



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

2014 / 2015

*CARACTERIZACIÓN A IMPACTO DE CAUCHO RECICLADO MEDIANTE
ELEMENTOS FINITOS*

ANEXO 1: HIPERELASTICIDAD

DATOS DE LA ALUMNA O DEL ALUMNO

NOMBRE: ANE

APELLIDOS: ESCRIBANO CASTRO

FDO.:

FECHA: 10-02-2015

DATOS DEL DIRECTOR O DE LA DIRECTORA

NOMBRE: IRANTZU

APELLIDOS: URIARTE GALLASTEGI

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA MECÁNICA

FDO.:

FECHA: 10-02-2015

Contenido

Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Ajuste de Mínimos Cuadrados.....	2
2.1. Desarrollo para Neo-Hooke	2
2.1.1. Resultados para Neo-Hooke	4
2.2. Desarrollo para Mooney-Rivlin.....	8
2.2.1. Resultados para Mooney-Rivlin.....	10
Capítulo 3. Curve Fitting.....	18
3.1. Desarrollo para Neo-Hooke	18
3.1.1. Resultados para Neo-Hooke	20
3.2. Mooney-Rivlin	29
3.2.1. Resultados para Mooney-Rivlin.....	31
Capítulo 4. Resumen de resultados.....	41
4.1. Ajuste mínimos cuadrados (MATLAB).....	41
4.1.1. Neo-Hooke	41
4.1.2. Mooney-Rivlin.....	42
4.2. Curve fitting (ANSYS).....	42
4.2.1. Neo-Hooke	42
4.2.2. Mooney-Rivlin.....	43

Índice de tablas

Tabla 1: Constante hiperelástica para probetas grandes obtenidas mediante ajuste de mínimos cuadrados para modelo Neo Hooke	41
Tabla 2: Constante hiperelástica para probetas pequeñas obtenidas mediante ajuste de mínimos cuadrados para modelo Neo Hooke	41
Tabla 3: Constantes hiperelásticas para probetas grandes obtenidas mediante ajuste de mínimos cuadrados para modelo Mooney Rivlin.	42
Tabla 4: Constantes hiperelásticas para probetas pequeñas obtenidas mediante ajuste de mínimos cuadrados para modelo Mooney Rivlin.	42
Tabla 5: Constante hiperelástica para probetas grandes (modelo Neo Hooke) obtenidas mediante Curve-fitting.	42
Tabla 6: Constante hiperelástica para probetas pequeñas (modelo Neo Hooke) obtenidas mediante Curve-fitting.	43
Tabla 7: Constantes hiperelásticas para probetas grandes (modelo Mooney Rivlin) obtenidas mediante Curve-fitting.	43
Tabla 8: Constantes hiperelásticas para probetas pequeñas (modelo Mooney Rivlin) obtenidas mediante Curve-fitting.	43

Índice de figuras

Fig. 1. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.7 g/cm ³ para probetas grandes.	4
Fig. 2. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.8 g/cm ³ para probetas grandes.	5
Fig. 3. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.9 g/cm ³ para probetas grandes.	5
Fig. 4. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 1 g/cm ³ para probetas grandes.	6
Fig. 5. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.7 g/cm ³ para probetas pequeñas.	6
Fig. 6. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.9 g/cm ³ para probetas pequeñas.	7
Fig. 7. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 1 g/cm ³ para probetas pequeñas.	7
Fig. 8. Obtención de parámetros para densidad 0.7 g/cm ³ para probetas grandes.	10
Fig. 9. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.7 g/cm ³ para probetas grandes.	10
Fig. 10. Obtención de parámetros para densidad 0.8 g/cm ³ para probetas grandes.	11
Fig. 11. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.8 g/cm ³ para probetas grandes.	11
Fig. 12. Obtención de parámetros para densidad 0.9 g/cm ³ para probetas grandes	12
Fig. 13. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.9 g/cm ³ para probetas grandes.	13
Fig. 14. Obtención de parámetros para densidad 1 g/cm ³ para probetas grandes.	13
Fig. 15. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 1 g/cm ³ para probetas grandes.	14
Fig. 16. Obtención de parámetros para densidad 0.7 g/cm ³ para probetas pequeñas	14
Fig. 17. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.7 g/cm ³ para probetas pequeñas.	15

Fig. 18. Obtención de parámetros para densidad 0.9 g/cm ³ para probetas pequeñas.	15
Fig. 19. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.9 g/cm ³ para probetas pequeñas.	16
Fig. 20. Obtención de parámetros para densidad 1 g/cm ³ para probetas pequeñas.	16
Fig. 21. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 1 g/cm ³ para probetas pequeñas.	17
Fig. 22. Obtención de parámetros para Neo Hooke con densidad 0.73 g/cm ³ para probetas grandes mediante curve fitting.	20
Fig. 23. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.73 g/cm ³ (Probetas grandes).	21
Fig. 24. Obtención de parámetros para Neo Hooke con densidad 0.82 g/cm ³ para probetas grandes mediante curve fitting.	21
Fig. 25. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.82 g/cm ³ (Probetas grandes).	21
Fig. 26. Obtención de parámetros para Neo Hooke con densidad 0.83 g/cm ³ para probetas grandes mediante curve fitting.	22
Fig. 27. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.83 g/cm ³ (Probetas grandes).	22
Fig. 28. Obtención de parámetros para Neo Hooke con densidad 0.92 g/cm ³ para probetas grandes mediante curve fitting.	22
Fig. 29. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.92 g/cm ³ (Probetas grandes).	23
Fig. 30. Obtención de parámetros para Neo Hooke con densidad 0.93 g/cm ³ para probetas grandes mediante curve fitting.	23
Fig. 31. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.93 g/cm ³ (Probetas grandes).	23
Fig. 32. Obtención de parámetros para Neo Hooke con densidad 1.01 g/cm ³ para probetas grandes mediante curve fitting.	24
Fig. 33. Diagrama tensión-deformación para densidad 1.01 g/cm ³ (Probetas grandes).	24
Fig. 34. Obtención de parámetros para Neo Hooke con densidad 1.03 g/cm ³	24

para probetas grandes mediante curve fitting.	
Fig. 35. Diagrama tensión-deformación para densidad 1.03 g/cm ³ (Probetas grandes).	25
Fig. 36. Obtención de parámetros para Neo Hooke con densidad 0.68 g/cm ³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.	25
Fig. 37. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.68 g/cm ³ (Probetas pequeñas).	25
Fig. 38. Obtención de parámetros para Neo Hooke con densidad 0.71 g/cm ³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.	26
Fig. 39. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.71 g/cm ³ (Probetas pequeñas).	26
Fig. 40. Obtención de parámetros para Neo Hooke con densidad 0.89 g/cm ³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.	26
Fig. 41. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.89 g/cm ³ (Probetas pequeñas).	27
Fig. 42. Obtención de parámetros para Neo Hooke con densidad 0.91 g/cm ³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.	27
Fig. 43. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.91 g/cm ³ (Probetas pequeñas).	27
Fig. 44. Obtención de parámetros para Neo Hooke con densidad 0.97 g/cm ³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.	28
Fig. 45. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.97 g/cm ³ (Probetas pequeñas).	28
Fig. 46. Obtención de parámetros para Neo Hooke con densidad 0.99 g/cm ³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.	28
Fig. 47. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.99 g/cm ³ (Probetas pequeñas).	29
Fig. 48. Obtención de parámetros para Mooney Rivlin con densidad 0.73 g/cm ³ para probetas grandes mediante curve fitting.	31
Fig. 49. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.73 g/cm ³ (Probetas grandes).	32
Fig. 50. Obtención de parámetros para Mooney Rivlin con densidad 0.82 g/cm ³ para probetas grandes mediante curve fitting.	32

Fig. 51. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.82 g/cm ³ (Probetas grandes).	32
Fig. 52. Obtención de parámetros para Mooney Rivlin con densidad 0.83 g/cm ³ para probetas grandes mediante curve fitting.	33
Fig. 53. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.83 g/cm ³ (Probetas grandes).	33
Fig. 54. Obtención de parámetros para Mooney Rivlin con densidad 0.92 g/cm ³ para probetas grandes mediante curve fitting.	33
Fig. 55. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.92 g/cm ³ (Probetas grandes).	34
Fig. 56. Obtención de parámetros para Mooney Rivlin con densidad 0.93 g/cm ³ para probetas grandes mediante curve fitting.	34
Fig. 57. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.93 g/cm ³ (Probetas grandes)	34
Fig. 58. Obtención de parámetros para Mooney Rivlin con densidad 1.01 g/cm ³ para probetas grandes mediante curve fitting.	35
Fig. 59. Diagrama tensión-deformación para densidad 1.01 g/cm ³ (Probetas grandes).	35
Fig. 60. Obtención de parámetros para Mooney Rivlin con densidad 1.03 g/cm ³ para probetas grandes mediante curve fitting.	35
Fig. 61. Diagrama tensión-deformación para densidad 1.03 g/cm ³ (Probetas grandes).	36
Fig. 62. Obtención de parámetros para Mooney Rivlin con densidad 0.68 g/cm ³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.	36
Fig. 63. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.68 g/cm ³ (Probetas pequeñas).	37
Fig. 64. Obtención de parámetros para Mooney Rivlin con densidad 0.71 g/cm ³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.	37
Fig. 65. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.71 g/cm ³ (Probetas pequeñas).	37
Fig. 66. Obtención de parámetros para Mooney Rivlin con densidad 0.89 g/cm ³ para probetas pequeñas mediante curve fitting	38
Fig. 67. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.89 g/cm ³ (Probetas	38

pequeñas).

