes mis logros y crecimiento.

A mis abuelos Mariana, Susana y Jorge, mis padrinos Georgina y Guillermo, mis tíos Federico, Alfonso y Esther, por su cariño y apoyo durante toda mi vida; no podría pedir una mejor familia.

A los doctores Alberto Caballero Ruiz y Leopoldo Ruíz Huerta, gracias por depositar su confianza en mí para la realización de este proyecto, por su calidez y cercanía y por estar siempre en los momentos en los que he necesitado su consejo, por ayudarme a crecer tanto personal como profesionalmente.

A todos quienes forman parte del laboratorio MADiT, quienes además de brindarme su amistad, también me aconsejaron a lo largo de mi paso por el laboratorio; un agradecimiento especial al próximo Dr. Luis Sánchez Balanzar, por compartir su conocimiento y guiarme durante la realización de este proyecto.

A mis profesores, amigos y compañeros por sus enseñanzas y consejos.

Índice

Índice de Nomenclatura I

Introducción 1

1. Antecedentes 2

1.1. Simuladores de esófago 2

1.2. Caracterización del material Ecoflex 00-30 5

2. Planteamiento del problema 28

2.1. Hipótesis 28

2.2. Objetivos 29

3. Marco teórico 30

3.1. Actuadores 30

3.2. Actuadores blandos 30

3.2.1. Manufactura y diseño de actuadores blandos 31

3.2.2. Materiales utilizados y algunos estímulos de respuesta 32

3.3. Materiales hiperelásticos 36

3.3.1. Relación entre la función de Energía de Deformación (W) y el esfuerzo 36

3.3.2. Modelos constitutivos para materiales hiperelásticos 38

3.4. Computación evolutiva 40

3.4.1. Modelos en la computación evolutiva 40

3.5. Algoritmos Genéticos 41

3.5.1. Codificación 41

3.5.2. Evaluación de ajuste 42

3.5.3. Reproducción 42

3.5.4. Selección 43

3.5.5. Cruza 43

3.5.6. Mutación 45

3.5.7. Condición de término 46

3.6. Método de elementos finitos 46

3.6.1. Aplicaciones del análisis por elementos finitos 46

3.6.2. Procedimiento del análisis por elementos finitos 48

4. Desarrollo 51
4.1. Ensayos de tracción uniaxial 52
4.1.1. Fabricación de especímenes 52
4.1.2. Realización de ensayos mecánicos 55
4.2. Modelo constitutivo para el Ecoflex 00-30 58
4.2.1. Procesamiento de datos experimentales 58
4.2.2. Comprobación de modelos reportados 61
4.2.3. Algoritmo evolutivo para encontrar constantes del modelo constitutivo 65
4.2.4. Algoritmo genético 74
4.3. Análisis por elementos finitos 83
Conclusiones y trabajo a futuro 89
Referencias 90
Bibliografía 92

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Propiedades de los materiales de la serie Ecoflex [15]. 4
Tabla 1.2 Modelos constitutivos para los materiales ensayados reportados por Elsayed *et al*. [12]. 6
Tabla 1.3 Constantes del modelo de Ogden por Moseley *et al* [27]. 16
Tabla 1.4 Modelos constitutivos reportados por Steck *et al* [35]. 19
Tabla 1.5 Parámetros para el Ecoflex 00-30 como un material incompresible [35]. 19
Tabla 1.6 Parámetros para el Ecoflex 00-30 como un material compresible [*sic*] [35]. 20
Tabla 1.7 Parámetros del Ecoflex utilizados en la simulación de elemento finito [35]. 21
Tabla 1.8 Modelos constitutivos para los materiales ensayados reportados por Shi *et al*. [30]. 25
Tabla 3.1. Dos clasificaciones posibles para actuadores [17]. 30
Tabla 3.2 Factores que se deben considerar cuando se elige un actuador blando [16]. 31
Tabla 3.3. Principales fluidos de trabajo utilizados en los actuadores blandos [23]. 34
Tabla 3.4. Actuadores blandos documentados a partir del material y el estímulo al que responden [4]. 35
Tabla 3.5 La función de energía de deformación relacionada con el esfuerzo verdadero [24, 25].. 37
Tabla 3.6 Desarrollo y progreso de la teoría de hiperelasticidad a lo largo del tiempo [19]. 38
Tabla 4.1 Descripción técnica del material Ecoflex 00-30. 56
Tabla 4.2 Modelos y constantes reportados que caracterizan el Ecoflex 00-30 [12, 30, 35]. 62
Tabla 4.3 Modelo de Ogden para modelar el comportamiento del Ecoflex 00-30 s en ANSYS (Moseley *et al*.) [27]. 63
Tabla 4.4 Resultados del algoritmo evolutivo 1ª Generación (Modelo de Gent y Yeoh). 67
Tabla 4.5 Resultados del algoritmo evolutivo 40ª Generación (Modelo de Gent y Yeoh). 70
Tabla 4.6 Resultados del algoritmo genético 1ª Generación 76
Tabla 4.7 Resultados del algoritmo genético, soluciones óptimas 79
Tabla 4.8 Promedio de soluciones óptimas. Algoritmo evolutivo. 83
Tabla 4.9 Promedio de soluciones óptimas. Algoritmo genético. 85
Tabla 4.10 Comparación entre valores de esfuerzo y deformación verdadera. 87
Tabla 4.11 Errores porcentuales calculados. 88

Índice de Figuras

Fig. 1.1 Esquema del diseño del actuador blando (a) vista interior del actuador, 12 niveles de cámaras expandibles incrustadas a lo largo del conducto de transporte de comida, (b) vista del área transversal [8]. . 2
Fig. 1.2 Resultados de los ensayos de tracción realizados para 5 especímenes [8]. 3
Fig. 1.3 (a) modelo de 5 niveles para el análisis en elementos finitos, (b) modelo deformado [8]. 3
Fig. 1.4 Propuesta mecánica. A) Elemento elástico, B) Nivel de conducto esofágico, C) Apilamiento de niveles, envueltos por una camisa rígida, D) Estrangulamiento del conducto [15]. 4
Fig. 1.5 Propuesta neumática. A) Elemento elástico, B) Nivel del conducto esofágico, C) Apilamiento de niveles, envueltos por una camisa rígida, D) Estrangulamiento del conducto, mediante el control de electroválvulas [15] 4
Fig. 1.6 Diseño de la cámara interna y muestra de un nivel del conducto [15]. 5
Fig. 1.7 Comparación del comportamiento del actuador, entre la simulación y el modelo [15]. 5
Fig. 1.8 Propuestas de diseño investigadas para cámaras neumáticas a9 Sección transversal circular, b) Sección transversal semicircular, c) Sección transversal con sectores circulares, d) Sección transversal con sectores de anillo [12]. 6
Fig. 1.9 Ajustes óptimos para los datos experimentales: modelo de Yeoh para el Ecoflex 00-30, modelo de Ogden (N=3) para el Ecoflex 00-50 y modelo de Yeoh para el Dragon Skin 30 [12]. 7
Fig. 1.10 Comparación entre los ángulos de flexión experimental y el predicho mediante FEA, módulo hecho con Ecoflex 00-30 [12]. 7
Fig. 1.11 Módulos de sección transversal circular a) presión de accionamiento 0.1 bar, hecho con Ecoflex 00-30, b) hecho con Ecoflex 00-50 [12]. 8
Fig. 1.12 Resultados de los estudios paramétricos en FEA [12]. 9
Fig. 1.13 Diseño final del módulo, análisis en FEA y estudio experimental de la actuación de una cámara bajo una presión de 0.8 bar [12]. 10
Fig. 1.14 Modelo del actuador [39]. 10
Fig. 1.15 Curvas de esfuerzo-deformación nominal del Ecoflex 00-30 y PDMS [39]. 11
Fig. 1.16 Modelo del actuador (1/4 del modelo completo) [39]. 11
Fig. 1.17 a) esfuerzo, b) deformación y c) desplazamiento en dirección Z del actuador bajo una presión de 6 kPa [39]. 11
Fig. 1.18 Modelo del actuador modificado [39]. 12
Fig. 1.19 Esfuerzo, deformación y desplazamiento en dirección Z del actuador bajo una presión de 8 kPa [39]. 12
Fig. 1.20 Esfuerzo, deformación y desplazamiento en dirección Z del actuador bajo una presión de 10 kPa [39]. 12
Fig. 1.21 Resultados experimentales bajo una presión de 10 kPa [39]. 13
Fig. 1.22 a) Espécimen de prueba para el ensayo uniaxial a falla, b) Galgas extensiométricas de elastómero con metal líquido incrustado [7]. 13
Fig. 1.23 Resultados del ensayo uniaxial hasta falla (a diferentes velocidades), a)Sylgard 184, b)Smooth-Sil-950, c) Ecoflex 00-30 (la región sombreada representa un intervalo de confianza del 95%) [7]. 14
Fig. 1.24 Ensayo uniaxial de tracción (consistencia de lote a lote), ensayados a 100 mm/min [7]. 14
Fig. 1.25 Resultados del ensayo de uniaxial de tracción con precarga, a)Sylgard 184, b)Smooth-Sil-950, c) Ecoflex 00-30 (la región sombreada representa un intervalo de confianza del 95%) [7]. 15
Fig. 1.26 Ensayos de carga cíclica para el espécimen homogéneo a)Sylgard 184, b)Smooth-Sil-950, c) Ecoflex 00-30 y para las galgas extensiométricas d)Sylgard 184, e)Smooth-Sil-950, f) Ecoflex 00-30 [7]. 15

Fig. 1.27 Resultados del ensayo de relajación de esfuerzo: a) Espécimen homogéneo, las marcas de color representan los datos experimentales y las líneas negras representan los modelos teóricos, b) Datos obtenidos con las galgas extensiométricas [7]. 16
Fig. 1.28 Datos experimentales y ajustes iniciales obtenidos por Moseley *et al* [27]. 16
Fig. 1.29 Datos experimentales y ajustes finales obtenidos por Moseley *et al* [27]. 16
Fig. 1.30 Esquema de un actuador lineal y sus parámetros geométricos relevantes para su diseño [27]. 17
Fig. 1.31 Actuador blando neumático bajo una carga de 35 kPa y su simulación [27]. 17
Fig. 1.32 Comparación de resultados obtenidos experimentalmente y mediante la simulación (prueba de desplazamiento) [27]. 17
Fig. 1.33 Comparación de resultados obtenidos experimentalmente y mediante la simulación (prueba de bloqueo de fuerza) [27]. 17
Fig. 1.34 Proceso de producción de especímenes reportado por Steck *et al* [35]. 18
Fig. 1.35 Resultados experimentales a una taza de elongación de 1.2/min [35]. 19
Fig. 1.36 Respuesta uniaxial del Ecoflex 00-30 como material incompresible [35]. 20
Fig. 1.37 Respuesta axial y transversal del Ecoflex como material compresible [35]. 20
Fig. 1.38 Porción modelada de la esfera a analizar mediante elementos finitos [35]. 21
Fig. 1.39 Contornos de esfuerzos para la esfera [35]. 21
Fig. 1.40 Fotos de la propagación de fisura en el Ecoflex, la línea roja muestra la posición inicial del precorte, y la línea amarilla muestra la posición de propagación lateral estable [20]. 22
Fig. 1.41 Curvas de esfuerzo-deformación y su correspondiente morfología de fractura [20]. 22
Fig. 1.42 A) Propagación de la fisura de un espécimen precortado. B) Fisura después de la descarga [20]. ... 22
Fig. 1.43 a) Simulaciones de elementos finitos que comparan las tasas de liberación de energía para las fisuras hacia adelante y de forma lateral b) Tasa de liberación de energía, G, como función de la longitud de la grieta recién creada, dc [20]. 23
Fig. 1.44 a) Esquema del sensor con entrehierros y electrodos de PEDOT:PSS, b) micrografía óptica (imagen superior) e imagen SEM (imagen inferior) de la película de PEDOT:PSS serigrafiada de grosor $\approx \boldsymbol{200\ \mu m}$, c) fotografía de un sensor de presión de 12x12, d) esquema del proceso de fabricación del sensor [30]. 24
Fig. 1.45 Espécimen de PDMS (espesor de 1.5 mm), preparado para el ensayo de tracción uniaxial [30]. 25
Fig. 1.46 Análisis por elementos finitos del sensor con y sin entrehierro en la capa dieléctrica de Ecoflex 00-30, a) Sensor sin entrehierro bajo una presión positiva de 20 kPa, b) sensor con entrehierro bajo una presión positiva de 20 kPa, c) Sensor sin entrehierro bajo una presión de -30 kPa aplicada con una ventosa, d) Sensor con entrehierro bajo una presión de -30 kPa aplicada con una ventosa, e) Deformación direccional en Z de los electrodos de la superficie superior e inferior, bajo una presión de -30 kPa, $\boldsymbol{d0}$ indica la distancia entre los electrodos, f) cambio de distancia entre los electrodos superior e inferior bajo diferentes presiones para diferentes configuraciones de sensor [30]. 26
Fig. 1.47 a) y b) Mapeo de presiones con objetos diferentes, c) sensor con entrehierro bajo una presión de -10 kPa (izquierda) y -20 kPa (derecha), d) sensor sin entrehierro bajo una presión de -10 kPa (izquierda) y -20 kPa (derecha) [30]. 27
Fig. 3.1 Ejemplo de unas pinzas (actuador blando) hecho de elastómero, con circuitos de metal líquido y aleación de memoria de forma para accionamiento eléctrico [23]. 32
Fig. 3.2 Comparación entre el (i) movimiento de un gusano, (ii) y su contraparte hecha de un polímero iónico [16]. 33
Fig. 3.3 Actuador de flexión neumático hecho con manufactura aditiva [23]. 33
Fig. 3.4 Caminante hecho con un gel aniónico y catonico. Se aplica un campo de 5 V/cm para inducir movimiento [16]. 34
Fig. 3.5 Codificación binaria. 42

Fig. 3.6 Codificación octal. 42
Fig. 3.7 Codificación hexadecimal. 42
Fig. 3.8 a) Ejemplo de cruza en un punto, b) Ejemplo de cruza en dos puntos. 44
Fig. 3.9 Ejemplo de cruza uniforme. 44
Fig. 3.10 Ejemplo de cruza de tres padres. 45
Fig. 3.11 Ejemplo de mutación por inversión. 45
Fig. 3.12 Ejemplo de mutación por intercambio. 46
Fig. 3.13 Ejemplos de análisis por elementos finitos [5]. 47
Fig. 3.14 a) Elementos lineales, b) Elementos bidimensionales, c) Elementos tridimensionales, d) Elementos triangulares y cuadriláteros axisimétricos [21]. 49
Fig. 3.15 Diagrama de flujo del procedimiento de un análisis por elementos finitos. 50
Fig. 4.1 Metodología a seguir para la caracterización de un material hiperelástico. 51
Fig. 4.2 Tipos de especímenes (método de ensayo A, norma ASTM D412) [3]. 52
Fig. 4.3 Medidas del espécimen tipo D en milímetros [3]. 52
Fig. 4.4 Modelo CAD del molde para el espécimen D: a) Parte inferior del molde de vaciado, b) Parte superior del molde de vaciado (diseño realizado en licencia estudiantil de Autodesk Fusion 360). Todas las cotas están en milímetros. 53
Fig. 4.5 Molde de vaciado para especímenes. 53
Fig. 4.6 Medición de Parte A: 7 gramos para la mezcla de Ecoflex 00-30. 54
Fig. 4.7 Medición de Parte B: 7 gramos para la mezcla de Ecoflex 00-30 (en total 18 gramos). 54
Fig. 4.8 Mezclado de Parte A y B 55
Fig. 4.9 Cámara de vacío V400A – KLM GmbH. 55
Fig. 4.10 Desgasificación de la mezcla 55
Fig. 4.11 Vaciado de mezcla en el molde (especímenes para el ensayo de tracción tipo D). 55
Fig. 4.12 Espécimen tipo D curado y marcado previamente, distancia entre marcas 25 mm. 55
Fig. 4.13 Marco electromecánico de ensayo universal Shimadzu AGS-X Series 50 kN [31]. 56
Fig. 4.14 Mordazas por rodillo. 56
Fig. 4.15 Espécimen tipo D ensayado a una velocidad de 500 mm/min 57
Fig. 4.16 Resultados obtenidos a partir de los ensayos experimentales 58
Fig. 4.17 Curva promedio, gráfica verde: esfuerzo verdadero máximo 4.972 [MPa], elongación máxima 4.781 [mm/mm], tiempo de ensayo promedio 45.468 [s]. 61
Fig. 4.18 Validación de modelos reportados por Elsayed *et al*. (2014), Steck *et al*. (2019) y Shi *et al*. (2019), para el Ecoflex 00-30 considerándolo como un material isotrópico e incompresible. 62
Fig. 4.19 Mallado final de la probeta para el modelo de Moseley, con mayor refinamiento en las zonas internas (obtenido de forma empírica). 63
Fig. 4.20 Fallo en la simulación, debido a deformaciones inusuales en algunos elementos internos (dicho fallo no pudo resolverse aún con un refinamiento mayor de malla). 64
Fig. 4.21 Diagrama de flujo del algoritmo evolutivo implementado. 65
Fig. 4.22 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 11). 68
Fig. 4.23 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 12). 68
Fig. 4.24 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 16). 69
Fig. 4.25 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 17). 69
Fig. 4.26 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 22). 70
Fig. 4.27 Candidatos a solución óptima, 40ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 11). 71
Fig. 4.28 Candidatos a solución óptima, 40ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 12). 72
Fig. 4.29 Candidatos a solución óptima, 40ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 16). 72

Fig. 4.30 Candidatos a solución óptima, 40ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 17). 73
Fig. 4.31 Candidatos a solución óptima, 40ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 22). 73
Fig. 4.32 Diagrama de flujo del algoritmo genético implementado. 74
Fig. 4.33 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo genético (Ensayo 11). 77
Fig. 4.34 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo genético (Ensayo 12). 77
Fig. 4.35 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo genético (Ensayo 16). 78
Fig. 4.36 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo genético (Ensayo 17). 78
Fig. 4.37 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo genético (Ensayo 22). 79
Fig. 4.38 Candidatos a solución óptima del algoritmo genético (Ensayo 11). 80
Fig. 4.39 Candidatos a solución óptima del algoritmo genético (Ensayo 12). 81
Fig. 4.40 Candidatos a solución óptima del algoritmo genético (Ensayo 16). 81
Fig. 4.41 Candidatos a solución óptima del algoritmo genético (Ensayo 17). 82
Fig. 4.42 Candidatos a solución óptima del algoritmo genético (Ensayo 22). 82
Fig. 4.43 Soluciones óptimas obtenidas mediante un algoritmo evolutivo. 83
Fig. 4.44 Simulación del ensayo de tracción cálculo de esfuerzo máximo. Modelo de Gent solución óptima del algoritmo evolutivo. 84
Fig. 4.45 Simulación del ensayo de tracción cálculo de la deformación máxima. Modelo de Gent solución óptima del algoritmo evolutivo. 84
Fig. 4.46 Simulación del ensayo de tracción cálculo de esfuerzo máximo. Modelo de Yeoh solución óptima del algoritmo evolutivo. 84
Fig. 4.47 Simulación del ensayo de tracción cálculo de la deformación máxima. Modelo de Yeoh solución óptima del algoritmo evolutivo. 85
Fig. 4.48 Soluciones óptimas obtenidas mediante un algoritmo genético. 85
Fig. 4.49 Simulación del ensayo de tracción cálculo de esfuerzo máximo. Modelo de Gent solución óptima del algoritmo genético. 86
Fig. 4.50 Simulación del ensayo de tracción cálculo de la deformación máxima. Modelo de Gent solución óptima del algoritmo genético. 86
Fig. 4.51 Simulación del ensayo de tracción cálculo de esfuerzo máximo. Modelo de Yeoh solución óptima del algoritmo genético. 87
Fig. 4.52 Simulación del ensayo de tracción cálculo de la deformación máxima. Modelo de Yeoh solución óptima del algoritmo genético. 87

Índice de Nomenclatura

$\%Err$	Error porcentual.
$\overline{\Lambda}_k$	Desviador de la elongación: $\overline{\Lambda}_k = J^{-1/3}\,\Lambda_k$, $k = 1{:}\,3$.
A_0	Área transversal inicial de la sección homogénea de la probeta.
C_1, C_2	Parámetros del modelo de Mooney.
C_1, C_2, C_3, D_1, D_2, D_3	Parámetros del modelo de Yeoh (ecuación 12)
C_1, C_2, D	Parámetros del modelo de Mooney-Rivlin (ecuación 11).
C_{i0}	Parámetros del modelo de Yeoh $i = 0{:}\,n$.
C_{ij}	Parámetros del modelo de Mooney-Rivlin $i = 0{:}\,n$, $j = 0{:}\,n$
F_T	Fuerza teórica.
F_{max}	Fuerza máxima necesaria para llevar a fractura el material.
I_1, I_2, I_3	Invariantes del tensor de deformación.
J_1	Primer invariante del tensor de deformación (ecuación 8).
P_i	Esfuerzo nominal i en función de W y las elongaciones principales.
V_0	Volumen inicial.
V_A	Valor aproximado.
V_R	Valor real.
W_{GT}	Función de energía de deformación para el modelo de Gent (ecuación 8).
W_O	Función de energía de deformación para el modelo de Ogden (ecuación 6).
W_{vol}	Parte volumétrica de la función de energía de deformación (ecuaciones 7 y 9).
l_0	Longitud inicial de la probeta.
λ_1, λ_2, λ_3	Elongaciones principales, $\lambda_i = \Lambda_i$.
μ_i, α_i	Parámetros del modelo de Ogden $i = 1{:}\,n$.
μ_i, α_i, D	Parámetros del modelo de Ogden (ecuación 12).
σ_{BT1}	Relación de esfuerzo-elongación correspondiente al ensayo de tracción biaxial (dirección 1).
σ_{BT2}	Relación de esfuerzo-elongación correspondiente al ensayo de tracción biaxial (dirección 2).
$\sigma_{Experimental[i]}$	Esfuerzo iésimo experimental.
σ_{Gent}	Esfuerzo verdadero descrito por el modelo de Gent.
$\sigma_{Modelo[i]}$	Esfuerzo iésimo predicho por el modelo.
σ_{RT}	Resistencia a la tracción.
σ_{UT}	Relación de esfuerzo-elongación correspondiente al ensayo de tracción uniaxial.
σ_{Yeoh}	Esfuerzo verdadero descrito por el modelo de Yeoh.
σ_i	Esfuerzo verdadero i en función de W y las elongaciones principales.
ϕ_i	Valor codificado del parámetro iésimo.

ϕ_{max}	Límite superior
ϕ_{min}	Límite inferior
A	Área transversal resultante (ecuación 3).
A	Área transversal actual de la sección homogénea de la probeta.
F	Fuerza actual aplicada.
J	Jacobiano: determinante del tensor gradiente de deformación (ecuaciones 7, 9, 10, 11 y 12).
J, μ	Parámetros del modelo de Horgan-Saccomandi.
N	Número total de datos (ecuación 67).
N	Número de genes del cromosoma (ecuación 70).
SSE	Suma de los cuadrados del error residual.
U, W	Función de energía de deformación.
V	Volumen actual.
b	Valor decimal del cromosoma.
e	Deformación ingenieril o nominal.
l	Longitud actual de la probeta.
n, k, T	Parámetros del modelo Neo-Hookean.
n, k, T, a, b	Parámetros del modelo de Khajahsaeid.
p	Parámetro escalar arbitrario (ecuaciones 21, 22, 24 y 25).
s	Esfuerzo ingenieril o nominal.
$\boldsymbol{B}$	Tensor de deformación de Cauchy-Green por la izquierda.
$\boldsymbol{C}$	Tensor de deformación de Cauchy-Green por la derecha.
$\boldsymbol{F}$	Tensor gradiente de deformación.
$\boldsymbol{I}$	Tensor identidad
$\boldsymbol{P}$	Tensor de esfuerzo ingenieril o nominal en función de W.
$\boldsymbol{T}$	Tensor de esfuerzo verdadero (ecuación 5).
ΔL	Longitud corregida (ecuaciones 3 y 4).
ΔL	Cambio de longitud de la probeta.
δ	Contracción normal a la dirección de elongación (ecuaciones 3 y 4).
ε	Deformación verdadera o logarítmica.
$\kappa, \alpha, \mu, \delta, I_2$	Parámetros del modelo de Muliana
μ	Parámetro del modelo de Valanis-Landel.
μ, C_i, λ_L	Parámetros del modelo de Arruda-Boyce $i = 1{:}\,n$.
μ, J_m	Parámetros del modelo de Gent.
μ, J_m, C_1, C_2, C_3	Parámetros del modelo de Gent (Ecuación 8 y 9)
μ, f, ν	Parámetros del modelo Blatz-Ko.
ν	Coeficiente de Poisson (ecuación 4).
σ	Esfuerzo verdadero o de Cauchy.
$\boldsymbol{\sigma}$	Tensor de esfuerzo verdadero o de Cauchy en función de W.

Introducción

El diseño de sistemas robóticos bioinspirados reconoce que la naturaleza tiene soluciones a problemas que aún no han podido ser resueltos mediante los métodos de ingeniería existentes, lo que ha dado lugar a la creación de robots humanoides, prótesis robóticas, músculos artificiales y materiales blandos multifunciones que se basan en organismos naturales y tejido biológico [23].

Aunque la mayoría de los avances en el campo de la robótica bionspirada se ha logrado a partir de sistemas basados en piezas rígidas o semirrígidas; la utilización de materiales blandos, permite abordar problemas como: movilidad en espacios reducidos, resistencia al impacto y absorción de cargas dinámicas e impactos. Además para conseguir flexibilidad mecánica a nivel dispositivo, es necesario seleccionar cuidadosamente la geometría (arquitecturas determinísticas) mientras que al utilizar robots o actuadores blandos no es necesario considerar arquitecturas determinísticas pues están hechos a partir de materiales flexibles [23].

Dentro del campo de robótica blanda así como en el campo de actuadores blandos los elastómeros son un material recurrente debido a su alto límite de deformación elástica y alta flexibilidad mecánica. Este trabajo presenta el proceso realizado para la caracterización mecánica del Ecoflex 00-30, un elastómero que se ha empleado previamente en actuadores blandos con aplicación en el campo de medicina [8, 12, 15, 22], la biomimética [26, 41], en sensores de presión [30] y como pinzas para manipulación de objetos [26, 33] pero que hasta la fecha no ha sido caracterizado de manera satisfactoria; no se ha utilizado una norma adecuada para llevar a cabo los experimentos y en ocasiones se ha simplificado el comportamiento mecánico del material de no lineal a lineal.

En el primer capítulo (apartado de antecedentes) se presentan los dos actuadores blandos en los que se fundamenta la caracterización de este material, así como los trabajos existentes relacionados a la caracterización mecánica y obtención de modelos constitutivos para el Ecoflex 00-30.

En el segundo capítulo se presenta el planteamiento del problema, la hipótesis a seguir y los objetivos del trabajo. En el tercer capítulo se exponen todas las bases teóricas en las que está basado el trabajo así como el funcionamiento de los algoritmos genéticos. En el cuarto capítulo se describen los experimentos realizados para llevar a cabo la caracterización y el posterior análisis de los resultados obtenidos. Finalmente se plasman las conclusiones, además del trabajo a futuro.

1. Antecedentes

1.1. Simuladores de esófago

Con el fin de proveer de un ambiente sin riesgo que facilite las investigaciones en las propiedades más efectivas de la comida que ayuden a personas con trastornos en la deglución Chen *et al*. (2014) propusieron el primer actuador blando que simula la peristalsis esofágica humana [8].
Debido a la ventaja que presentan los robots blandos al incorporar materiales blandos que permiten imitar a sus contrapartes biológicas, optaron por construir un actuador de cuerpo blando hecho a base de un elastómero. La estructura se compone de un conducto cilíndrico en la parte central que funciona como conducto de transporte para la comida, además de contar con múltiples niveles de cámaras inflables que se encuentran incrustadas en la estructura, cada nivel cuenta con cuatro cámaras [8].

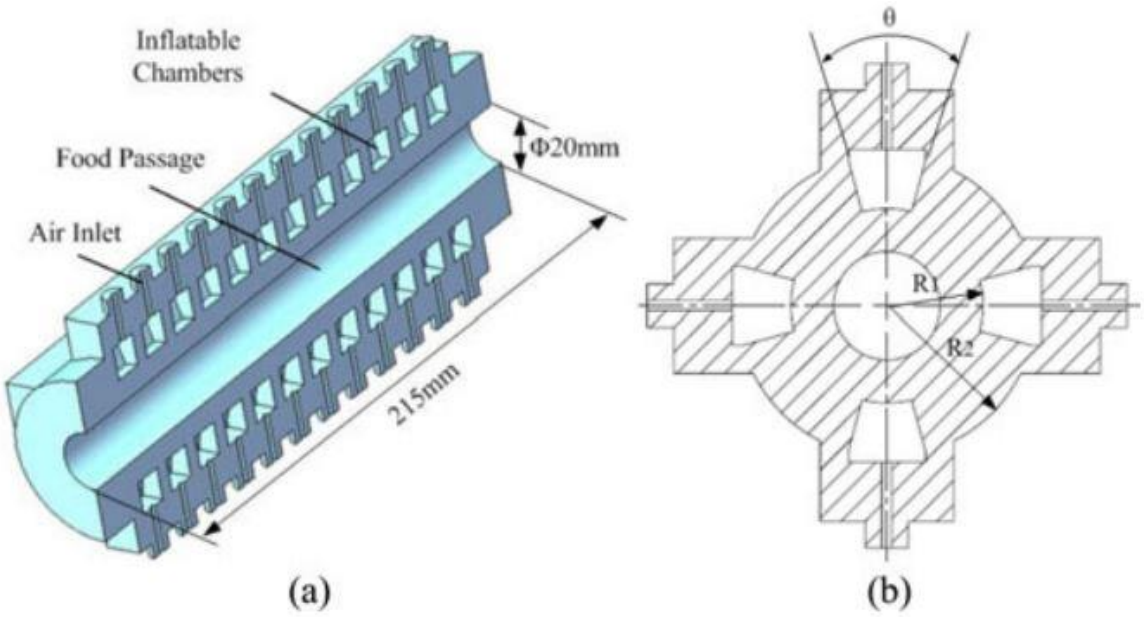


Fig. 1.1 Esquema del diseño del actuador blando (a) vista interior del actuador, 12 niveles de cámaras expandibles incrustadas a lo largo del conducto de transporte de comida, (b) vista del área transversal [8].

Previo a la construcción del actuador, realizaron un análisis de elementos finitos para simular la deformación del actuador, además de definir algunos parámetros de diseño tales como R1, R2 y θ. En los que el material seleccionado para el cuerpo del actuador fue el Ecoflex 00-30, debido a su baja rigidez, así como su alta deformabilidad (elongación de hasta 900% en la fractura), características que lo hacen adecuado para el actuador [8].
Para la caracterización del material realizaron ensayos de tracción uniaxial para 10 especímenes basados en la norma ASTM D412, las muestras tenían un espesor de 2 mm mientras que el ancho de la sección uniforme se fijó en 3 mm, realizando los ensayos a una velocidad de 500 mm/min. Sin embargo, notaron que el material presenta una relación cuasi-lineal hasta el 200% de deformación,

la que es la deformación necesaria para el actuador por lo que decidieron linealizar el comportamiento mecánico del Ecoflex mediante la definición de un módulo de Young con valor de 69 460 [Pa] [8].

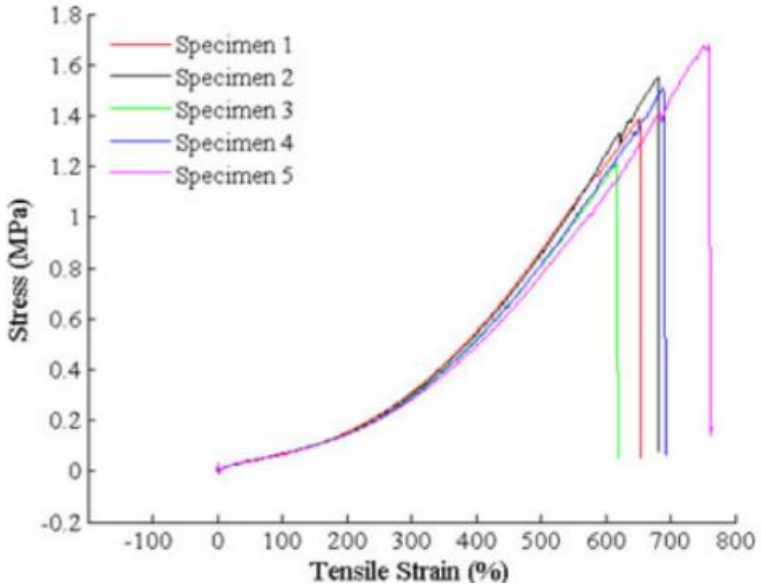


Fig. 1.2 Resultados de los ensayos de tracción realizados para 5 especímenes [8].

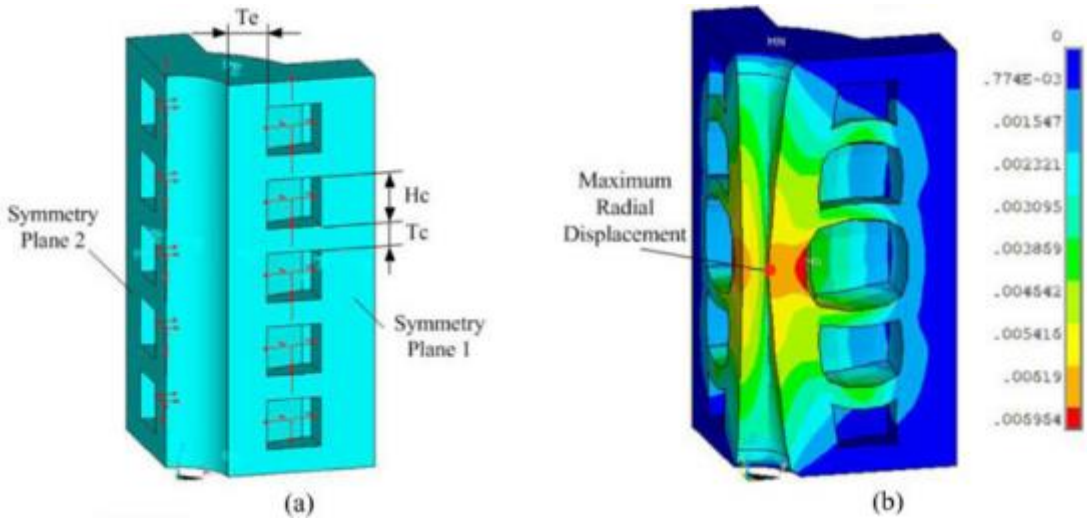


Fig. 1.3 (a) modelo de 5 niveles para el análisis en elementos finitos, (b) modelo deformado [8].

Más tarde, Hernández (2015) presenta un actuador blando para la simulación de la peristalsis esofágica humana, con el objetivo de reproducir el funcionamiento del esófago humano durante el transporte del bolo alimenticio, esto con fines de investigación (en cuanto al funcionamiento, procesos de deglución, diseño de alimentos y/o enfoque para tratamientos médicos). En este trabajo se presentan dos propuestas de mecanismo, la primera de acción mecánica, en la que el estrangulamiento del conducto esofágico se pretende lograr mediante elementos elásticos que contienen aire, mismos que presentan una forma de medio toroide y son cerrados gracias a

cordones que son halados en direcciones contrarias por una manivela (dichos cordones rodean la estructura); la segunda propuesta contempla accionamiento neumático, al igual que en la primer propuesta se tienen elementos elásticos en forma de medio toroide con una cavidad interna, además de contar con un conducto de entrada y salida de aire. Esta última propuesta fue seleccionada para llevar a cabo el actuador blando que simulara la peristalsis esofágica humana [15].

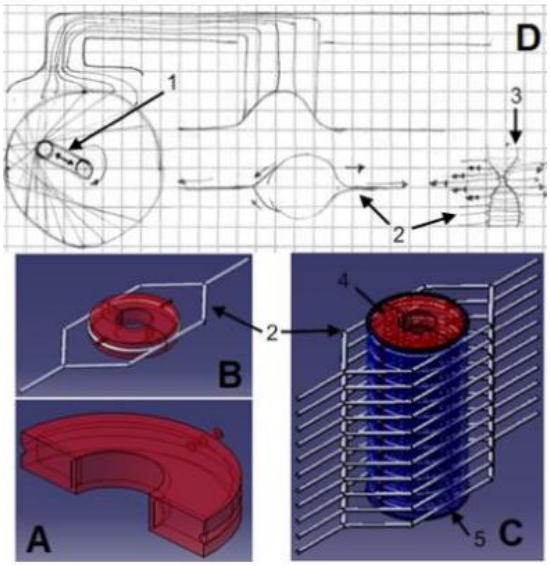


Fig. 1.4 Propuesta mecánica. A) Elemento elástico, B) Nivel de conducto esofágico, C) Apilamiento de niveles, envueltos por una camisa rígida, D) Estrangulamiento del conducto [15].

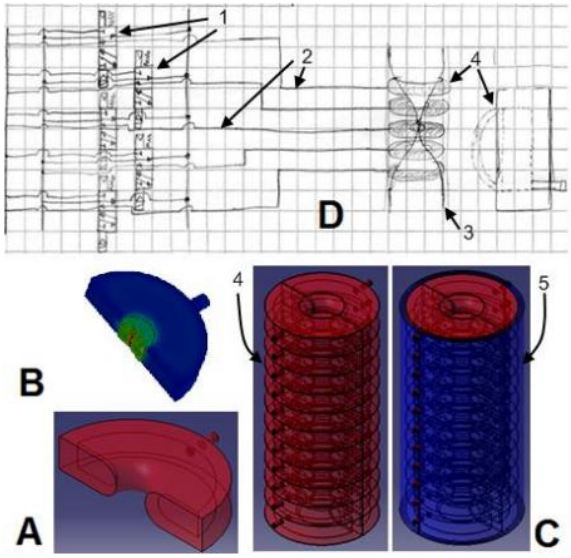


Fig. 1.5 Propuesta neumática. A) Elemento elástico, B) Nivel del conducto esofágico, C) Apilamiento de niveles, envueltos por una camisa rígida, D) Estrangulamiento del conducto, mediante el control de electroválvulas [15]

Para la selección de material se consideraron las series de Ecoflex 00-30 y 00-50 comparando el rendimiento de los materiales mediante análisis por elementos finitos en un análisis estático, para ambos materiales se utilizó un módulo de elasticidad [15].

Tabla 1.1 Propiedades de los materiales de la serie Ecoflex [15].

	Ecoflex 00-30	**Ecoflex 00-50**
Módulo de elasticidad	68,947.57 N/m^2	82,737.08 N/m^2
Coeficiente de Poisson	0.4	0.4

Después de 4 iteraciones de diseño, Hernández seleccionó al Ecoflex 00-30 como material base del actuador además de obtener la geometría final de la cámara interna para posteriormente realizar una comparación entre el comportamiento real del actuador y el comportamiento simulado, de lo que pudo concluir que, a pesar de que la simulación proporciona información similar al comportamiento real del conducto esofágico durante su deformación, no logra capturar algunos comportamientos observados en el conducto físico (como pellizcos entre el material) [15].

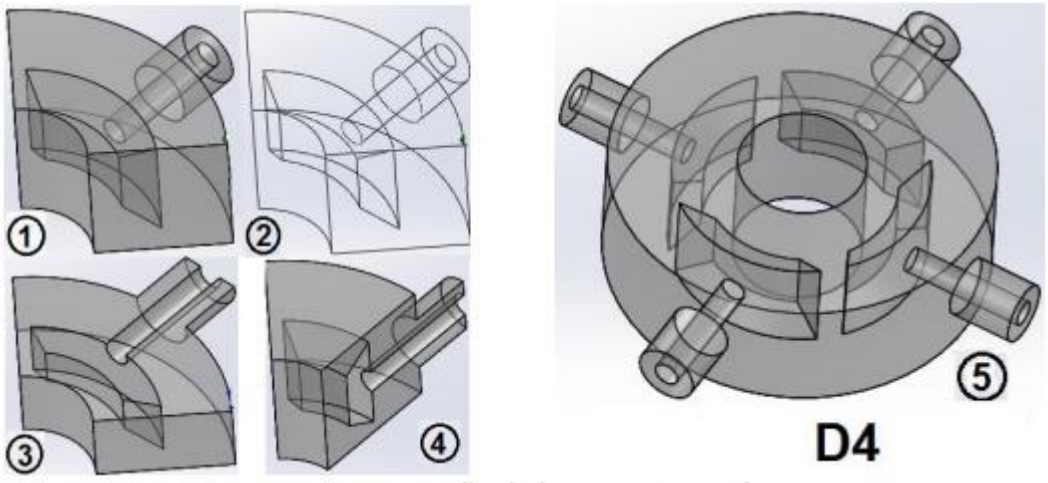


Fig. 1.6 Diseño de la cámara interna y muestra de un nivel del conducto [15].

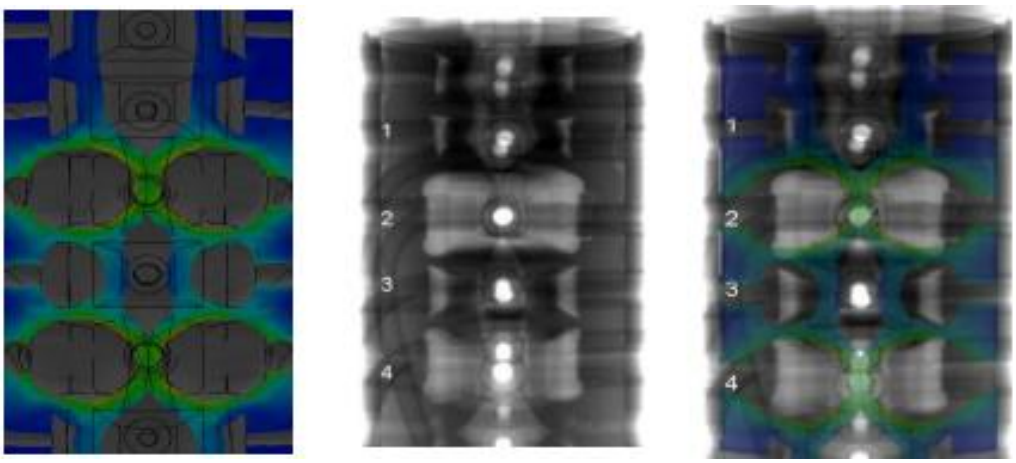


Fig. 1.7 Comparación del comportamiento del actuador, entre la simulación y el modelo [15].

1.2. Caracterización del material Ecoflex 00-30

Elsayed *et al*. (2014) presentan e investigan diferentes propuestas de diseño de un actuador blando neumático (Fig. 1.8), con el objetivo de reducir el efecto de hinchazón bajo actuación neumática mientras se utiliza internamente como una herramienta de diagnóstico médico y/o como herramienta quirúrgica; la hinchazón excesiva y el cambio abrupto de forma del actuador puede generar una presión desmedida sobre los órganos o causar el estallido del módulo. A pesar de que ya existen varias propuestas de diseño de este tipo de actuadores su viabilidad sólo se ha estudiado en términos de relaciones geométricas y algoritmos cinemáticos con dinámica lineal, sin tomar en cuenta la compresibilidad del fluido. En este trabajo integran el diseño asistido por computadora (CAD) y el análisis por elementos finitos (FEA), para considerar completamente la forma del canal de actuación y las secciones transversales de configuración, los efectos de compresibilidad de la cavidad neumática y el comportamiento mecánico de tres elastómeros diferentes (Ecoflex 00-30, Ecoflex 00-50 y Dragon Skin 30) [12].

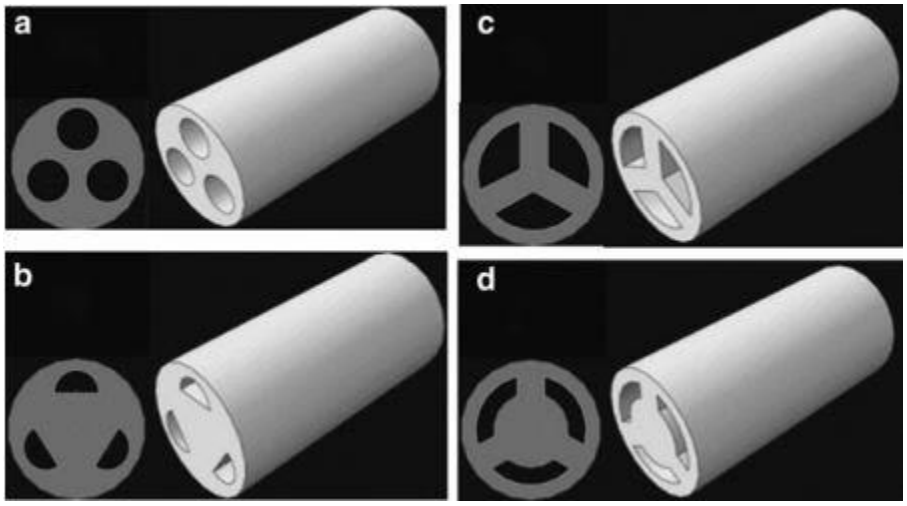


Fig. 1.8 Propuestas de diseño investigadas para cámaras neumáticas a9 Sección transversal circular, b) Sección transversal semicircular, c) Sección transversal con sectores circulares, d) Sección transversal con sectores de anillo [12].

En este trabajo realizaron ensayos de tracción uniaxial en cintas de 30 mm x 6 mm x 3 mm para obtener los modelos constitutivos de los tres materiales seleccionados, se utilizó una máquina de ensayos de tracción Instron con una celda de carga de 100N y los ensayos se llevaron a cabo bajo una velocidad de 300 mm/min; para el cálculo de las constantes de los materiales, se consideraron como incompresibles y se utilizaron los modelos de Yeoh (ecuación 1) [*sic*] y Ogden (ecuación 2) para describir el comportamiento de los elastómeros (Tabla 1.3 , Fig. 1.9) [12].

$$U = \sum_{i=1}^{N} C_{10}\left(\overline{I}_1 - 3\right)^i \tag{1}$$

$$U = \sum_{i=1}^{N} \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2}\left(\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3\right) \tag{2}$$

Tabla 1.2 Modelos constitutivos para los materiales ensayados reportados por Elsayed *et al*. [12].

Ecoflex 00-30 (Modelo de Yeoh)	Ecoflex 00-50 (Modelo de Ogden)	Dragon Skin 30 (Modelo de Yeoh)
$\boldsymbol{C_{10} = 5072\ [Pa]}$	$\mu_1 = 107.9 \times 10^3\ [Pa]$	$C_{10} = 1190\ [Pa]$
	$\alpha_1 = 1.55$	
$\boldsymbol{C_{20} = -331 [Pa]}$	$\mu_2 = 21.47\ [Pa]$	
	$\alpha_2 = 7.86$	$C_{20} = 23\,028\ [Pa]$
$\boldsymbol{C_{30} = -15\ [Pa]}$	$\mu_3 = -87.1 \times 10^3 [Pa]$	
	$\alpha_3 = -1.91$	

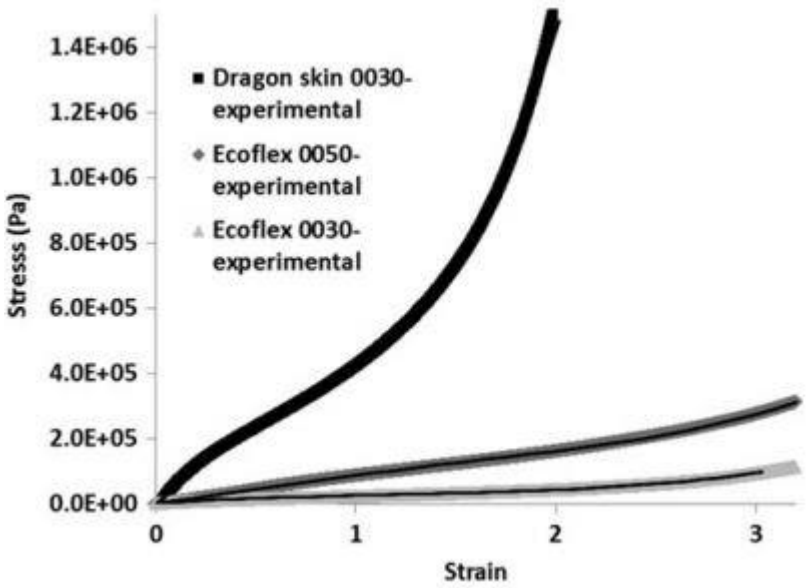


Fig. 1.9 Ajustes óptimos para los datos experimentales: modelo de Yeoh para el Ecoflex 00-30, modelo de Ogden (N=3) para el Ecoflex 00-50 y modelo de Yeoh para el Dragon Skin 30 [12].

Una vez obtenidos los modelos constitutivos de cada material, realizaron simulaciones en FEA para conocer la flexión de un módulo (sección transversal con cámaras circulares) hecho con Ecoflex 00-30 y Ecoflex 00-50, bajo diferentes presiones aplicadas en una sola cámara. El ángulo de flexión experimental se determinó mediante un sensor magnético localizado en la punta y se comparó con el ángulo obtenido de la simulación (Fig. 10) [12].

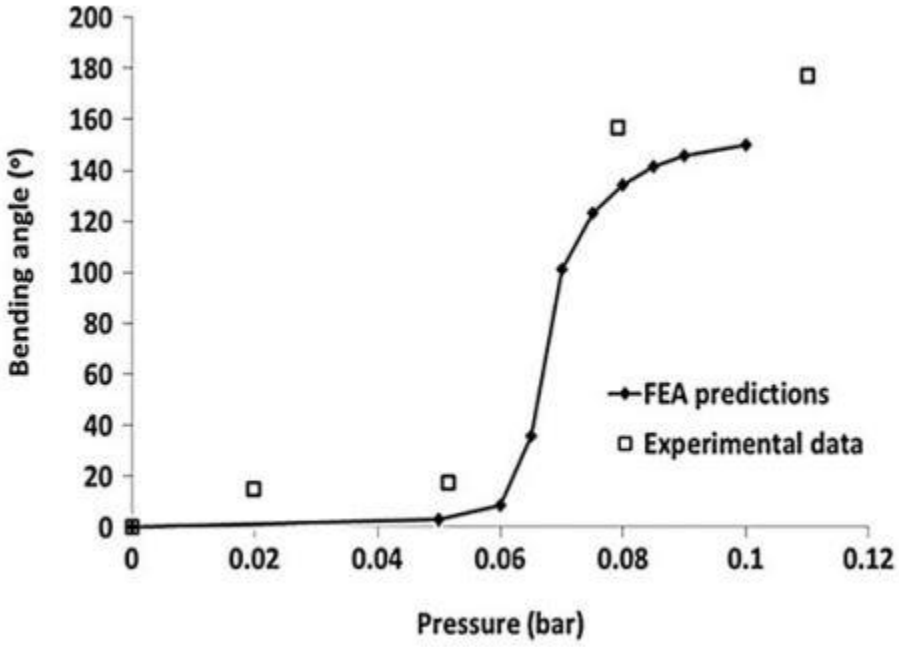


Fig. 1.10 Comparación entre los ángulos de flexión experimental y el predicho mediante FEA, módulo hecho con Ecoflex 00-30 [12].

También a partir de la comparación entre la flexión experimental y la predicha mediante FEA se nota que el comportamiento en la simulación parece tener un retraso con respecto al experimental, además de que el proceso de actuación experimental no fue a velocidad constante bajo cada presión aplicada (Fig. 1.11) [12].

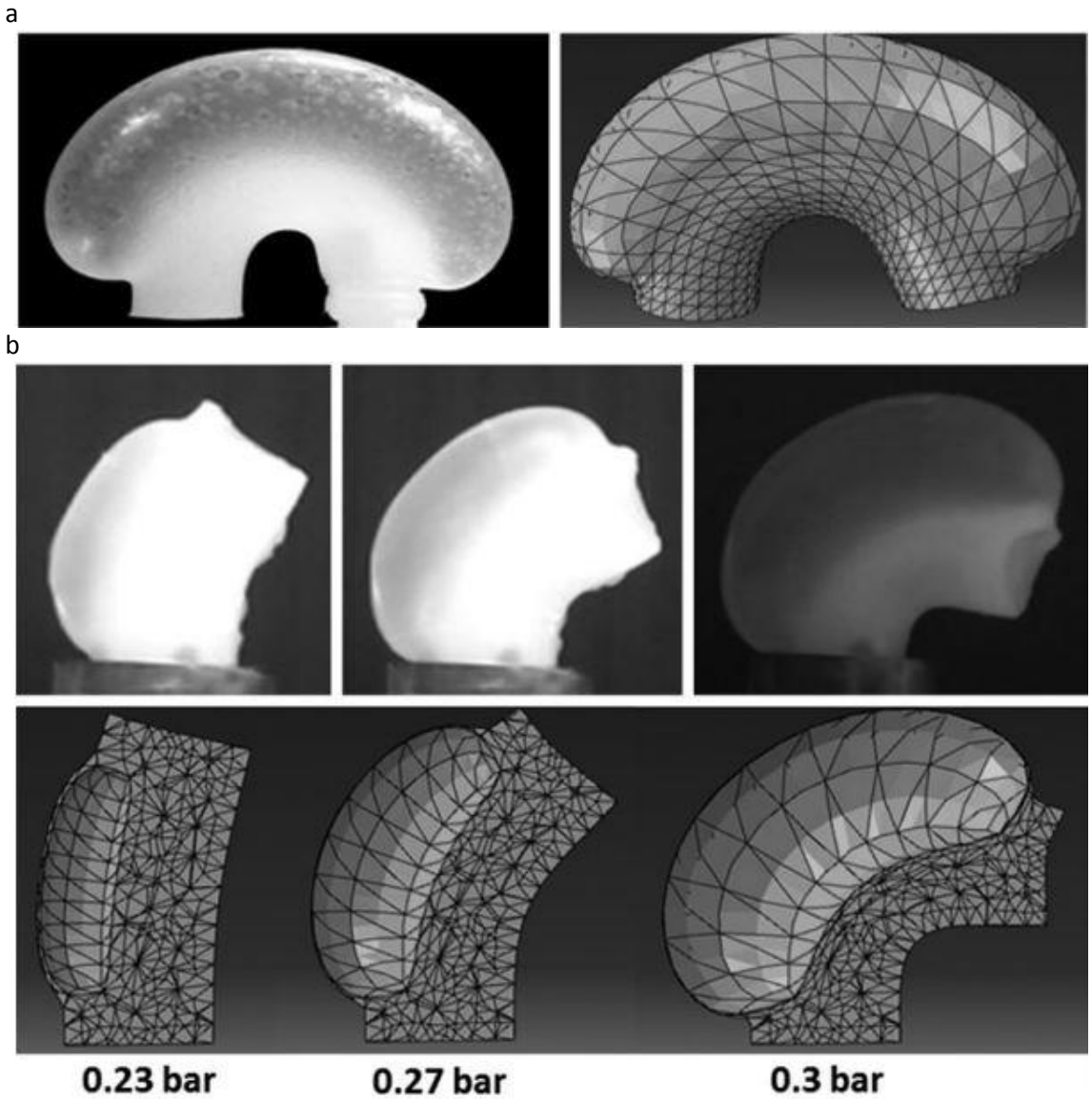


Fig. 1.11 Módulos de sección transversal circular a) presión de accionamiento 0.1 bar, hecho con Ecoflex 00-30, b) hecho con Ecoflex 00-50 [12].

Para la optimización del módulo Elsayed *et al*. (2014) realizaron estudios paramétricos en FEA, partiendo de los diseños propuestos inicialmente (Fig. 1.8); para las simulaciones se utilizaron los valores del Ecoflex 00-30. En estos estudios se comparó el efecto de la relación entre la distancia de la pared de cámara a la pared del módulo (Fig. 1.12 a), y el efecto de la relación entre la longitud de la cámara y la longitud del módulo (Fig. 1.12 b) con respecto a la presión necesaria para flexionar 90° y el área proyectada de hinchazón del módulo asociada con tres cámaras semicirculares; el

efecto de la relación entre la cámara y el módulo para el área de la sección transversal con respecto a la presión requerida para flexionar 90° (Fig. 1.12 c); y el efecto de la relación entre la cámara y el módulo para el área de la sección transversal con respecto a el área proyectada de hinchazón del módulo (Fig. 1.12 d) [12].

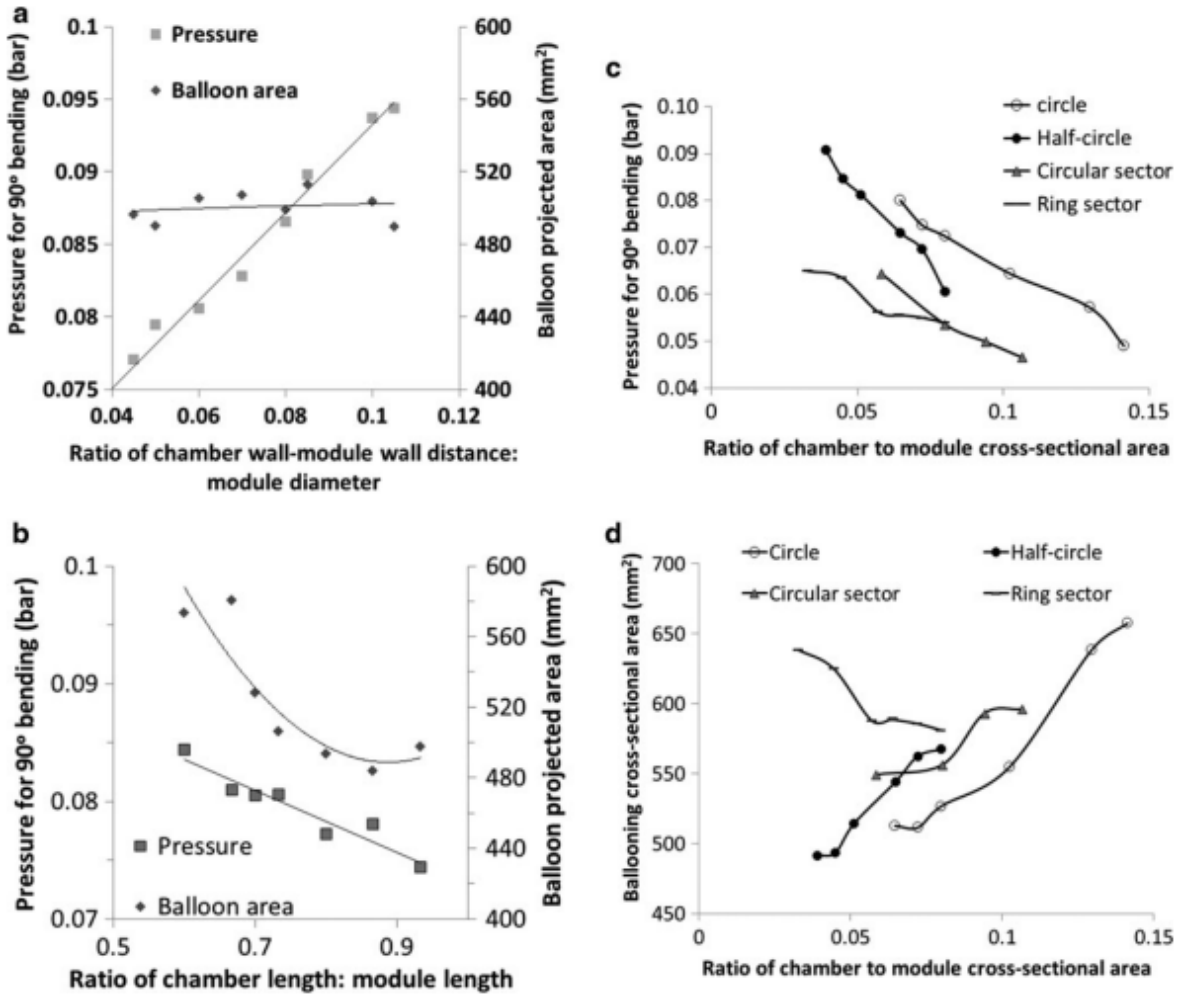


Fig. 1.12 Resultados de los estudios paramétricos en FEA [12].

Finalmente después del proceso de optimización, presentan un módulo que involucra a los tres materiales, esto con el fin de reducir el efecto de hinchazón además de mantener una buena capacidad de flexionarse. El nuevo módulo presenta una capa externa corrugada en forma de acordeón hecha de Dragon Skin 30 que envuelve un optimizado módulo de Ecoflex 00-50, mientras que una capa delgada de Ecoflex 00-30 alisa las partes corrugadas ya que esta superficie estará en contacto con los órganos internos (Fig. 1.13) [12].

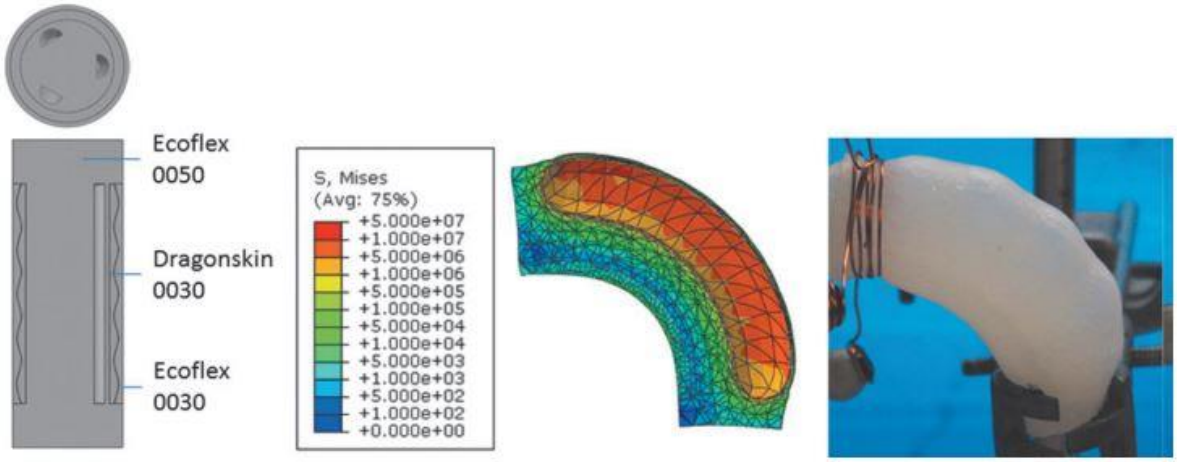


Fig. 1.13 Diseño final del módulo, análisis en FEA y estudio experimental de la actuación de una cámara bajo una presión de 0.8 bar [12].

Zhang *et al*. (2014) diseñan un actuador blando neumático hecho con Ecoflex 00-30 y PDMS que considera integralmente las características mecánicas de los materiales y la estructura geométrica, utilizando el software de cómputo Abaqus. En este trabajo buscan imitar el modo de propulsión de un pez del tipo cuerpo – aleta caudal, adoptando un patrón de oscilación para la aleta caudal, el diseño propuesto imita la forma real de un pez, y está diseñado de forma cónica con múltiples cámaras internas en paralelo (Fig. 1.14) [39].

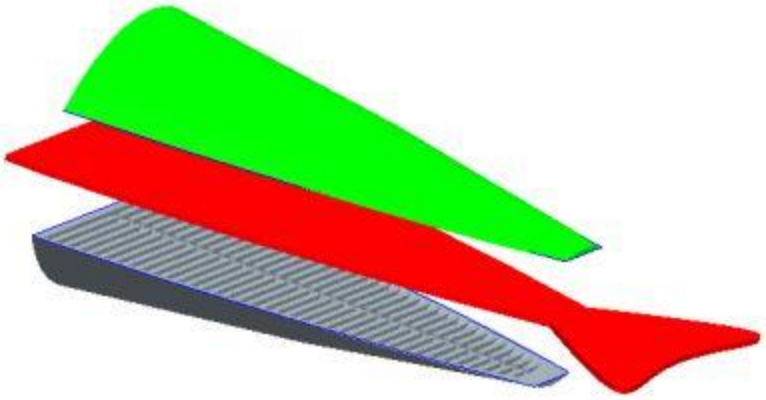


Fig. 1.14 Modelo del actuador [39].

Zhang *et al*. (2014) realizaron ensayos uniaxiales de tracción, basados en la norma GB/T528-2009, obteniendo las curvas de esfuerzo-deformación nominal Fig. 1.15, a partir de estos ensayos encontraron que el PDMS en comparación con el Ecoflex 00-30 es duro y quebradizo, por lo tanto es adecuado para ser la capa de retención (Fig. 1.14), y se utilizaron el modelo de Yeoh para el Ecoflex 00-30 y el modelo Neo Hookean para el PDMS [39].

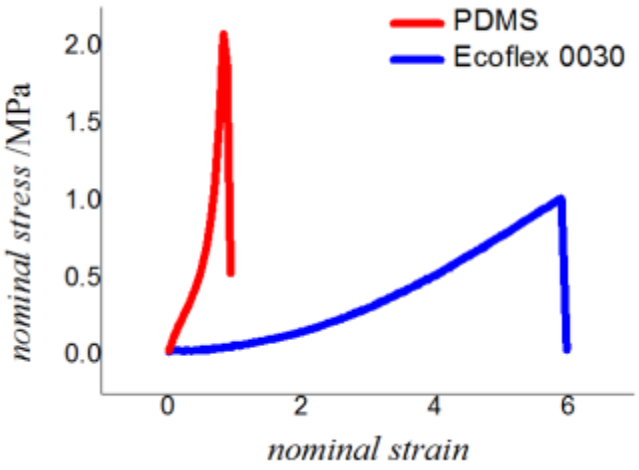


Fig. 1.15 Curvas de esfuerzo-deformación nominal del Ecoflex 00-30 y PDMS [39].

A partir de la caracterización previa de los materiales realizaron simulaciones para conocer el comportamiento del actuador, dichas simulaciones se llevaron a cabo en un ¼ del modelo debido a que la geometría es simétrica (Fig. 1.16 y Fig. 1.17) [39].

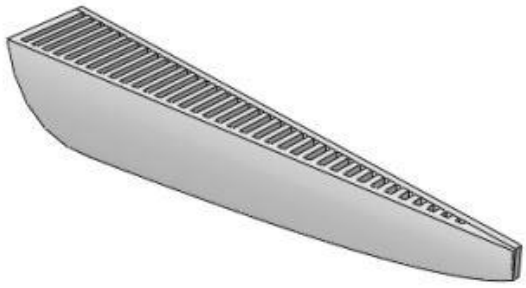


Fig. 1.16 Modelo del actuador (1/4 del modelo completo) [39].

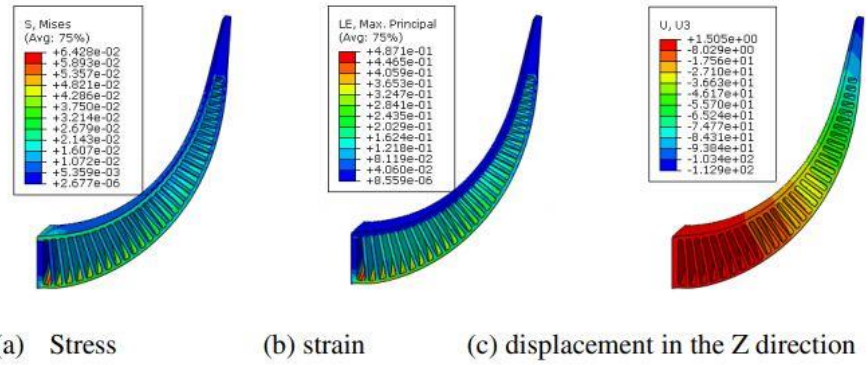


Fig. 1.17 a) esfuerzo, b) deformación y c) desplazamiento en dirección Z del actuador bajo una presión de 6 kPa [39].

Una vez realizada la primera simulación utilizando la propuesta inicial del modelo se decidió reducir la altura de las cámaras iniciales, cambiando la superficie de cono a plano (Fig. 1.18). Posteriormente

se volvió a simular el nuevo diseño, a partir del que se encontró que al modificar la altura de las cámaras, se encontró una distribución más uniforme del esfuerzo, aunque la estructura necesita mayor presión de accionamiento (8 kPa) para lograr una flexión similar a la que se presenta en la primera estructura (Fig. 1.19) [39].

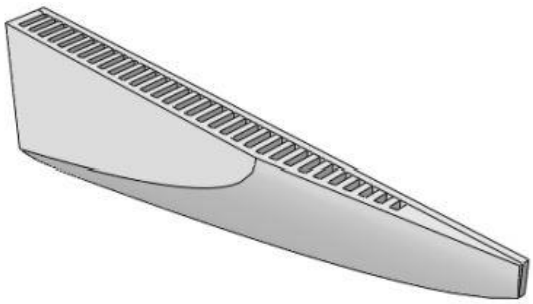


Fig. 1.18 Modelo del actuador modificado [39].

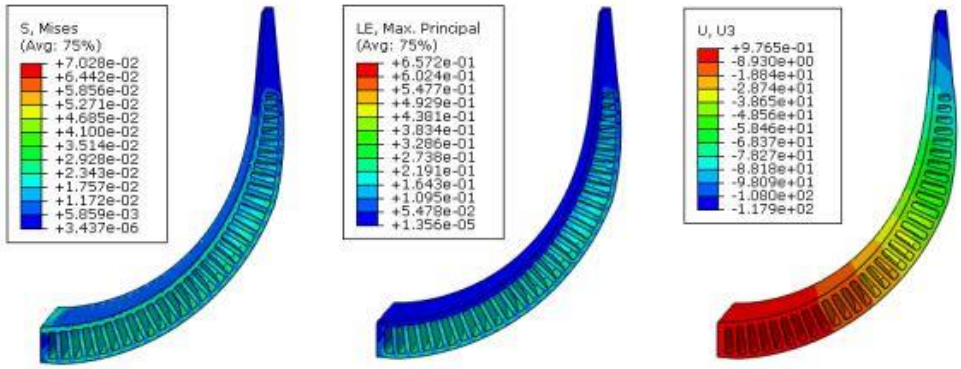


Fig. 1.19 Esfuerzo, deformación y desplazamiento en dirección Z del actuador bajo una presión de 8 kPa [39].

Debido a la mejora que presenta el modelo modificado, combinaron dos de estos modelos para formar un actuador completo y al simularlo el actuador presenta un desplazamiento reducido debido a la restricción del lado no inflado y para obtener una deformación similar aumentó la presión de accionamiento (Fig. 1.20) [39].

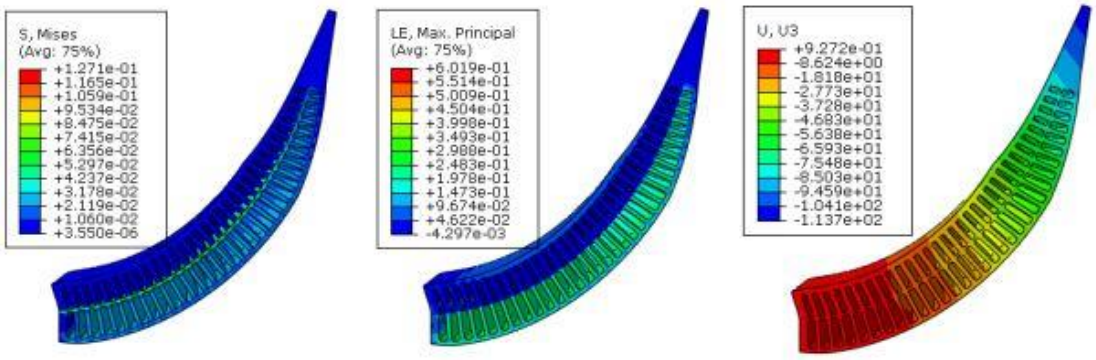


Fig. 1.20 Esfuerzo, deformación y desplazamiento en dirección Z del actuador bajo una presión de 10 kPa [39].

Con el fin de validar la simulación previa, se manufacturó el actuador, accionándolo con aire comprimido y regulando el flujo de aire con válvulas solenoides para controlar la dirección de flexión. A partir de los resultados experimentales obtenidos (Fig. 1.21), Zhang *et al*. (2014) observaron que los comportamientos experimentales (Fig. 1.21) y simulado (Fig. 1.20) son similares y atribuyen esta diferencia a que el modelo constitutivo no describe las propiedades mecánicas del material de forma precisa debido a su compleja relación entre esfuerzo y deformación [39].



Fig. 1.21 Resultados experimentales bajo una presión de 10 kPa [39].

Case *et al*. (2015) presentan una extensa evaluación cualitativa de tres de los elastómeros más utilizados en sistemas de robótica suave (Sylgard 184, Smooth-Sil 950 y Ecoflex 00-30) con el objetivo de mejorar el modelado dinámico de componentes de robots blandos. Llevaron a cabo pruebas de tracción uniaxiales (hasta falla) a diferentes velocidades, pruebas de carga cíclica y de relajación de esfuerzo [7].

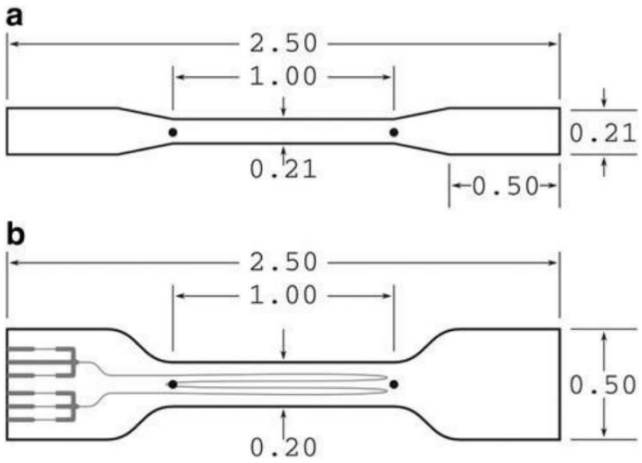


Fig. 1.22 a) Espécimen de prueba para el ensayo uniaxial a falla, b) Galgas extensiométricas de elastómero con metal líquido incrustado [7].

En este trabajo considera al material como incompresible (el coeficiente de Poisson es v=0.5) e isotrópico y proponen modelos analíticos (ecuación 3, ecuación 4) para la caracterización de la deformación del material basados en el área resultante de la sección transversal del espécimen y la contracción que se presenta durante el ensayo de tracción [7].

$$A = WT(1 - 2\delta + \delta^2) \tag{3}$$

$$\delta = 1 - \left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right)^{-\nu} \tag{4}$$

Dentro de los ensayos de tracción se realizaron tres tipos de ensayo: velocidad variable de deformación (Fig. 1.23), prueba de consistencia de lote a lote (Fig. 1.24) y ensayo con precarga (Fig. 1.25), dichos ensayos se realizaron con el espécimen homogéneo (Fig. 1.22 a); mientras que para los ensayos de carga cíclica (Fig. 1.26) y relajación de esfuerzo se utilizó el espécimen de galga extensiométrica (Fig. 1.22 b). Cada ensayo se llevó a cabo tres veces para cada material con excepción de los ensayos de carga cíclica [7].

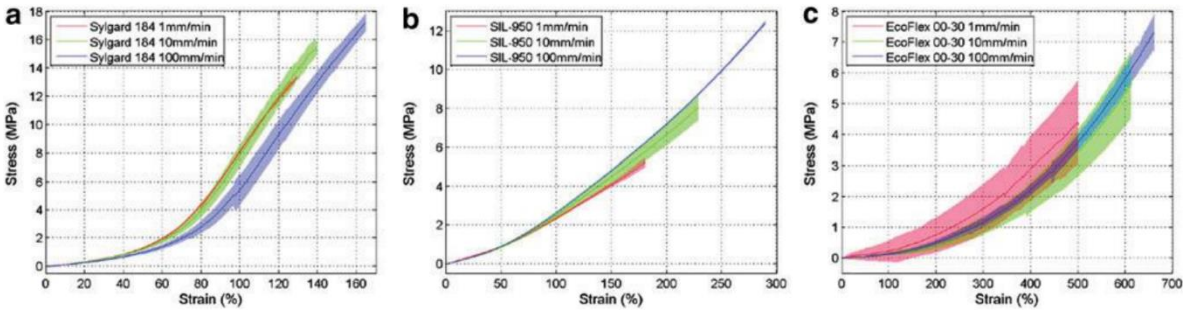


Fig. 1.23 Resultados del ensayo uniaxial hasta falla (a diferentes velocidades), a)Sylgard 184, b)Smooth-Sil-950, c) Ecoflex 00-30 (la región sombreada representa un intervalo de confianza del 95%) [7].

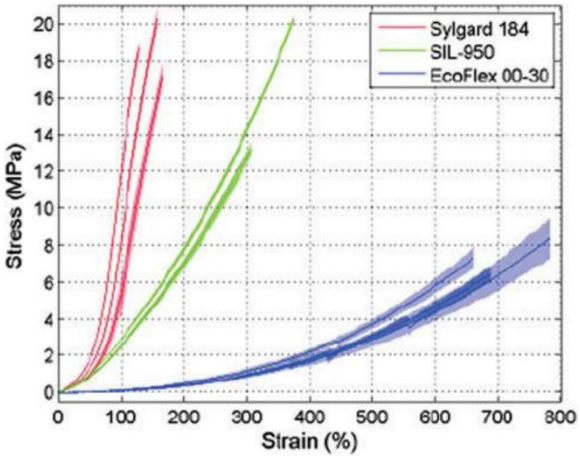


Fig. 1.24 Ensayo uniaxial de tracción (consistencia de lote a lote), ensayados a 100 mm/min [7].

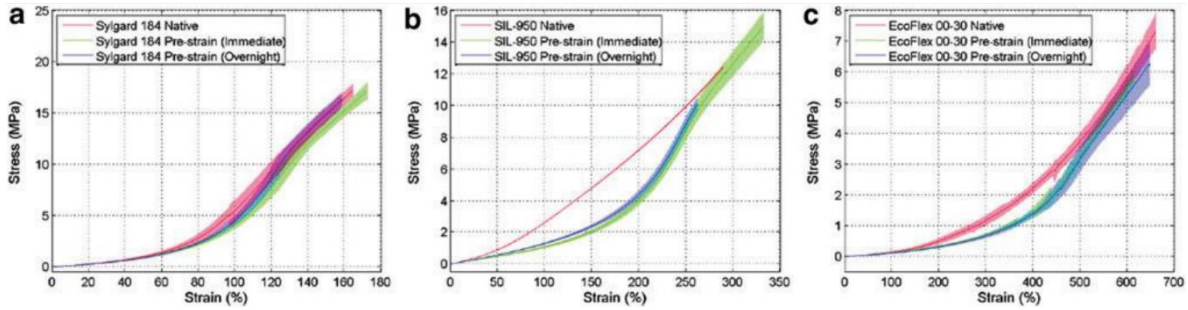


Fig. 1.25 Resultados del ensayo de uniaxial de tracción con precarga, a)Sylgard 184, b)Smooth-Sil-950, c) Ecoflex 00-30 (la región sombreada representa un intervalo de confianza del 95%) [7].

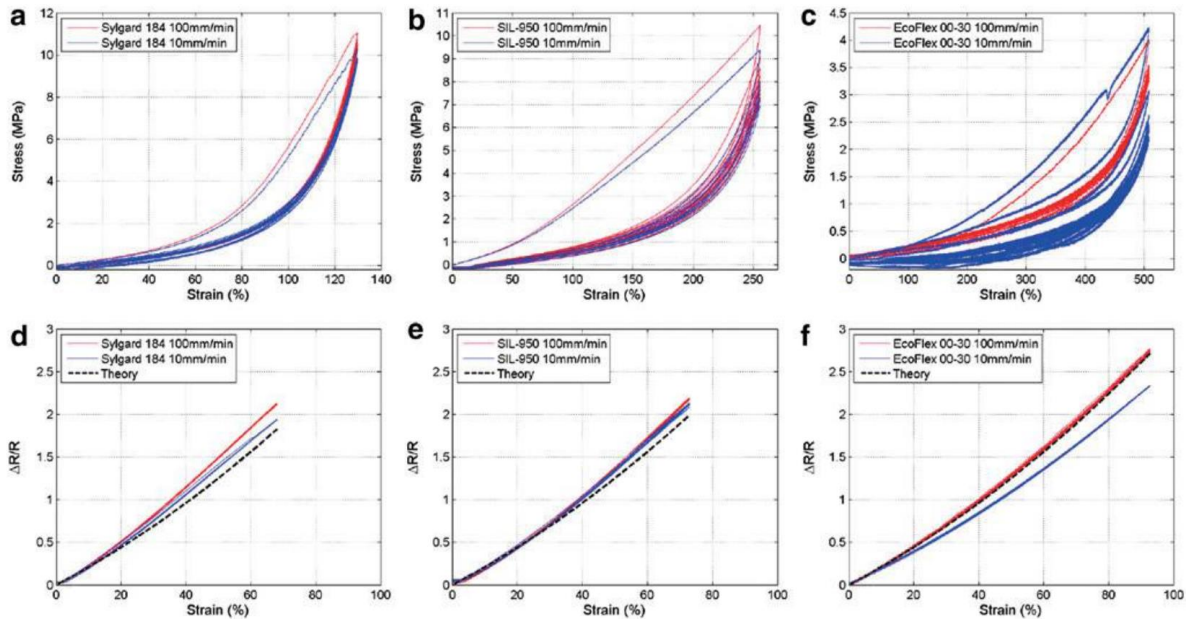


Fig. 1.26 Ensayos de carga cíclica para el espécimen homogéneo a)Sylgard 184, b)Smooth-Sil-950, c) Ecoflex 00-30 y para las galgas extensiométricas d)Sylgard 184, e)Smooth-Sil-950, f) Ecoflex 00-30 [7].