Fig. 68. Obtención de parámetros para Mooney Rivlin con densidad 0.91 g/cm³ para probetas pequeñas mediante curve fitting. 38

Fig. 69. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.91 g/cm³ (Probetas pequeñas). 39

Fig. 70. Obtención de parámetros para Mooney Rivlin con densidad 0.97 g/cm³ para probetas pequeñas mediante curve fitting. 39

Fig. 71. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.97 g/cm³ (Probetas pequeñas). 39

Fig. 72. Obtención de parámetros para Mooney Rivlin con densidad 0.99 g/cm³ para probetas pequeñas mediante curve fitting. 40

Fig. 73. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.99 g/cm³ (Probetas pequeñas). 40

Capítulo 1. Introducción

Tal y como se ha mencionado en la memoria de este estudio, se ha realizado la obtención de parámetros de la parte hiperelástica mediante dos métodos:

- Ajuste de Mínimos Cuadrados.
- Curve fitting.

Para ambos métodos se usan dos tipos de modelos para caracterizar el material y ver cuál de ellos se ajusta mejor a las características del mismo.

Dichos modelos son:

- Neo-Hooke: Se obtiene un parámetro de material.
- Mooney-Rivlin: Se obtienen 3 parámetros de material.

A continuación se exponen los ensayos realizados para la obtención de los parámetros hiperelásticos.

Capítulo 2. Ajuste de Mínimos Cuadrados.

2.1. Desarrollo para Neo-Hooke

Primero se ha obtenido el parámetro de material C_1 mediante el software informático MATLAB. Para ello se ha utilizado un ajuste de Mínimos Cuadrados, el cual es el método de ajuste que intenta encontrar una función continua dentro de un conjunto de pares ordenados.

A continuación se expone un ejemplo de ajuste que se ha utilizado, el de la probeta pequeña con densidad 0.7 g/cm^3 . (P_0.004_0.68 y P_0.004_0.71). Con este ejemplo se muestra el proceso utilizado para obtener el parámetro:

Se llama al conjunto de datos de Excel que necesitamos usar para la obtención de los parámetros. Ellos son Tiempo, Lambda y Cauchy. Como tenemos dos ensayos para cada densidad y velocidad hiperelástica ($v=0.004\text{m/s}$), se usan ambos:

```
lambda1=p0004068AS4(:,2);  
sigma1=p0004068AS4(:,3);  
  
lambda2=p0004071AS4(:,2);  
sigma2=p0004071AS4(:,3);
```

Se procede a la utilización de la siguiente ecuación que se basa en la matriz de observaciones:

$$col1 = 2 \left(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right)$$

```
col11=2*(lambda1-(1./lambda1.^2))  
col12=2*(lambda2-(1./lambda2.^2))
```

Función PHI: calcula la función de Euler ϕ del argumento n. En este caso calcula el número de números más pequeño que col1.

```
PHI1=[col11];
Coptimos1=inv(PHI1'*PHI1)*PHI1'*sigma1;

PHI2=[col12];
Coptimos2=inv(PHI2'*PHI2)*PHI2'*sigma2;
```

Se obtiene la gráfica con λ en el eje X y σ en el eje Y con sus valores aproximados:

```
figure
plot(lambda1,sigma1,'k','linewidth',1)
grid on
xlabel('Stretch (\lambda)')
ylabel('True stress (\sigma) [Pa]')
hold on

plot(lambda2,sigma2,'-ok','linewidth',1.5,'MarkerSize',4)
hold on

sigmasestimados1=PHI1*Coptimos1;
plot(lambda1,sigmasestimados1,'+k','LineWidth', 1)
sigmasestimados2=PHI2*Coptimos2;
plot(lambda2,sigmasestimados2,':k','LineWidth', 1.5)
h=legend('Experimental values for 0.68A','Experimental values
for 0.71A','Estimated values for 0.68A','Estimated values for
0.71A');
set(h);
```

Se obtienen los coeficientes óptimos para los dos casos de densidades que se tiene para la densidad 0.7 g/cm³:

```
C10_068=Coptimos1(1)
C10_071=Coptimos2(1)
```

Se obtiene el error del ajuste realizado mediante el coeficiente de determinación:

```
a1=sum((sigma1-sigmasestimados1).^2);
b1=sum((sigma1-mean(sigma1)).^2);
R21=1-a1/b1;

a2=sum((sigma2-sigmasestimados2).^2);
b2=sum((sigma2-mean(sigma2)).^2);
R22=1-a2/b2;
```

2.1.1. Resultados para Neo-Hooke

A continuación, se exponen todos los resultados obtenidos mediante la utilización de este método:

Probetas grandes

Para probetas grandes, en función de los tipos de densidad:

1- 0.7 g/cm^3

$$C10_073 = 2.4421\text{e}+05$$

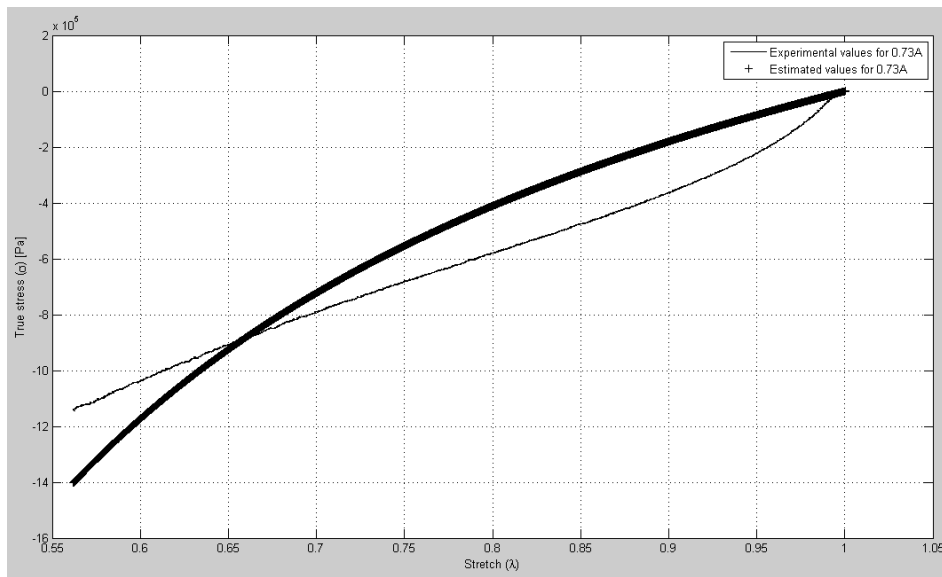


Fig. 1. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.7 g/cm^3 para probetas grandes.

2- 0.8 g/cm^3

$$C10_082 = 2.3920\text{e}+05$$

$$C10_083 = 2.2625\text{e}+05$$

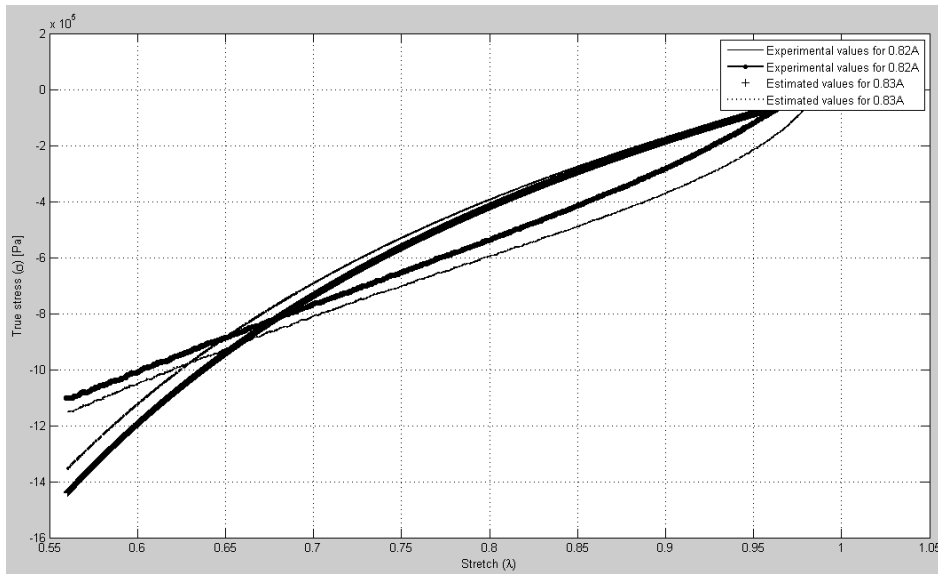


Fig. 2. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.8 g/cm^3 para probetas grandes.

3- 0.9 g/cm^3

C10_092 = 4.6515×10^5

C10_093 = 4.4623×10^5

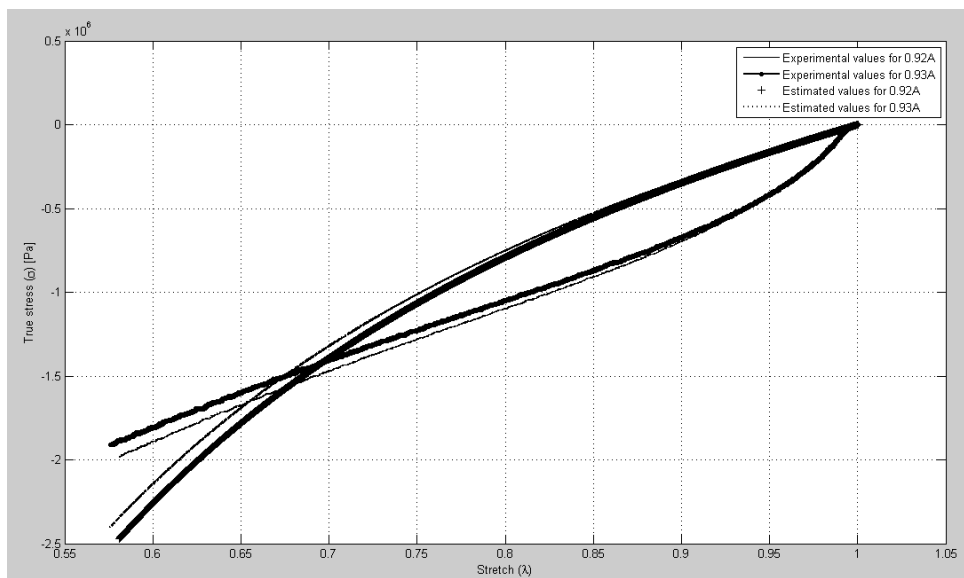


Fig. 3. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.9 g/cm^3 para probetas grandes.

4- 1 g/cm^3

C10_101 = 3.8515×10^5

$$C10_{103} = 5.7061e+05$$

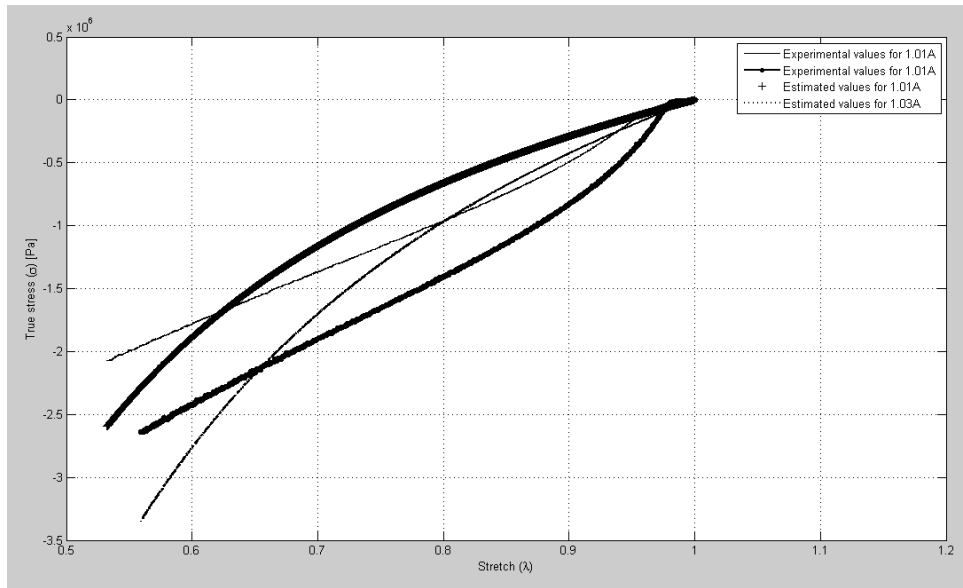


Fig. 4. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 1 g/cm³ para probetas grandes.

Probetas pequeñas:

$$1- 0.7 \text{ g/cm}^3$$

$$C10_{068} = 1.5115e+05$$

$$C10_{071} = 1.6934e+05$$

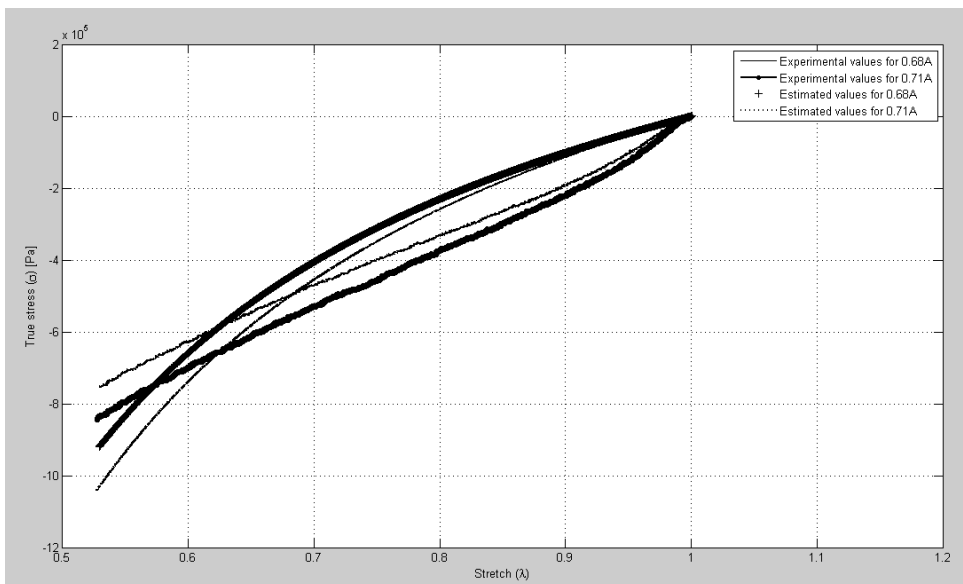


Fig. 5. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.7 g/cm³ para probetas pequeñas.

2- 0.9 g/cm^3

$C10_{089} = 2.7681\text{e}+05$

$C10_{091} = 3.4536\text{e}+05$

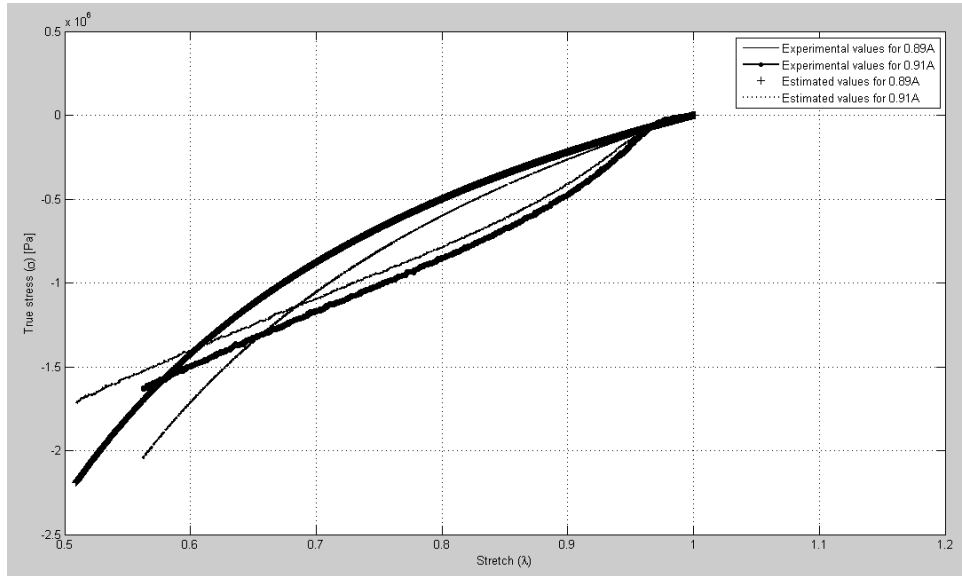


Fig. 6. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.9 g/cm^3 para probetas pequeñas.

3- 1 g/cm^3

$C10_{097} = 3.0254\text{e}+05$

$C10_{099} = 4.4347\text{e}+05$

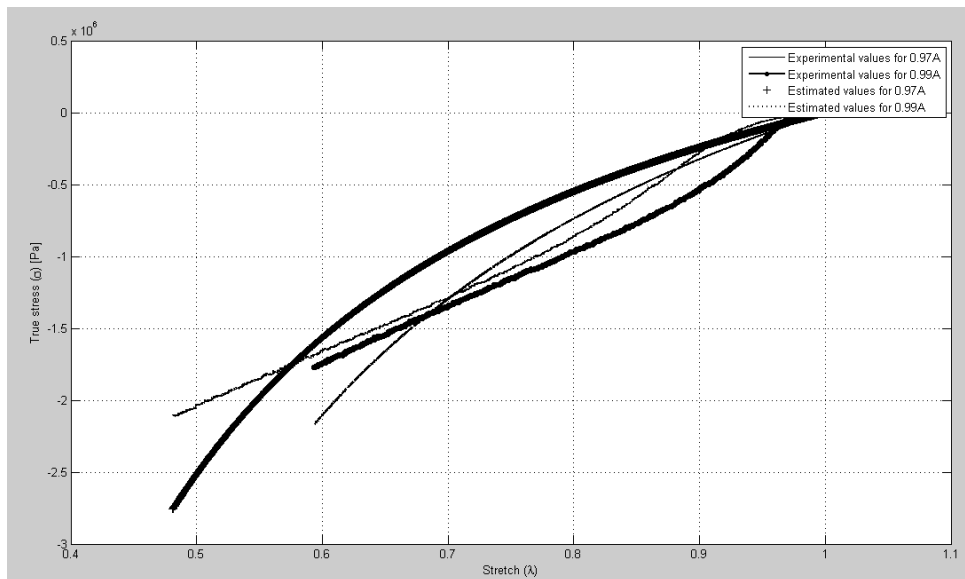


Fig. 7. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 1 g/cm^3 para probetas pequeñas.

2.2. Desarrollo para Mooney-Rivlin

Para este caso, el procedimiento es el mismo que para Neo-Hooke, a excepción de que con Mooney-Rivlin se obtienen 3 parámetros, que son C_{01} , C_{10} y C_{11} . Se expone a continuación un ejemplo de ajuste para Mooney-Rivlin.