En cuanto a los ensayos de relajación de esfuerzo utilizaron los modelos viscoelásticos de relajación de Maxwell, Zener y Burgers (Fig. 1.27), realizando el ensayo a una velocidad de 1000 mm/min y sosteniendo la extensión durante 3 horas [7].

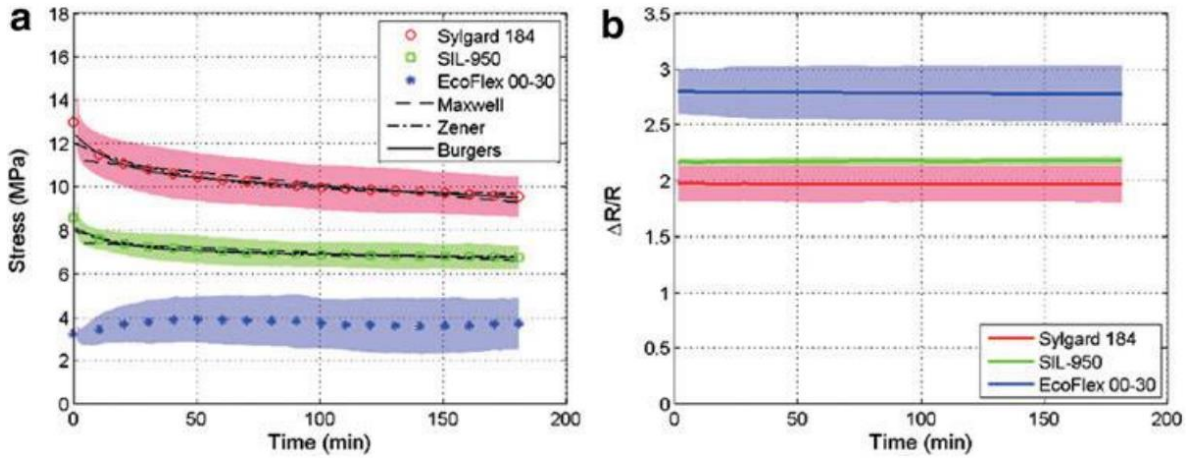


Fig. 1.27 Resultados del ensayo de relajación de esfuerzo: a) Espécimen homogéneo, las marcas de color representan los datos experimentales y las líneas negras representan los modelos teóricos, b) Datos obtenidos con las galgas extensiométricas [7].

Moseley *et al*. (2015) proporcionan una herramienta de fuente abierta que tiene como objetivo el servir como enlace entre el diseño y la simulación de actuadores blandos neumáticos y para ejemplificar su funcionamiento utilizan al Ecoflex 00-30 [27].

Para determinar sus propiedades como material hiperelástico realizan ensayos de tracción uniaxial y de tracción plana, el ensayo biaxial no fue realizado por falta de equipo especializado; sin embargo se realizó una predicción de los datos de dicho ensayo. El modelo seleccionado para caracterizar al material fue el modelo de Ogden y se utilizó el método de mínimos cuadrados para obtener los parámetros y realizar el ajuste [27].

Tabla 1.3 Constantes del modelo de Ogden por Moseley *et al* [27].

$\mu_1 = 0.024361\ [MPa]$	$\alpha_1 = 1.7138$	$D_1 = 3.2587\ \left[\frac{1}{MPa}\right]$
$\mu_2 = 6.6703 \times 10^{-5}\ [MPa]$	$\alpha_2 = 7.0679$	
$\mu_3 = 4.5381 \times 10^{-4}\ [MPa]$	$\alpha_3 = -3.3659$	$D_2 = D_3 = 0$

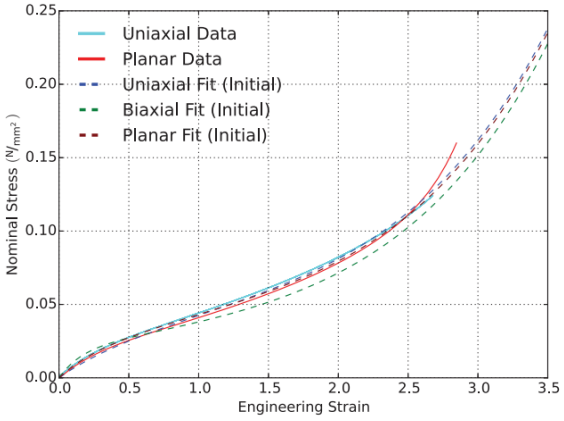


Fig. 1.28 Datos experimentales y ajustes iniciales obtenidos por Moseley *et al* [27].

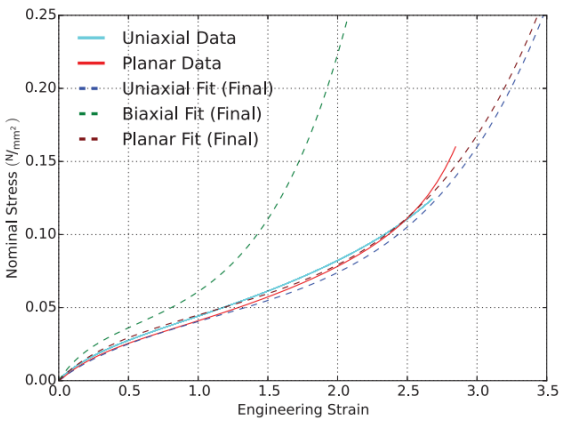


Fig. 1.29 Datos experimentales y ajustes finales obtenidos por Moseley *et al* [27].

Para la validación de la herramienta que presentan, los autores utilizan datos experimentales de actuadores lineales bajo pruebas de desplazamiento y bloqueo de fuerza, además se utilizaron diferentes medidas en los actuadores [27].

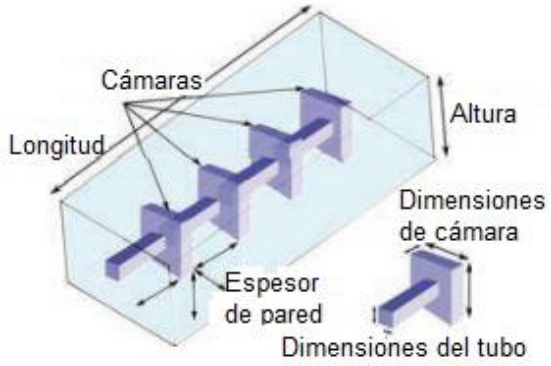


Fig. 1.30 Esquema de un actuador lineal y sus parámetros geométricos relevantes para su diseño [27].

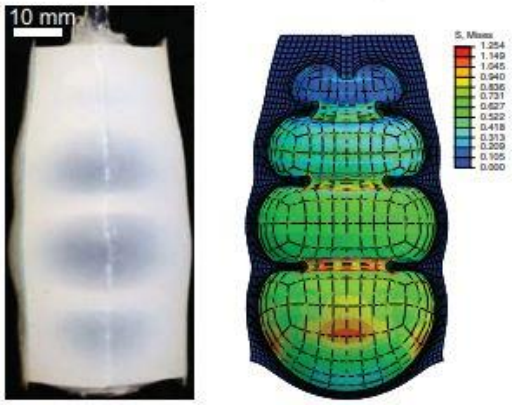


Fig. 1.31 Actuador blando neumático bajo una carga de 35 kPa y su simulación [27].

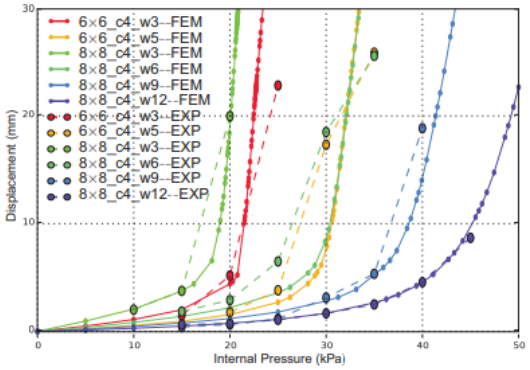


Fig. 1.32 Comparación de resultados obtenidos experimentalmente y mediante la simulación (prueba de desplazamiento) [27].

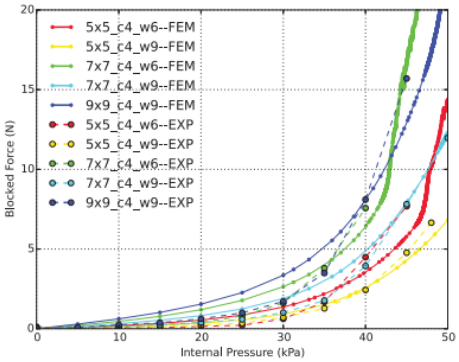
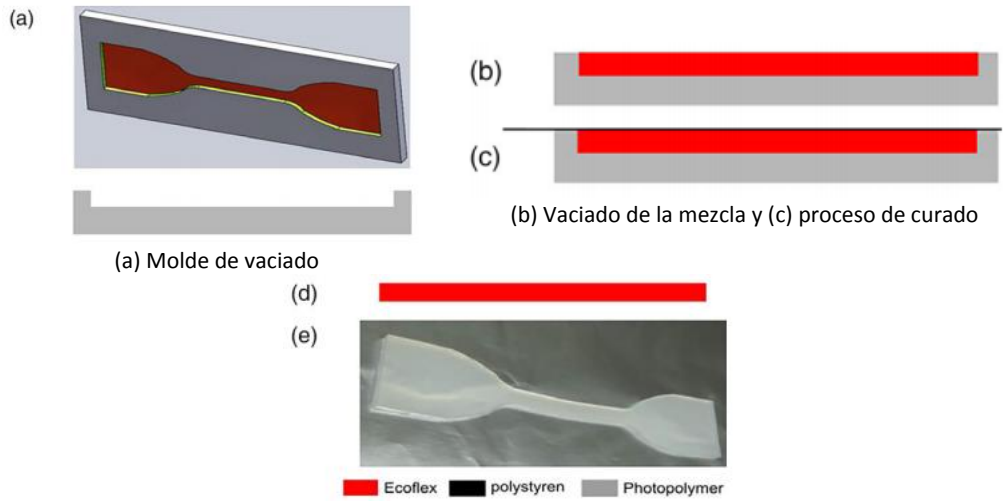


Fig. 1.33 Comparación de resultados obtenidos experimentalmente y mediante la simulación (prueba de bloqueo de fuerza) [27].

Uno de los dos trabajos más recientes acerca de la caracterización del comportamiento mecánico del Ecoflex 00-30 lo realizaron Steck *et al*. (2019) con el fin de otorgar mayor precisión en las aplicaciones de robótica blanda, en este trabajo llevan a cabo ensayos de tracción, en los que se mide la elongación y contracciones laterales de los especímenes ensayados. El material es considerado como isotrópico y, además, se analiza su comportamiento bajo las consideraciones de compresible e incompresible [35].

Los especímenes fueron producidos con ayuda de un molde fabricado con manufactura aditiva, en el que se vació la mezcla del material y posteriormente la mezcla fue desgasificado durante 20 minutos, para posteriormente colocar una película de poliestireno para suavizar la superficie y al terminar el proceso de curado obtener una muestra de espesor uniforme. Se produjeron dos lotes de especímenes con diferentes espesores, uno de especímenes con espesor igual a 2 mm y el otro con espesor igual a 3 mm [35].



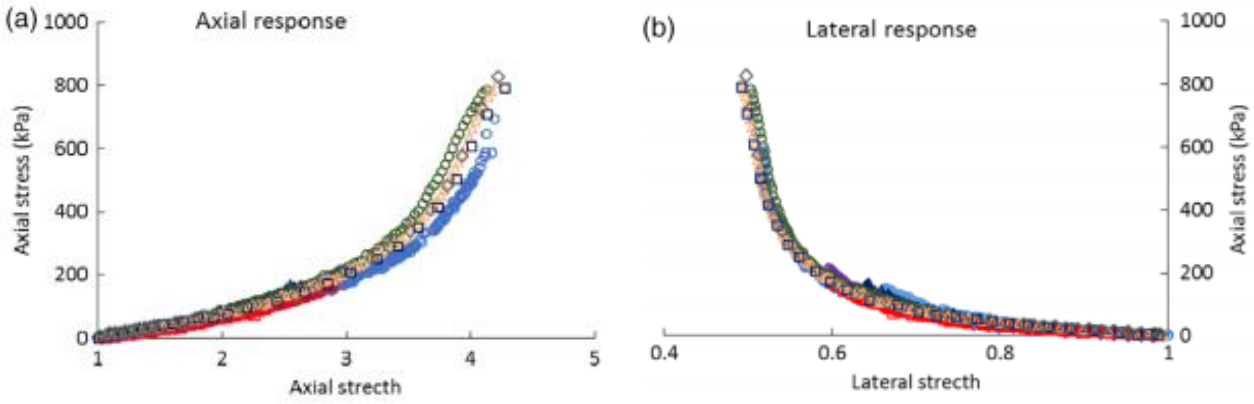
(a) Molde de vaciado

(b) Vaciado de la mezcla y (c) proceso de curado

(d) Extracción del espécimen e (e) imagen real del espécimen obtenido

Fig. 1.34 Proceso de producción de especímenes reportado por Steck *et al* [35].

Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina electromecánica de ensayos universales Instron modelo 5500 equipada con una celda de carga de 10 [N], mientras que para la medida de deformaciones axial y transversal se midieron utilizando un sistema de correlación de imagen digital Mercury RT con dos cámaras Prosilica GT6600 de 29 megapíxeles. Los especímenes ensayados se basaron en la norma ISO 527-3. Nueve especímenes fueron ensayados a una tasa constante de elongación de 1.2/min, durante varios ciclos de carga y descarga. Bajo estas condiciones los especímenes presentaron recuperación completa después de la descarga. Además de que encontraron buena reproducibilidad en los resultados y el cambio de volumen se calculó con el determinante del gradiente de deformación $\det \boldsymbol{F}$ durante los ensayos, donde se demuestra que al incrementar la elongación también incrementa la compresibilidad del material [35].



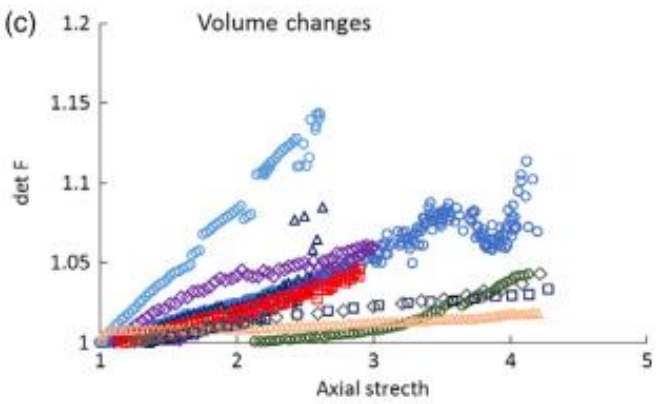


Fig. 1.35 Resultados experimentales a una taza de elongación de 1.2/min [35].

En este trabajo comparan las respuestas generadas por modelos hiperelásticos clásicos así como un modelo constitutivo reciente (desarrollado por Muliana *et al*.) que expresa el tensor de deformación de Cauchy-Green por la izquierda ($\boldsymbol{B}$), en términos del esfuerzo de Cauchy ($\boldsymbol{T}$) [35].

Tabla 1.4 Modelos constitutivos reportados por Steck *et al* [35].

Modelo constitutivo	Ecuación constitutiva	
Muliana *et al.*	$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{g}_a(\boldsymbol{T}) = \boldsymbol{I} - \kappa\left(1 - e^{-\alpha\sqrt{I_2}}\right)\boldsymbol{I} + \dfrac{\mu\left(1 - e^{-\delta\sqrt{I_2}}\right)}{\sqrt{I_2}}\boldsymbol{T}$	(5)
Ogden	$W_O = \sum_{i1}^{N} \dfrac{\mu_i}{\alpha_i}[\Lambda_1^{\alpha_i} + \Lambda_2^{\alpha_i} + \Lambda_3^{\alpha_i} - 3\,] + W_{vol}$ (6) $\quad W_{vol} = \lambda\left(\dfrac{1}{2}J^2 - J + \dfrac{1}{2}\right) - \sum_{i=1}^{N} \mu_i \ln J$	(7)
Gent	$W_{GT} = -\dfrac{\mu}{2} J_m \ln\left(1 - \dfrac{J_1 - 3}{J_m}\right) + W_{vol}$ (8) $\quad W_{vol} = c_1 \ln J + c_2(\ln J)^2 + c_3(J^2 - 1)$	(9)
Yeoh	$W = \sum_{i=1}^{3} C_i(\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{k=1}^{3} D_i(J - 3)^{2k}$	(10)
Mooney-Rivlin	$W = C_1(\bar{I}_1 - 3) + C_2(\bar{I}_2 - 3) + D(J - 1)^2$	(11)

Tabla 1.5 Parámetros para el Ecoflex 00-30 como un material incompresible [35].

Muliana *et al.*	Ogden (N=3)	Gent	Yeoh	Mooney-Rivlin
$\boldsymbol{\mu = 18}$	$\mu_1 = 22\ [kPa]$	$J_m = 27$	$C_1 = 17\ [kPa]$	$C_1 = 48\ [kPa]$
$\boldsymbol{\delta = 0.004\ \left[\dfrac{1}{kPa}\right]}$	$\alpha_1 = 1.3$	$\mu = 17000\ [kPa]$	$C_2 = -0.2\ [kPa]$	$C_2 = -152[kPa]$
	$\mu_2 = 0.4\ [kPa]$		$C_3 = 0.023\ [kPa]$	
	$\alpha_2 = 5$			
	$\mu_3 = -2\ [kPa]$			
	$\alpha_3 = -2$			

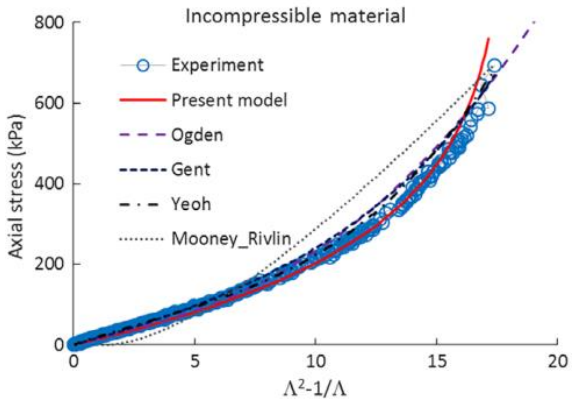


Fig. 1.36 Respuesta uniaxial del Ecoflex 00-30 como material incompresible [35].

Tabla 1.6 Parámetros para el Ecoflex 00-30 como un material compresible [*sic*] [35].

Muliana *et al.*	Ogden (N=3)	Gent	Yeoh	Mooney-Rivlin
$\boldsymbol{\kappa = 0.715}$	$\mu_1 = 22\ [kPa]$	$J_m = 27$	$C_1 = 17\ [kPa]$	$C_1 = 48\ [kPa]$
$\boldsymbol{\alpha = 0.016\ \left[\frac{1}{kPa}\right]}$	$\alpha_1 = 1.3$	$\mu = 17000\ [kPa]$	$C_2 = -0.2\ [kPa]$	$C_2 = -152[kPa]$
$\boldsymbol{\mu = 20}$	$\mu_2 = 0.4\ [kPa]$	$C_1 = 50$	$C_3 = 0.023\ [kPa]$	$D = 3$
$\boldsymbol{\delta = 0.003\ \left[\frac{1}{kPa}\right]}$	$\alpha_2 = 5$	$C_2 = 20]$	$D_1 = 15$	
	$\mu_3 = -2\ [kPa]$	$C_3 = -25$	$D_2 = 20]$	
	$\alpha_3 = -2$		$D_3 = 10$	
	$\lambda = 375$			

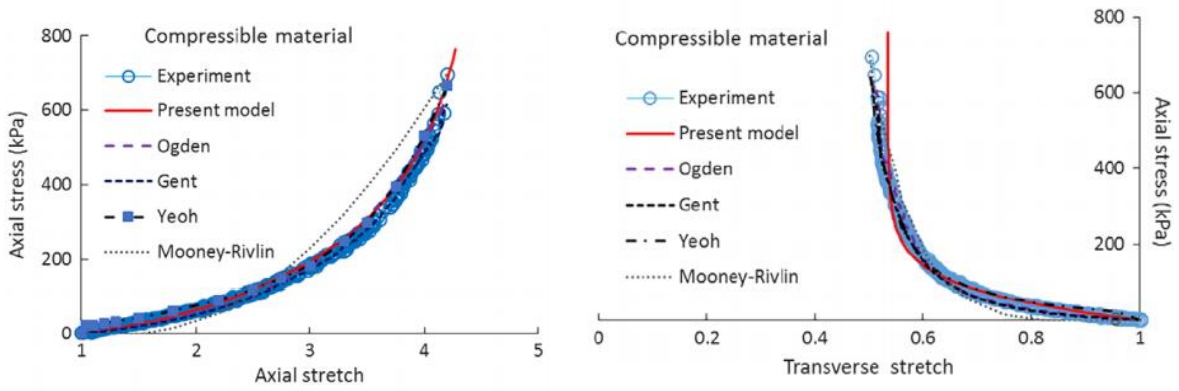


Fig. 1.37 Respuesta axial y transversal del Ecoflex como material compresible [35].

Y con el fin de analizar la respuesta multiaxial del Ecoflex 00-30 tanto como material compresible como incompresible presentan un problema de condición de frontera, en el que analizan una esfera de pared delgada para la que se utiliza el modelo de Ogden descrito en el programa de cómputo ABAQUS, obteniendo los parámetros del material y realizando su posterior análisis en elemento finito, comparando las respuestas de esfuerzo para la pared entre los comportamientos (compresible e incompresible) [35].

$$W_O = \sum_{i=1}^{N} \frac{\mu_i}{\alpha_i}\left[\overline{\Lambda}_1^{\alpha_i} + \overline{\Lambda}_2^{\alpha_i} + \overline{\Lambda}_3^{\alpha_i} - 3\right] + \sum_{j=1}^{M}\left[\frac{1}{D_i}(J-1)^{2j}\right] \quad (12)$$

Tabla 1.7 Parámetros del Ecoflex utilizados en la simulación de elemento finito [35].

i	$\mu_i\ [kPa]$	α_i	D_i
1	16.9	1.3	1.156
2	0.08	5.0	0.0001
3	1.0	-2.0	-

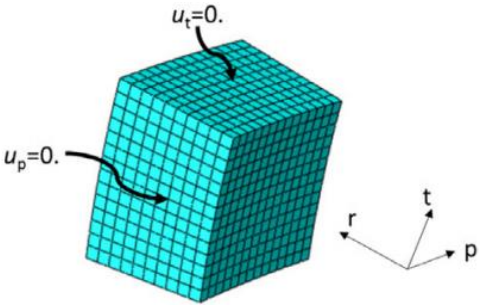


Fig. 1.38 Porción modelada de la esfera a analizar mediante elementos finitos [35].

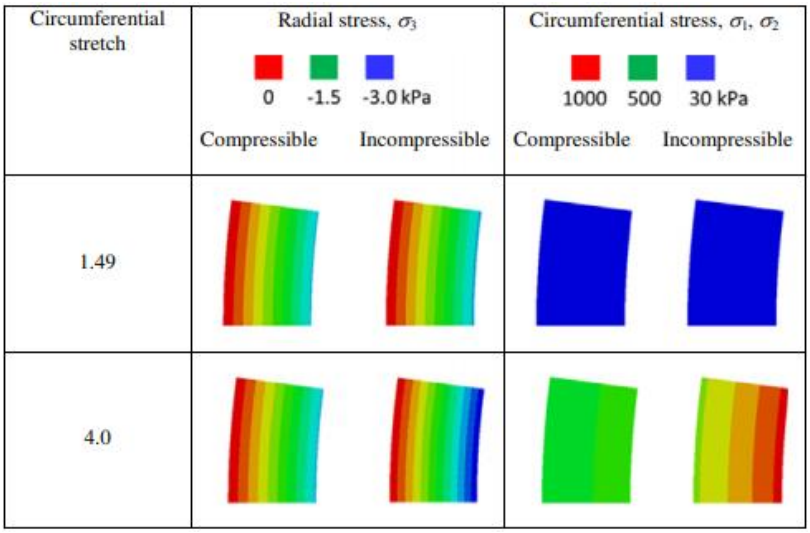


Fig. 1.39 Contornos de esfuerzos para la esfera [35].

Poco tiempo después Lee y Pharr (2019), investigan la fractura del Ecoflex 00-30, ya que las observaciones experimentales sugieren que la fractura en elastómeros es fundamentalmente diferente respecto a otros materiales, lo que hace necesario realizar más estudios destinados a proporcionar una comprensión básica de su fractura, además de que las características de fractura y las propiedades básicas de este material no han sido estudiadas sistemáticamente.

Durante los ensayos de fractura que realizaron encontraron un fenómeno intrigante, en el que se observó que bajo ciertas condiciones la fisura se desvía de la trayectoria inicial y se propaga perpendicularmente a ésta. Además se observó que el crecimiento lateral de las fisuras es completamente estable, no presenta ninguna bifurcación ni regresa a la dirección de falla inicial asimismo la longitud de la fisura aumenta lentamente al aumentar la carga y dicho crecimiento se detiene si se detiene también la carga [20].

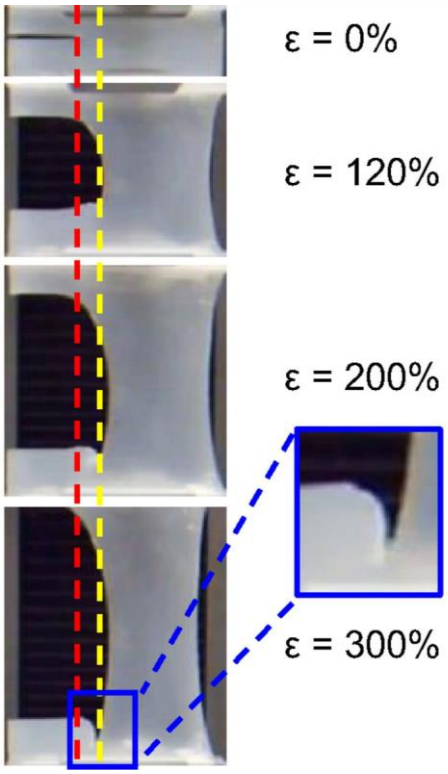


Fig. 1.40 Fotos de la propagación de fisura en el Ecoflex, la línea roja muestra la posición inicial del precorte, y la línea amarilla muestra la posición de propagación lateral estable [20].

Estos resultados tienen ramificaciones importantes desde el punto de vista práctico, ya que al detenerse de manera estable las fisuras laterales, la región no fisurada frente a la grieta puede continuar sosteniendo la carga, lo que permite elongaciones significativamente grandes. A pesar de la temprana propagación de la fisura en una muestra precortada (alrededor de λ=1.7), la muestra continua soportando cargas. Además, la región no fisurada por delante de la punta de la grieta se recupera completamente después de un ciclo de carga/descarga, lo que significa que la deformación continúa siendo elástica [20].

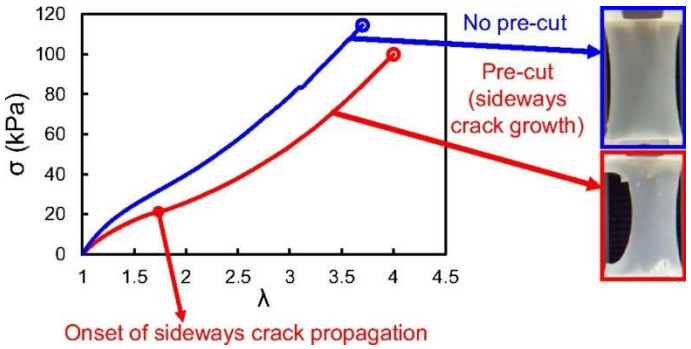


Fig. 1.41 Curvas de esfuerzo-deformación y su correspondiente morfología de fractura [20].

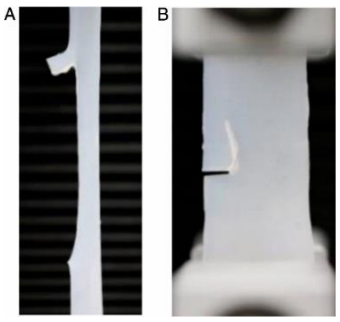


Fig. 1.42 A) Propagación de la fisura de un espécimen precortado. B) Fisura después de la descarga [20].

Con el fin de analizar el origen del agrietamiento lateral desde un punto de vista mecánico, emplearon simulaciones tridimensionales de elementos finitos para la fractura, utilizando el programa de cómputo ABAQUS, donde el elastómero con un precorte era sometido a un nivel fijo de estiramiento, a partir del que se calculó la energía elástica almacenada (U). Para este caso, se implementó el modelo constitutivo de Mooney-Rivlin, además de también realizar las simulaciones por separado con un modelo constitutivo elástico lineal, encontrando resultados similares para ambos casos [20].

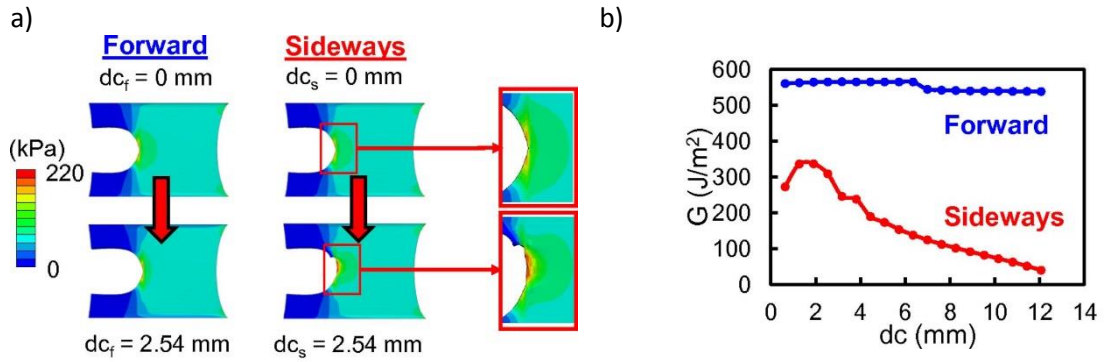


Fig. 1.43 a) Simulaciones de elementos finitos que comparan las tasas de liberación de energía para las fisuras hacia adelante y de forma lateral b) Tasa de liberación de energía, G, como función de la longitud de la grieta recién creada, dc [20].

Shi *et al*. (2019) presentan un proceso de bajo costo para la fabricación de un sensor blando capacitivo, elástico y sensible a presiones positivas y negativas. Este sensor está compuesto de una capa dieléctrica suave de Ecoflex 00-30 intercalada con electrodos de PEDOT:PSS serigrafiados y encapsulados por PDMS. Además la capa de Ecoflex 00-30 cuenta con entrehierros que están uniformemente distribuidos y dan forma a las estructuras de diafragma que mejoran en gran medida la deformación de la capa dieléctrica bajo una presión externa (Fig. 1.44) [30].

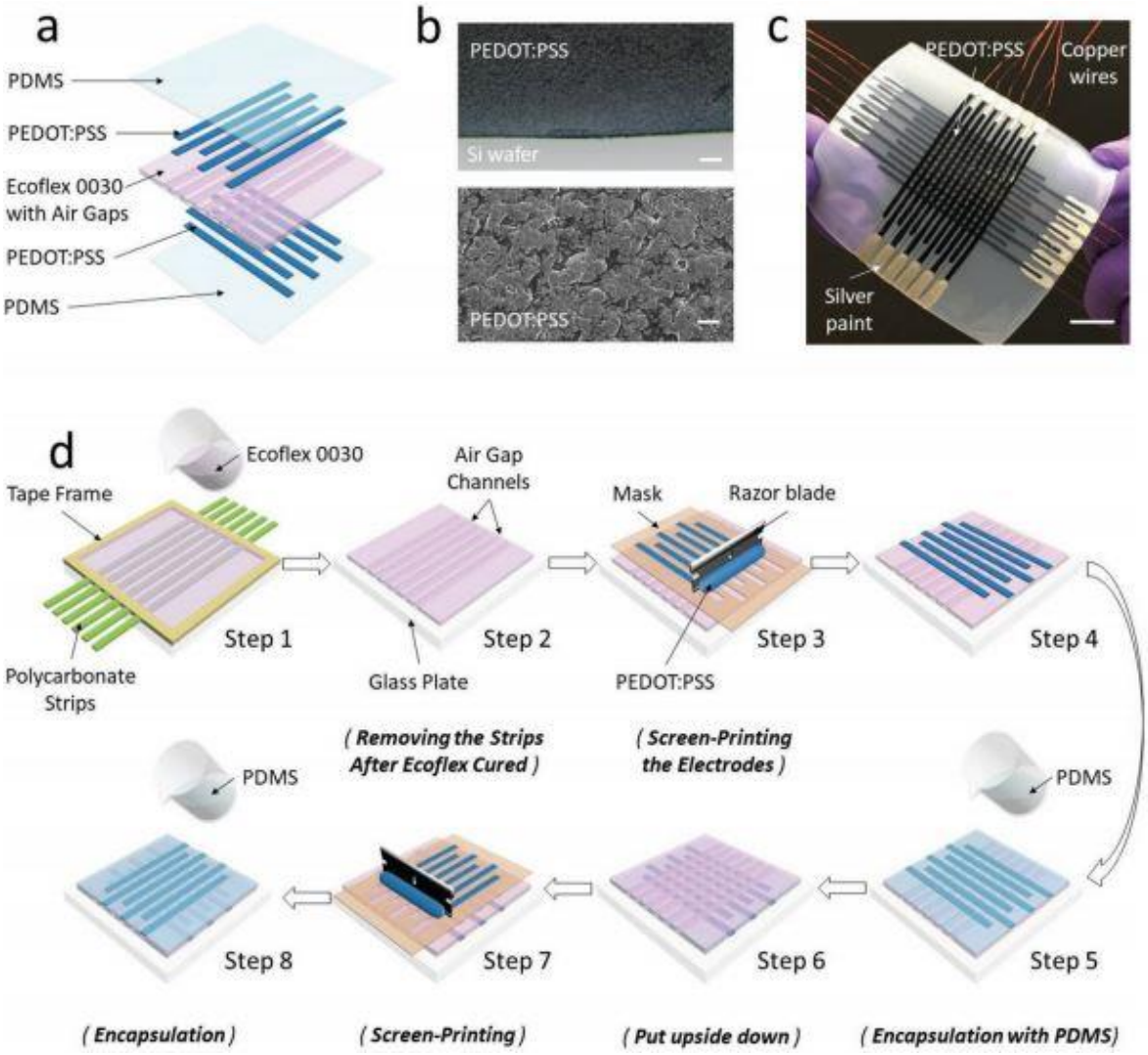


Fig. 1.44 a) Esquema del sensor con entrehierros y electrodos de PEDOT:PSS, b) micrografía óptica (imagen superior) e imagen SEM (imagen inferior) de la película de PEDOT:PSS serigrafiada de grosor $\approx \boldsymbol{200\ \mu m}$, c) fotografía de un sensor de presión de 12x12, d) esquema del proceso de fabricación del sensor [30].

Al probar los sensores, Shi *et al*. (2019) encontraron que la geometría del entrehierro tiene una influencia significativa en la sensibilidad de respuesta del sensor, lo que hace importante estudiar las propiedades mecánicas del Ecoflex 00-30, la silicona PDMS y los polímeros conductores PEDOT:PSS para comprender la deformación inducida por la presión del sensor y la respuesta capacitiva bajo presiones externas [30].

En este trabajo presentan la caracterización de tres elastómeros (Ecoflex 00-30, PDMS y Dragon Skin 30) que son materiales de interés para el trabajo desarrollado; para su caracterización 5 especímenes de cada material fueron ensayados siguiendo la norma ASTM D412-15a, a una velocidad de 500 mm/min (Fig. 1.45), y la curva promedio de esfuerzo-deformación fue utilizada en el análisis por elementos finitos para ajustar los datos y obtener el mejor modelo hiperelástico

(Tabla 1.9); por otro lado, para el polímero conductor PEDOT:PSS Shi *et al*. (2019) utilizan un módulo de elasticidad previamente reportado[l] (Tabla 1.9) [30].

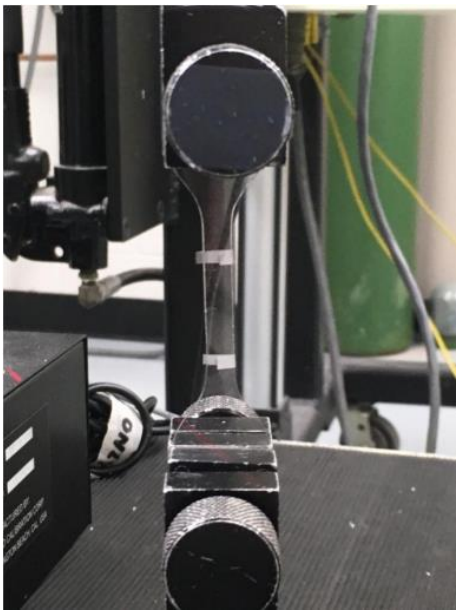


Fig. 1.45 Espécimen de PDMS (espesor de 1.5 mm), preparado para el ensayo de tracción uniaxial [30].

Tabla 1.8 Modelos constitutivos para los materiales ensayados reportados por Shi *et al*. [30].

Ecoflex 00-30 (Modelo de Mooney-Rivlin)	PDMS (Modelo de Yeoh)	Dragon Skin 30 (Modelo de Ogden)	PEDOT:PSS (Módulo de Young)
$\boldsymbol{C_{10} = 1620.24\ [Pa]}$	$C_{10} = 117\,432.54\ [Pa]$	$\mu_1 = 0.158\ [MPa]$	$E = 55\ [MPa]$
$\boldsymbol{C_{01} = 20\,108.26\ [Pa]}$	$C_{20} = 6808.47\ [Pa]$	$\alpha_1 = 2.717$	
$\boldsymbol{C_{11} = 698.74\ [Pa]}$	$C_{30} = 369.59\ [Pa]$		

El análisis por elementos finitos se llevó a cabo en ANSYS Workbench y se analizaron dos tipos de sensores, un sensor sin entrehierro y otro con entrehierro bajo una presión de +20 y -30 kPa. La presión positiva se aplicó sobre una placa de vidrio que se colocó sobre el centro del sensor, mientras que para la presión negativa se utilizó una ventosa (cuyo material asignado fue Dragon Skin 30), por lo que la presión aplicada fue en la región debajo de la ventosa (Fig. 1.46). A partir de los resultados obtenidos de la simulación de 5 tipos de arreglo de sensor, concluyen que para mejorar la sensibilidad de medición tanto para presiones positivas como negativas es necesario contar con el entrehierro más grande [30].

[l] Wang, Y. *et al*. *apud* Shi *et al*. Screen-Printed Soft Capcativie Sensors for Spatial Mapping of Both Positive and Negative Pressures. p. 1809116 (7 de 10).

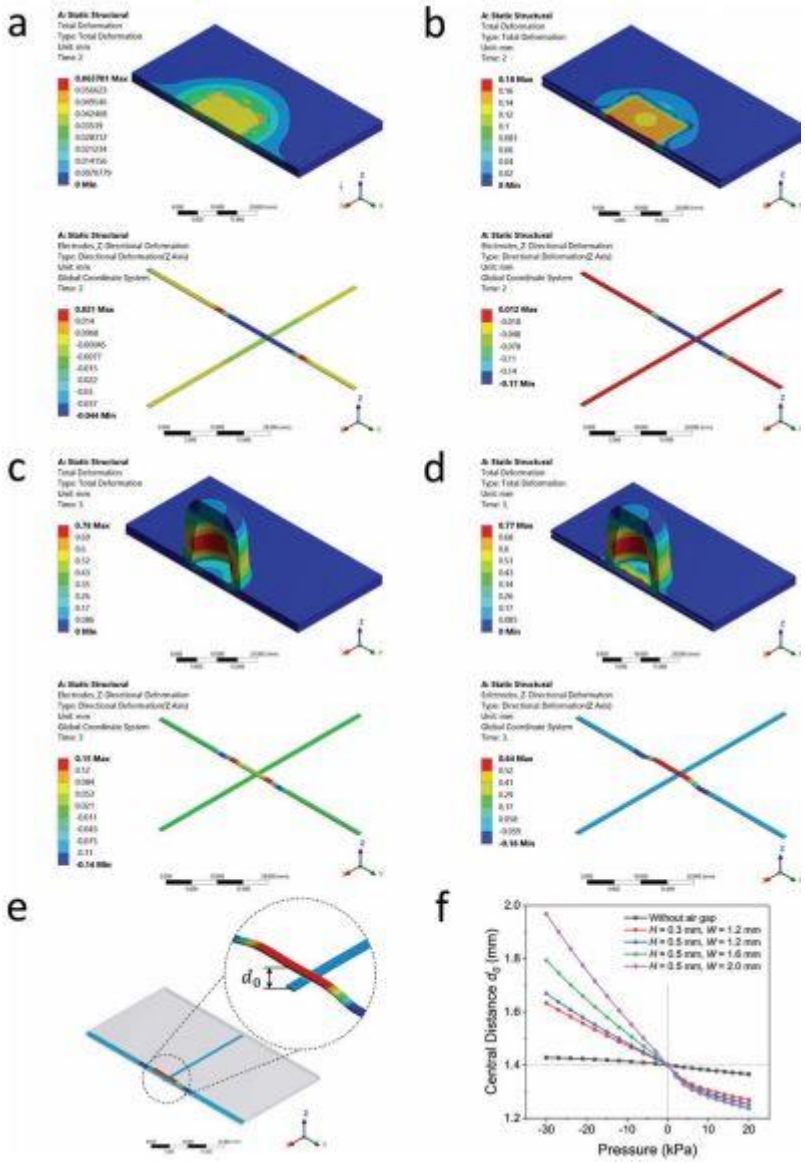


Fig. 1.46 Análisis por elementos finitos del sensor con y sin entrehierro en la capa dieléctrica de Ecoflex 00-30, a) Sensor sin entrehierro bajo una presión positiva de 20 kPa, b) sensor con entrehierro bajo una presión positiva de 20 kPa, c) Sensor sin entrehierro bajo una presión de -30 kPa aplicada con una ventosa, d) Sensor con entrehierro bajo una presión de -30 kPa aplicada con una ventosa, e) Deformación direccional en Z de los electrodos de la superficie superior e inferior, bajo una presión de -30 kPa, $\boldsymbol{d_0}$ indica la distancia entre los electrodos, f) cambio de distancia entre los electrodos superior e inferior bajo diferentes presiones para diferentes configuraciones de sensor [30].