Para probetas pequeñas y densidad 0.7 g/cm^3 (P_0.004_0.68 y P_0.004_0.71):

Se llama al conjunto de datos de Excel que necesitamos usar para la obtención de los parámetros. Ellos son Tiempo, Lambda y Cauchy. Como tenemos dos ensayos para cada densidad y velocidad hiperelástica ($v=0.004\text{m/s}$), se usan ambos:

```
lambda1=p0004068AS4(:,2);
sigma1=p0004068AS4(:,3);

lambda2=p0004071AS4(:,2);
sigma2=p0004071AS4(:,3);
```

Se procede a la utilización de las siguientes ecuaciones que se basan en la matriz de observaciones:

$$\begin{aligned} Col1 &= 2\left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda}\right) \\ Col2 &= 2\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right) \\ Col3 &= 6\left(\lambda^3 - \lambda^2 - \lambda + \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda^3}\right) \end{aligned}$$

```
col11=2*((lambda1.^2)-(1./lambda1))
col21=2*(lambda1-(1./(lambda1.^2)))
col31=6*(lambda1.^3-lambda1.^2-
lambda1+(1./lambda1)+(1./(lambda1.^2))-(1./(lambda1.^3)))

col12=2*((lambda2.^2)-(1./lambda2))
col22=2*(lambda2-(1./(lambda2.^2)))
col32=6*(lambda2.^3-lambda2.^2-
lambda2+(1./lambda2)+(1./(lambda2.^2))-(1./(lambda2.^3)))
```

Función PHI: calcula la función de Euler ϕ del argumento n . En este caso calcula el número de números más pequeño que col1, col2 y col3.

```
PHI1=[col11,col21,col31];
Coptos1=inv(PHI1'*PHI1)*PHI1'*sigma1;
```

```
PHI2=[col12,col22,col32];
Coptimos2=inv(PHI2'*PHI2)*PHI2'*sigma2;
```

Se obtiene la gráfica con λ en el eje X y σ en el eje Y con sus valores aproximados:

```
figure
plot(lambda1,sigma1,'k','linewidth',1)
grid on
xlabel('Stretch (\lambda)')
ylabel('True stress (\sigma) [Pa]')
hold on

plot(lambda2,sigma2,'-ok','linewidth',1.5,'MarkerSize',4)
hold on

sigmasestimados1=PHI1*Coptimos1;
plot(lambda1,sigmasestimados1,'+k','LineWidth', 1)

sigmasestimados2=PHI2*Coptimos2;
plot(lambda2,sigmasestimados2,':k','LineWidth', 1.5)

h=legend('Experimental values for 0.68A','Experimental values
for 0.71A','Estimated values for 0.68A','Estimated values for
0.71A');
set(h);
```

Se obtienen los coeficientes óptimos para los dos casos de densidades que se tiene para la densidad 0.7 g/cm³:

```
C10_068=Coptimos1(1)
C01_068=Coptimos1(2)
C11_068=Coptimos1(3)

C10_071=Coptimos2(1)
C01_071=Coptimos2(2)
C11_071=Coptimos2(3)
```

Se calcula el error matemática del ajuste mediante el coeficiente de determinación:

```
a1=sum((sigma1-sigmasestimados1).^2);
b1=sum((sigma1-mean(sigma1)).^2);
R21=1-a1/b1;

a2=sum((sigma2-sigmasestimados2).^2);
b2=sum((sigma2-mean(sigma2)).^2);
R22=1-a2/b2;
```

2.2.1. Resultados para Mooney-Rivlin

A continuación, se exponen todos los resultados obtenidos mediante la utilización de este método:

Probetas grandes:

Para probetas grandes, en función de los tipos de densidad:

1- 0.7 g/cm^3

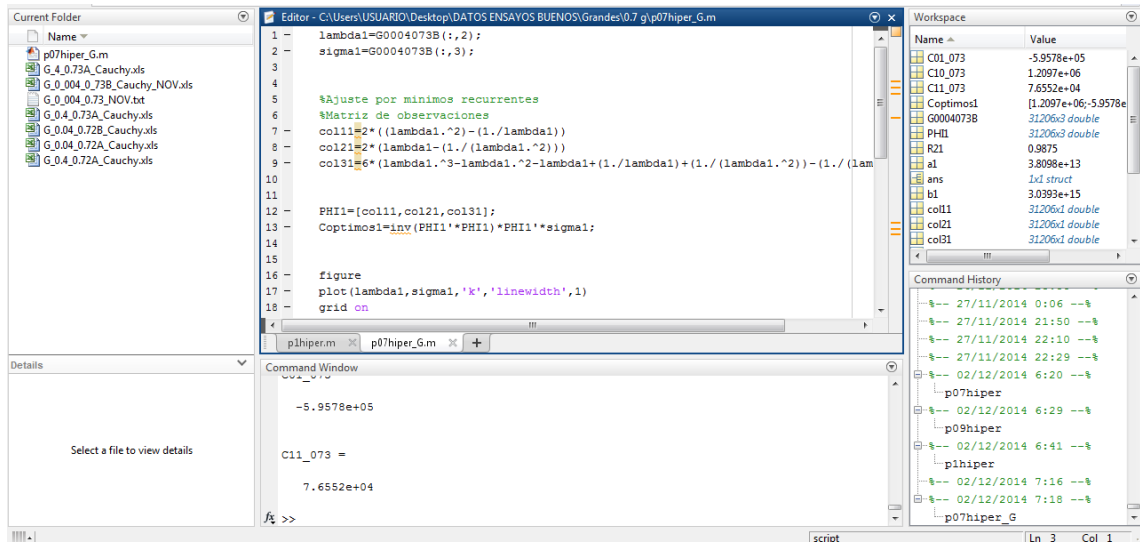


Fig. 8. Obtención de parámetros para densidad 0.7 g/cm^3 para probetas grandes.

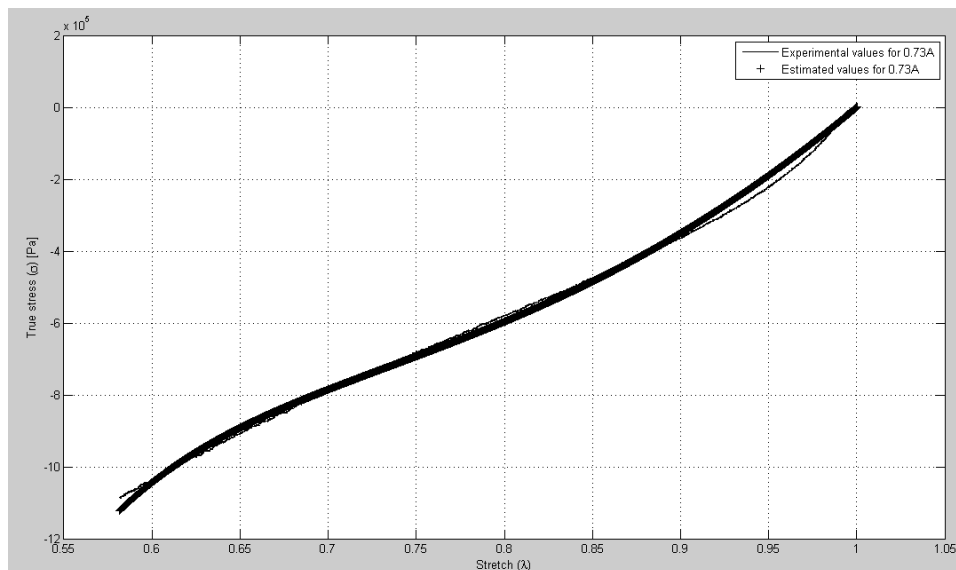


Fig. 9. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.7 g/cm^3 para probetas grandes.

$$C10_{073} = 1.2097e+06$$

$$C01_{073} = -5.9578e+05$$

$$C11_{073} = 7.6552e+04$$

2- 0.8 g/cm^3

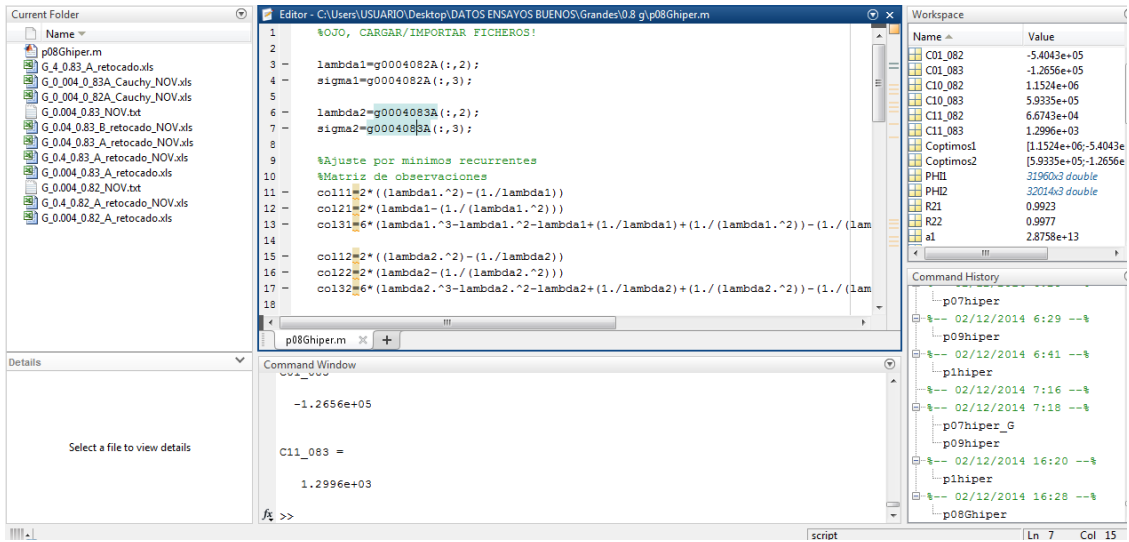


Fig. 10. Obtención de parámetros para densidad 0.8 g/cm^3 para probetas grandes.

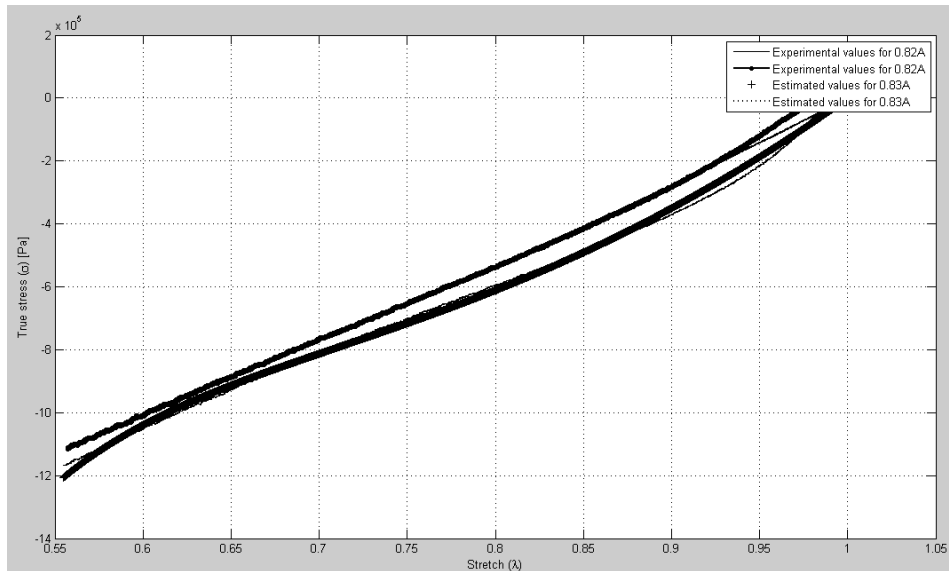


Fig. 11. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.8 g/cm^3 para probetas grandes.

$$C10_082 = 1.1524e+06$$

$$C01_082 = -5.4043e+05$$

$$C11_082 = 6.6743e+04$$

$$C10_083 = 5.9335e+05$$

$$C01_083 = -1.2656e+05$$

$$C11_083 = 1.2996e+03$$

3- 0.9 g/cm^3

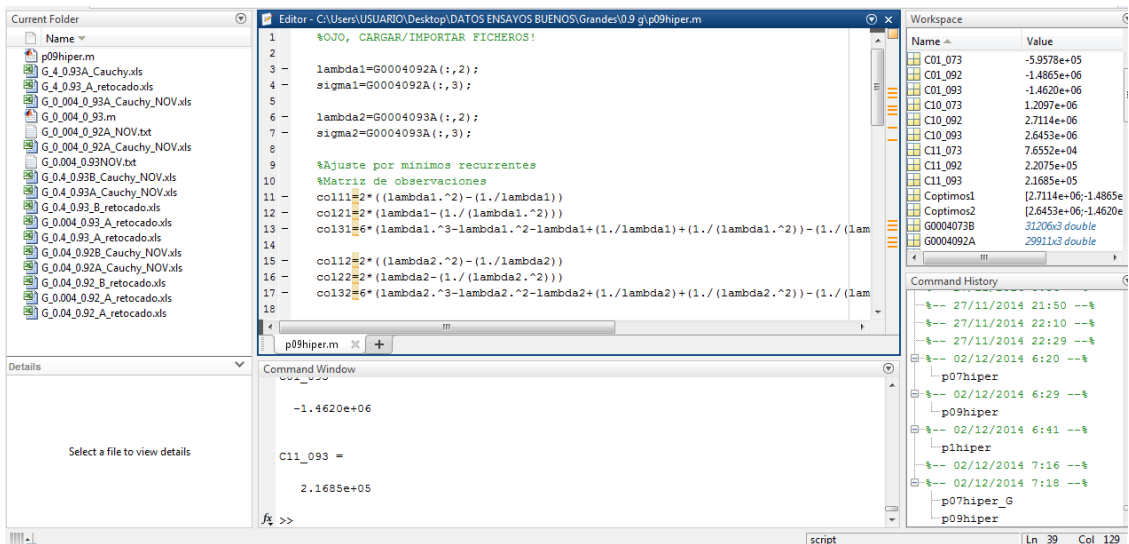


Fig. 12. Obtención de parámetros para densidad 0.9 g/cm^3 para probetas grandes.

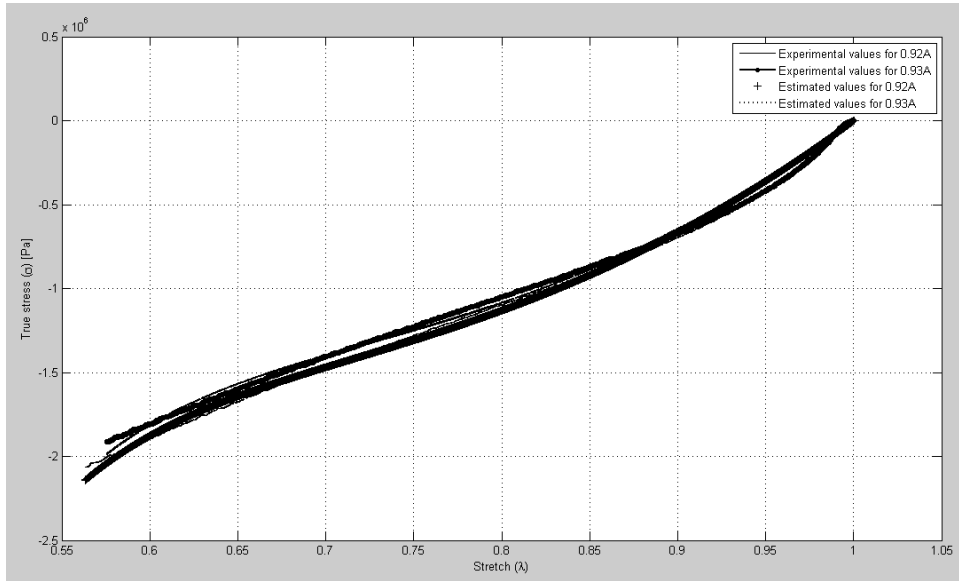


Fig. 13. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.9 g/cm³ para probetas grandes.

C10_092 = 2.7114e+06

C01_092 = -1.4865e+06

C11_092 = 2.2075e+05

C10_093 = 2.6453e+06

C01_093 = -1.4620e+06

C11_093 = 2.1685e+05

4- 1 g/cm³

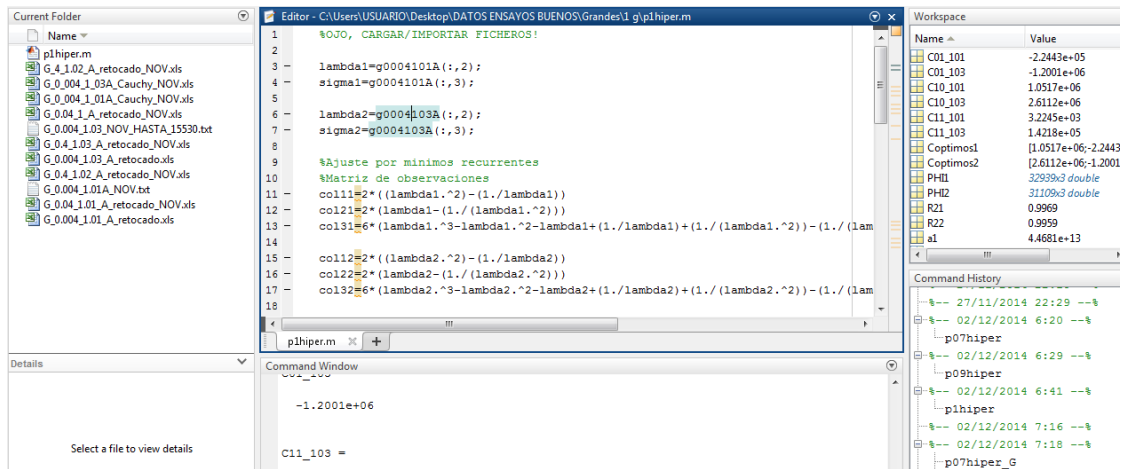


Fig. 14. Obtención de parámetros para densidad 1 g/cm³ para probetas grandes.

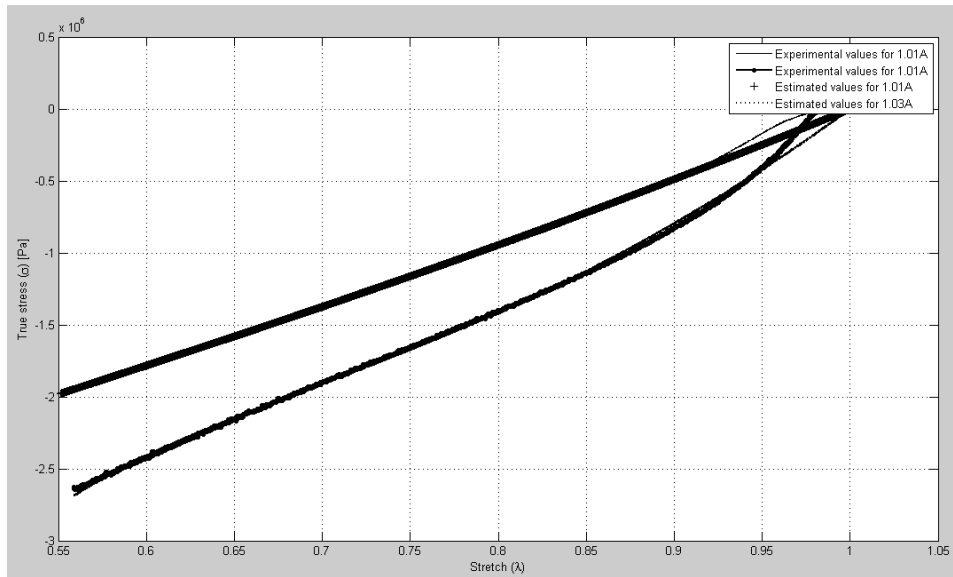


Fig. 15. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 1 g/cm³ para probetas grandes.

$$C10_{101} = 1.0517e+06$$

$$C01_{101} = -2.2443e+05$$

$$C11_{101} = 3.2245e+03$$

$$C10_{103} = 2.6112e+06$$

$$C01_{103} = -1.2001e+06$$

$$C11_{103} = 1.4218e+05$$

Probetas pequeñas

1- 0.7 g/cm³

```

1 - lambda1=p0004068AS4(:,2);
2 - sigma1=p0004068AS4(:,3);
3
4 - lambda2=p0004071AS4(:,2);
5 - sigma2=p0004071AS4(:,3);
6
7 %Ajuste por mínimos recurrentes
8 %Matriz de observaciones
9 - col11=2*(lambda1.^2)-(1./lambda1)
10 - col12=2*(lambda1-(1./lambda1.^2))
11 - col13=6*(lambda1.^3-lambda1.^2-lambda1+(1./lambda1)+(1./lambda1.^2))-(1./lam
12
13 - col12=2*(lambda2.^2)-(1./lambda2)
14 - col12=2*(lambda2-(1./lambda2.^2))
15 - col13=6*(lambda2.^3-lambda2.^2-lambda2+(1./lambda2)+(1./lambda2.^2))-(1./lam

```

El Workspace muestra los valores de los parámetros estimados:

Name	Value
C01_068	-2.7544e+05
C01_071	-3.3508e+05
C10_068	6.0666e+05
C10_071	7.1609e+05
C11_068	4.1912e+04
C11_071	5.0068e+04
Coptimos1	[6.0666e+05;-2.7544e+05]
Coptimos2	[7.1609e+05;-3.3508e+05]
PH11	171043 double
PH12	289953 double
R21	0.9990
R22	0.9987
a1	6.9398e+11

Fig. 16. Obtención de parámetros para densidad 0.7 g/cm³ para probetas pequeñas.