Una vez definido el arreglo del sensor procedieron a mapear la distribución de presiones sobre el sensor, para lo que se manufacturaron diferentes bloques con manufactura aditiva, con el fin de medir presión positiva; para la medición de presión negativa se utilizó una ventosa (Fig. 1.47)[30].

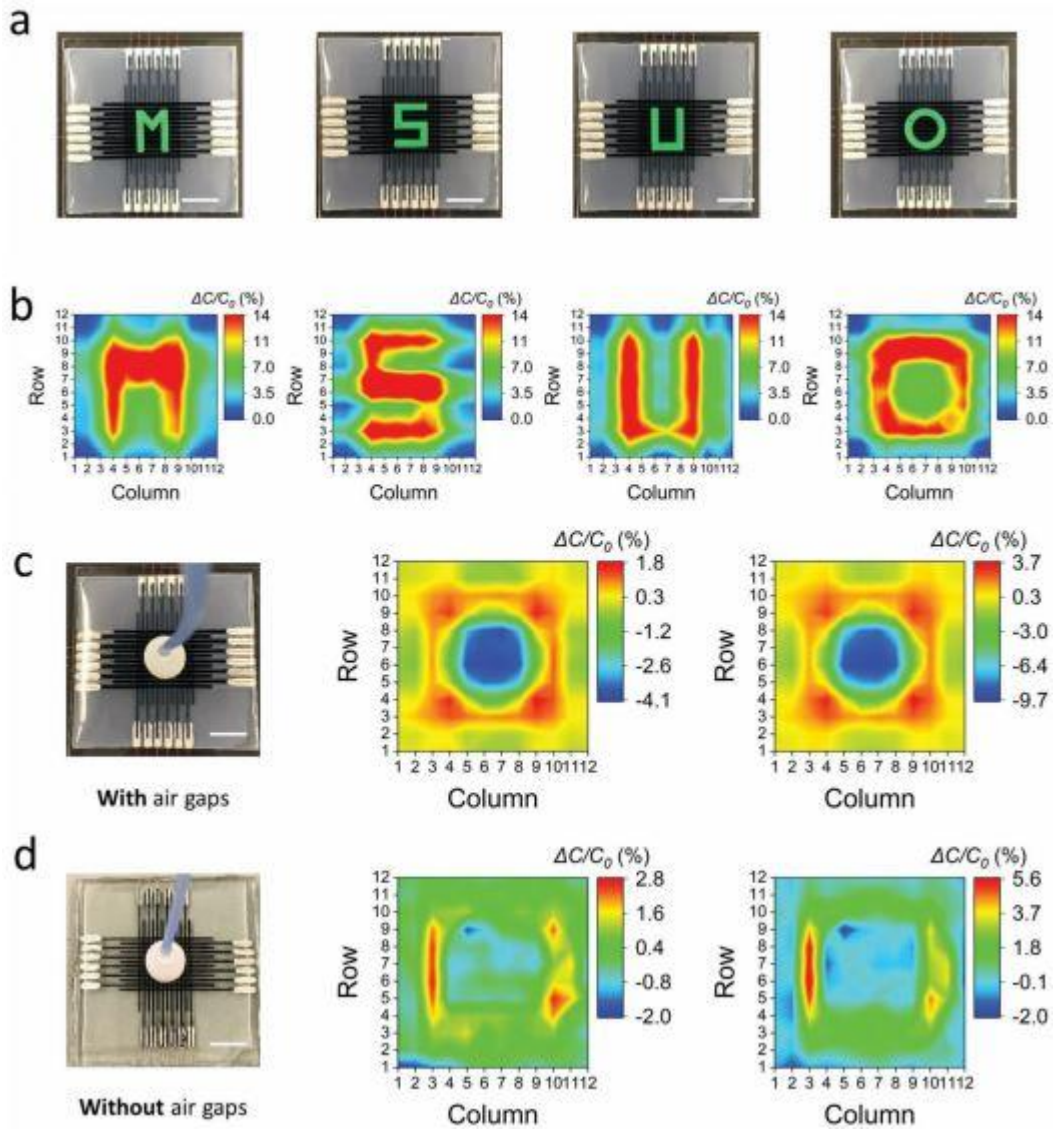


Fig. 1.47 a) y b) Mapeo de presiones con objetos diferentes, c) sensor con entrehierro bajo una presión de -10 kPa (izquierda) y -20 kPa (derecha), d) sensor sin entrehierro bajo una presión de -10 kPa (izquierda) y -20 kPa (derecha) [30].

2. Planteamiento del problema

El Ecoflex 00-30 es uno de los principales elastómeros utilizados en el campo de actuadores blandos y robótica suave [8, 12, 15, 22, 26, 30, 41], por lo que la importancia de su caracterización recae en que a partir de su modelo constitutivo será posible predecir su desempeño. Esta caracterización ayudará a tener simulaciones más precisas a partir de las que será posible mejorar el diseño de los actuadores blandos o sistemas de robótica suave.

De los actuadores blandos que simulan la peristalsis esofágica humana anteriormente revisados es posible observar que ambos tienen en común la selección del material base del actuador, el Ecoflex 00-30, ya que permite grandes deformaciones y puede regresar a su forma original; sin embargo ninguno reporta la caracterización de su comportamiento no lineal, es decir, tanto en el trabajo presentado por Chen *et al* (2014) [8] como en el trabajo de Hernández (2015) [15] se reporta un módulo de elasticidad para el material, considerando de esta manera un comportamiento elástico lineal, lo que conduce a un error ya que como lo menciona Hernández (2015) en su trabajo [15], al momento de validar mediante tomografía computarizada se observa que los comportamientos descritos por la simulación difieren del comportamiento experimental.

En cuanto a los artículos cuyo objetivo es caracterizar el material, los trabajos reportados por Elsayed *et al*. (2014) [12] y Case *et al*. (2015) [7], no siguen ninguna norma estandarizada para realizar la caracterización, por lo que los valores del material no son constantes de un reporte a otro. Por otro lado Lee y Pharr (2019) [20] implementan el modelo de Mooney-Rivlin para simular el comportamiento del Ecoflex 00-30 pero respecto a fractura, no obstante al igual que Moseley *et al*. (2015) [27] no mencionan si utilizan o no una norma estandarizada para obtener los valores del material. Respecto a los artículos que sí siguen una norma, Zhang *et al*. (2014) basa la caracterización mecánica en una norma China, por lo que no se basa en una estandarización internacional [39], mientras que Steck *et al*. (2019) [35] y Shi *et al*. (2019) [30] si utilizan normas internacionales, ISO 527-3 [13] y ASTM D412-15a [3] respectivamente; sin embargo la norma utilizada en el trabajo de Steck et al (2019) es un norma estandarizada para películas y hojas de plástico con espesor menor a 1 mm, por lo que no es una norma adecuada para ensayar elastómeros. Por otro lado Shi *et al*. (2019) utilizan la norma ASTM D412, que sí está estandarizada para elastómeros; sin embargo no presentan las curvas resultantes de los ensayos, por lo que no es posible definir en qué rango de deformación está definido el modelo que proponen [30].

2.1. Hipótesis

A partir de la utilización de modelos constitutivos para materiales hiperelásticos optimizados con la herramienta de algoritmos genéticos con base en la caracterización mecánica del material es posible simular su comportamiento desde el punto de vista computacional.

2.2. Objetivos

- Caracterizar el comportamiento mecánico del silicón Ecoflex 00-30 a partir de modelos constitutivos para materiales hiperelásticos.
- Obtener el modelo constitutivo que simule el fenómeno de comportamiento del material.
- Desarrollar una herramienta computacional que permita encontrar las constantes del modelo constitutivo mediante la herramienta de algoritmos genéticos.
- Validar el modelo obtenido a partir de la comparación de la simulación de elemento finito y los resultados del ensayo de tracción uniaxial.
- Ejemplificar la metodología necesaria para realizar la caracterización de un elastómero con fines didácticos.

3. Marco teórico

3.1. Actuadores

Un actuador es un dispositivo o mecanismo capaz de realizar una acción o movimiento físico [9, 17]. Existen diferentes tipos de actuadores como: los neumáticos, hidráulicos, magnéticos, electromagnéticos y solenoides, motores eléctricos y dispositivos piezoeléctricos [9].
La clasificación de los actuadores no está completamente definida ya que algunas clasificaciones están basadas en descriptores de movimiento, mientras que otras se basan en leyes físicas (Tabla 3.1) [17].

Tabla 3.1. Dos clasificaciones posibles para actuadores [17].

Por tipo de movimiento	Por potencia
	Actuadores de baja potencia
Lineal	Actuadores de alta potencia
Rotacional	Actuadores de micropotencia
Un eje	Actuadores miniatura
Dos ejes	Micro actuadores
Tres ejes	Actuadores microelectromecánicos (MEMs)
	Nanoactuadores

3.2. Actuadores blandos

Los actuadores convencionales (tales como motores eléctricos o de combustión y bombas hidráulicas) generan movimiento por un cambio de posición relativa entre sus componentes, por otro lado los actuadores blandos se caracterizan por ser manufacturados a base de materiales o compuestos (sintéticos o naturales) altamente deformables que pueden convertir energía química o física en trabajo mecánico a través de su respuesta a estímulos del ambiente (pH, salinidad, solventes, campos eléctricos o magnéticos y ondas de luz) para generar algún movimiento y por ende una fuerza o torque deseado, estos movimientos se dan a partir de cambios de forma o volumen; para facilitar la deformación, la mayoría de estos actuadores son construidos de diferentes materiales que pueden tener un bajo módulo elástico o pueden incorporar fluidos y en ocasiones dependiendo de sus configuraciones geométricas, los materiales rígidos con un alto módulo elástico también pueden ser utilizados como actuadores blandos [4, 16].
Este tipo de actuadores por lo general son capaces de generar y soportar grandes esfuerzos, alcanzando movimientos con múltiples grados de libertad con funcionalidades complejas, por lo tanto tienen como principal aplicación el campo de sistemas biomiméticos o bioinspirados [4, 16].
Tanto para el diseño como para la selección de un actuador blando, existen un número de características claves a considerar, ya que tienen un rol importante en la elección de un actuador apropiado para una aplicación específica (Tabla 3.2). Entre estas características una de las más

importantes es su mecanismo de operación, ya que esto tiene repercusión en si tiene un desempeño efectivo y su habilidad de funcionar en ciertas escalas de tamaño [16].

Tabla 3.2 Factores que se deben considerar cuando se elige un actuador blando [16].

• Fuerza producida y deformación de actuación • Tamaño de escala • Resistencia a otro estímulo • Potencia de consumo • Velocidad de activación y tiempo de respuesta • Biocompatibilidad • Biodegradabilidad • Multifuncionalidad	• Ambiente de operación (ej. dentro de una solución salina/solvente) • Tipo de fuente de poder • Esfuerzo de cedencia • Durabilidad y resistencia a la fatiga • Histéresis y viscoelasticidad del material • Anisotropía del material

Los actuadores blandos pueden ser clasificados a partir de los materiales que están hechos y los estímulos a los que estos reaccionan o el método a partir del que están fabricados: desarrollados totalmente con manufactura aditiva o semi-desarrollados con manufactura aditiva [4, 35].

3.2.1. Manufactura y diseño de actuadores blandos

Por lo general los sistemas de robótica suave se han diseñado en un programa de cómputo para diseño asistido por computadora (CAD); sin embargo, los programas de cómputos actuales de CAD presentan complicaciones para el desarrollo de los diseños complejos no homogéneos que se intentan crear en la robótica suave [29].
El progreso reciente en el campo de la robótica suave se debe al rápido desarrollo de herramientas de diseño digital y técnicas de fabricación. Entre estas técnicas de fabricación se encuentra la manufactura aditiva, *shape deposition manufacturing (SDM)* y litografía suave [29].

3.2.1.1. *Actuadores blandos desarrollados por manufactura aditiva*

La producción de cualquier actuador blando con manufactura aditiva requiere 4 pasos, el primer paso es la definición del problema que es la aclaración de la necesidad de utilizar una máquina de manufactura aditiva para construir el actuador. En segundo lugar, deberían justificarse las ventajas de utilizar una máquina de manufactura aditiva sobre las técnicas de fabricación convencionales. En tercer lugar, los materiales apropiados que pueden cumplir las características deseadas del producto final deben seleccionarse meticulosamente. Finalmente, el método de manufactura aditiva debe decidirse según las propiedades del material, el tamaño de la estructura y el movimiento vertical de la boquilla y el espesor de las capas [40].
Los actuadores desarrollados en su totalidad por manufactura aditiva presentan la ventaja sobre los semi-desarrollados por el mismo método, ya que no cuentan con ningún post-procesamiento de ensamble. Además sus principales ventajas son: la fabricación no requiere más de un proceso, esto

los hace más accesibles y económicos para el diseño personalizado en comparación con los actuadores blandos semi-desarrollados por manufactura aditiva [40].

3.2.2. Materiales utilizados y algunos estímulos de respuesta

3.2.2.1. *Elastómeros*

Los elastómeros son polímeros gomosos que son mecánicamente flexibles[II] y tienen un alto límite de deformación elástica. Por lo general en aplicaciones de ingeniería, típicamente se requiere una deformación pequeña (se trabaja dentro del régimen elástico), donde el esfuerzo y la deformación tienen una relación aproximadamente lineal, esto hace posible determinar el módulo de Young (E) o módulo de elasticidad; sin embargo, los elastómeros y otros polímeros blandos utilizados en este campo de aplicación experimentan grandes deformaciones y para este régimen, la respuesta a los esfuerzos es no lineal [23].

Con el objetivo de estudiar materiales con propiedades mecánicas no lineales, que generalmente sufren grandes deformaciones con pequeños esfuerzos aplicados, se desarrolló una versión no lineal de la teoría de elasticidad, que constituye la base teórica para el estudio de materiales hiperelásticos, como los elastómeros, esta teoría utiliza una función de energía de deformación (W) para describir en términos energéticos el comportamiento mecánico de este tipo de materiales [25].

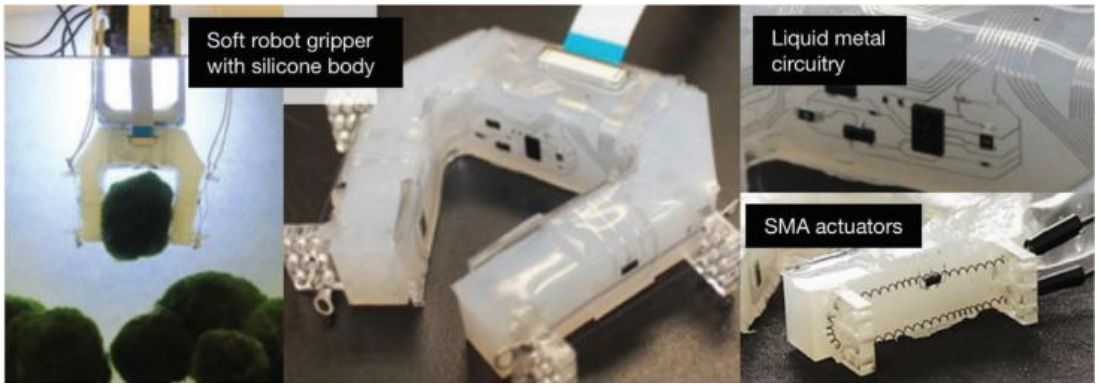


Fig. 3.1 Ejemplo de unas pinzas (actuador blando) hecho de elastómero, con circuitos de metal líquido y aleación de memoria de forma para accionamiento eléctrico [23].

[II] ***"Compliance (flexibity)".*** Como propiedad representa la tolerancia de un material para sufrir deformación, la propiedad de ser flexible y fácil de deformar, mientras que al referirse a materiales, hace referencia a que tienen un módulo elástico bajo y con pequeños esfuerzos se consiguen deformaciones considerables.
Manuel R. Vegas, Jose L. Martin del Yerro. *Stiffness, Compliance, Resilience, and Creep Deformation: Understanding Implant-Soft Tissue Dynamics in the Augmented Breast: Fundamentals Based on Materials Science.* p. 923

3.2.2.2. *Polímeros*

Existen dos tipos de materiales poliméricos ampliamente utilizados y designados para responder a una extensa variedad de estímulos, como lo son los polímeros de cristal líquido (LC) y los polímeros de memoria de forma (SMPs) [16].

Los polímeros de memoria de forma son materiales capaces de recuperar una o más formas. Es posible fijar y recuperar la forma de una deformación temporal utilizando varios estímulos como el calor, la luz y los solventes. La recuperación del material a su estado inicial produce grandes deformaciones pero fuerzas de magnitud baja y esto depende de la elasticidad del polímero [16].

Además de los polímeros ya mencionados, los elastómeros se caracterizan por ser aislantes naturales tanto eléctricos como térmicos y para poder hacerlos conductores de electricidad o calor, los elastómeros cuentan con la integración ya sea de nano o micropartículas o inclusiones fluidas[III] [23].

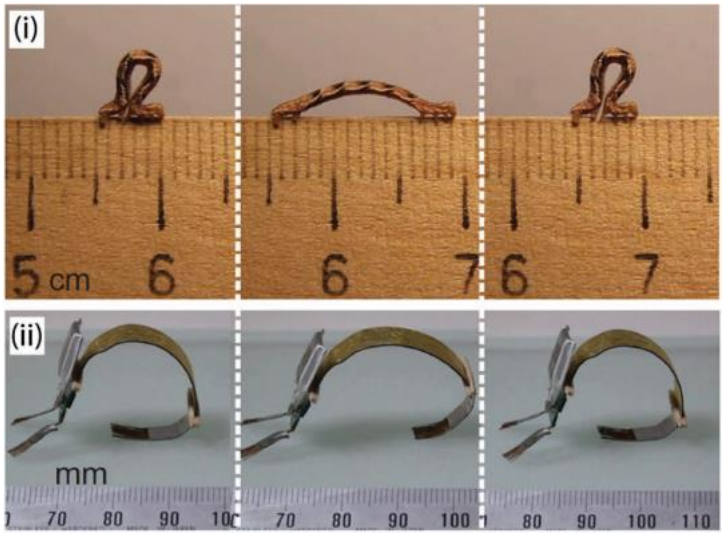


Fig. 3.2 Comparación entre el (i) movimiento de un gusano, (ii) y su contraparte hecha de un polímero iónico [16].

3.2.2.3. *Fluidos*

Los primeros actuadores blandos utilizaron músculos neumáticos artificiales (PAMs) y estos actuadores están compuestos de una cámara de elastómero cubierta con material textil trenzado que se contraería cuando se llenará con aire comprimido y son llamados músculos artificiales debido a la similitud con la fuerza, contracción, cambio de rigidez y velocidad generada por un músculo natural [23].



Fig. 3.3 Actuador de flexión neumático hecho con manufactura aditiva [23].

[III] **Inclusiones fluidas.** Son pequeñas gotas de fluido que están atrapadas en cristales durante su crecimiento o después del crecimiento durante la recuperación de las fracturas en el mineral. Robert J. Bodnar. *Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. p. 488

Tabla 3.3. Principales fluidos de trabajo utilizados en los actuadores blandos [23].

Aire comprimido	La ley de gases ideales es utilizada para modelar la mecánica del aire en los músculos neumáticos artificiales y otros sistemas neumáticos suaves.
Agua	En comparación con el aire, el agua presenta una mayor capacidad de carga y mayor velocidad de respuesta en el actuador.
Fluido conductor	Los fluidos conductores de electricidad son comúnmente utilizados en tecnologías de elastómeros dieléctricos.

3.2.2.4. *Geles*

Los geles han sido un material emergente que se ha popularizado en la robótica suave y la electrónica. Los geles son definidos como sistemas binarios fluido-sólido y sus propiedades pueden ser percibidas como una combinación entre las propiedades de los polímeros blandos y los fluidos [23].

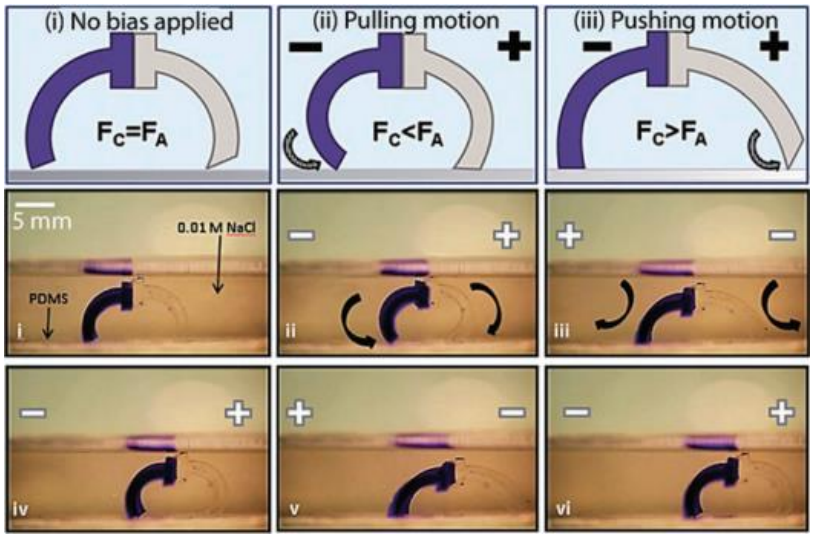


Fig. 3.4 Caminante hecho con un gel aniónico y catonico. Se aplica un campo de 5 V/cm para inducir movimiento [16].

3.2.2.5. *Elastómeros con metal líquido incrustado (LM-Embedded Elastomers, LMEE)*

Es posible observar que en los geles el compuesto predominante son los fluidos, pero también es posible obtener compuestos de fluido-elastómero. Dependiendo de la concentración y microestructura de las gotas incrustadas de metal líquido, los compuestos LMEE pueden ser conductores o aislantes eléctricos o térmicos [23].

Tabla 3.4. Actuadores blandos documentados a partir del material y el estímulo al que responden [4].

Material	Estímulo	Actuadores existentes
Gel	pH	▪ 1949. Katchalsky & Kuhn reportan un gel hinchado con agua que puede convertir energía química en trabajo mecánico.
	Sal	▪ 1966. Katchalsky desarrolló motores químico-mecánicos enfocados con el tratamiento de soluciones salinas como LiBr o Urea. ▪ 1970. Sussman & Katchalsky construyen turbinas químico-mecánicas.
	Solvente	▪ 1980. Tanaka descubre que geles de poliacrilamida (PAAm) hidrolizados sumergidos en mezclas de acetona y agua experimentan un colapso de volumen de forma discontinua. ▪ 1993. Suzuki inventa un "brazo de gel" sensible a los solventes.
	Térmico	▪ 1975. Osada desarrolla sistemas químico-mecánicos que se contraen a partir de gradientes de temperatura. ▪ 1993. Hirasa sintetiza un polímero termo-sensible con una baja temperatura crítica de solución en agua a 37 °C.
	Eléctrico	▪ 1965. Hamlen *et al*, observan cambios de las dimensiones en geles debido a estímulos eléctricos (utilizan una fibra PVA-PAA que contiene polvos finos de platino dispersos). ▪ 1977. Grodzinski muestra que membranas de colágeno inmersas en una solución electrolítica deforma en presencia de un campo eléctrico externo.
	Luz	▪ 2000. Misawa *et al*, muestra la contracción en polímeros de gel a partir de la excitación con un rayo láser.
	Magnético	▪ 1995. Hirai fabrica geles de PVA que incorporan fluidos magnéticos. ▪ 1996. Zrinyi desarrolla "*ferrogels*" hechos de hidrogeles de PVA con partículas magnéticas (se estudia el comportamiento magneto-elástico unidireccional).
Polímeros conductivos (CP)	Eléctrico	▪ 2003-2004. Kaneto *et al*, reportan películas sintetizadas electro-químicamente que son aplicadas a bombas de diafragma y pantallas táctiles.
	Humedad	▪ 1966. Okuzaki desarrolla motores de polímeros.
Elastómeros	Eléctrico	▪ 1999-2001. Lehmann y sus colaboradores desarrollan elastómeros líquido-cristalinos ferromagnéticos.
	Luz	▪ 2008. Yamada, Mamiya, *et al*, fabricaron un motor de plástico impulsado por luz utilizando elastómeros líquido-cristalinos, donde la energía es convertida de forma directa en un rotación mecánica.
Nanotubos de carbono (*CNTs*)	Eléctrico	▪ 1999. Baughman y sus colaboradores reportan un nuevo actuador electromecánico basado en hojas de nanotubos de carbono de pared simple.
Bio-actuadores	ATP	▪ 2000. Montemagno *et al*, fabricaron bio-actuadores que consisten de un sustrato diseñado y nanopropulsores fabricados.

- 2002. Kakugo *et al*, desarrollaron un bio-actuador que utiliza ATP, nombrado “gel machines”.

3.3. Materiales hiperelásticos

Las medidas experimentales de la relación entre el esfuerzo y deformación en materiales de goma, ayudaron a que Melvin Mooney y Ronald Rivlin evidenciaran lo inadecuadas que eran tanto la teoría lineal de elasticidad como la ley de Hooke, cuando se trataba de obtener las propiedades mecánicas de ciertos materiales. Para estudiar materiales con propiedades mecánicas no lineales se desarrolló una versión no lineal de la teoría clásica de elasticidad, misma que constituye la base para el estudio de materiales hiperelásticos y utiliza una función de energía de deformación para describir el comportamiento mecánico del material en términos energéticos[25].
Los materiales hiperelásticos entran en la clasificación de materiales elásticos, lo que implica que pueden recuperar su forma original al remover las cargas externas que generan la deformación [11]. La hiperelasticidad se define para materiales idealmente elásticos a partir de modelos constitutivos en los que las relaciones entre esfuerzo y deformación son contenidas en la función de densidad de energía de deformación, misma que se denota por “W” y debe expresarse de tal manera que pueda describir la elevada deformabilidad, la recuperación después de la deformación y el elevado comportamiento no lineal para esta clase de materiales [19].

3.3.1. Relación entre la función de Energía de Deformación (W) y el esfuerzo

Cuando se consideran deformaciones en materiales gomosos se recurre al tensor gradiente de deformación ($\boldsymbol{F}$) para definir la deformación local y a partir de él es posible definir a los tensores de deformación de Cauchy-Green por la izquierda ($\boldsymbol{B}$) (ecuación 13) y por la derecha ($\boldsymbol{C}$) (ecuación 14), mismos que son importantes para obtener los invariantes de deformación (I_1, I_2, I_3) [24].

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{F}^T \cdot \boldsymbol{F} \quad (13) \qquad \boldsymbol{C} = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{F}^T \quad (14)$$

$$I_1 = tr(\boldsymbol{B}) \quad (15)$$

$$I_2 = \frac{1}{2}[tr(\boldsymbol{B})^{\boldsymbol{2}} - tr(\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{2}})] \quad (16)$$

$$I_3 = \det(\boldsymbol{B}) \quad (17)$$

Los invariantes de la deformación son los mismos para ambos tensores y escritos en término de las elongaciones $(\lambda_i)_{i=1:3}$ se pueden reescribir como [24]:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (18)$$

$$I_2 = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2 \quad (19)$$

$$I_3 = \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2 \quad (20)$$

En el caso de grandes deformaciones se utilizan principalmente dos tensores de esfuerzo definidos como: el tensor de esfuerzo verdadero $\boldsymbol{\sigma}$ (o de Cauchy) y el tensor de esfuerzo nominal $\boldsymbol{P}$ (o el primer tensor de Piola-Kirchoff). Además de que se asume que los tensores de esfuerzo derivan de la función de energía de deformación, misma que depende del tensor de deformación $\boldsymbol{B}$, por lo tanto los tensores de esfuerzo se representan como [24]:

Esfuerzo verdadero
$$\boldsymbol{\sigma} = 2\boldsymbol{B}\frac{\partial W}{\partial \boldsymbol{B}} - p\boldsymbol{I} \tag{21}$$

Esfuerzo nominal
$$\boldsymbol{P} = \frac{\partial W}{\partial \boldsymbol{F}} - p\boldsymbol{F}^{-T} \tag{22}$$

Y siguiendo la teoría fenomenológica de Rivlin, cualquier material gomoso que se encuentre en su comportamiento elástico será considerado como isotrópico e incompresible y debido a la consideración de isotropía la función de energía de deformación W deberá estar en función de los invariantes de la deformación [1]. Mientras que la consideración de incompresibilidad se refleja en el tercer invariante de la deformación (ecuación 23) [25]:

$$I_3 = 1 \tag{23}$$

Por lo tanto las relaciones entre la función de energía de deformación y los esfuerzos verdadero y nominal se expresan de la siguiente forma [24]:

Esfuerzo verdadero
$$\sigma_i = 2\left(\lambda_i^2\frac{\partial W}{\partial I_1} - \frac{1}{\lambda_i^2}\frac{\partial W}{\partial I_2}\right) - p \qquad i = 1{:}3 \tag{24}$$

Esfuerzo nominal
$$P_i = 2\left(\lambda_i\frac{\partial W}{\partial I_1} - \frac{1}{\lambda_i^3}\frac{\partial W}{\partial I_2}\right) - p\frac{1}{\lambda_i} \qquad i = 1{:}3 \tag{25}$$

Y a partir de la relación entre el esfuerzo verdadero y la función de energía de deformación es posible obtener las relaciones de esfuerzo para algunos ensayos mecánicos (Tabla 3.5) [24].

Tabla 3.5 La función de energía de deformación relacionada con el esfuerzo verdadero [24, 25].

Ensayo mecánico	Esfuerzo verdadero $\boldsymbol{\sigma}$	
Tracción uniaxial	$\sigma_{UT} = 2\left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda}\right)\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda}\frac{\partial W}{\partial I_2}\right)$	(26)
Tracción biaxial	$\sigma_{BT1} = 2\left(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2\lambda_2^2}\right)\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_2^2\frac{\partial W}{\partial I_2}\right)$	(27)
	$\sigma_{BT2} = 2\left(\lambda_2^2 - \frac{1}{\lambda_1^2\lambda_2^2}\right)\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_1^2\frac{\partial W}{\partial I_2}\right)$	(28)

3.3.2. Modelos constitutivos para materiales hiperelásticos

Los modelos constitutivos para materiales hiperelásticos están clasificados con base en tres tipos de planteamiento, mismo que depende del enfoque que el autor seleccione para el desarrollo de la función de energía de deformación [24].

1) Modelos fenomenológicos. Parten de desarrollos matemáticos, algunos de estos modelos tienen rangos de deformación restringidos, por lo que conducen a errores si se usan fuera de sus rangos de aplicación.

2) Modelos experimentales. Para estos modelos se determina directamente de los datos experimentales las funciones materiales $\frac{\partial W}{\partial I_1}$ y $\frac{\partial W}{\partial I_2}$.

3) Modelos basados físicamente. Estos modelos están basados tanto en la física de los polímeros (estructuras de red y cadenas de polímeros) como en métodos estadísticos. La función de energía de deformación depende de los fenómenos microscópicos [24].

En la Tabla 3.6 se encuentran algunas de las aportaciones más importantes dentro de la teoría de hiperelasticidad así como algunos modelos constitutivos.

Tabla 3.6 Desarrollo y progreso de la teoría de hiperelasticidad a lo largo del tiempo [19].

Año	Autor	Aportación	Modelo constitutivo	
1940	Melvin Mooney	Desarrolla un modelo hiperelástico que utiliza los invariantes del tensor de deformaciones de Green por la izquierda para evaluar a *W*. Se utiliza para rangos de 50 % en compresión y 400% en elongación.	$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3)$	(29)
1948	Ronald Rivlin	Propone el modelo hiperelástico "Neo-Hookean" Válido para deformaciones debajo del rango del 20%.	$W = \frac{1}{2}nkT(I_1 - 3)$	(30)
		Como continuación el modelo "Neo Hookean", expresa el modelo de Mooney como función de dos invariantes de la deformación (modelo de "*Mooney-Rivlin*").	$W = \sum_{i=0,j=0}^{\infty} C_{ij}\,(I_1 - 3)^i (I_2 - 3)$	(31)
1951	Ronald Rivlin	Valida la aplicación de la teoría de largas deformaciones elásticas previamente desarrollada para explicar las curvas de carga/deformación de perfiles de goma altamente deformables.		
1962	Paul Blatz y William Ko	Desarrollan un modelo constitutivo hiperelástico con una interpretación analítica diferente de la función de densidad de energía de deformación.	$W = \frac{\mu}{2} f\left(I_1 - 1 - \frac{1}{\nu} + \frac{1-2\nu}{\nu} I_3^{-\frac{\nu}{1-2\nu}}\right) + \frac{\mu}{2}(1-f)\left(\frac{I_2}{I_3} - 1 - \frac{1}{\nu} + \frac{1-2\nu}{\nu} I_3^{-\frac{\nu}{1-2\nu}}\right)$	(32)
1967	Valanis y Landel	Concluyen que es posible simplificar a W al expresarla como función de las elongaciones (λ). Asumiendo el comportamiento	$W = w(\lambda_1) + w(\lambda_2) + w(\lambda_3)$	(33)

		incompresible, es posible obtener resultados cercanos para un rango de elongación (λ) de 0.6 a 2.5.	$\frac{dw}{d\lambda} = 2\mu \ln(\lambda)$	(34)
1972	Raymond Ogden	Desarrolla un modelo para explicar el comportamiento no lineal del esfuerzo-deformación de un material hiperelástico. Utiliza las deformaciones principales para evaluar W.	$W = \sum_{i=1}^{N} \frac{\mu_n}{\alpha_n}(\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3)$	(35)
1993	Ellen M. Arruda y Mary C. Boyce	Proponen un modelo que asume la incompresibilidad del material y puede predecir de forma precisa el comportamiento de ciertas gomas	$W = \mu \sum_{i=1}^{N} \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}}(I_1^i - 3^i)$	(36)
	Yeoh	Propone un modelo simplificado para W, mismo que puede dar buenas predicciones para rangos mayores de deformación que en "*Mooney-Rivlin*" o "*Neo Hookean*".	$W = \sum_{i=1}^{\infty} C_{i0}\,(I_1 - 3)^i$	(37)
1996	Gent	Presenta un nuevo modelo constitutivo que contiene dos constantes en la función W, ofrece una buena predicción para perfiles complejos de deformación además de una formulación matemática simple de la relación entre carga y deformación.	$W = -\frac{\mu}{2} J_m \ln\left(1 - \frac{I_1 - 3}{J_m}\right)$	(38)
2004	Ogden *et al*.	A partir de determinar las constantes para un caucho natural, emplearon un esquema de optimización basado en el método no lineal de mínimos cuadrados para evaluar los parámetros del material de W para los modelos hiperelásticos.		
2006	Horgan y Saccomandi	Analizaron y presentaron modelos constitutivos hiperelásticos para explicar el endurecimiento o rigidez para grandes deformaciones.	$W = -\frac{\mu}{2} J \ln\left(\frac{1}{(J-1)^3}(J^3 - J^2 I_1 + J I_2 - 1\right)$	(39)
	Marckmann y Verron	Presentan un análisis comparativo de 20 modelos constitutivos hiperelásticos.		
	Martins *et al*.	Realizaron un análisis comparativo de los modelos hiperelásticos para determinar el modelo hiperelástico adecuado para tejidos humanos.		
2008	Guo y Sluys	Emplearon el método de elemento finito y la ley elástica de Gao para simular el comportamiento hiperelástico no lineal.		
	Sasso *et al*.	Emplean el método de "*test bugle*", entre otras pruebas para probar los modelos hiperelásticos.		
2009	Lin *et al*.	Utilizan el método de elemento finito para obtener las relaciones de W para modelos de contacto elástico no lineal.		
2012	Kim *et al*.	Realizan un análisis exhaustivo para comparar los modelos hiperelásticos con los		

		resultados obtenidos a partir de diferentes ensayos mecánicos.		
	Steinmann *et al*.	Llevan a cabo un análisis comparativo de 14 modelos para derivar analíticamente las relacione entre los perfiles de carga y deformación.		
2013	Khajahsaeid *et al*.	Propone un nuevo modelo hiperelástico para materiales isotrópicos e incompresibles.	$W = \frac{nkT}{2}\left(\frac{1}{a}\exp\left(a(I_1 - 3)\right) + b(I_1 - 2)(1 - \ln(I_1 - 2)) - \frac{1}{a} - b\right)$	(40)
2015	Mihai *et al*.	Llevan a cabo un análisis de tejidos blandos del cuerpo humano modelándolo como un material incompresible e isotrópico y llegan a la conclusión de que el modelo de Ogden ajusta de manera razonable.		

Recientemente se ha utilizado la herramienta de algoritmos genéticos para determinar los parámetros de material que requiere cada modelo constitutivo [24]. Además con el fin de validar las constantes obtenidas para los modelos constitutivos es común utilizar un software de análisis por elementos finitos [19].

3.4. Computación evolutiva

La computación evolutiva hace uso de los principios de la selección natural en forma de algoritmos que utilizan el mismo mecanismo de búsqueda y optimización para la obtención de una solución óptima para un problema. Comenzó relacionando la teoría evolutiva biológica con la informática y aún busca entre los descubrimientos biológicos por inspiración; sin embargo, a pesar de esto la computación evolutiva no puede reproducir por completo a la evolución biológica [32].

3.4.1. Modelos en la computación evolutiva

Los modelos que se han seguido históricamente para desarrollar la mayor parte de la actividad de la computación evolutiva son: algoritmos genéticos (Holland, 1975), programación genética (Koza, 1992, 1994), estrategias evolutivas (Recheuberg, 1973) y programación evolutiva (Forgel *et al*., 1996). Dichos modelos se diferencian en la naturaleza de los esquemas de representación, los operadores de reproducción y los métodos de selección [32].

3.4.1.1. *Algoritmos genéticos*

La técnica de algoritmo genético ha sido la más popular en el campo de investigación de la computación evolutiva. Los algoritmos genéticos fueron inventados y desarrollados por John Holland en 1975, proponiéndolos como un método heurístico basado en el principio de Darwin “la supervivencia del más apto”. Tradicionalmente la representación utilizada en algoritmos genéticos es una cadena de bits de longitud fija (dicha representación puede cambiar), donde cada posición

en la cadena representa una característica particular del individuo y el valor que se almacena en dicha posición representa como esa característica se expresa en la solución; esta representación es análoga a los genes en un organismo biológico [32].

3.4.1.2. *Programación genética, estrategias evolutivas y programación evolutiva*

La programación genética es una técnica cada vez más popular, y se basa en la representación de un árbol de tamaño variable que representa funciones y valores. El árbol entero corresponde a una única función que deberá evaluarse. Esta técnica es similar a los algoritmos genéticos a excepción de los operadores de reproducción ya que en el caso de programación genética siguen la representación de un árbol [32].
Por otro lado, en el caso de estrategias evolutivas se utiliza la representación de un vector de longitud fija con valores reales, donde, al igual que algoritmos genéticos cada posición en el vector corresponde a una característica del individuo; sin embargo, a diferencia de algoritmos genéticos las características que se consideran se relacionan más con el comportamiento que con la estructura [32].
En programación evolutiva, la idea base es la representación fenotípica de los individuos como máquinas de estados finitos, que responden a estímulos de su ambiente y además son capaces de desarrollar operadores para realizar cambios en su comportamiento a lo largo del tiempo [32].

3.5. Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos son una técnica de búsqueda heurística cuya base es la evolución, la genética y la selección natural; parten de una metáfora en la que se considera al problema de optimización como un ambiente en el que un conjunto de candidatos a solución vivirá, lo que hace posible aplicarlos a una gran variedad de problemas de optimización además de ser una herramienta interesante para problemas prácticos [18, 32].
En algoritmos genéticos existen dos elementos principales las poblaciones y los individuos, cada individuo representa una única solución, mientras que una población es un conjunto de individuos que están involucrados en el proceso de búsqueda [32].
Cada individuo está compuesto por dos tipos de representación de la solución candidato; el cromosoma, que representa la información "genética" (genotipo) codificada y contiene información característica de la solución, y el fenotipo, que decodifica al cromosoma (mediante la función de morfogénesis) en términos del modelo [32].

3.5.1. Codificación

La codificación permite representar a los genes individuales utilizando bits, números, árboles, cadenas, listas u otro objeto [32].

3.5.1.1. *Codificación binaria*

Se trata de la codificación más común, donde cada cromosoma se codifica como una cadena binaria (0-1) y cada bit dentro de la cadena representa alguna característica de la solución. Para este tipo de codificación se tiene que: los enteros son representados de manera exacta, es posible representar una cantidad finita de números reales, la precisión dependerá de la longitud de la cadena (mayor longitud mayor cantidad de números reales representables) [32].

Cromosoma 1	1 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1
Cromosoma 2	0 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1

Fig. 3.5 Codificación binaria.

3.5.1.2. *Codificación octal*

La diferencia con la codificación binaria es que las cadenas se basan en el sistema octal (0-7) [32].

Cromosoma 1	75014362
Cromosoma 2	23057143

Fig. 3.6 Codificación octal.

3.5.1.3. *Codificación hexadecimal*

En este caso las cadenas utilizan números hexadecimales (0-9, A-F) [32].

Cromosoma 1	A247BF
Cromosoma 2	C580DE

Fig. 3.7 Codificación hexadecimal.

3.5.2. Evaluación de ajuste

Este proceso se lleva a cabo con la ayuda de una función de ajuste, dicha función mide la calidad de las soluciones que el algoritmo genético ha generado [18].

3.5.3. Reproducción

Este proceso es la esencia del algoritmo genético; se realiza una búsqueda de nuevos y mejores individuos en comparación a la generación anterior, este proceso consta de tres pasos principales [32]:

- Selección de padres.
- Cruza de los padres para generar descendencia (nuevos individuos).
- Reemplazo de los individuos anteriores [32].

3.5.4. Selección

En el proceso de selección dos individuos son seleccionados como padres para el posterior proceso de cruza. El objetivo de este proceso es destacar a los mejores individuos, para que su descendencia conserve dichas características [32].

3.5.4.1. *Selección por ruleta*

Esta es una de las técnicas más tradicionales de selección en algoritmos genéticos. Se trata de una técnica simple pero ineficiente ya que el individuo menos apto puede seleccionarse en más de una ocasión [10].

3.5.4.2. *Selección de rango*

Esta técnica clasifica a la población y cada individuo es asociado con un valor de aptitud dado por el ranking, el peor candidato tiene un valor de aptitud de 1 y el mejor un valor de aptitud de N. Se trata de una técnica de convergencia lenta, pero entre sus ventajas esta la conservación de la presión de selección cuando la variación entre individuos es baja y conservación de la diversidad de la población [32].

3.5.4.3. *Selección por Torneo*

La técnica de selección por torneo tiene como principio de selección la competencia de torneo entre un número N de individuos, donde el individuo con mayor valor de aptitud es el que gana el torneo y por ende es seleccionado. Con esta técnica se impulsa a que los individuos de generaciones posteriores tengan mejores valores de aptitud [32].

3.5.5. Cruza

La cruza permite la combinación de material genético de dos o más individuos, en sistemas biológicos, se trata de un proceso complejo en el que parejas de cromosomas se alinean, se fragmentan en ciertas secciones y finalmente se intercambian dichos fragmentos entre sí. En computación evolutiva la cruza es simulada al intercambiar segmentos de un cromosoma [10, 18].

3.5.5.1. *Cruza en un punto*

A partir de dos cromosomas padres se selecciona una posición aleatoria dentro de la cadena, en dicha posición se realizará un corte en ambos cromosomas y las secciones posteriores a dicho corte se intercambiarán [32].

3.5.5.2. *Cruza en dos puntos*

Este tipo de cruza se deriva del método de cruza en un punto, aquí se seleccionan dos puntos y la sección que se encuentra entre dichos puntos se intercambia [32].

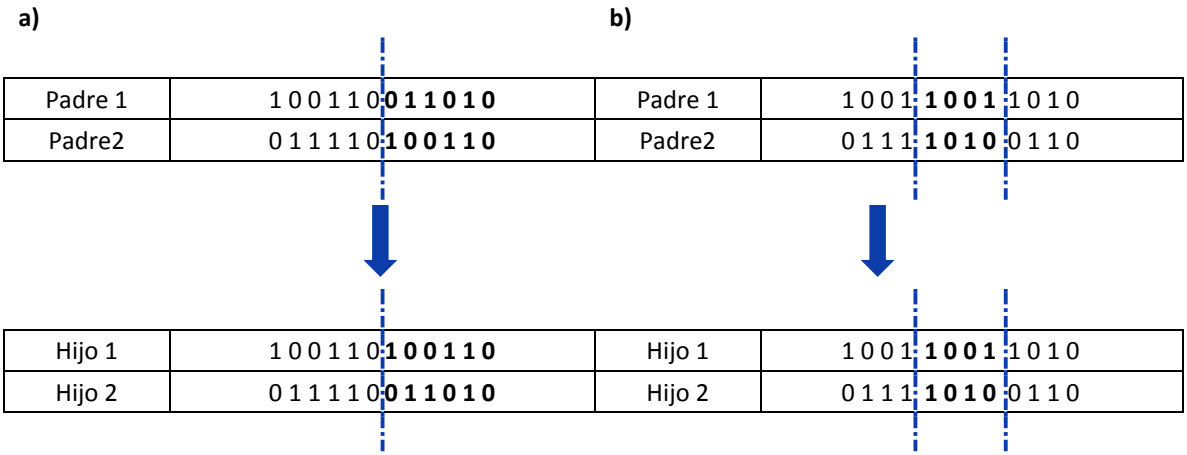


Fig. 3.8 a) Ejemplo de cruza en un punto, b) Ejemplo de cruza en dos puntos.

3.5.5.3. *Cruza uniforme*

Este método es completamente diferente del método de cruza de puntos, para la cruza uniforme cada gen es copiado de uno u otro padre con base en una tercera cadena binaria con la misma longitud que los padres, esta cadena se genera al azar y se denomina "máscara de cruce". Para el primer hijo, en caso de que el gen de la máscara de cruza sea 1 el gen es copiado del primer padre, si por el contrario el gen en la máscara de cruza es 0 el gen se copia del segundo padre, caso contrario para el segundo hijo. El número de puntos de cruce efectivo en por lo general es igual a la mitad de la longitud del cromosoma [32].

Padre 1	1 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1
Padre 2	0 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1
Máscara de cruce	1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0
Hijo 1	1 1 **1** 0 **1** 1 0 **1** 0 0 0 **1**
Hijo 2	**0** 1 **1** 0 **0** 1 0 1 **1** 1 0 1

Fig. 3.9 Ejemplo de cruza uniforme.

3.5.5.4. *Cruza de tres padres*

En esta técnica se seleccionan tres padres de forma aleatoria, posteriormente los dos primeros padres son comparados gen por gen y en caso de que estos coincidan este gen será heredado por el hijo, en caso contrario el gen será heredado del tercer padre [32].

Padre 1	**1 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1**
Padre 2	**0 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1**
Padre 3	*1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0*
Hijo	*1 1* **1 0** *0* **1 0 1** *1 0* **0 1**

Fig. 3.10 Ejemplo de cruza de tres padres.

3.5.6. Mutación

El operador de mutación evita que el algoritmo quede atrapado en un mínimo local, al recuperar material genético perdido durante la cruza o perturbando la información genética de forma aleatoria. Se trata de un operador que conserva la diversidad genética en la población [32].

3.5.6.1. *Mutación por inversión*

Este tipo de mutación involucra un cromosoma "padre" y un cromosoma de mutación generado de manera aleatoria (de igual longitud al primer cromosoma). Cuando un gen del cromosoma de mutación tiene como dígito a un 1, ese mismo gen del cromosoma padre deberá invertirse (1 por 0 o viceversa) dando como resultado un cromosoma "hijo" [32].

Padre	**1** 0 1 0 0 1 **0** 1 0 1 **0** 1
Cromosoma de mutación	**1** 1 1 0 0 0 **0** 1 1 0 **0** 0
Hijo	**0** 0 1 0 0 1 **1** 1 0 1 **1** 1

Fig. 3.11 Ejemplo de mutación por inversión.

3.5.6.2. *Mutación por intercambio*

En este caso se selecciona un par de posiciones dentro de la cadena de forma aleatoria y los genes que pertenecen a dichas posiciones se intercambian [32].

Padre	**1** 0 1 0 0 1 **0** 1 0 1 0 1
Hijo	**0** 0 1 0 0 1 **1** 1 0 1 0 1

Fig. 3.12 Ejemplo de mutación por intercambio.

3.5.6.3. *Probabilidad de mutación*

La probabilidad de mutación es un parámetro importante, ya que a partir de este se decide la cantidad de genes mutados en un cromosoma. Además debe ser un valor pequeño, por lo general se toma como 1/L donde L representa la longitud del cromosoma y no debe ocurrir con mucha frecuencia, ya que puede generar que el algoritmo genético se torne a una búsqueda aleatoria [32].

3.5.7. Condición de término

La condición de término indica cuándo terminará el ciclo evolutivo principal, existen diferentes tipos de condición de término, algunas se enlistan a continuación [18, 32].

a) Máximo número de generaciones. El algoritmo genético para en un número finito de generaciones previamente fijado.

b) Tiempo transcurrido. El algoritmo genético parará una vez que se alcance un cierto tiempo transcurrido.

c) Sin cambio en el valor de aptitud. El proceso terminará en caso de que el valor de aptitud no cambie en la población [32].

3.6. Método de elementos finitos

El método de elementos finitos (*finite element method*, FEM) es una herramienta matemática que permite establecer y resolver sistemas de ecuaciones diferenciales, o integrales, parciales. Este método es utilizado en ingeniería para resolver sistemas complejos cuyo comportamiento no es posible predecir al utilizar ecuaciones de forma cerrada. El sistema se divide en elementos más pequeños donde la solución es conocida o es posible aproximarla. El método exige que la geometría del sistema sea definida por un número finito de puntos en el espacio, a estos puntos se les llama nodos y cada nodo tiene un conjunto de grados de libertad que pueden variar en función de las excitaciones que entren al sistema (por ejemplo, temperatura o desplazamientos). Además estos nodos están conectados entre sí por elementos que definen las interacciones matemáticas de los grados de libertad [36].

3.6.1. Aplicaciones del análisis por elementos finitos

a) Análisis estructural. A partir de este tipo de análisis se determinan desplazamientos y esfuerzos bajo condiciones de carga estática. Existen dos tipos de análisis, lineal y no lineal,

para el caso lineal se asume que el material trabaja en la región elástica y no existe deformación plástica, mientras que en el caso no lineal, existe deformación plástica en el material. Este tipo de análisis es utilizado para marcos y armaduras y geometrías en las que se puede encontrar concentradores de esfuerzos.

b) **Análisis modal.** Se utiliza para evaluar las frecuencias naturales y los patrones de vibración (cuando una excitación externa tiene una frecuencia cercana a una frecuencia natural la estructura falla).

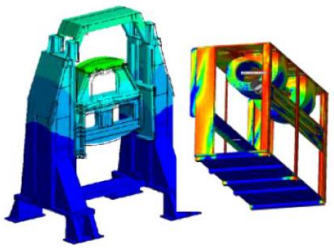
c) **Análisis de fatiga.** Este tipo de análisis sirve para predecir el clico de vida de una pieza o componente en un modelo que se encuentra bajo una carga cíclica.

d) **Análisis de transferencia de calor.** Es posible realizar dos tipos de análisis, estacionario y transitorio, en el caso estacionario se consideran como constantes las propiedades térmicas, por el contrario en el caso transitorio se toma en cuenta los cambios de temperatura.

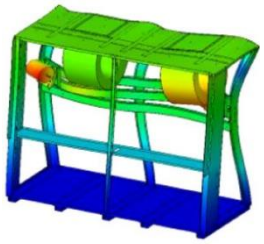
e) **Simulación de flujo.** Este tipo de análisis simula flujos de aire o líquido en condiciones reales y se utiliza para predecir la distribución de presión y perfiles de velocidad.

f) **Diagnóstico de falla.** A partir de este análisis se determinan las causas de falla para una pieza, componente o estructura [5].

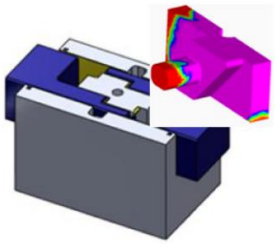
a) Análisis estructural



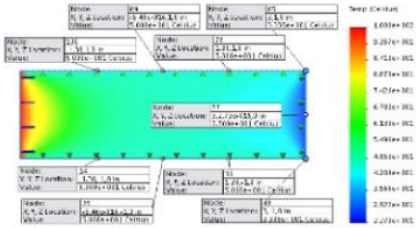
b) Análisis modal



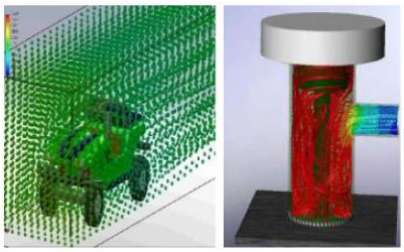
c) Análisis de fatiga



d) Análisis de transferencia de calor



e) Simulación de flujo



f) Diagnóstico de falla



Fig. 3.13 Ejemplos de análisis por elementos finitos [5].

3.6.2. Procedimiento del análisis por elementos finitos

El procedimiento general para realizar un análisis por elementos finitos es el siguiente.

1. Creación del modelo. Antes de realizar un análisis por elementos finitos, primero es necesario desarrollar un modelo virtual del modelo, la pieza o el ensamble que se desea analizar, además también es necesario definir las propiedades del o los materiales de los que está compuesto el modelo [36].

2. Discretización del modelo. En este paso se procede a discretizar al modelo, es decir, el cuerpo se dividirá en un sistema equivalente de elementos finitos que tienen nodos específicos para cada elemento [21].

2.1 Definición de los elementos. El tipo de análisis así como la definición de los elementos está basada en el comportamiento físico del modelo. Por lo tanto se seleccionarán los elementos cuyo comportamiento sea el más cercano al comportamiento físico, en cuanto al número de elementos y su tamaño, idealmente se buscan elementos lo suficientemente pequeños que permitan obtener resultados aceptables, pero lo suficientemente grandes para reducir el tiempo de procesamiento [21].

a) Elementos lineales. Se utilizan para modelar estructuras de tipo armadura o tipo marco, el elemento lineal más simple está compuesto por dos nodos, uno en cada extremo, aunque también existen elementos lineales de mayor orden, con tres o más nodos.

b) Elementos bidimensionales. También conocidos como elementos tipo plano, pueden ser triangulares o cuadriláteros, los elementos bidimensionales más simples solamente se componen por nodos en los vértices y límites rectos o curvos.

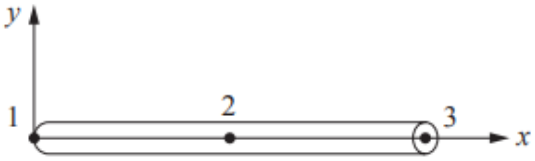
c) Elementos tridimensionales. Los elementos tridimensionales básicos solamente cuentan con nodos en los vértices y pueden ser tetraedros o hexaedros con lados rectos, en el caso de elementos de mayor orden pueden tener nodos intermedios y superficies o lados curvos.

d) Elementos triangulares y cuadriláteros axisimétricos. Utilizados para problemas axisimétricos. Estos elementos se generan a partir de rotar 360° un elemento bidimensional alrededor de un eje fijo [21].

a)



Elemento lineal de dos nodos



Elemento lineal de tres nodos

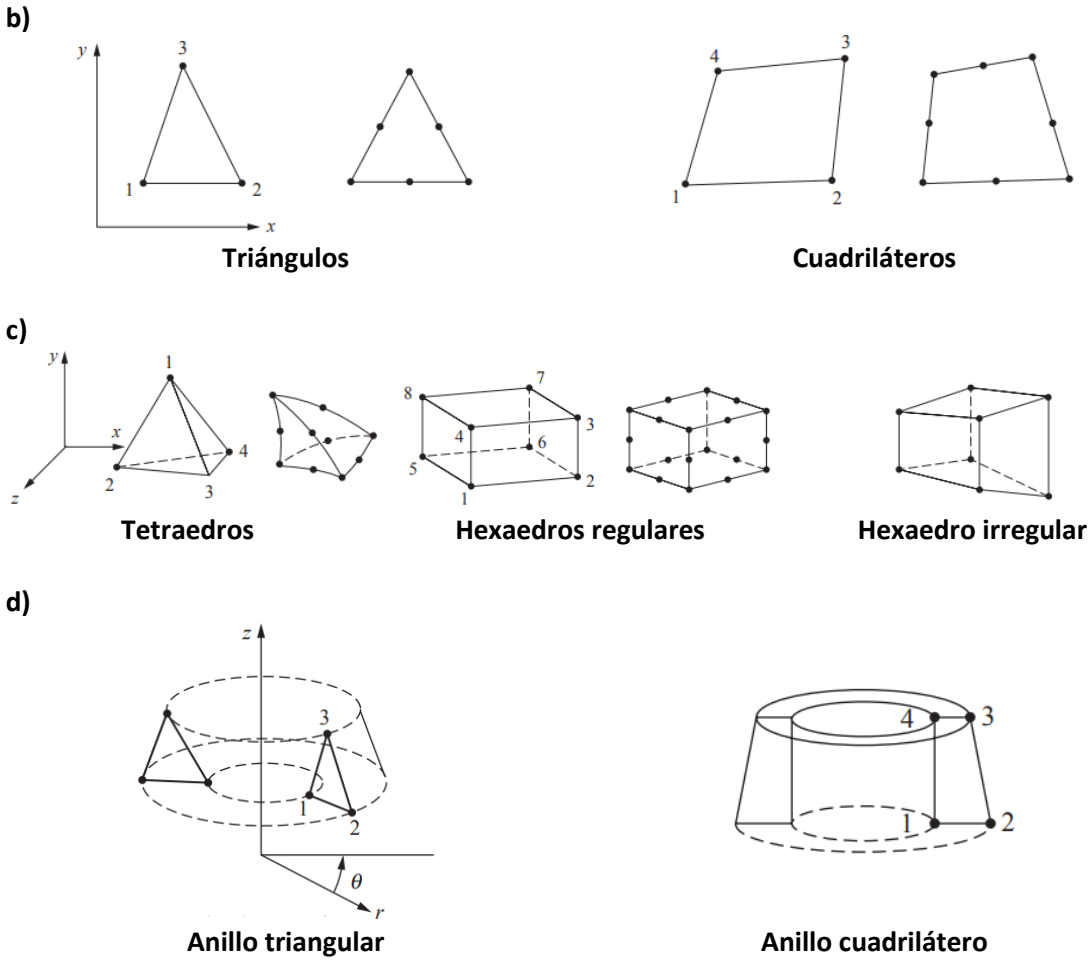


Fig. 3.14 a) Elementos lineales, b) Elementos bidimensionales, c) Elementos tridimensionales, d) Elementos triangulares y cuadriláteros axisimétricos [21].

3. **Ensamble de elementos.** En esta parte los modelos de elementos en sistemas de coordenadas locales se convierten a elementos de un sistema global que permite su ensamblaje.

4. **Definición de condiciones de frontera y cargas.** La interacción que existe entre el modelo y el ambiente se representan mediante la definición de condiciones de frontera y cargas.

5. **Solución de incógnitas primarias.** Contar con condiciones de frontera suficientes permiten obtener una solución para el sistema global del modelo, que consta por lo general de una gran cantidad de ecuaciones lineales.

6. **Cálculo de variables dependientes.** A partir de la solución de variables independientes es posible resolver a las variables dependientes, por ejemplo a partir de la deformación (variable independiente) junto con el modelo constitutivo del material, es posible obtener el valor de esfuerzo (variable dependiente) [5].

7. **Interpretación de resultados.** El objetivo principal es que la interpretación de los resultados obtenidos sirvan como herramienta en el proceso de diseño y análisis [21].

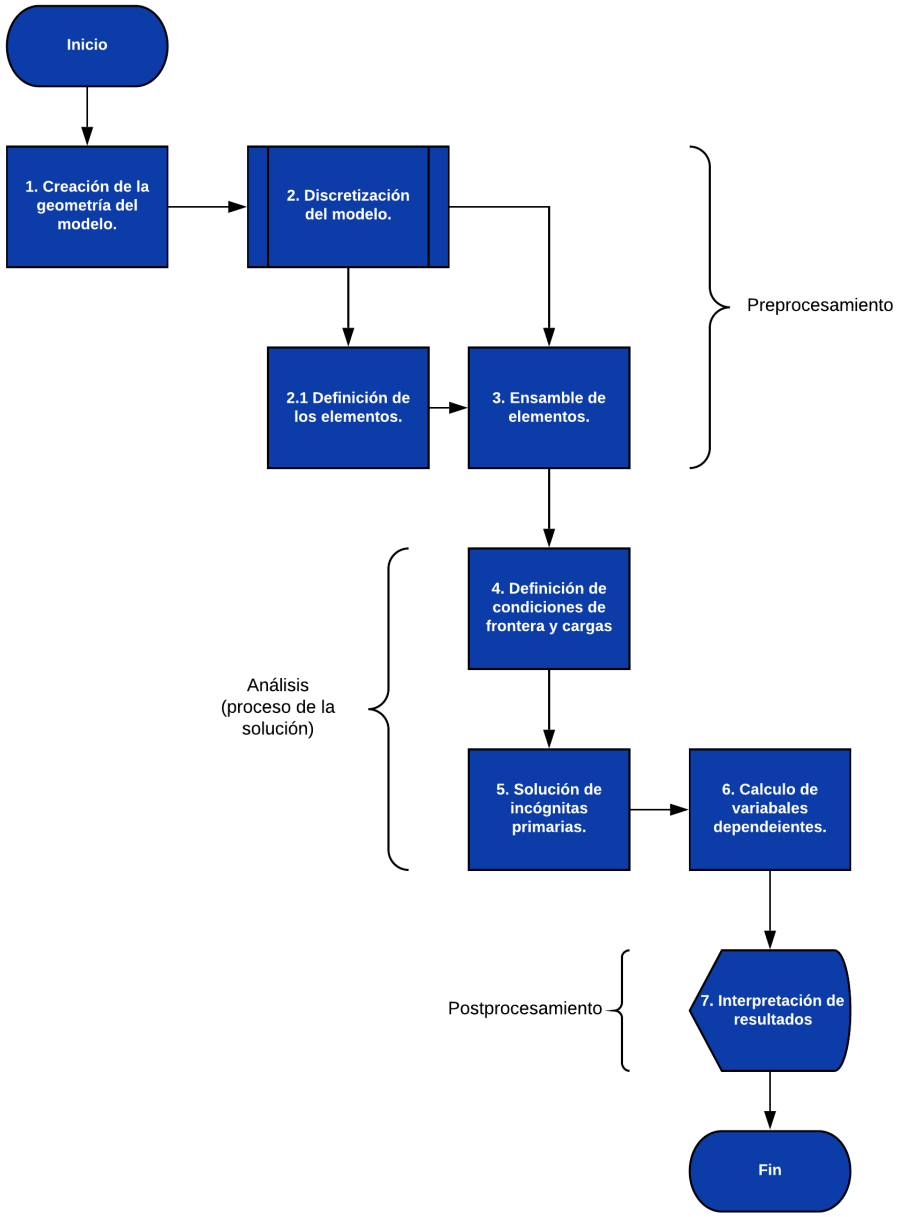


Fig. 3.15 Diagrama de flujo del procedimiento de un análisis por elementos finitos.

4. Desarrollo

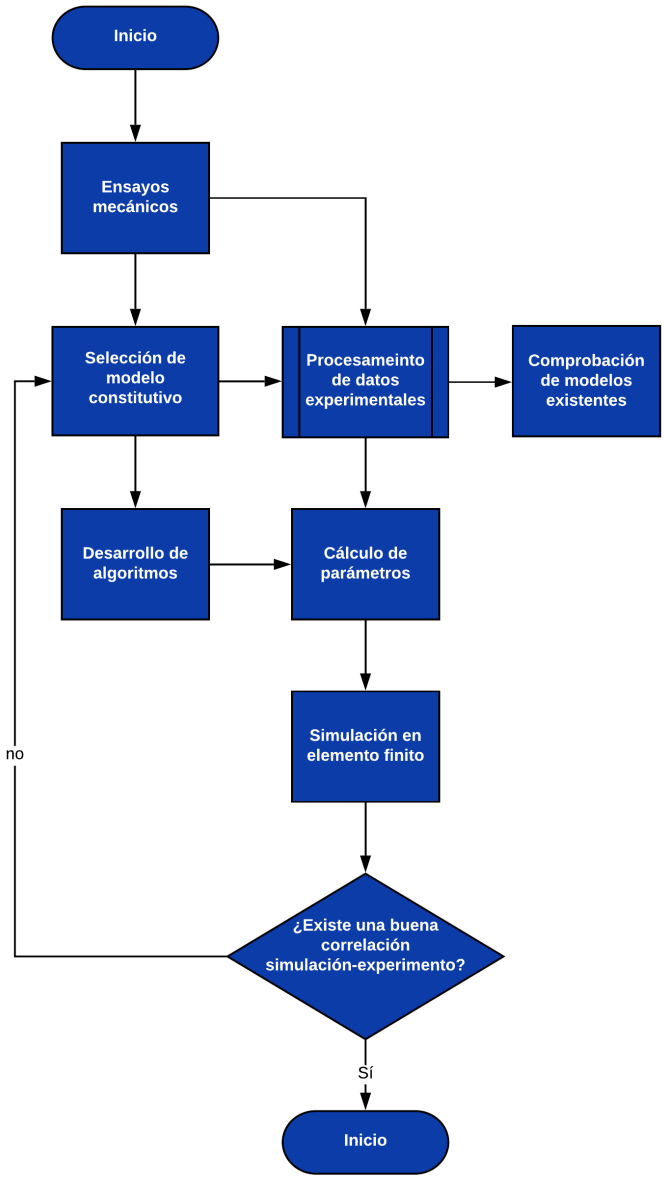


Fig. 4.1 Metodología a seguir para la caracterización de un material hiperelástico.

Para la caracterización de un elastómero es necesario contar con datos experimentales (mismos que se obtienen de la realización de ensayos mecánicos, tales como el ensayo de tracción uniaxial, el ensayo de tracción biaxial o el ensayo de cortante puro), posteriormente se realizarán ajustes de curvas con ayuda de la herramienta computacional de algoritmos genéticos y la utilización modelos constitutivos para materiales hiperelásticos, finalmente una vez encontrados los parámetros del material se procederá a validarlos mediante la simulación en elemento finito del ensayo de tracción.

4.1. Ensayos de tracción uniaxial

Para realizar la caracterización del elastómero, se realizaron ensayos de tracción uniaxiales, los que se basaron en el método A, descrito en la norma ASTM D 412 "*Propiedades de tensión de caucho vulcanizado y elastómeros termoplásticos*" [2, 28], que propone especímenes de diferentes dimensiones como se muestra en la figura 4.2.

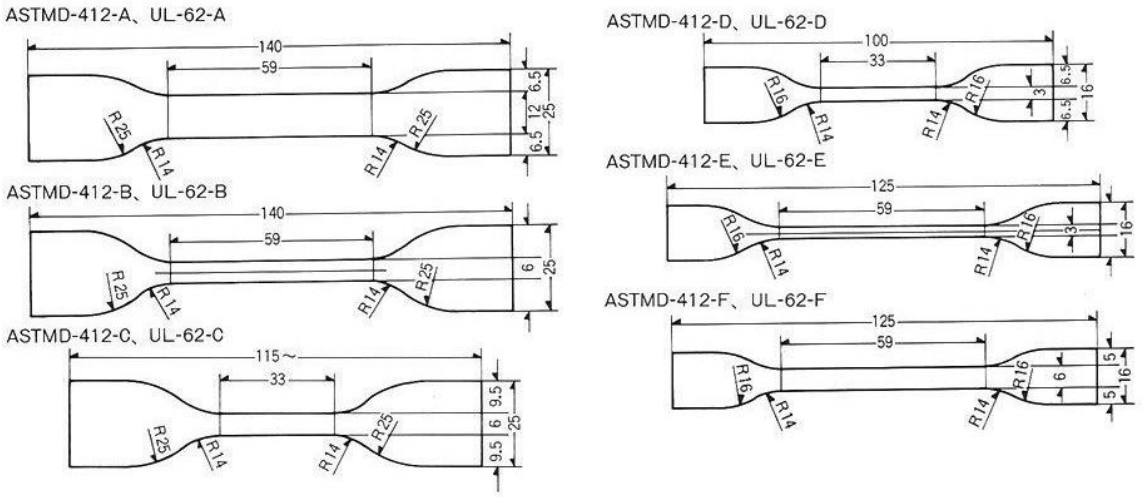


Fig. 4.2 Tipos de especímenes (método de ensayo A, norma ASTM D412) [3].

Se seleccionó al espécimen tipo D (Fig. 4.3) como sujeto de pruebas ya que la distancia entre marcas, dentro de la sección homogénea, era la máxima en comparación a los demás especímenes (25 mm de distancia entre centros de marca, Fig. 4.3). Además el espesor de espécimen se fijó en 3 mm (espesor máximo permitido por la norma) [2].

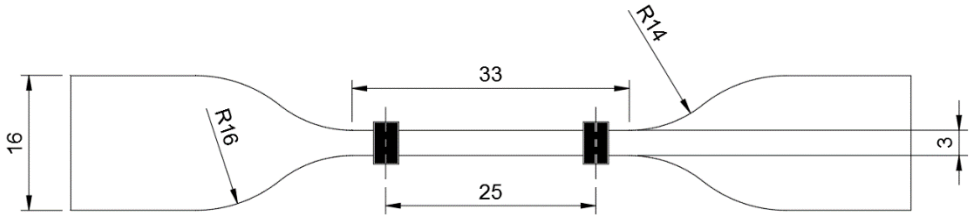


Fig. 4.3 Medidas del espécimen tipo D en milímetros [3].

4.1.1. Fabricación de especímenes

Para obtener la geometría requerida por los especímenes se optó diseñar el molde en el programa de cómputo Autodesk Fusion 360 (Fig. 4.4) y por fabricarlo en acrílico para vaciar en él el material. Para cumplir con el espesor dictado por la norma se utilizaron dos placas de acrílico de 3 mm de espesor, la primera se utilizó como base del molde, mientras que la segunda contenía los patrones

de los especímenes para cumplir con la geometría del tipo D. Ambas placas se manufacturaron por corte láser y posteriormente se fijaron con *AD-CRYL* (Fig. 4.5).

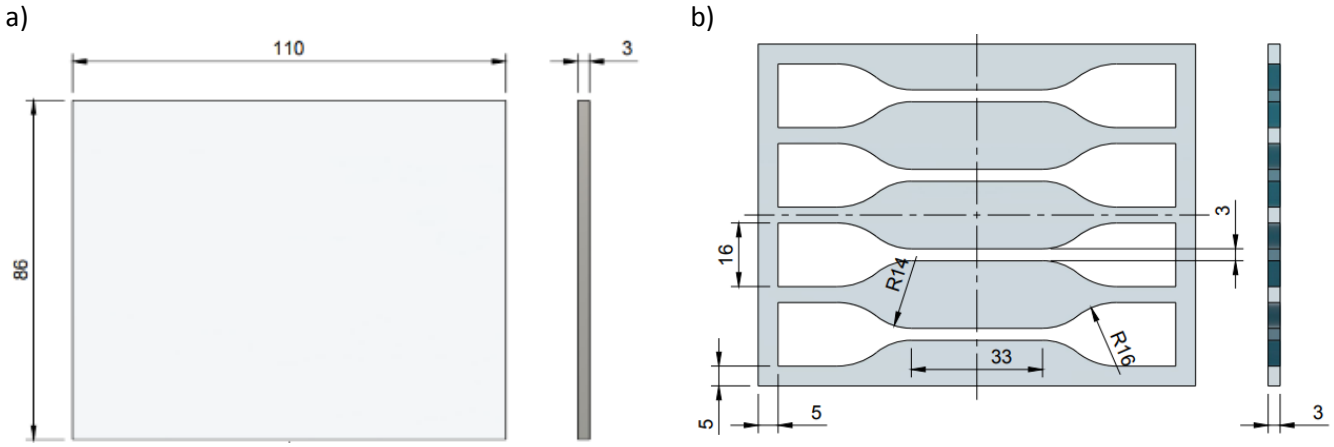


Fig. 4.4 Modelo CAD del molde para el espécimen D: a) Parte inferior del molde de vaciado, b) Parte superior del molde de vaciado (diseño realizado en licencia estudiantil de Autodesk Fusion 360). Todas las cotas están en milímetros.



Fig. 4.5 Molde de vaciado para especímenes.

La hoja técnica del material indica que la mezcla de material por parte A y parte B debe estar compuesta uno a uno de peso o volumen (1A:1B). Por lo tanto la cantidad de material mezclado necesario por lote (4 especímenes por lote) en peso se calculó a partir de volumen total por lote (suma del volumen de los 4 especímenes, obtenida con Autodesk Fusion 360) y el volumen específico del material (registrado en la hoja técnica) [34].

Volumen de material por lote (4 especímenes) **Volumen específico (Ecoflex 00-30)**

$$V = 11.213727[cm^3] \qquad v = 26\left[\frac{in^3}{lb}\right]$$

De la relación entre volumen específico y densidad $v = \frac{1}{\rho}$ es posible obtener directamente el valor de densidad $\rho = \frac{1}{26}\left[\frac{lb}{in^3}\right] = \frac{1}{26} \times 27.6799\left[\frac{g}{cm^3}\right] = 1.06461\left[\frac{g}{cm^3}\right]$

Por lo tanto la mezcla necesaria en peso por cada lote es

$$Peso = 1.06461\left[\frac{g}{cm^3}\right] \times 11.214[cm^3]$$

$$Peso = 11.9385 \approx 12\ [g]$$

Para vaciar las partes que componen la mezcla se decidió utilizar un recipiente pequeño cuyo peso es de 18 g, mientras que a cada parte se le agregó un gramo de material, esto con el fin de que se tuviera suficiente material para vaciar en el molde.



Fig. 4.6 Medición de Parte A: 7 gramos para la mezcla de Ecoflex 00-30.

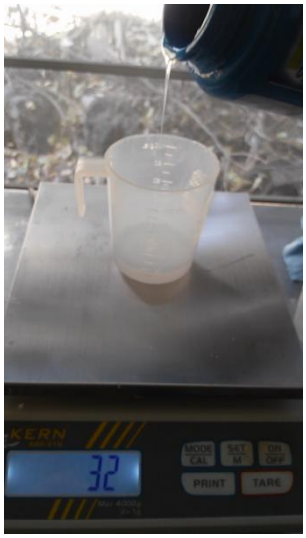


Fig. 4.7 Medición de Parte B: 7 gramos para la mezcla de Ecoflex 00-30 (en total 18 gramos).

Una vez pesado el material se procedió a mezclarlo alrededor de 3 minutos (Fig.4.8) para posteriormente colocarlo en una cámara de vacío V400A - KLM GmbH - *Vacuum Chamber*, con el fin de retirar el aire contenido al momento de realizar la mezcla (Fig. 4.9 - 4.10).

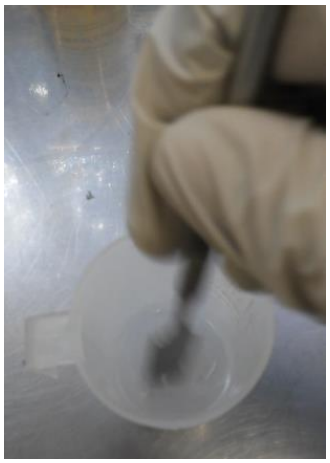


Fig. 4.8 Mezclado de Parte A y B



Fig. 4.9 Cámara de vacío V400A – KLM GmbH.



Fig. 4.10 Desgasificación de la mezcla

Posteriormente la mezcla se vacío en el molde de acrílico (Fig. 4.11), para comenzar el proceso de curado a temperatura ambiente. Una vez curado el material los especímenes fueron marcados y extraídos del molde para poder ser sometidos al ensayo de tracción (Fig. 4.12).



Fig. 4.11 Vaciado de mezcla en el molde (especímenes para el ensayo de tracción tipo D).



Fig. 4.12 Espécimen tipo D curado y marcado previamente, distancia entre marcas 25 mm.

4.1.2. Realización de ensayos mecánicos

Los ensayos se llevaron a cabo en un marco electromecánico de ensayo universal Shimadzu AGS-X Series con capacidad máxima de 50 kN (Fig. 4.13) [26]. Para la opción de sujeción se optó por mordazas por rodillo (Fig.4.14) [28].



Fig. 4.13 Marco electromecánico de ensayo universal Shimadzu AGS-X Series 50 kN [31].



Fig. 4.14 Mordazas por rodillo.

En cuanto a la selección de la celda de carga se realizó el siguiente cálculo a partir de los datos provistos por el fabricante (Tabla 4.1):

Tabla 4.1 Descripción técnica del material Ecoflex 00-30.

Propiedad	Dato del fabricante
Resistencia a la tracción	200 psi
Módulo de elasticidad (E)	10 psi
Elongación %	900%

De la definición de esfuerzo nominal, es posible calcular la fuerza máxima necesaria para llevar a fractura el material:

$$\sigma_{RT} = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (41) \qquad \rightarrow \qquad F_{max} = \sigma_{RT} \cdot A_0 \quad (42)$$

$$\sigma_{RT} = 200\ [psi]$$

Realizando la conversión de $[psi]$ a $[Pa]$

$$1\ [psi] = 6894.76\ [Pa] \qquad \rightarrow \qquad \sigma_{RT} = 1\,378\,952\ [Pa]$$

A partir de las medidas del espécimen seleccionado se sabe que el ancho de la sección homogénea es igual a $3\ [mm]$, además el espesor se fijó igual en $3\ [mm]$, por lo tanto el área de dicha sección es

$$A_0 = (3 \times 10^{-3})(3 \times 10^{-3}) = 9 \times 10^{-6}\ [m^2]$$

Finalmente es posible calcular la fuerza máxima necesaria para fracturar el material:

$$F_{max} = (1\,378\,952\ [Pa]) \cdot (9 \times 10^{-6}\ [m^2])$$

$$F_{max} = 12.41\ [N]$$

A partir de este valor se consideró utilizar la celda de carga de 50 [N]; sin embargo, las mordazas seleccionadas no eran compatibles con dicha celda debido a su tamaño, por lo tanto se decidió utilizar la celda de carga de 500 [N] para realizar los ensayos (Fig. 4.15).



Fig. 4.15 Espécimen tipo D ensayado a una velocidad de 500 mm/min

La norma estipula que para considerar como válidos a los datos obtenidos mediante los ensayos es necesario que cinco de todos los especímenes ensayados presenten falla dentro de la zona delimitada por las marcas previamente colocadas [2]. Cumpliendo dicho requerimiento, después de realizar 22 pruebas, los datos de las pruebas 11, 12, 16, 17 y 22 se consideraron como válidos (Fig. 4.16). Los datos reportados por la máquina no toman en cuenta las marcas de la sección homogénea ya que no se encontró una tinta adecuada para el registro del video extensómetro, por lo tanto los datos de desplazamiento fueron generados considerando el largo total del espécimen (100 mm).