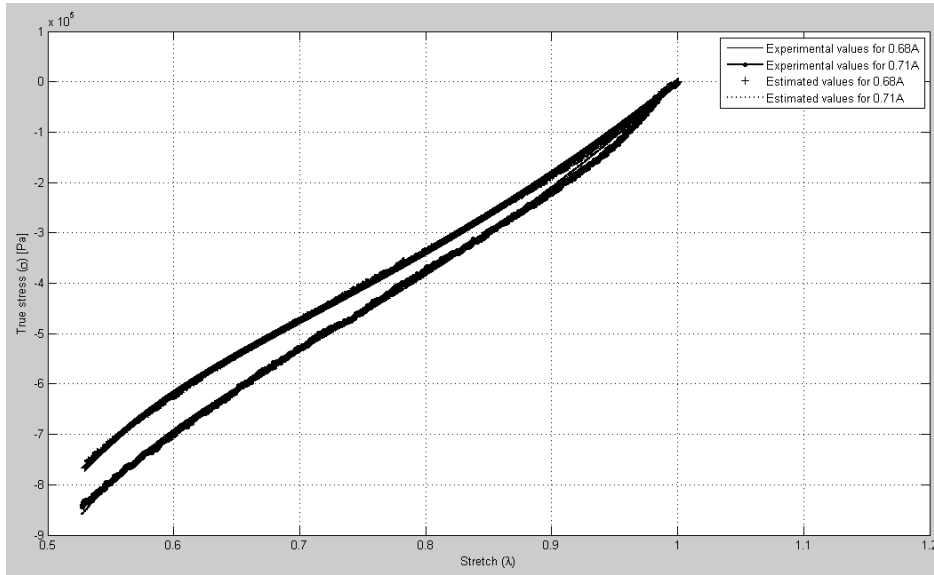


Fig. 17. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.7 g/cm^3 para probetas pequeñas.

$$C10_{068} = 6.0666e+05$$

$$C01_{068} = -2.7544e+05$$

$$C11_{068} = 4.1912e+04$$

$$C10_{071} = 7.1609e+05$$

$$C01_{071} = -3.3508e+05$$

$$C11_{071} = 5.0068e+04$$

2- 0.9 g/cm^3

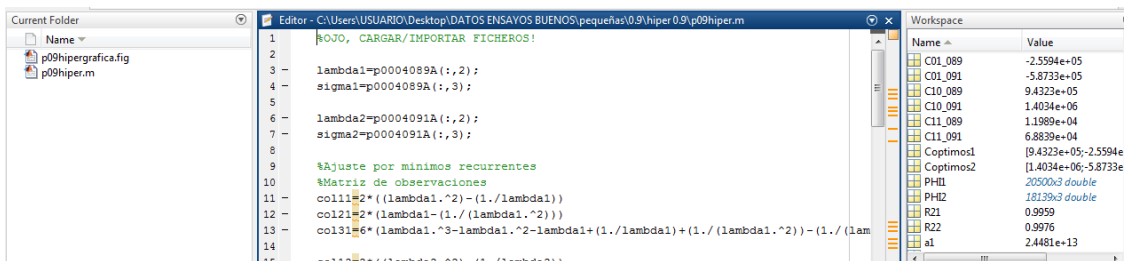


Fig. 18. Obtención de parámetros para densidad 0.9 g/cm^3 para probetas pequeñas.

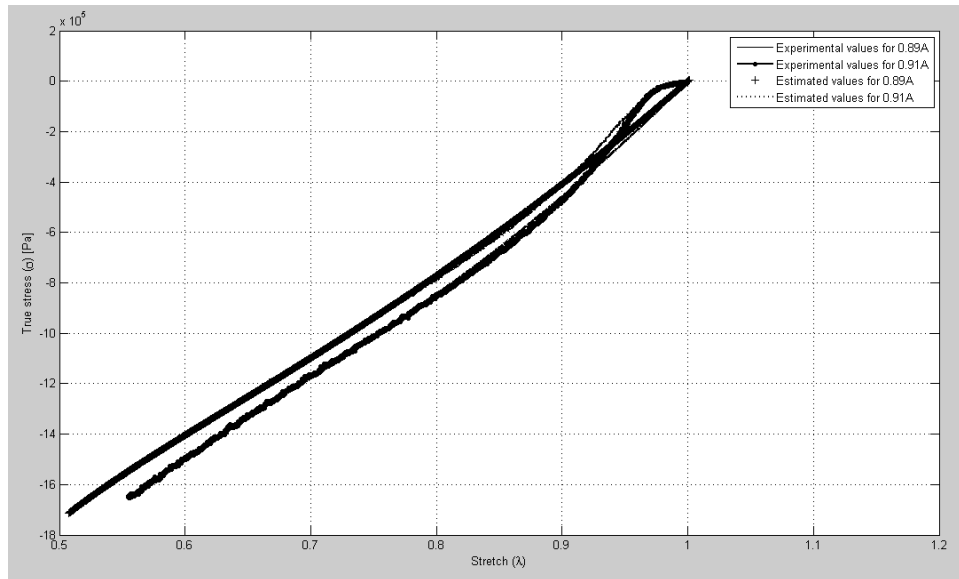


Fig. 19. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 0.9 g/cm^3 para probetas pequeñas.

$$C10_{089} = 9.4323e+05$$

$$C01_{089} = -2.5594e+05$$

$$C11_{089} = 1.1989e+04$$

$$C10_{091} = 1.4034e+06$$

$$C01_{091} = -5.8733e+05$$

$$C11_{091} = 6.8839e+04$$

3- 1 g/cm^3

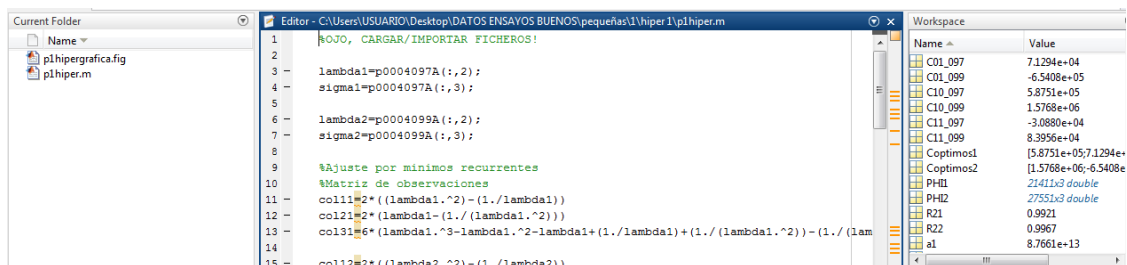


Fig. 20. Obtención de parámetros para densidad 1 g/cm^3 para probetas pequeñas.

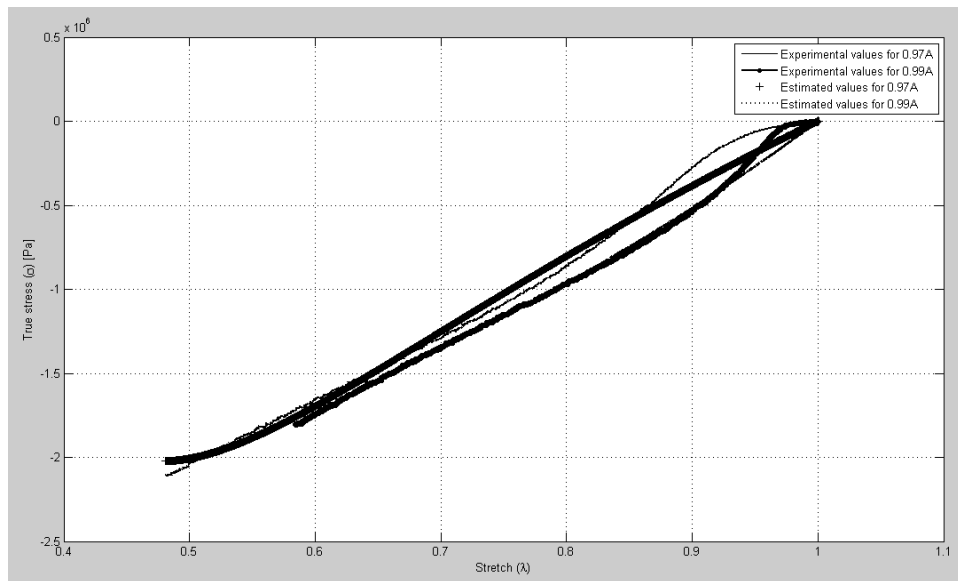


Fig. 21. Diagrama tensión-alargamiento para densidad 1 g/cm^3 para probetas pequeñas.

$$C10_{097} = 5.8751e+05$$

$$C01_{097} = 7.1294e+04$$

$$C11_{097} = -3.0880e+04$$

$$C10_{099} = 1.5768e+06$$

$$C01_{099} = -6.5408e+05$$

$$C11_{099} = 8.3956e+04$$

Capítulo 3. Curve Fitting

Para este segundo método empleado, se utiliza el software informático ANSYS. El curve fitting se basa en un ajuste de curvas. Al igual que para la técnica anteriormente aplicada, se obtienen resultados para dos modelos:

- Neo-Hooke: Con el que aparece un parámetro de material.
- Mooney-Rivlin: Caracteriza al material con 3 parámetros de modelo.