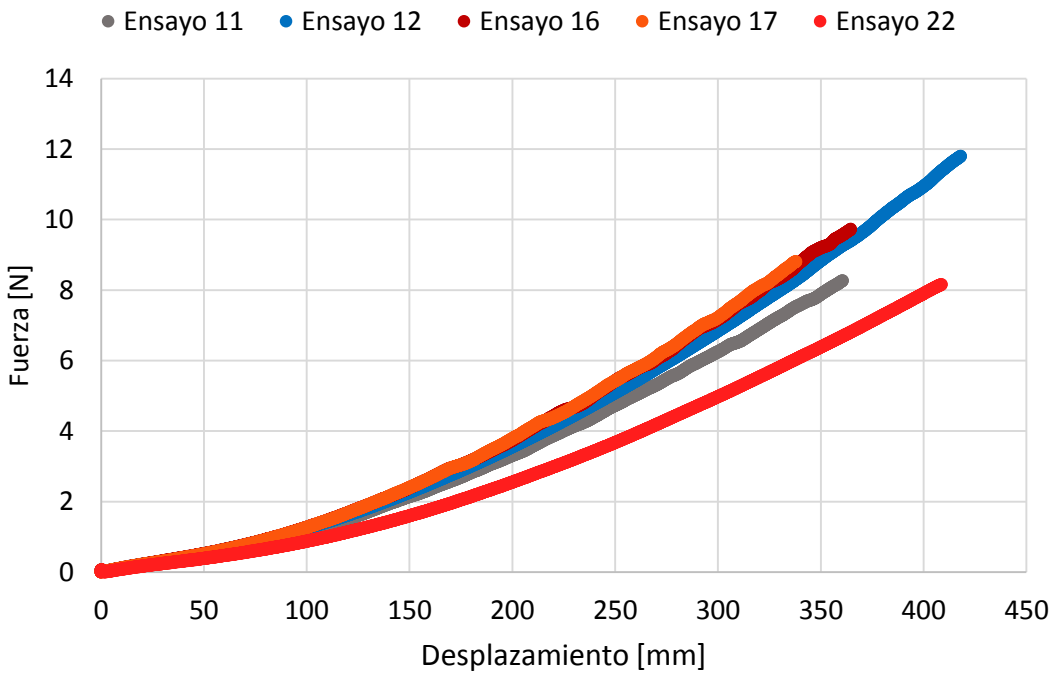


Fig. 4.16 Resultados obtenidos a partir de los ensayos experimentales

Una vez obtenidos los datos experimentales, el siguiente paso fue la selección del modelo constitutivo.

4.2. Modelo constitutivo para el Ecoflex 00-30

Este trabajo está basado en la teoría fenomenológica de Rivlin, es decir se considera al material como incompresible e isotrópico, por lo tanto sólo se utilizarán modelos constitutivos que estén en término de los invariantes de deformación; los modelos seleccionados para caracterizar al Ecoflex 00-30 fueron el modelo de Gent (ecuación 38) y el modelo de Yeoh (ecuación 37) seleccionados por su buena predicción en perfiles complejos de deformación y los parámetros a definir son μ, J_m y C_{10}, C_{20}, C_{30} respectivamente.

4.2.1. Procesamiento de datos experimentales

Los datos experimentales obtenidos a partir del ensayo de tracción están en términos de fuerza y desplazamiento, mientras que los modelos constitutivos para materiales hiperelásticos se encuentran en términos de esfuerzo verdadero y elongación, por lo tanto es necesario procesar dichos datos experimentales para poder realizar el cálculo de los parámetros correspondientes al modelo.

Primero se debe transformar las fuerzas y desplazamientos a esfuerzos y deformaciones ingenieriles

$$s = \frac{F}{A_0} \quad (43) \qquad e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (44)$$

A partir de la deformación ingenieril es posible obtener la elongación, que se define como longitud actual entre longitud inicial:

$$\lambda = \frac{l}{l_0} \quad (45)$$

Y con base en la ecuación 44, es posible reescribir a la elongación en término de la deformación ingenieril:

$$\lambda = 1 + e \quad (46)$$

Por otro lado el esfuerzo verdadero o de Cauchy está definido como la fuerza actual entre el área actual (ecuación 47), mientras que la deformación verdadera (ecuación 49) se define a partir de una deformación instantánea (ecuación 48), e involucrando a las ecuaciones 45 y 46 es posible reescribirla en términos de la deformación ingenieril (ecuación 50).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (47)$$

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (48)$$

$$\varepsilon = \int_{l_0}^{l} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (49)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (50)$$

Aunque no se conocen los valores de área para cada fuerza, al haber realizado la consideración de que el material es incompresible es posible decir que el volumen siempre es constante, por lo tanto es posible afirmar que el volumen inicial es igual al volumen actual (ecuación 51):

$$V_0 = V \quad (51)$$

Y definiendo al volumen como área por altura se obtiene la ecuación 52:

$$A_0 \cdot l_0 = A \cdot l \quad (52)$$

Entonces es posible obtener el área actual como una relación entre longitud inicial y actual y área inicial (ecuación 53), misma que es posible sustituir directamente en el esfuerzo verdadero (ecuación 47) dando como resultado la ecuación 54.

$$\frac{1}{A} = \frac{l}{A_0 l_0} \quad (53)$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{l}{l_0} \tag{54}$$

Finalmente es posible reescribir al esfuerzo verdadero en función de los esfuerzos y deformaciones ingenieriles (ecuación 55).

$$\sigma = s(1 + e) \tag{55}$$

Una vez procesados los datos experimentales es posible obtener la relación entre la función de energía de deformación (ecuaciones 37 y 38) y el esfuerzo verdadero, a partir de la ecuación 26:

Esfuerzo verdadero

Modelo de Gent
$$\sigma_{Gent} = -\frac{\mu J_m(\lambda^3 - 1)}{\lambda(I_1 - J_m - 3)} \tag{56}$$

Modelo de Yeoh
$$\sigma_{Yeoh} = 2\left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda}\right)(C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3) + 3C_{30}(I_1 - 3)^2 \tag{57}$$

Al tratarse de un ensayo uniaxial de tracción, el tensor gradiente de deformación $\boldsymbol{F}$ estaría definido de la siguiente manera (ecuación 58):

$$\boldsymbol{F}: \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \tag{58}$$

En el que la elongación λ_1 sería conocida ($\lambda_1 \to \lambda$), si se toma a la primera dirección como la dirección de tracción, mientras que las contracciones en las direcciones 2 y 3 son desconocidas (ecuación 59); sin embargo, retomando la consideración de isotropía (las propiedades mecánicas y térmicas son iguales en todas direcciones), es posible decir que las contracciones λ_2 y $\lambda_3$son iguales (ecuación 60):

$$\boldsymbol{F}: \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \tag{59}$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 \tag{60}$$

Y con ayuda de la consideración de incompresibilidad, es posible definir a cualquiera de las contracciones en términos de la única elongación conocida λ, si un material es incompresible entonces el determinante del tensor gradiente de deformación es igual a 1:

$$\det(\boldsymbol{F}) = 1 \tag{61}$$

$$\det(\boldsymbol{F}) = \lambda\, \lambda_2 \lambda_3 \tag{62}$$

Utilizando la condición de la ecuación 60 en la ecuación 62 se tiene:

$$\lambda\,\lambda_2\lambda_2 = \lambda\,\lambda_2^2 = 1 \tag{63}$$

A partir de la ecuación 63 es posible reescribir la contracción λ_2 en términos de la única elongación conocida por lo tanto ambas contracciones se definen como:

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \tag{64}$$

Ahora es posible definir a los invariantes de deformación (ecuaciones 18-20) para el ensayo de tracción:

$$I_1 = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} \tag{65}$$

$$I_2 = 2\lambda + \frac{1}{\lambda^2} \tag{66}$$

$$I_3 = 1 \tag{67}$$

4.2.2. Comprobación de modelos reportados

Antes de realizar el cálculo de parámetros para los modelos, se comprobó la validez de las constantes de modelos previamente reportados; por lo tanto se calculó la curva promedio con el fin de obtener valores representativos del ensayo de tracción (dicho cálculo se realizó en un programa desarrollado y proporcionado por el M. I. Luis Eduardo Sánchez Balanzar). Los valores promedio obtenidos fueron procesados para obtener los datos de esfuerzo verdadero y elongación (Fig. 4.17).

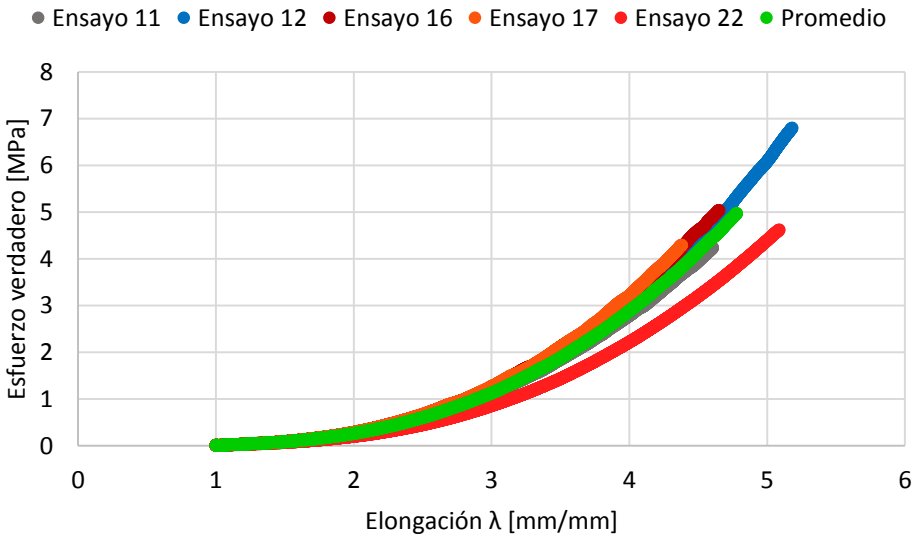


Fig. 4.17 Curva promedio, gráfica verde: esfuerzo verdadero máximo 4.972 [MPa], elongación máxima 4.781 [mm/mm], tiempo de ensayo promedio 45.468 [s].

A partir del promedio de datos se realizaron ajustes de curva únicamente con los modelos reportados por Elsayed *et al*. (2014) [12], Steck *et al*. (2019) [35] y Shi *et al*. (2019) [30], (Tabla 4.2 y Fig. 4.18); en el caso de los modelos que reportan Steck *et al*. (2019) [35] solamente se tomaron en cuenta aquellos que consideran al material como isotrópico e incompresible, ya que los modelos compresibles que reportan se basan en una formulación distinta; para el caso del modelo de Ogden reportado por Moseley *et al*. (2015) [27], no se cuenta con suficiente información para realizar el ajuste, pues no está especificado ni el nivel de anisotropía ni si se considera isotrópico, además de que tampoco se especifica el nivel de compresibilidad del material, lo que impide generar los datos apropiados.

Tabla 4.2 Modelos y constantes reportados que caracterizan el Ecoflex 00-30 [12, 30, 35].

Elsayed *et al*.	**Steck *et al*.**				**Shi *et al*.**
Ecoflex 00-30 (Modelo de Yeoh)	**Modelo de Gent**	**Modelo de Mooney-Rivlin**	**Modelo de Yeoh**	**Modelo de Ogden**	**Modelo de Mooney-Rivlin**
$\boldsymbol{C_{10} = 5072\ [Pa]}$ $\boldsymbol{C_{20} = -331[Pa]}$ $\boldsymbol{C_{30} = -15[Pa]}$	$\mu = 17\ [kPa]$ $J_m = 27$	$C_1 = 48\ [kPa]$ $C_2 = -152\ [kPa]$	$C_1 = 17\ [kPa]$ $C_2 = -0.2\ [kPa]$ $C_3 = 0.023\ [kPa]$	$\mu_1 = 22\ [kPa]$ $\mu_2 = 0.4\ [kPa]$ $\mu_3 = -2\ [kPa]$ $\alpha_1 = 1.3$ $\alpha_2 = 5$ $\alpha_3 = -2$	$C_{10} = 1620.24\ [Pa]$ $C_{01} = 20\ 108.26\ [Pa]$ $C_{11} = 698.74\ [Pa]$

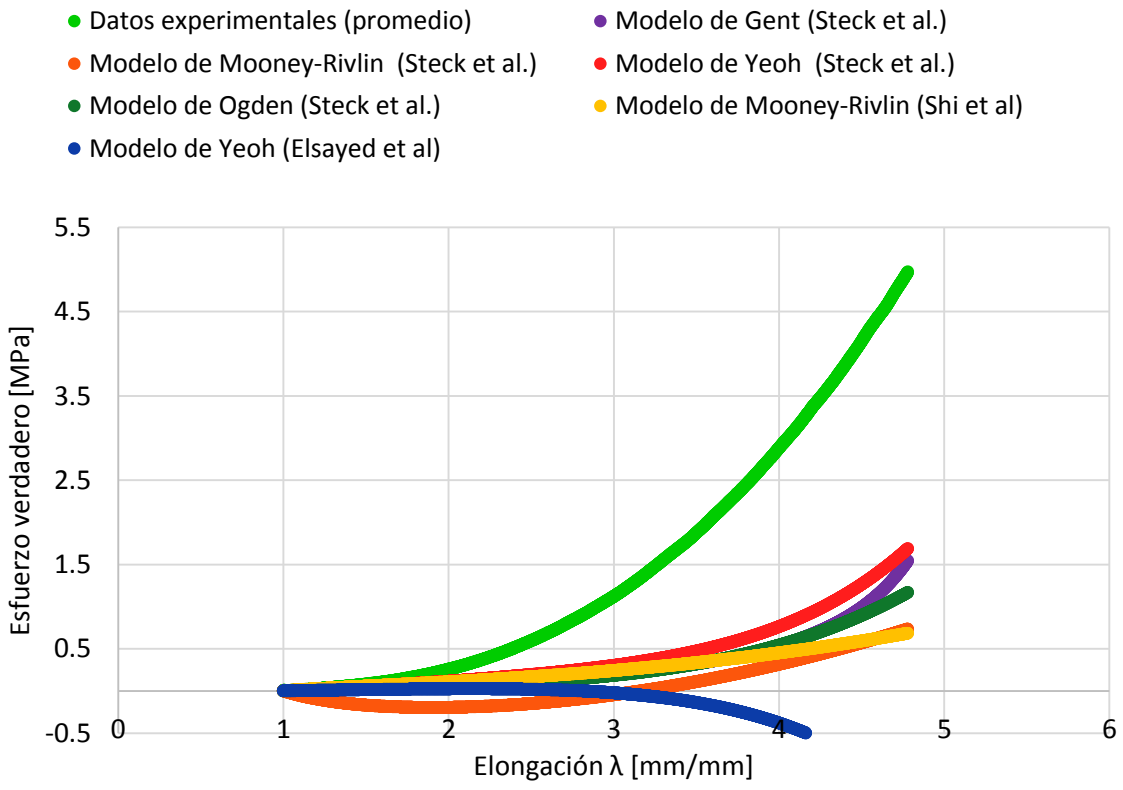


Fig. 4.18 Validación de modelos reportados por Elsayed *et al*. (2014), Steck *et al*. (2019) y Shi *et al*. (2019), para el Ecoflex 00-30 considerándolo como un material isotrópico e incompresible.

De acuerdo con los ajustes de curva realizados conforme a las constantes reportadas por Elsayed *et al*. (2014) [12], Steck *et al*. (2019) [35] y Shi *et al*. (2019) [30], es posible concluir que ninguno de los valores de esfuerzo predichos por los modelos coinciden y ni siquiera se encuentran cerca del valor promedio experimental (Fig. 4.18). En cuanto al modelo de Ogden reportado por Moseley *et al* (2015) [27] al no contar con un ajuste de curva, no es posible afirmar nada, por lo que se procedió a realizar la simulación del ensayo de tracción (utilizando como espécimen de prueba una probeta tipo D con espesor de 3 mm), aplicando una fuerza de 9.359 [N] (fuerza máxima registrada en la curva promedio) en un lapso de 45.468 [s] (tiempo promedio). Para este análisis se utilizó el programa de cómputo con licencia académica ANSYS v19.0 Workbench, y se realizó un análisis estático estructural.

Tabla 4.3 Modelo de Ogden para modelar el comportamiento del Ecoflex 00-30 s en ANSYS (Moseley *et al*.) [27].

$$\begin{array}{lll} \mu_1 = 0.024361\ [MPa] & \alpha_1 = 1.7138 & D_1 = 3.2587\ \left[\frac{1}{MPa}\right] \\ \mu_2 = 6.6703 \times 10^{-5}\ [MPa] & \alpha_2 = 7.0679 & \\ \mu_3 = 4.5381 \times 10^{-4}\ [MPa] & \alpha_3 = -3.3659 & D_2 = D_3 = 0 \end{array}$$

Para realizar la simulación se utilizó una malla automática; sin embargo, la deformación en los elementos era demasiado grande y no se mostraba ningún resultado, por lo tanto se seccionó la probeta con el fin de mejorar la malla en zonas donde la geometría era compleja; a pesar de esto no fue posible simular el ensayo de tracción con las constantes reportadas en el trabajo de Moseley *et al*. (2015) [27]. Al desconocer las condiciones de ensayo (norma en la que se basaron los experimentos, medidas y espesor del espécimen y velocidad de ensayo), no es posible conocer la región bajo la que el material fue caracterizado y por ende no es posible validarlo bajo otras condiciones de ensayo.

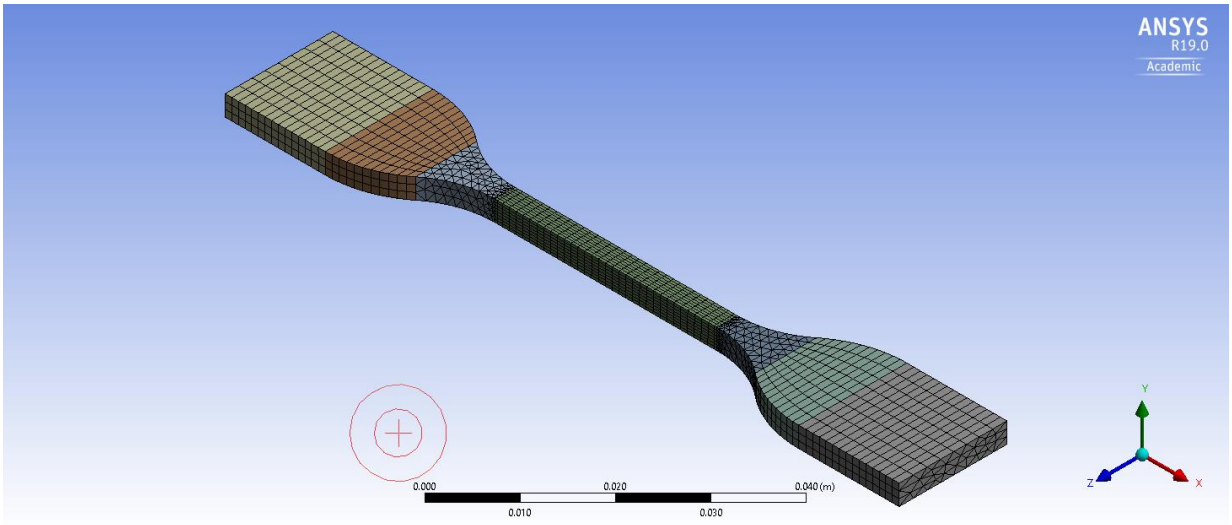


Fig. 4.19 Mallado final de la probeta para el modelo de Moseley, con mayor refinamiento en las zonas internas (obtenido de forma empírica).

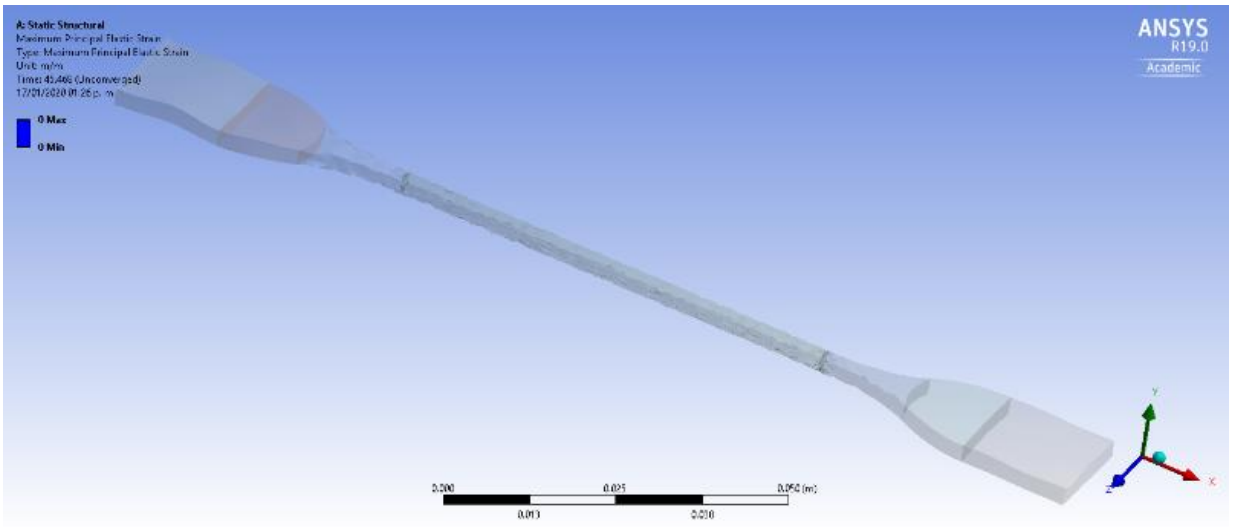


Fig. 4.20 Fallo en la simulación, debido a deformaciones inusuales en algunos elementos internos (dicho fallo no pudo resolverse aún con un refinamiento mayor de malla).

4.2.3. Algoritmo evolutivo para encontrar constantes del modelo constitutivo

Para obtener las constantes de cada modelo se utilizó como primera aproximación un algoritmo evolutivo [5]. A diferencia de un algoritmo genético, el algoritmo evolutivo no utiliza ningún operador de codificación ni cruza (Fig. 4.21).

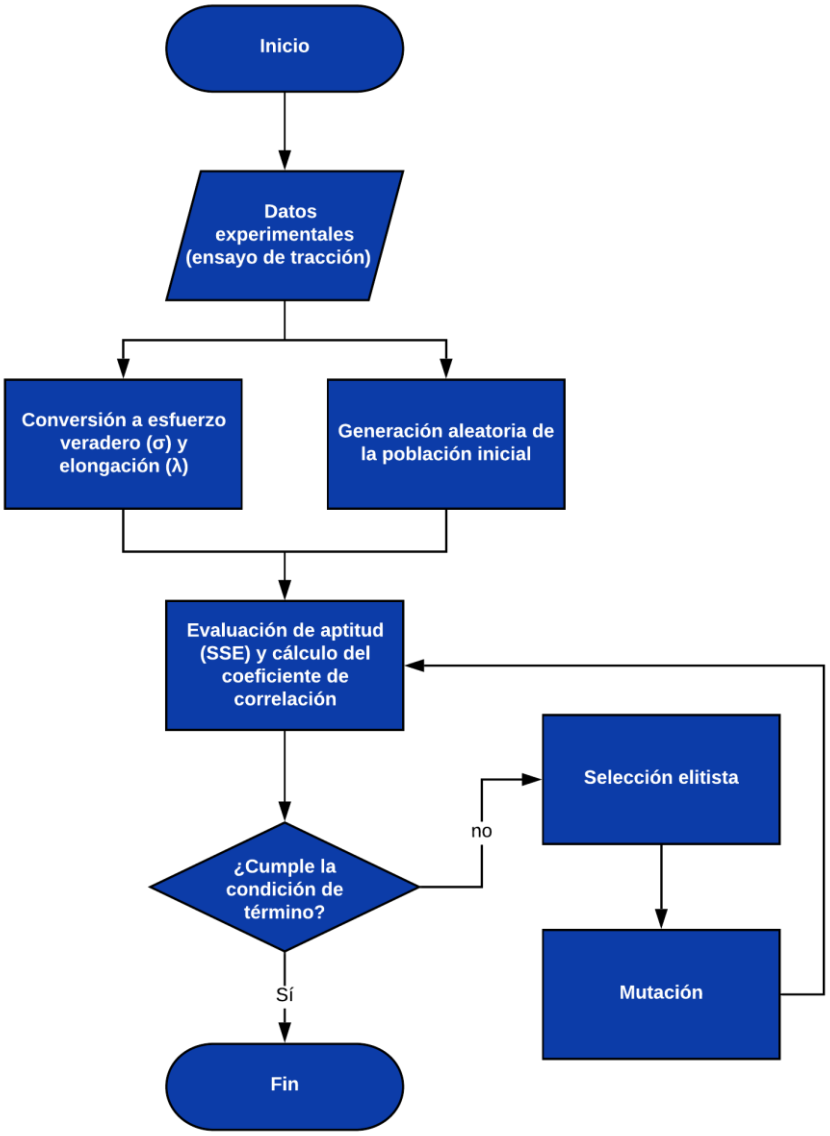


Fig. 4.21 Diagrama de flujo del algoritmo evolutivo implementado.

4.2.3.1. *Población inicial*

La población inicial en el algoritmo evolutivo fue obtenida de forma aleatoria, generando valores acotados por intervalos predefinidos, los que fueron: $0 < \mu < 200\,000$ y $0 < J_m < 1000$, en el caso del modelo de Gent y $0 < C_{10} < 100\,000$, $0 < C_{20} < 10\,000$ y $-100 < C_{30} < 0$ para el

modelo de Yeoh, estos intervalos fueron seleccionados como espacio de búsqueda ya que los individuos que se encontraban en dichos intervalos, presentaban un mejor acercamiento a la curva ideal y fueron determinados a partir de una primer ejecución con intervalos más amplios.

4.2.3.2. *Evaluación de aptitud y cálculo del coeficiente de correlación*

La evaluación de aptitud de los candidatos fue definida a partir de la discrepancia entre los resultados de esfuerzo verdadero obtenidos por el modelo y los resultados experimentales, mediante la suma de los cuadrados del error residual (SSE) [24]:

$$SSE = \sum_{i=1}^{N} (\sigma_{Experimental[i]} - \sigma_{Modelo[i]})^2 \tag{68}$$

Y para calcular el coeficiente de correlación se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (utilizando la función "*Correlation* [v1,v2]" del programa de cómputo Wolfram Mathematica [38], licencia estudiantil) comparando los valores de fuerza experimental y teórica (calculada a partir de las curvas predichas por los modelos), donde la fuerza teórica es igual al esfuerzo verdadero multiplicado por el área instantánea $F_T = \sigma \cdot A$, y es posible deducir a partir de la relación de volúmenes obtenida durante el procesamiento de datos experimentales (ecuación 52), el área instantánea como:

$$A = A_0 \frac{l_0}{l} \tag{69}$$

Sustituyendo al área instantánea y haciendo uso de la definición de elongación (ecuación 45), es posible reescribir a la fuerza teórica como:

$$F_T = \frac{A_0 \, \sigma}{\lambda} \tag{70}$$

4.2.3.3. *Selección de padres*

Para la selección de padres se optó por hacerlo de forma elitista, seleccionando a la cuarta mejor parte de la población, dicha selección se llevó a cabo tomando en cuenta a aquellos individuos con menor valor de SSE.

4.2.3.4. *Descendencia y nueva generación*

Para la obtención de la descendencia se mutaron los padres realizando un incremento o decremento aleatorio acotado por un intervalo para cada parámetro del modelo esto con el fin de variar la población pero sin afectar de manera drástica el espacio de búsqueda.

En cuanto a la obtención de la nueva generación, ésta se realizó de manera elitista pues los padres seleccionados ya formaban parte de la nueva generación, por lo que tres cuartas partes de la nueva generación son ocupadas por la descendencia.

4.2.3.5. *Condición de término*

Como condición de término se optó por terminar el ciclo de optimización al obtener la cuadragésima generación, considerando a esta última como solución óptima.

Tabla 4.4 Resultados del algoritmo evolutivo 1ª Generación (Modelo de Gent y Yeoh).

Ensayo	Parámetros	Error SSE	Coeficiente de Correlación
11	$\mu = 128\,623\ [Pa]$	1.63103×10^{14}	0.99197
	$J_m = 64.2419$		
	$C_{10} = 26\,722\ [Pa]$	1.12258×10^{13}	0.999484
	$C_{20} = 3597.85\ [Pa]$		
	$C_{30} = -60.5287\ [Pa]$		
12	$\mu = 167\,927\ [Pa]$	8.15736×10^{14}	0.986181
	$J_m = 114.049$		
	$C_{10} = 15\,904.2\ [Pa]$	3.27104×10^{13}	0.999202
	$C_{20} = 3744.72\ [Pa]$		
	$C_{30} = -39.6523\ [Pa]$		
16	$\mu = 139\,976\ [Pa]$	3.20665×10^{14}	0.994695
	$J_m = 38.4493$		
	$C_{10} = 15\,904.2\ [Pa]$	1.03203×10^{14}	0.998116
	$C_{20} = 3744.72\ [Pa]$		
	$C_{30} = -39.6523\ [Pa]$		
17	$\mu = 139\,976\ [Pa]$	1.61299×10^{14}	0.995431
	$J_m = 38.4493$		
	$C_{10} = 33\,951.6\ [Pa]$	4.53924×10^{13}	0.996814
	$C_{20} = 4333.79\ [Pa]$		
	$C_{30} = -90.3078\ [Pa]$		
22	$\mu = 115\,713\ [Pa]$	3.32161×10^{14}	0.995183
	$J_m = 54.2351$		
	$C_{10} = 35\,154.6\ [Pa]$	3.12276×10^{13}	0.999274
	$C_{20} = 1575.53\ [Pa]$		
	$C_{30} = -10.3356\ [Pa]$		

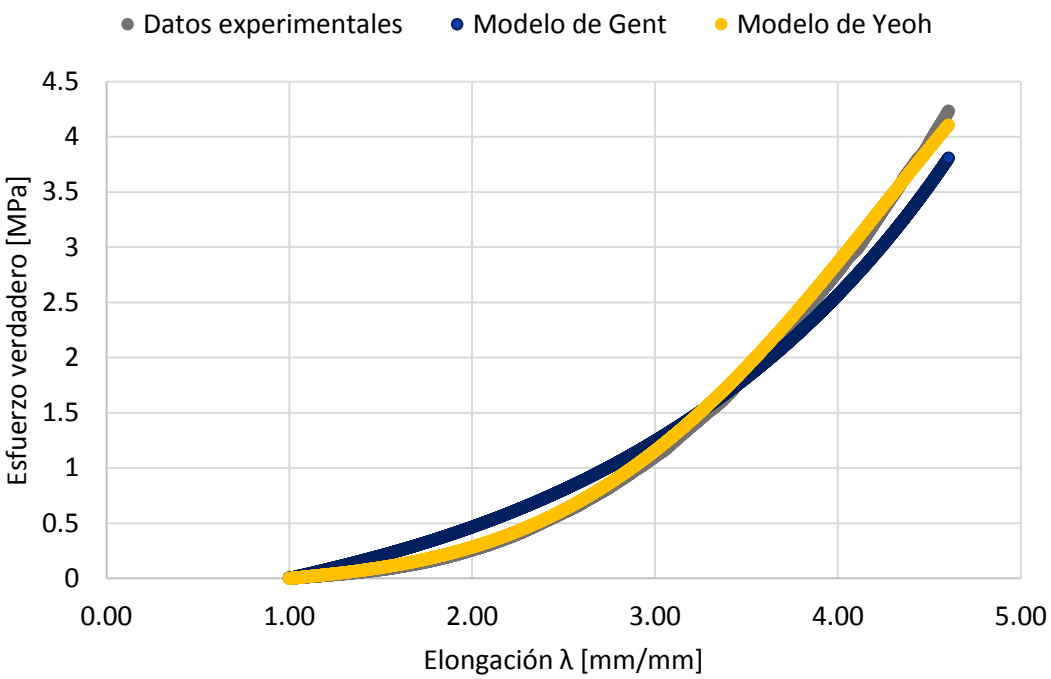


Fig. 4.22 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 11).

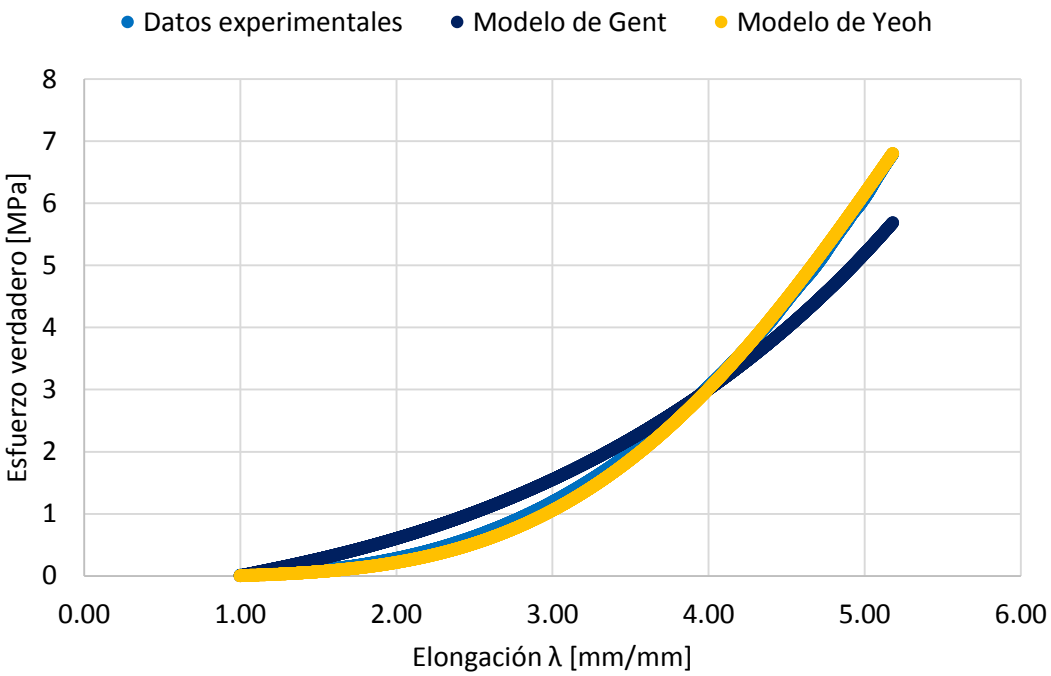


Fig. 4.23 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 12).

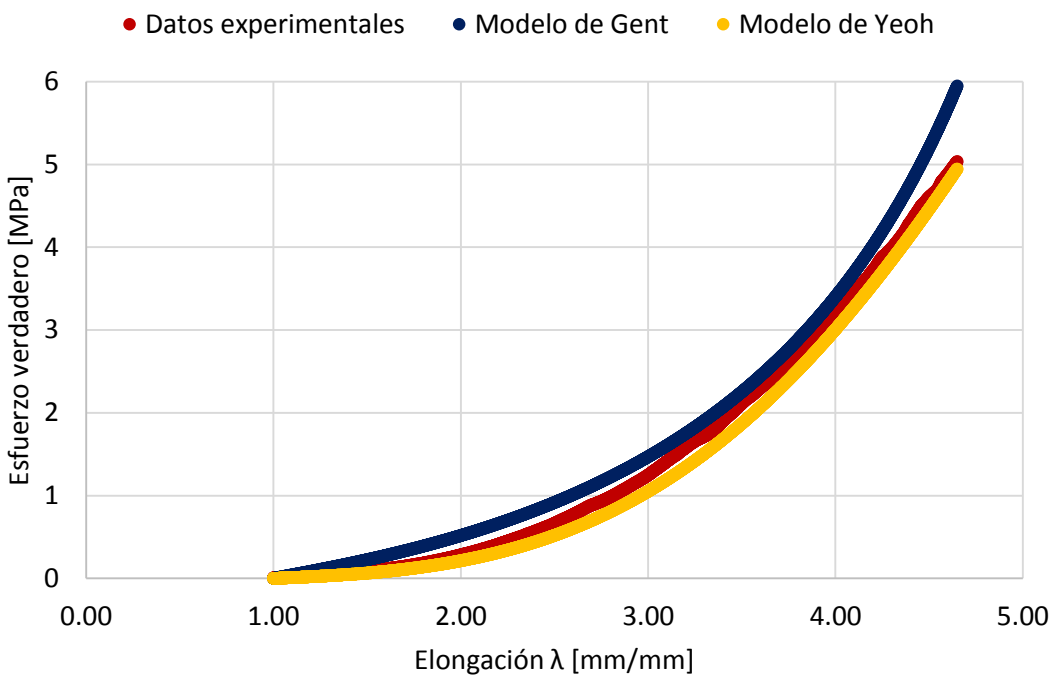


Fig. 4.24 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 16).

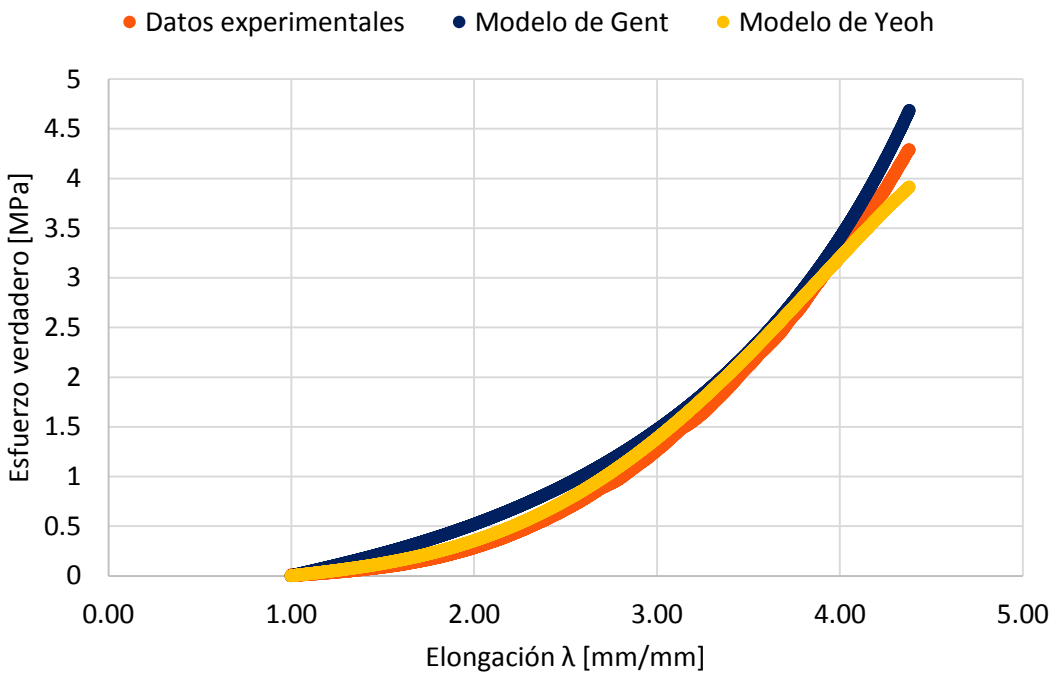


Fig. 4.25 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 17).

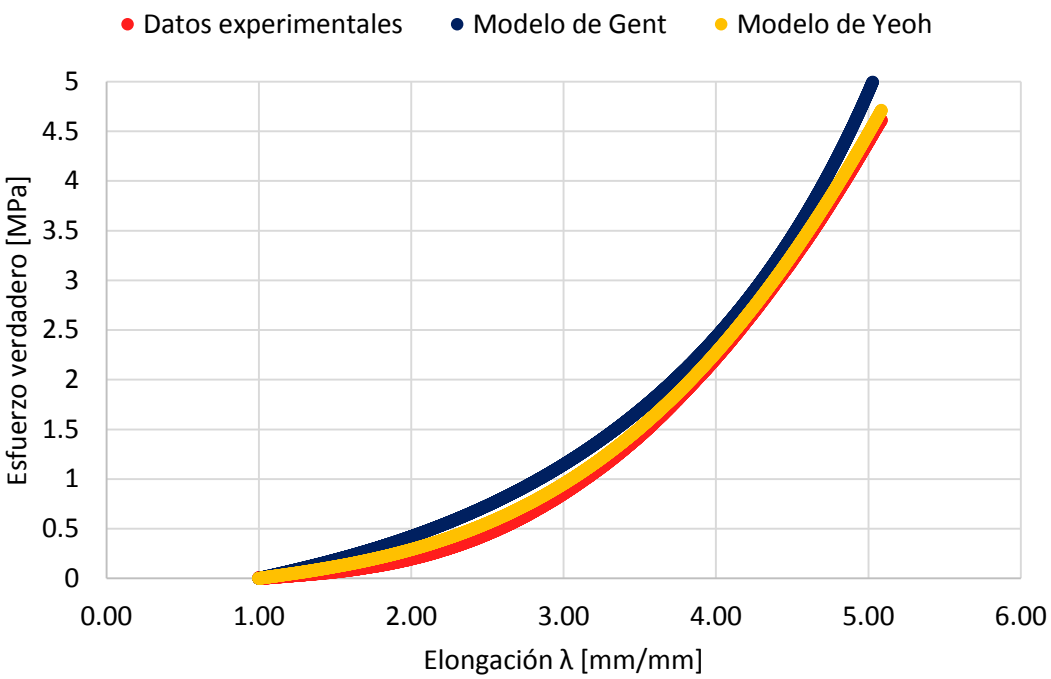


Fig. 4.26 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 22).

Tabla 4.5 Resultados del algoritmo evolutivo 40ª Generación (Modelo de Gent y Yeoh).

Ensayo	Parámetros	Error SSE	Coeficiente de Correlación
11	$\mu = 115\,915\ [Pa]$	5.34816×10^{13}	0.995343
	$J_m = 40.8848$		
	$C_{10} = 27\,284.9\ [Pa]$	1.0359×10^{12}	0.999863
	$C_{20} = 3168.49\ [Pa]$		
	$C_{30} = -43.7347\ [Pa]$		
12	$\mu = 167\,499\ [Pa]$	3.82771×10^{14}	0.993267
	$J_m = 73.0977$		
	$C_{10} = 25\,952.2\ [Pa]$	1.34874×10^{13}	0.999646
	$C_{20} = 3566.89\ [Pa]$		
	$C_{30} = -42.2601\ [Pa]$		
16	$\mu = 139\,769\ [Pa]$	9.71492×10^{13}	0.995333
	$J_m = 45.1638$		
	$C_{10} = 33\,120\ [Pa]$	2.16247×10^{12}	0.999733
	$C_{20} = 3268.58\ [Pa]$		
	$C_{30} = -36.2648\ [Pa]$		
17	$\mu = 125\,823\ [Pa]$	5.23893×10^{13}	0.995564
	$J_m = 36.3049$		
	$C_{10} = 28\,272.3\ [Pa]$	8.55152×10^{11}	0.999835
	$C_{20} = 3780.55\ [Pa]$		
	$C_{30} = -50.3926\ [Pa]$		

22	$\mu = 115\,762\ [Pa]$ $J_m = 63.2395$	1.64326×10^{14}	0.993919
	$C_{10} = 34\,233.4\ [Pa]$ $C_{20} = 1461.83\ [Pa]$ $C_{30} = -7.31077\ [Pa]$	1.41442×10^{13}	0.999188

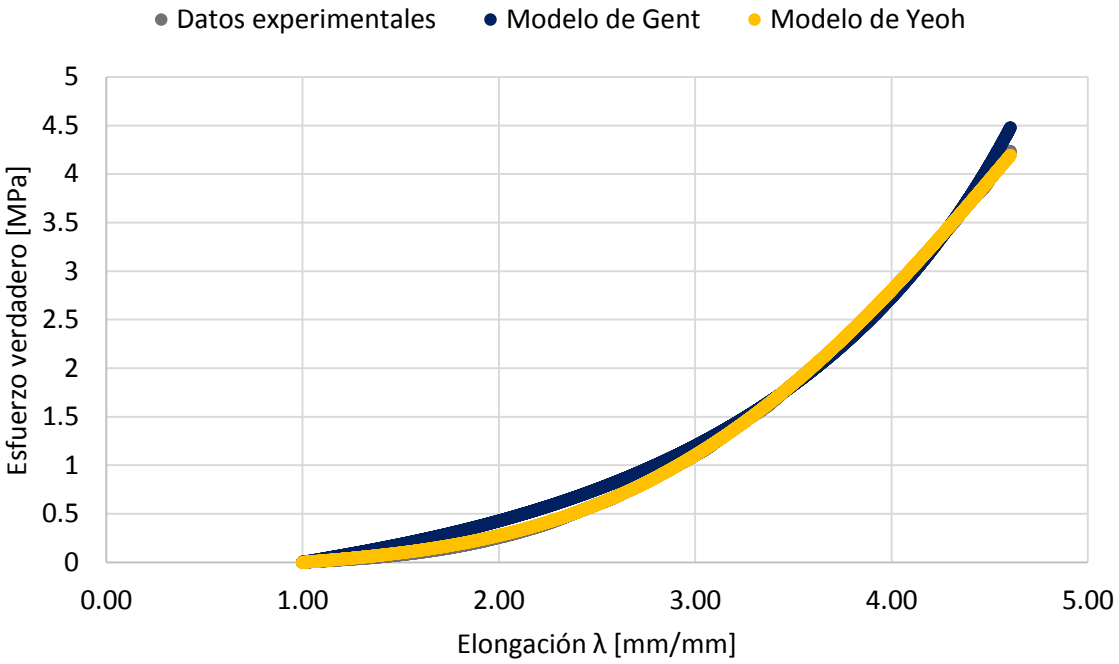


Fig. 4.27 Candidatos a solución óptima, 40ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 11).

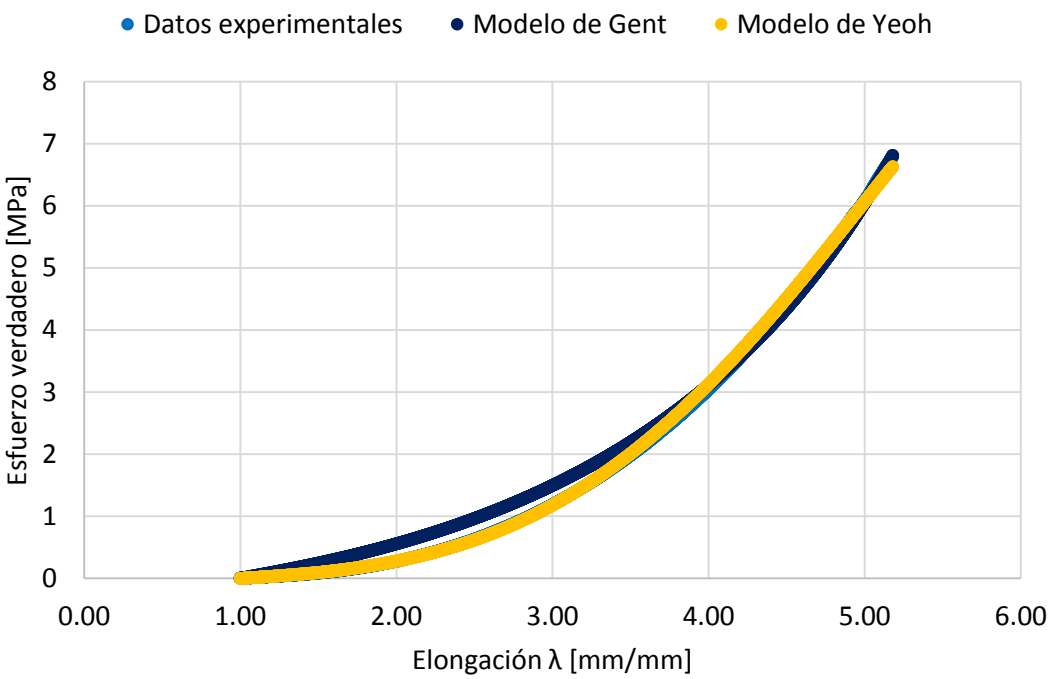


Fig. 4.28 Candidatos a solución óptima, 40ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 12).

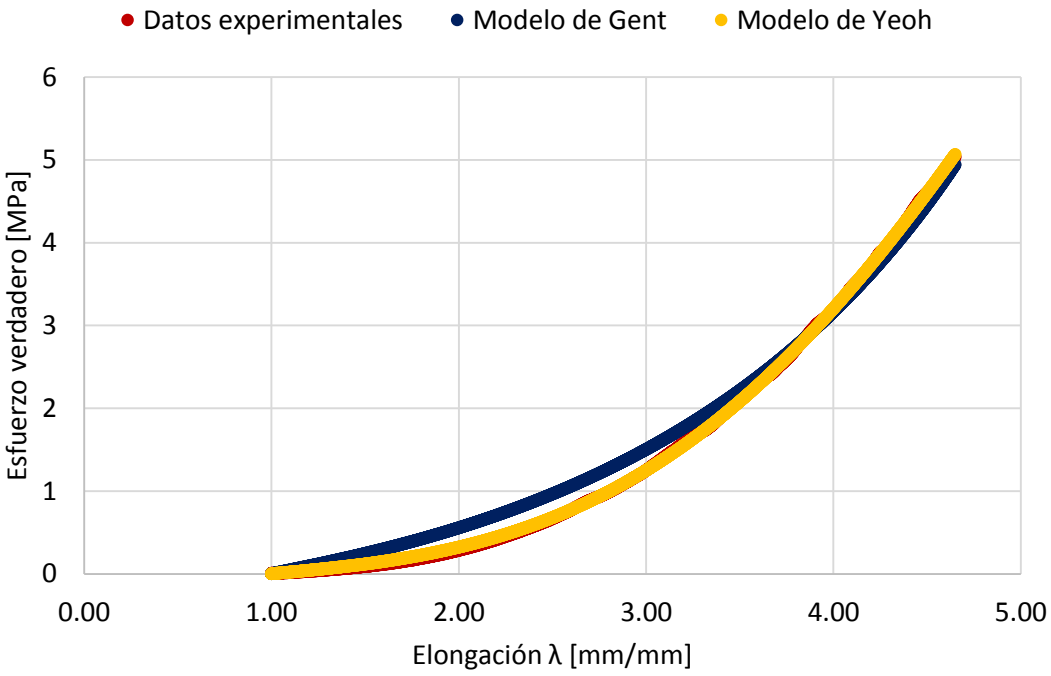


Fig. 4.29 Candidatos a solución óptima, 40ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 16).

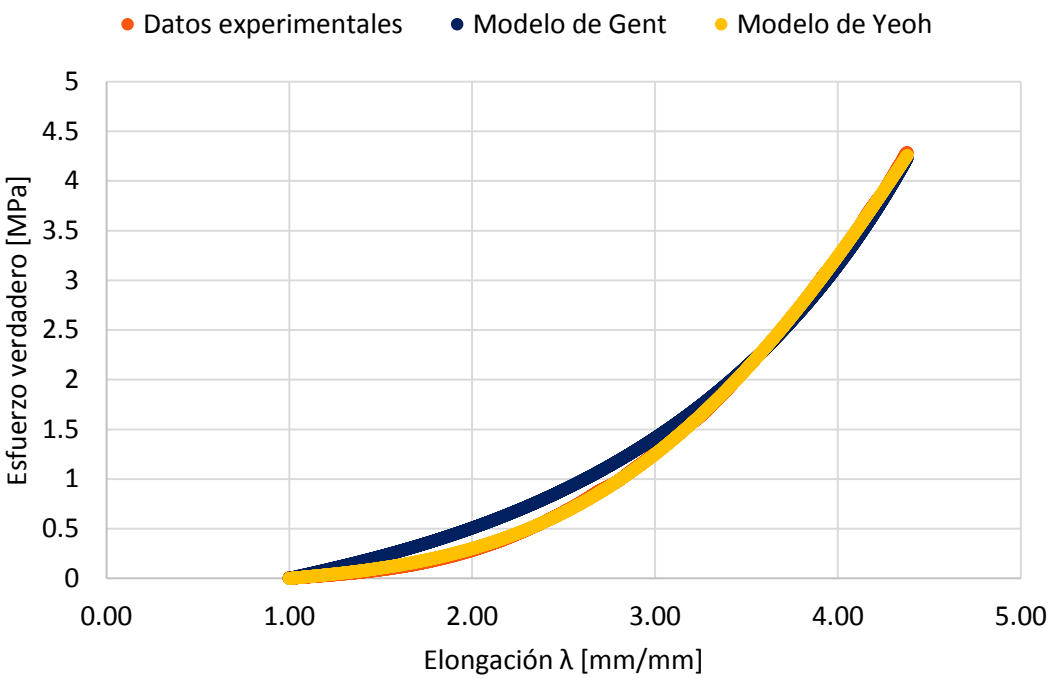


Fig. 4.30 Candidatos a solución óptima, 40ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 17).

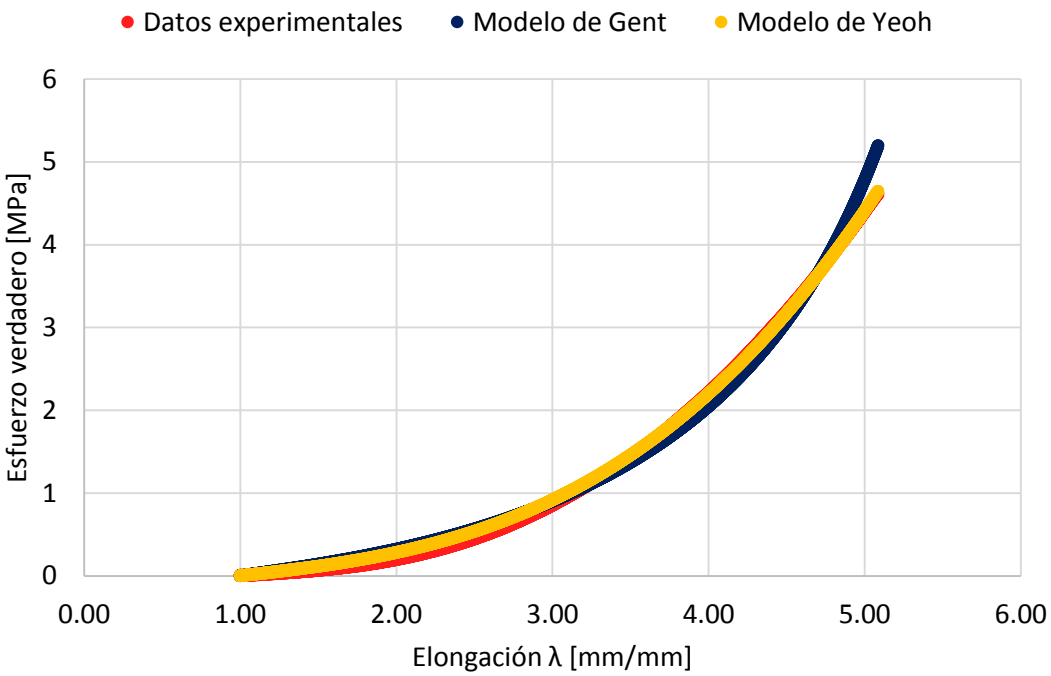


Fig. 4.31 Candidatos a solución óptima, 40ª generación del algoritmo evolutivo (Ensayo 22).

4.2.4. Algoritmo genético

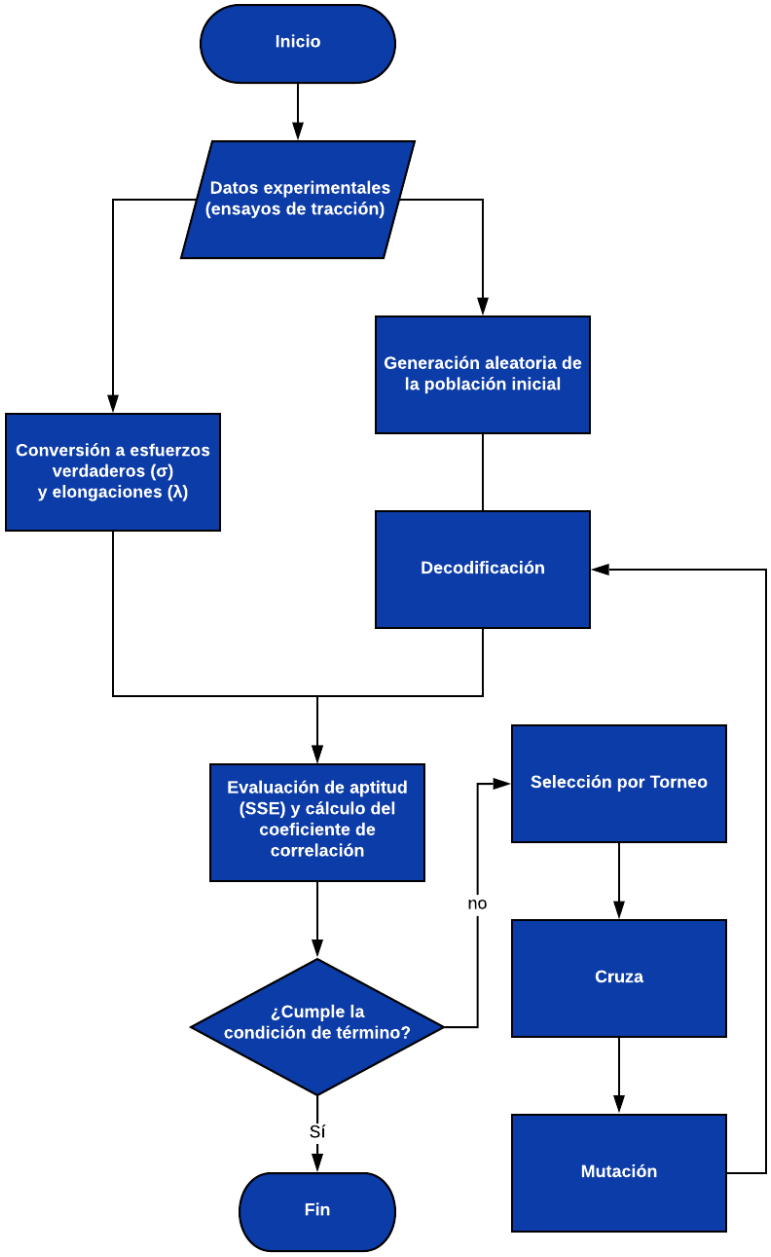


Fig. 4.32 Diagrama de flujo del algoritmo genético implementado.

4.2.4.1. *Codificación de los individuos*

Los individuos fueron codificados en binario y la longitud de los cromosomas se definió de 16 genes, cada candidato está compuesto por dos y tres cromosomas para el modelo de Gent y el modelo de Yeoh respectivamente.

Para codificar y decodificar los parámetros del modelo de Gent, se utilizó la función de morfogénesis formulada por Fernández *et al*. (2018) que relaciona los límites inferior (ϕ_{min}) y superior (ϕ_{max}) entre los que se puede encuentra el valor del parámetro, así como el número de genes (N) y el valor en decimal del cromosoma (b), lo que da como resultado al valor del parámetro (ϕ_i) [14].

$$\phi_i = \phi_{min} + \frac{b}{2^N - 1}(\phi_{max} - \phi_{min}) \tag{71}$$

4.2.4.2. *Población inicial*

Para la población inicial los cromosomas fueron generados de manera aleatoria, con 100 individuos por generación, donde los intervalos fueron $100\,000 < \mu < 160\,000$ y $30 < J_m < 80$, en el caso del modelo de Gent y $0 < C_{10} < 50\,000$, $0 < C_{20} < 5\,000$ y $-60 < C_{30} < 0$ para el modelo de Yeoh.

Individuo codificado	$0\,0\,1\,1\,1\,1\,1\,1\,0\,1\,0\,1\,0\,0\,1\,1$
Valor decimal del individuo	$16\,211$
Decodificación del individuo	$\phi_1 = 100\,000 + \frac{16211}{2^{16} - 1}(160\,000 - 100\,000)$ $\phi_1 = 114\,842$

4.2.4.3. *Evaluación de aptitud y cálculo del coeficiente de correlación*

Para la evaluación de aptitud y cálculo del coeficiente de correlación, se recurrió a las funciones previamente definidas en el algoritmo evolutivo.

4.2.4.4. *Selección de padres*

La selección de padres se basó en el método de Torneo, donde 4 individuos seleccionados de manera aleatoria competirían por parejas en primera instancia para posteriormente definir entre los dos individuos más aptos al que sería elegido como padre, la aptitud de los individuos quedó en función del error SSE, siendo el individuo con menor error el seleccionado; al igual que en el algoritmo evolutivo, se realizó una selección elitista, en el sentido en que los padres automáticamente eran colocados dentro de la nueva población.

4.2.4.5. *Cruza de individuos*

Para el operador de cruza, se utilizó el método de cruza en un punto; los padres fueron seleccionados de manera aleatoria al igual que el punto de cruza, cuyo valor se fijó entre 1 y 16.

4.2.4.6. *Mutación*

Para la mutación se utilizó mutación por intercambio y para no caer en una búsqueda aleatoria se decidió otorgar una probabilidad del 10% de mutación después de la cruza y una vez seleccionada la generación a mutar, cada cromosoma de la descendencia tenía 30% de probabilidad de mutar, se exentaron a los padres del proceso de mutación.

4.2.4.7. *Condición de término*

Para la condición de término se decidió utilizar dos condiciones, la condición de término por generaciones finitas y la condición de no tener cambio alguno en la población, con el fin de terminar el ciclo del algoritmo cuando cualquiera de las dos condiciones se cumpliera.

Tabla 4.6 Resultados del algoritmo genético 1ª Generación

Ensayo	Parámetros	Error SSE	Coeficiente de Correlación
11	$\mu = 122\,595\ [Pa]$	6.8248×10^{13}	0.982474
	$J_m = 45.4932$		
	$C_{10} = 20\,885.8\ [Pa]$	4.56351×10^{12}	0.991344
	$C_{20} = 3491.57\ [Pa]$		
	$C_{30} = -49.8778\ [Pa]$		
12	$\mu = 125\,718\ [Pa]$	1.48242×10^{14}	0.991837
	$J_m = 43.8985$		
	$C_{10} = 38\,016.3\ [Pa]$	5.06898×10^{13}	0.9871
	$C_{20} = 2620.51\ [Pa]$		
	$C_{30} = -25.1389\ [Pa]$		
16	$\mu = 127\,091\ [Pa]$	6.90383×10^{13}	0.988632
	$J_m = 38.5525$		
	$C_{10} = 27\,863\ [Pa]$	5.97116×10^{13}	0.996679
	$C_{20} = 3174.87\ [Pa]$		
	$C_{30} = -18.6734\ [Pa]$		
17	$\mu = 115\,973\ [Pa]$	4.35435×10^{13}	0.989926
	$J_m = 31.9889$		
	$C_{10} = 27\,863\ [Pa]$	1.47958×10^{13}	0.995992
	$C_{20} = 3174.87\ [Pa]$		
	$C_{30} = -18.6734\ [Pa]$		
22	$\mu = 110\,327\ [Pa]$	1.31458×10^{14}	0.975303
	$J_m = 64.0072$		
	$C_{10} = 11\,751\ [Pa]$	3.82523×10^{13}	0.989509
	$C_{20} = 3091.25\ [Pa]$		
	$C_{30} = -39.3289\ [Pa]$		

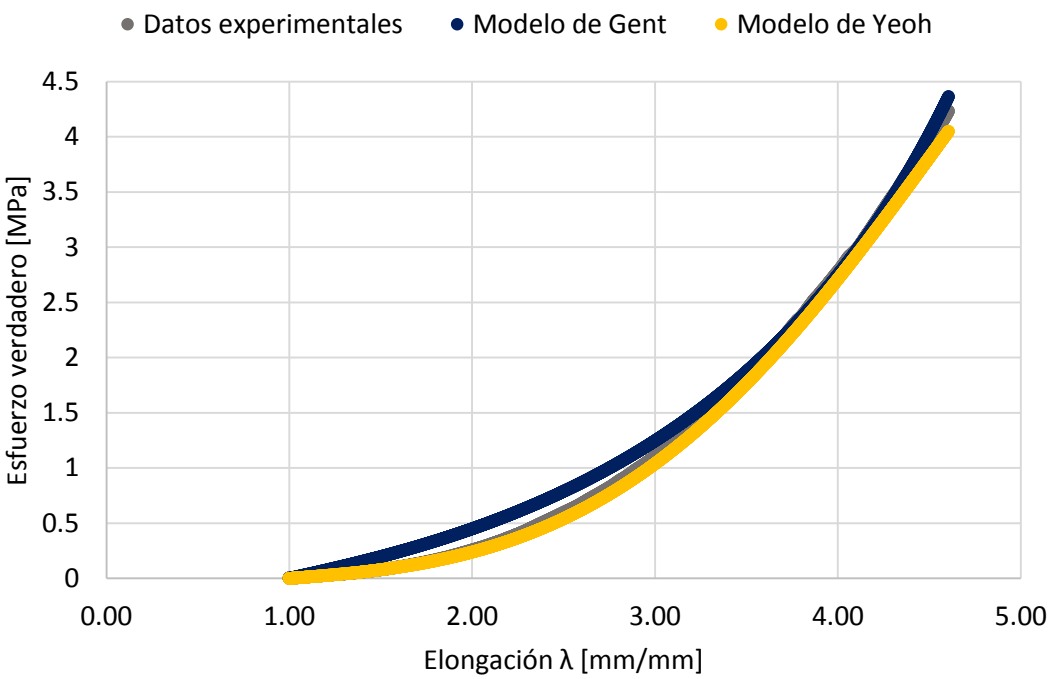


Fig. 4.33 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo genético (Ensayo 11).

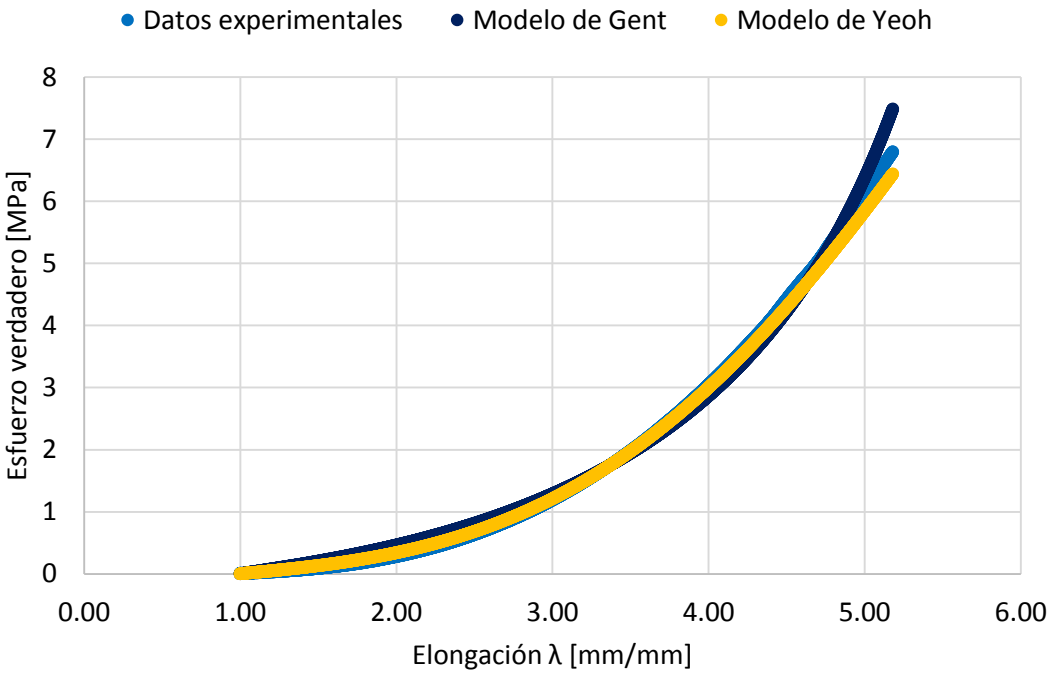


Fig. 4.34 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo genético (Ensayo 12).

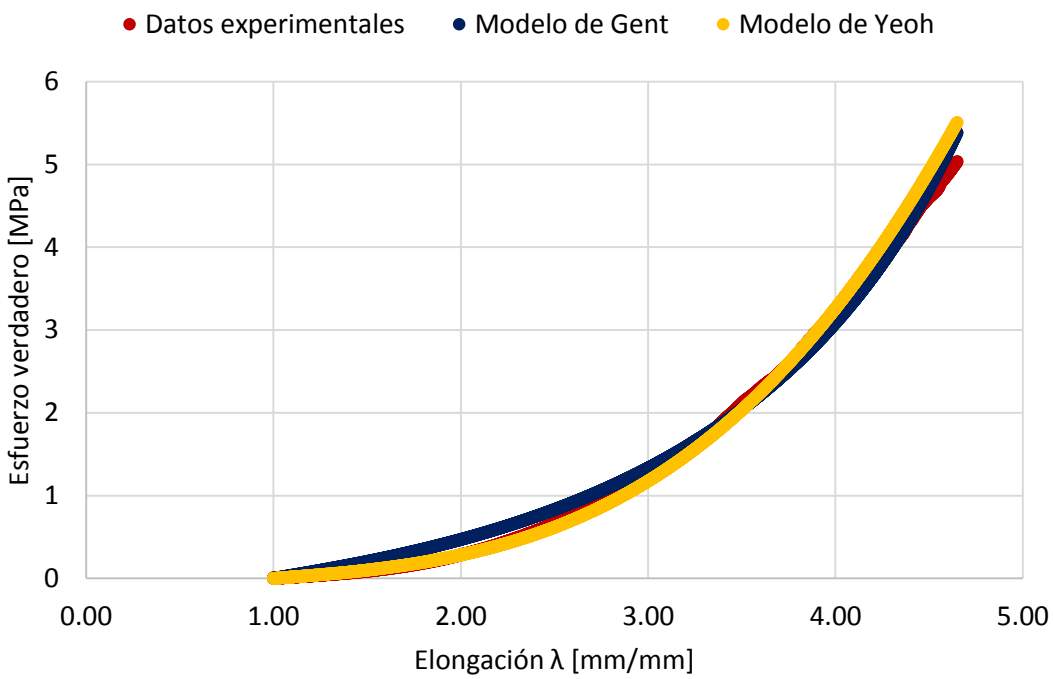


Fig. 4.35 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo genético (Ensayo 16).

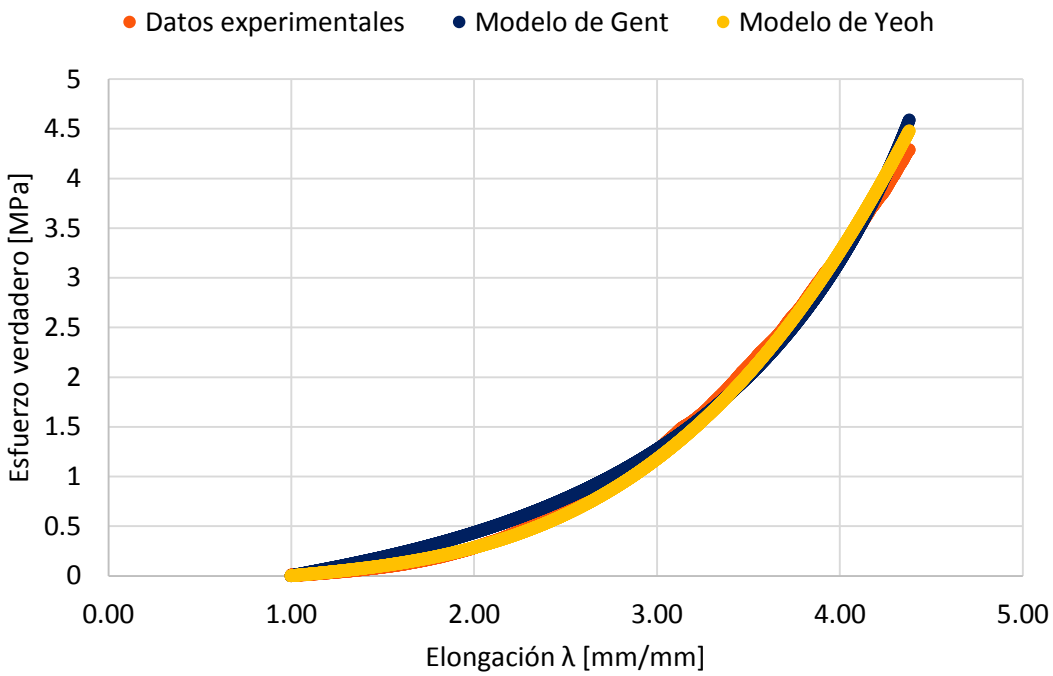


Fig. 4.36 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo genético (Ensayo 17).

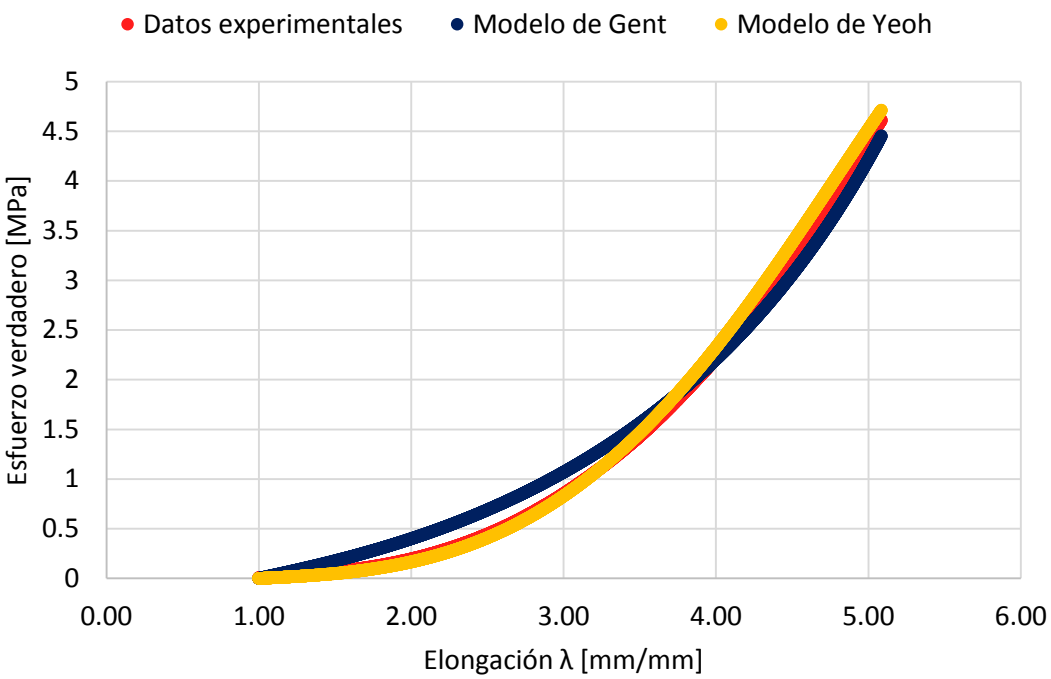


Fig. 4.37 Candidatos a solución óptima, 1ª generación del algoritmo genético (Ensayo 22).

Tabla 4.7 Resultados del algoritmo genético, soluciones óptimas

Ensayo	Parámetros	Error SSE	Coeficiente de Correlación
11	$\mu = 119\,650\ [Pa]$ $J_m = 44.1292$	5.8351×10^{13}	0.995523
	$C_{10} = 21\,078\ [Pa]$ $C_{20} = 3491.26\ [Pa]$ $C_{30} = -48.9403\ [Pa]$	3.30857×10^{12}	0.999638
12	$\mu = 132\,753\ [Pa]$ $J_m = 49.3075$	1.38415×10^{14}	0.99556
	$C_{10} = 16\,726.2\ [Pa]$ $C_{20} = 4020.83\ [Pa]$ $C_{30} = -51.1028\ [Pa]$	2.64277×10^{13}	0.999255
16	$\mu = 126\,700\ [Pa]$ $J_m = 38.5579$	6.81128×10^{13}	0.994733
	$C_{10} = 22\,417.8\ [Pa]$ $C_{20} = 3878.16\ [Pa]$ $C_{30} = -46.742\ [Pa]$	9.82562×10^{12}	0.999352
17	$\mu = 115\,633\ [Pa]$ $J_m = 32.1213$	4.13904×10^{13}	0.994606
	$C_{10} = 22\,961\ [Pa]$ $C_{20} = 4029.53\ [Pa]$ $C_{30} = -49.7633\ [Pa]$	7.24783×10^{12}	0.999417
22	$\mu = 110\,327\ [Pa]$ $J_m = 64.0072$	1.31458×10^{14}	0.993774

$C_{10} = 12385.7\ [Pa]$ $C_{20} = 2944.76\ [Pa]$ $C_{30} = -38.3932\ [Pa]$	6.24038×10^{12}	0.999603

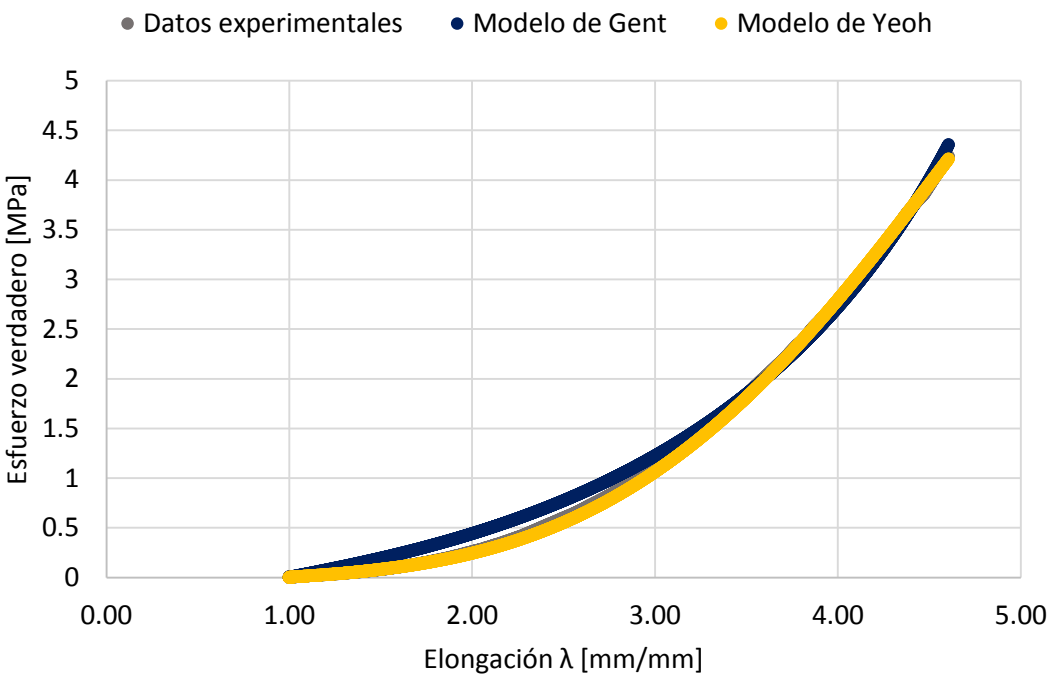


Fig. 4.38 Candidatos a solución óptima del algoritmo genético (Ensayo 11).

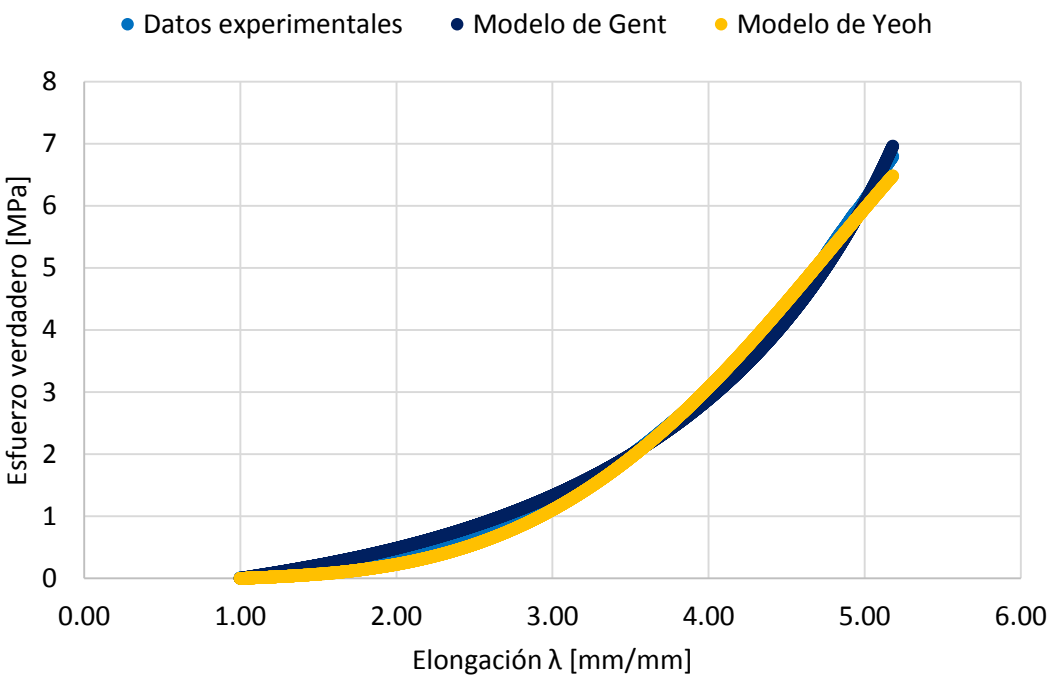


Fig. 4.39 Candidatos a solución óptima del algoritmo genético (Ensayo 12).