Se comienza explicando brevemente los pasos a usar para la obtención de los parámetros deseados, primero para el modelo Neo-Hookeano y seguido para el de Mooney-Rivlin.

3.1. Desarrollo para Neo-Hooke

Para obtener el parámetro C_{10} para cada ensayo de cada densidad, se debe realizar el siguiente proceso:

Para explicar dicho proceso, se expone un ejemplo de Log File extraído de ANSYS. Este caso es: P_0.004_0.68

```
/input,menust,tmp,''  
/GRA,POWER  
/GST,ON  
/PLO,INFO,3  
/GRO,CURL,ON  
/CPLANE,1  
/REPLOT,RESIZE  
WPSTYLE,,,,,,,,,0  
!*  
/NOPR  
KEYW,PR_SET,1  
KEYW,PR_STRUC,1  
KEYW,PR_THERM,0  
KEYW,PR_FLUID,0  
KEYW,PR_ELMAG,0  
KEYW,MAGNOD,0
```

```

KEYW, MAGEDG, 0
KEYW, MAGHFE, 0
KEYW, MAGELC, 0
KEYW, PR_MULTI, 0
KEYW, PR_CFD, 0
KEYW, LSDYNA, 0
KEYW, PR_DYNA, 0
/GO
!*
/COM,
/COM, Preferences for GUI filtering have been set to display:
/COM, Structural
!*
/PREP7
!*
/com, Curve Fitting Experimental Data Written To Geom_UNIA_1. exp
TBFT, EADD, 1, UNIA, Geom_UNIA_1. exp
TBFT, FADD, 1, HYPER, NEO,
TBFT, SOLVE, 1, HYPER, NEO, , 1

```

Lo que interesa del Log File son los últimos pasos, en los cuales se definen las características de nuestro material y lo que se desea obtener. En la ayuda del programa ANSYS vienen explicados correctamente cada paso:

```
TBFT, EADD, 1, UNIA, Geom_UNIA_1. exp
```

TBFT,EADD,ID,Option1,Option2,Option3,Option4 ! Se introducen los datos experimentales.

Dónde:

ID = Índice que corresponde al número de material

Option1 = UNIA, BIAX, SHEA, SSHE or VOLU (nuestro caso uniaxial = 1)

Option2 = Nombre del archive que contiene los datos experimentales

Option3 = Extensión del archivo

Option4 = Directorio del archivo

```
TBFT, FADD, 1, HYPER, NEO,
```

TBFT,FADD,ID,HYPER,Option2,Option3 ! Se introducen las opciones del modelo del material.

Dónde:

ID = Índice que corresponde al número de material

Option2 = Nombre del modelo (en este caso Neo Hooke)

Option3 = Orden o número de coeficientes. (Cómo es Neo hooke sólo es un parámetro)

TBFT, SOLVE, 1, HYPER, NEO, , 1

TBFT,SOLVE,ID,HYPER,Option2,Option3,Option4, ..., Option7 ! Establece los parámetros de control y lo resuelve.

Donde:

ID = Índice que corresponde al número de material

Option2 = Nombre del modelo (Este caso es Neo Hooke)

Option3 = Orden o número de coeficientes (Neo Hooke = 1)

Option4 = Procedimiento de curve fitting

- 0= Mínimos cuadrados no normalizados
- 1= Mínimos cuadrados normalizados (este caso es normalizado)

Option5 = Número máximo de iteraciones.

Option6 = Tolerancia de cambios residuales.

Option7 = Tolerancia de cambios en los coeficientes.

3.1.1. Resultados para Neo-Hooke

Los resultados obtenidos para el ajuste por Curve fitting para el modelo de Neo-Hooke son los siguientes:

Probetas grandes

1- 0.73 g/cm³

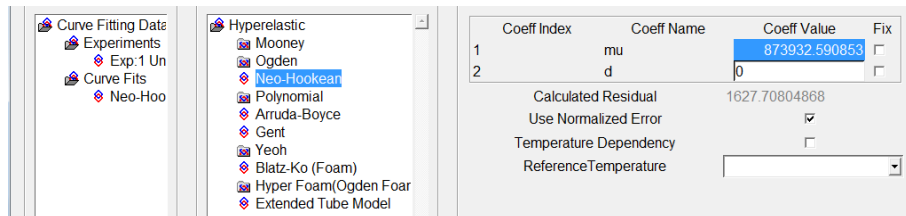


Fig. 22. Obtención de parámetros para Neo-Hooke con densidad 0.73 g/cm³ para probetas grandes mediante curve fitting.

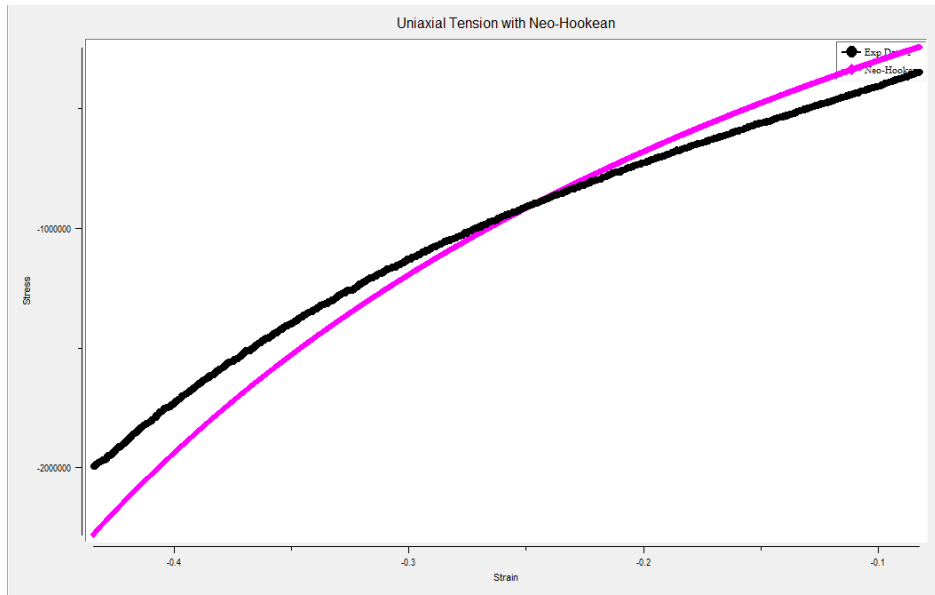


Fig. 23. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.73 g/cm^3 (Probetas grandes).

2- 0.82 g/cm^3

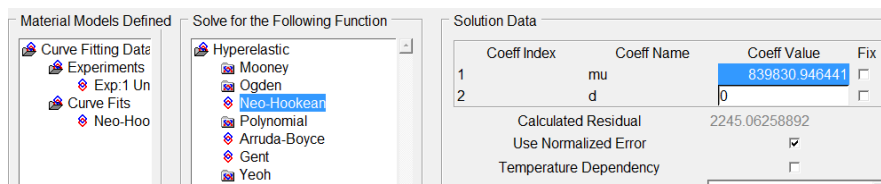


Fig. 24. Obtención de parámetros para Neo-Hooke con densidad 0.82 g/cm^3 para probetas grandes mediante curve fitting.

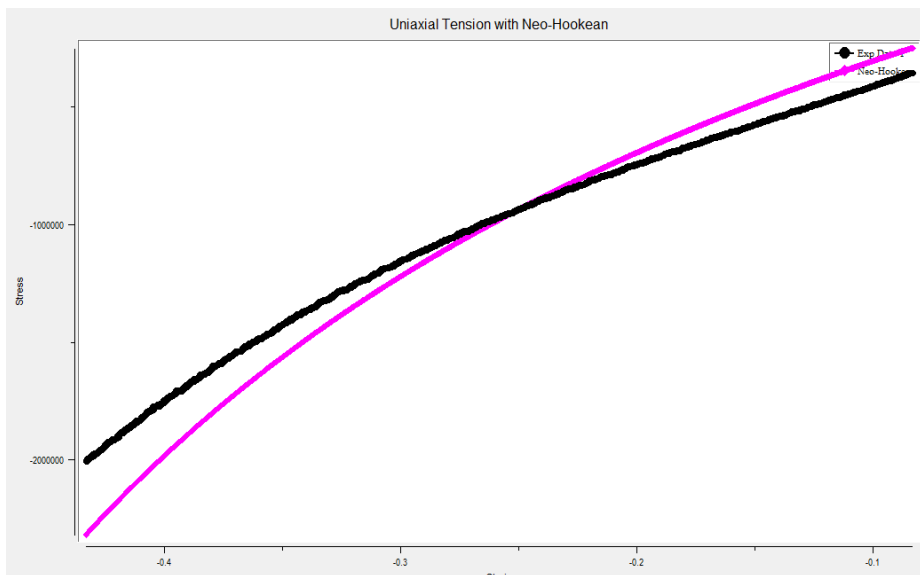


Fig. 25. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.82 g/cm^3 (Probetas grandes).

3- 0.83 g/cm³

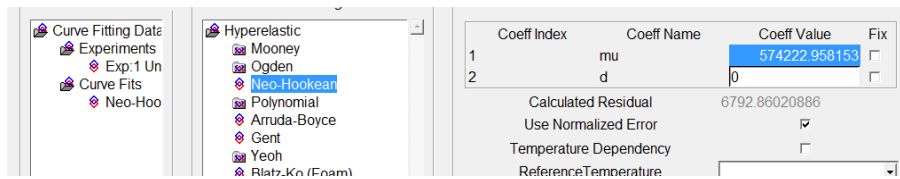


Fig. 26. Obtención de parámetros para Neo-Hooke con densidad 0.83 g/cm³ para probetas grandes mediante curve fitting.