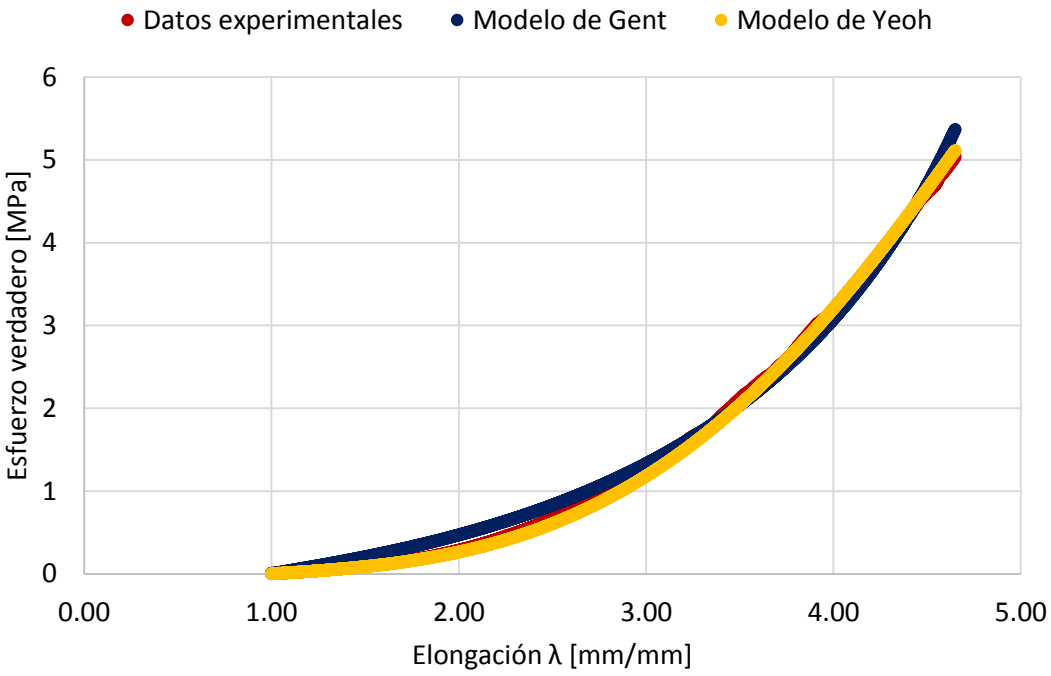


Fig. 4.40 Candidatos a solución óptima del algoritmo genético (Ensayo 16).

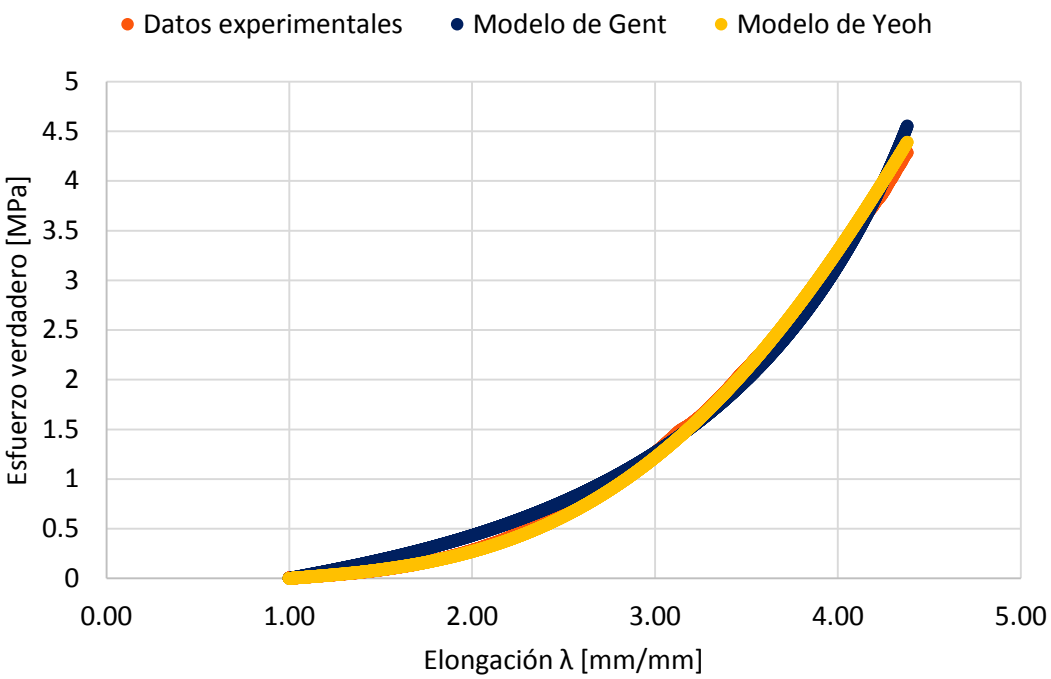


Fig. 4.41 Candidatos a solución óptima del algoritmo genético (Ensayo 17).

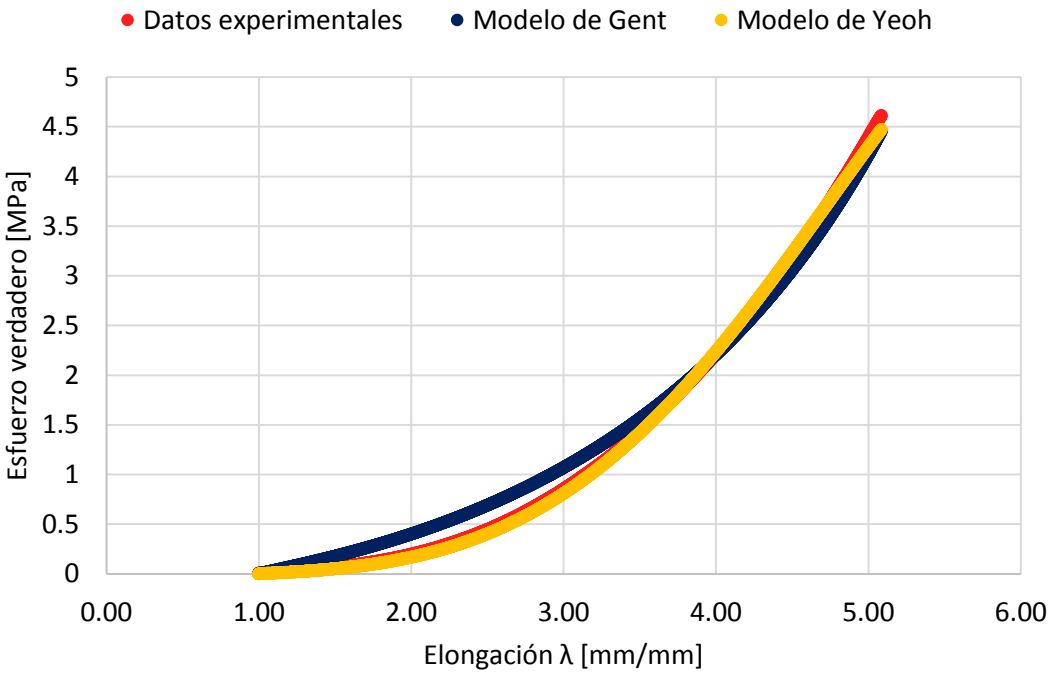


Fig. 4.42 Candidatos a solución óptima del algoritmo genético (Ensayo 22).

4.3. Análisis por elementos finitos

Se utilizó la licencia académica de ANSYS v19.0 para realizar la validación de los modelos obtenidos mediante un algoritmo evolutivo y genético. Se utilizó un análisis del tipo estático estructural, se utilizó un mallado automático para la probeta y dicha malla fue la misma para todos los análisis, al igual que las condiciones de carga (9.359 [N] fuerza máxima registrada en la curva promedio) y duración del ensayo (45.468 [s] tiempo promedio).
En cuanto a los valores de las constantes para los modelos de Gent y Yeoh, se calculó el promedio de los valores, a partir de las soluciones consideradas como óptimas de todos los ensayos, tanto para el algoritmo evolutivo como para el algoritmo genético. Además se calculó el error SSE y el coeficiente de estas nuevas constantes con respecto a la curva promedio de ensayos.

Tabla 4.8 Promedio de soluciones óptimas. Algoritmo evolutivo.

	Modelo de Gent	**Error SSE**	**Coeficiente de correlación**
Algoritmo evolutivo	$\mu = 132\,953.6\ [Pa]$ $J_m = 51.73814$	1.08014×10^{14}	0.994984
	Modelo de Yeoh	**Error SSE**	**Coeficiente de correlación**
	$C_{10} = 29\,772.56\ [Pa]$ $C_{20} = 3049.268\ [Pa]$ $C_{30} = -35.9926\ [Pa]$	2.83968×10^{12}	0.999893

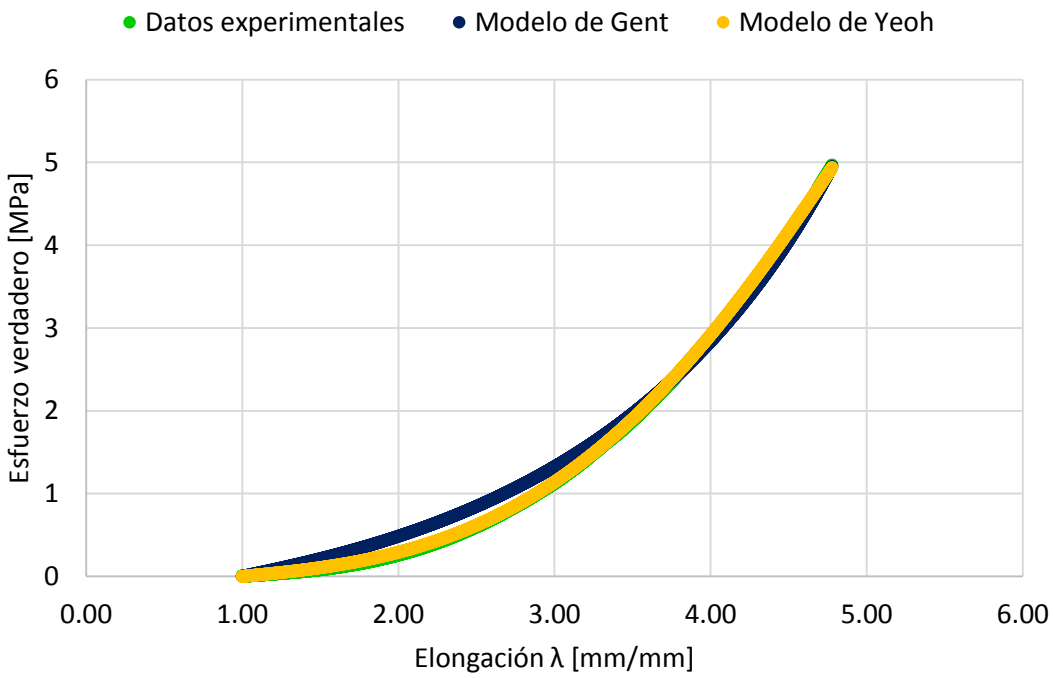


Fig. 4.43 Soluciones óptimas obtenidas mediante un algoritmo evolutivo.

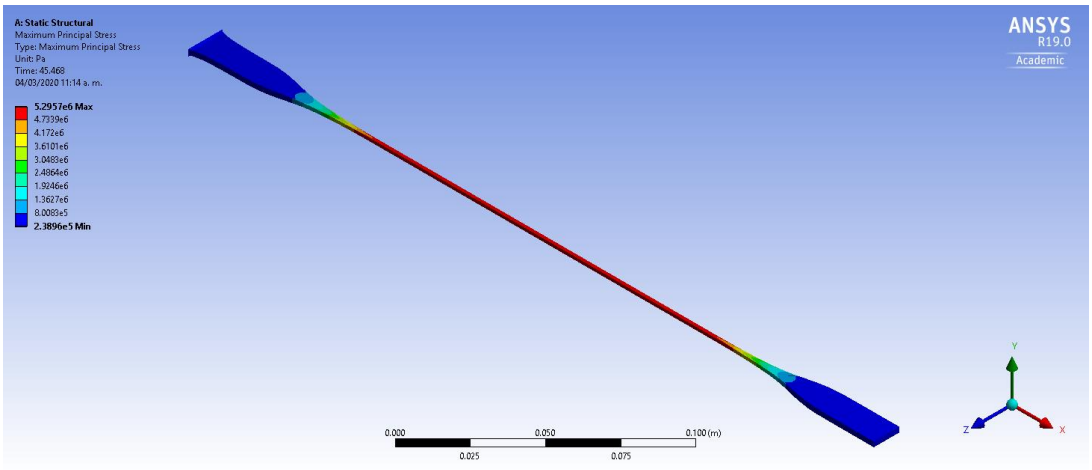


Fig. 4.44 Simulación del ensayo de tracción cálculo de esfuerzo máximo. Modelo de Gent solución óptima del algoritmo evolutivo.

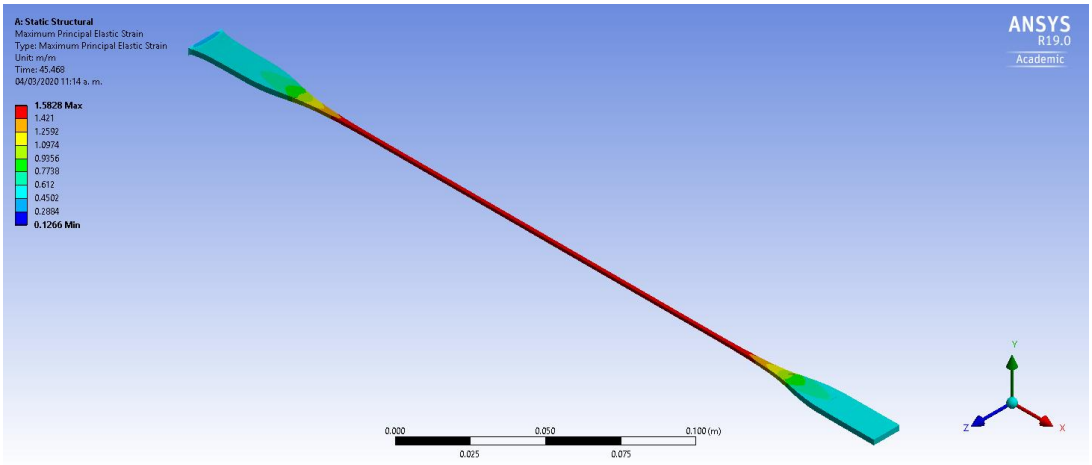


Fig. 4.45 Simulación del ensayo de tracción cálculo de la deformación máxima. Modelo de Gent solución óptima del algoritmo evolutivo.

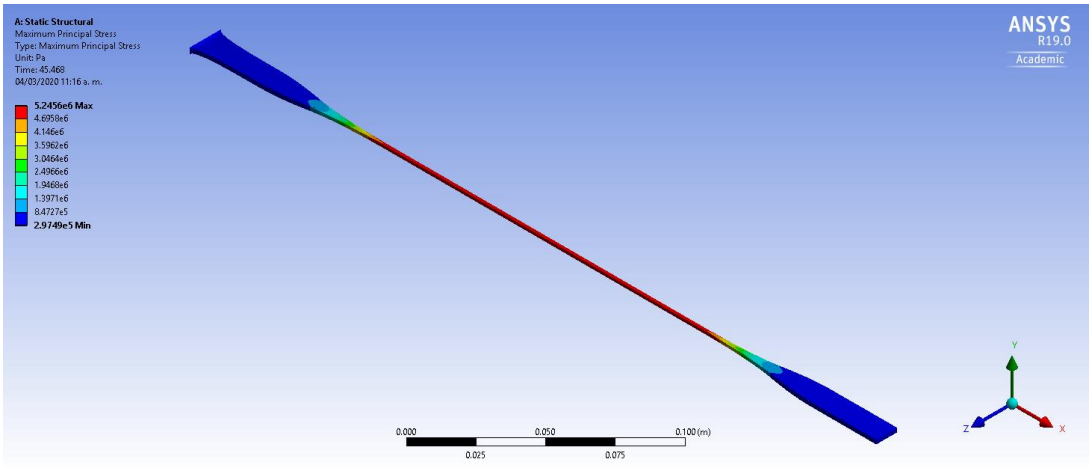


Fig. 4.46 Simulación del ensayo de tracción cálculo de esfuerzo máximo. Modelo de Yeoh solución óptima del algoritmo evolutivo.

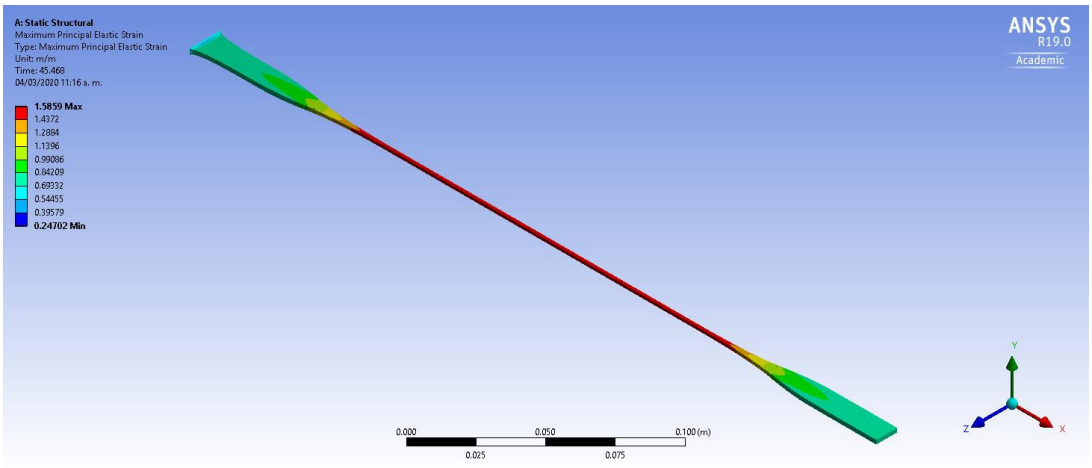


Fig. 4.47 Simulación del ensayo de tracción cálculo de la deformación máxima. Modelo de Yeoh solución óptima del algoritmo evolutivo.

Tabla 4.9 Promedio de soluciones óptimas. Algoritmo genético.

	Modelo de Gent	**Error SSE**	**Coeficiente de correlación**
Algoritmo genético	$\mu = 121\,012.6\ [Pa]$ $J_m = 45.62462$	8.65303×10^{13}	0.995597
	Modelo de Yeoh	**Error SSE**	**Coeficiente de correlación**
	$C_{10} = 19\,113.7\ [Pa]$ $C_{20} = 3672.908\ [Pa]$ $C_{30} = -46.98814\ [Pa]$	6.64771×10^{12}	0.999636

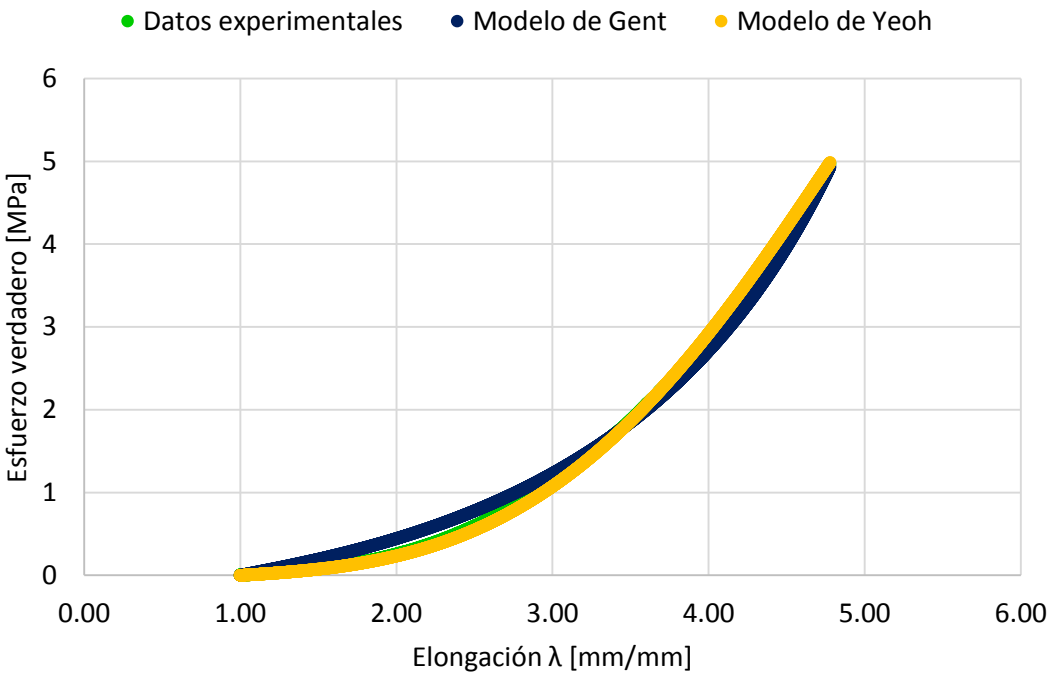


Fig. 4.48 Soluciones óptimas obtenidas mediante un algoritmo genético.

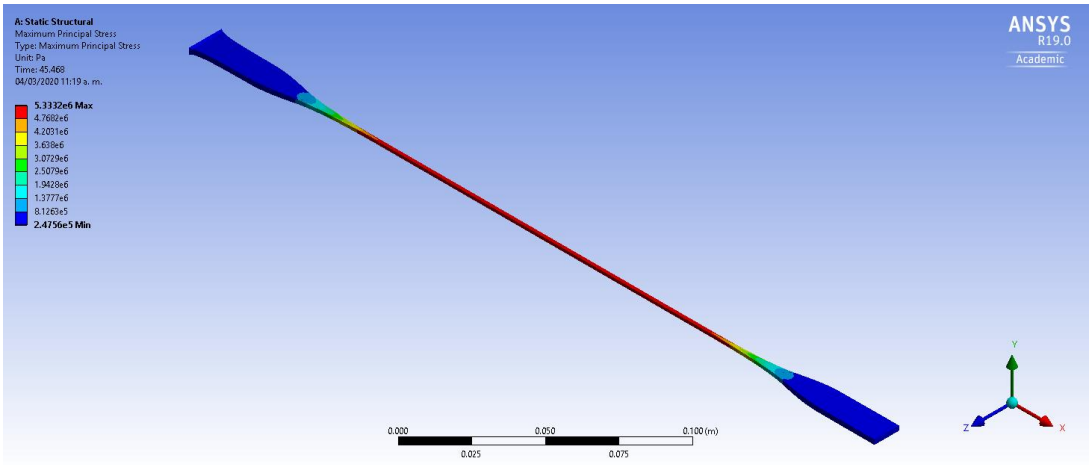


Fig. 4.49 Simulación del ensayo de tracción cálculo de esfuerzo máximo. Modelo de Gent solución óptima del algoritmo genético.

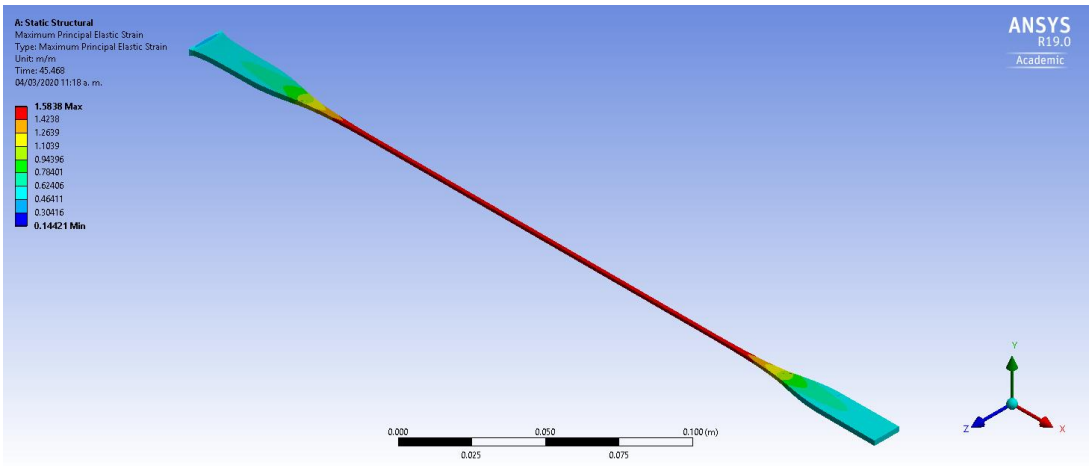


Fig. 4.50 Simulación del ensayo de tracción cálculo de la deformación máxima. Modelo de Gent solución óptima del algoritmo genético.

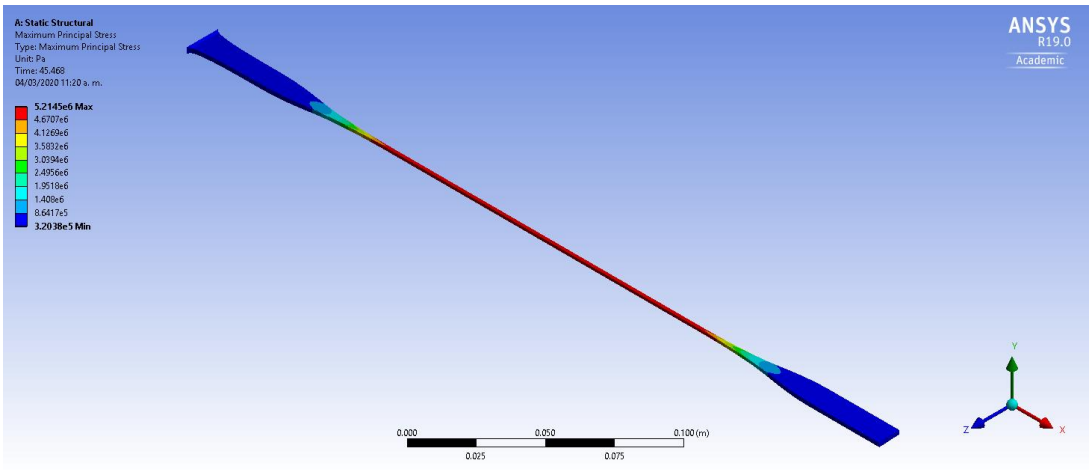


Fig. 4.51 Simulación del ensayo de tracción cálculo de esfuerzo máximo. Modelo de Yeoh solución óptima del algoritmo genético.

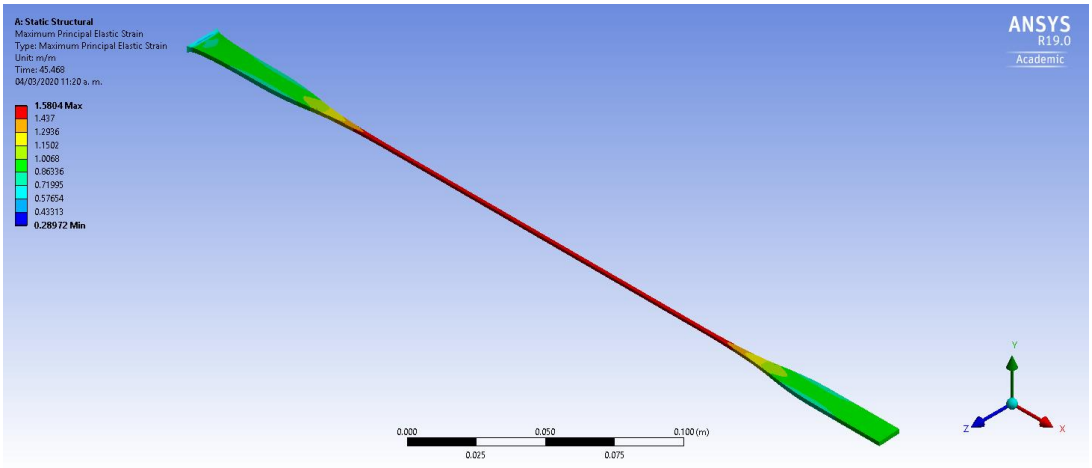


Fig. 4.52 Simulación del ensayo de tracción cálculo de la deformación máxima. Modelo de Yeoh solución óptima del algoritmo genético.

Tabla 4.10 Comparación entre valores de esfuerzo y deformación verdadera.

	Valores experimentales (promedio)	Modelo de Gent (Algoritmo Evolutivo)	Modelo de Yeoh (Algoritmo Evolutivo)	Modelo de Gent (Algoritmo Genético)	Modelo de Yeoh (Algoritmo Genético)
Esfuerzo [MPa]	4.972	5.2957	5.2456	5.3332	5.2145
Deformación [m/m]	1.5646	1.5828	1.5859	1.5838	1.5804

Una vez obtenidos los valores de esfuerzo y deformación verdadera, se calculó el valor de error porcentual entre el esfuerzo experimental promedio y los esfuerzos generados por los modelos obtenidos a partir de los algoritmos evolutivo y genético.

$$\%Err = \frac{|V_R - V_A|}{V_R} \times 100 \tag{72}$$

Tabla 4.11 Errores porcentuales calculados.

	Modelo de Gent (Algoritmo Evolutivo)	**Modelo de Yeoh (Algoritmo Evolutivo)**	**Modelo de Gent (Algoritmo Genético)**	**Modelo de Yeoh (Algoritmo Genético)**
Esfuerzo [MPa]	6.5105%	5.5028%	7.2647%	4.8773%
Deformación [m/m]	1.1632%	1.3614%	1.2272%	1.0098%

A partir de los errores porcentuales es posible concluir que el algoritmo evolutivo a pesar de contar con una formulación más sencilla en comparación con el algoritmo genético, ofrece una buena aproximación e incluso llega a superar al algoritmo genético en el caso del modelo de Gent; sin embargo el modelo que ofrece una mejor aproximación a los resultados experimentales fue obtenido gracias al algoritmo genético.

Conclusiones y trabajo a futuro

Las propiedades mecánicas de los elastómeros, tales como un alto límite de deformación elástica, alta flexibilidad, su superioridad en la resistencia de impacto y cargas cíclicas, en comparación con materiales rígidos, los hacen un material ideal para aplicaciones en actuadores blandos y robótica bioinspirada.

El Ecoflex 00-30 es un material ampliamente utilizado en el campo de actuadores blandos donde por lo general se recurre al cálculo del módulo de elasticidad y se considera el comportamiento del material como elástico lineal [8, 15, 26]; sin embargo, también existen artículos reportados que caracterizan el comportamiento no lineal del Ecoflex 00-30 entre los que se encuentran los trabajos de Elsayed *et al*. (2014) [12], Zhang *et al.* (2014) [39], Case *et al*. (2015) [7], Moseley *et al*. (2015) [27], Steck *et al*. (2015) [35], Lee y Pharr (2019) [20], y Shi *et al*. (2015) [30], donde salvo el trabajo de Case et al. (2015) [7], todos están basados en modelos constitutivos para materiales hiperelásticos y a excepción de los trabajos de Zhang *et al*. (2014) [39] y de Lee y Pharr (2019) [20] (donde no muestran los parámetros obtenidos), se reportan diferentes valores que caracterizan al material, además cabe destacar que el modelo provisto por Moseley *et al*. (2015) [27], se enfoca en el modelado de actuadores blandos neumáticos multicámara.

Por lo tanto realizar una caracterización metodológica es necesaria, los datos experimentales fueron obtenidos siguiendo el método A de la norma ASTM D412, mientras que los parámetros del material fueron optimizados con ayuda de la herramienta computacional de algoritmos genéticos, seleccionando a los modelos de Gent y Yeoh, para describir el comportamiento del material. Como resultado de esto, se obtuvo que el modelo con mejor correlación entre datos experimentales y simulación fue el modelo de Yeoh, con un error porcentual de 4.88% para el valor de esfuerzo verdadero y de aproximadamente 1% para el valor de deformación verdadera.

Caracterizar al Ecoflex 00-30, no solamente permite ejemplificar la metodología necesaria para la caracterización de un elastómero con fines didácticos, ya que además de modelar mejor los actuadores blandos existentes, también proporciona la obtención de un modelo constitutivo general, a partir del que será posible predecir el comportamiento en cualquier campo de aplicación en el que se desee utilizar este material.

Por último cabe señalar algunas áreas de oportunidad para generar una caracterización más completa como: la caracterización del material bajo diferentes estados de esfuerzo (ensayo de tracción biaxial y cortante puro), ensayar el material a diferentes velocidades para registrar si existen cambios en su comportamiento, además de conocer el fenómeno de ablandamiento en el material.

Referencias

[1] Ali, A., Hosseini, M., & Sahari, B. (2010). A Review of Constitutive Models for Rubber-Like Materials. *American J. of Engineering and Applied Sciences, 3*(1), 232-239.

[2] American National Standards Institute. (s.f.). *ASTM D412: Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers-Tension.*

[3] *America's Premier ASTM D412 | Die Maker Since 1960*. (s.f.). Obtenido de Ace Steel Rule Dies: https://acesteelruledies.com/astm-D412.html?no_redirect=true

[4] Asaka, K., & Okuzaki, H. (Edits.). (2014). *Soft Actuators. Materials, Modeling, Applications and Future Perspectives.* Tokyo, Japón: Springer. doi:https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/978-4-431-54767-9

[5] Bi, Z. (2018). *Finite Element Analysis Applications. A Systematic and Practical Approach.* Estados Unidos: ACADEMIC PRESS.

[6] Caballero, A. (2005). *METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PARA MICROEQUIPO.* UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. FACULTAD DE INGENIERÍA. DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO. Tesis de Doctorado en Ingeniería Mecánica.

[7] Case, J. C., White, E. L., & Kramer, R. K. (1 de Junio de 2015). Soft Material Characterization for Robotic Applications. *Soft Robotics, 2*(2), 80-87. doi:10.1089/soro.2015.0002

[8] Chen, F. J., Dirven, S., Xu, W. L., & Li, X. N. (2014). Soft Actuator Mimicking Human Esophageal Peristalsis for a Swallowing Robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 19*(4), 1300-1308. doi:10.1109/TMECH.2013.2280119

[9] Childs, P. (2014). *Mechanical Design Engineering Handbook.* Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.

[10] Coello, C. A. (2019). *Introducción a la Computación Evolutiva (Notas del Curso).* Ciudad de México, México: CINVESTAV-IPN.

[11] Darijani, H., & Naghdabadi, R. (2010). Hyperelastic materials behavior modeling using consistent strain energy density functions. *Acta Mechanica, 213*(3-4), 235-254. doi:10.1007/s00707-009-0239-3

[12] Elsayed, Y., Vincensi, A., Lekakou, C., Geng, T., Saaj, C. M., Ranzani, T., . . . Menciassi, A. (2014). Finite Element Analysis and Design Optimization of a Pneumatically Actuating Silicone Module for Robotic Surgery Applications. *Soft Robotics, 1*(4), 255-262. doi:10.1089/soro.2014.0016

[13] *Ensayo de tracción en hojas y láminas plásticas. ISO 527-3, ASTM D 882*. (s.f.). Obtenido de Zwick/Roell: https://www.zwickroell.com/es-es/pl%C3%A1sticos/hojas-y-l%C3%A1minas-pl%C3%A1sticas-/iso-527-3-propiedades-de-tracci%C3%B3n

[14] Fernández, J., López-Campos, J., Segade, A., & Vilán, J. (2018). A genetic algorithm for the characterization of hyperelastic materials. *Applied Mathematics and Computation*, 239-250.

[15] Hernández, J. A. (2015). *DISEÑO DE UN MECANISMO PARA UN SIMULADOR ESOFÁGICO.* México: UNAM, PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA MECÁNICA - MECATRÓNICA. Tesis de Maestría en Ingenieria Mecánica.

[16] Hines, L., Petersen, K., Lum, G. Z., & Sitti, M. (29 de Diciembre de 2016). Soft Actuators for Small-Scale Robotics. *Advanced Materials, 29*(13), 1-43. doi:10.1002/adma.201603483

[17] Ida, N. (2014). *Sensors, Actuators, and their Interfaces: A Multidisciplanary Introduction.* Ohio, Estados Unidos: SciTech Publishing.

[18] Kramer, O. (2017). *Genetic Algorithms Essentials* (Vol. 697). Springer.

[19] Latif, R. F., & Khan, N. S. (2019). 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). *Comparative Analysis of Various Hyperelastic Models for Neoprene Gasket at Ranging Strains*, (págs. 179-188). doi:10.1109/IBCAST.2019.8667253

[20] Lee, S., & Pharr, M. (7 de mayo de 2019). Sideaways and stable crack propagation in a silicone elastomer. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 116*(19), 9251-9256. doi:10.1073/pnas.1820424116

[21] Logan, D. (2012). *A FIRST COURSE IN THE FINITE ELEMENT METHOD* (5th ed.). Stamford, Estados Unidos: CENGAGE Learning.

[22] Lu, X., Xu, W., & Li, X. (2016). A soft biomimetic tongue: model reconstruction and motion tracking. *Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication 2016. 97970*, pág. 97970Y. International Society for Optics and Photonics. doi:10.1117/12.2218318

[23] Majidi, C. (2019). Soft-Matter Engineering for Soft Robotics. *Advanced Materials Technologies, 4*(2), 1800477 (1-13). doi:10.1002/admt.201800477

[24] Marckmann, G., & Verron, E. (2006). Comparision of hyperelastic models for rubber-like materials. *Rubber Chemistry and Technology. American Chemical Society, 79*(5), 835-858. doi:10.5254/1.3547969

[25] Martins, P., Jorge, R. N., & Ferrerira, A. (2006). A Comparative Study of Several Material Models for Prediction of Hyperelastic Properties: Application to Silicone-Rubber and Soft Tissues. *Strain, 42*(3), 135-147. doi:10.1111/j.1475-1305.2006.00257.x

[26] Mazzolai, B., Mondini, A., Tramacere, F., Riccomi, G., Sadeghi, A., Giordano, G., . . . Carminati, S. (2019). Octopus-Inspired Soft Arm with Suction Cups for Enhanced Grasping Tasks in Confined Environments. *Advanced Intelligent Systems, 6*(1), 1900041 (1-12). doi:10.1002/aisy.201900041

[27] Moseley, P., Florez, J. M., Sonar, H. A., Agarwal, G., Curtin, W., & Paik, J. (2015). Modeling, Design, and Development of Soft Pneumatic Actuators with Finite Element Method. *Advanced Engineering Materials, 18*(6), 978-988. doi:10.1002/adem.201500503

[28] MTS Systems Corporation. (s.f.). *MÉTODO DE ENSAYO NOTA TÉCNICA. HULE: ASTM D412 Propiedades de tensión de caucho vulcanizado y elastómeros termoplásticos.*

[29] Rus, D., & T. Tolley, M. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. *Nature, 521*, 467-475. doi:10.1038/nature14543

[30] Shi, H., Al-Rubaiai, M., Holbrook, C. M., Miao, J., Pinto, T., Wang, C., & Tan, X. (2019). Screen-Printed Soft Capacitive Sensors for Spatial Mapping of Both Positive and Negative Pressures. *Advanced Functional Materials, 29*(23), 1809116 (1-10). doi:10.1002/adfm.201903020

[31] Shimadzu Corporation. (s.f.). *AGS-X Series. Precision Universal / Tensile Tester*. Obtenido de SHIMADZU. Excellence in Science: https://www.shimadzu.com/an/test/universal/ags-x/ags-x.html

[32] Sivanandam, S. N., & Deepa., S. N. (2008). *Introduction to Genetic Algorithms.* Springer.

[33] Skorina, E. H., & Onal, C. D. (2020). Soft Hybrid Wave Spring Actuators. *Advanced Intelligent Systems, 2*(1), 1900097 (1-8). doi:10.1002/aisy.201900097

[34] Smooth-On. (s.f.). Ecoflex Series: Super-Soft. Addition Cure Silicone Rubbers.

[35] Steck, D., Qu, J., Kordmahale, S. B., Tscharnuter, D., Muliana, A., & Kameoka, J. (5 de febrero de 2019). Mechanical responses of Ecoflex silicone rubber: Compressible and incompressible behaviors. *Journal of Applied Polymer Science, 136*(5). doi:10.1002/app.47025

[36] Thompson, M. K., & Thompson, J. M. (2017). *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis.* Butterworth-Heinemann.

[37] *UNE-EN ISO 527-3:2019*. (2019). Obtenido de UNE. NormalizaciónEspañola: https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0062162

[38] *Wolfram Language & System. Documentation Center*. (2019). Obtenido de WOLFRAM: https://reference.wolfram.com/language/

[39] Zhang, J., Tang, J., Hong, J., Lu, T., & Wang, H. (2014). The Design and Analysis of Pneumatic Rubber Actuator of Soft Robotic Fish. En X. Zhang, H. Liu, Z. Chen, & N. Wang (Ed.), *Intelligent Robotics and Applications. 8917*, págs. 320-327. Springer International Publishing.

[40] Zolfagharian, A., Kouzani, A., Khoo, S., Amiri, A., Gibson, I., & Kaynak, A. (6 de Octubre de 2016). Evolution of 3D printed soft actuators. *Sensors and Actuators A: Physical, 250*, 259-271.

Bibliografía

I. Wang, Y., Zhu, C., Pfattner, R., Yan, H., Jin, L., Chen, S., Molina-Lopez, F., Lissel, F., Liu, J., Rabiah, N. I., Chen, Z., Chung, J. W., Linder, C., Toney, M. F., Murmann, B., & Bao, Z. (2017). A highly stretchable, transparent, and conductive polymer. Science Advances, 3(3), e1602076. doi:https://doi.org/10.1126/sciadv.1602076

II. Vegas, M. R., & Yerro, J. L. (2013). Stiffness, Compliance, Resilience, and Creep Deformation: Understanding Implant-Soft Tissue Dynamics in the Augmented. Breast: Fundamentals Based on Materials Science. *Aesthetic Plastic Surgery, 37*(5), 922-930. doi:10.1007/s00266-013-0197-y

III. White, W. M., Casey, W. H., Marty, B., & Yurimoto, H. (Edits.). (2018). *Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series.* Springer, Cham. doi:https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/978-3-319-39312-4