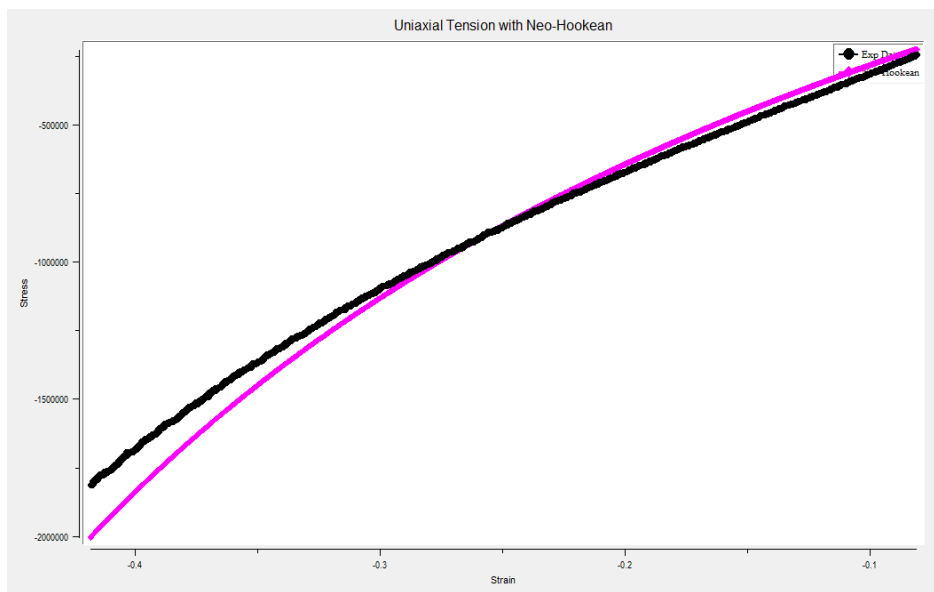


Fig. 27. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.83 g/cm³ (Probetas grandes).

4- 0.92 g/cm³

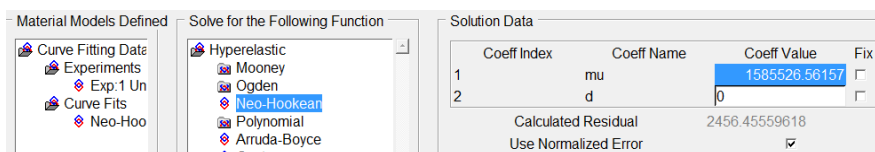


Fig. 28. Obtención de parámetros para Neo-Hooke con densidad 0.92 g/cm³ para probetas grandes mediante curve fitting.

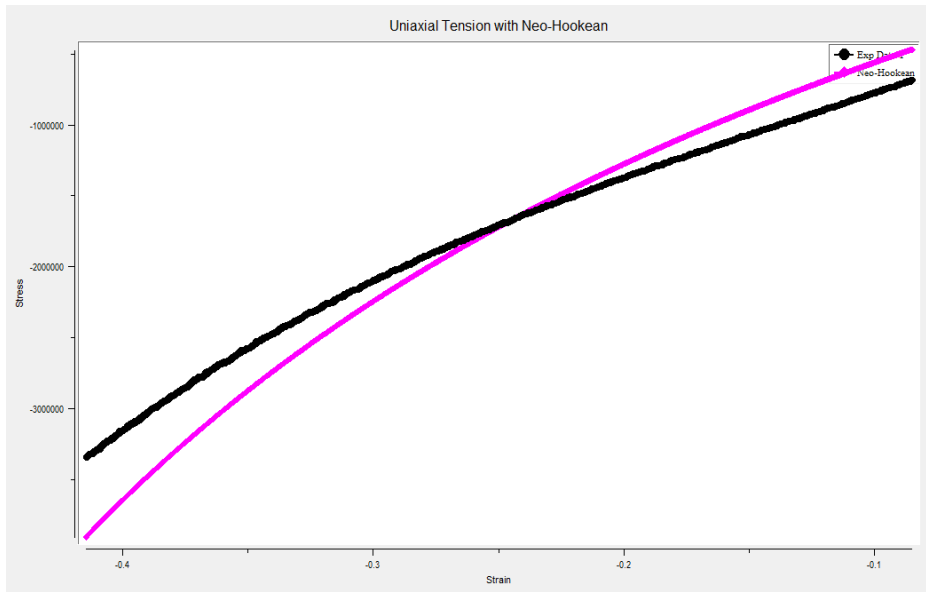


Fig. 29. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.92 g/cm^3 (Probetas grandes).

5- 0.93 g/cm^3

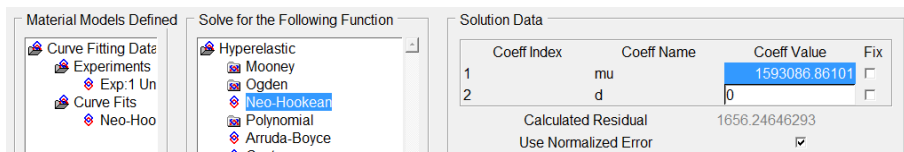


Fig. 30. Obtención de parámetros para Neo-Hooke con densidad 0.93 g/cm^3 para probetas grandes mediante curve fitting.

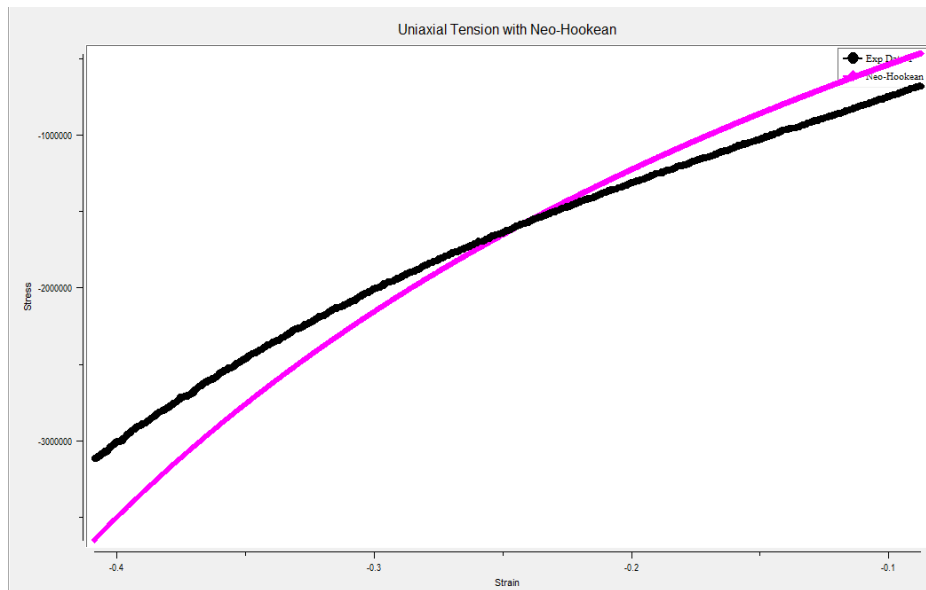


Fig. 31. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.93 g/cm^3 (Probetas grandes).

6- 1.01 g/cm³

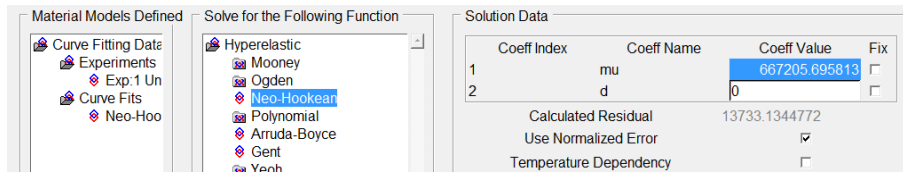


Fig. 32. Obtención de parámetros para Neo-Hooke con densidad 1.01 g/cm³ para probetas grandes mediante curve fitting.

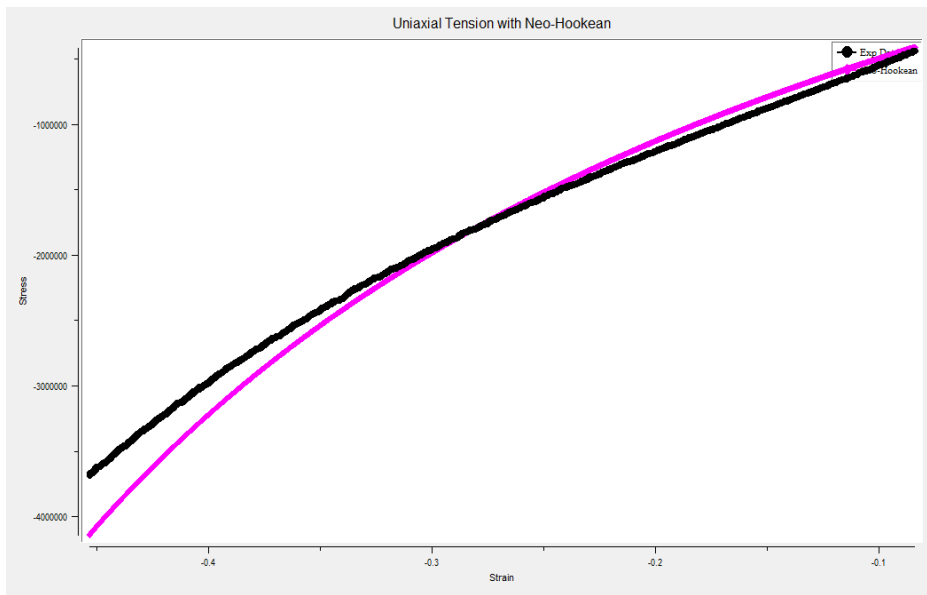


Fig. 33. Diagrama tensión-deformación para densidad 1.01 g/cm³ (Probetas grandes).

7- 1.03 g/cm³



Fig. 34. Obtención de parámetros para Neo-Hooke con densidad 1.03 g/cm³ para probetas grandes mediante curve fitting.

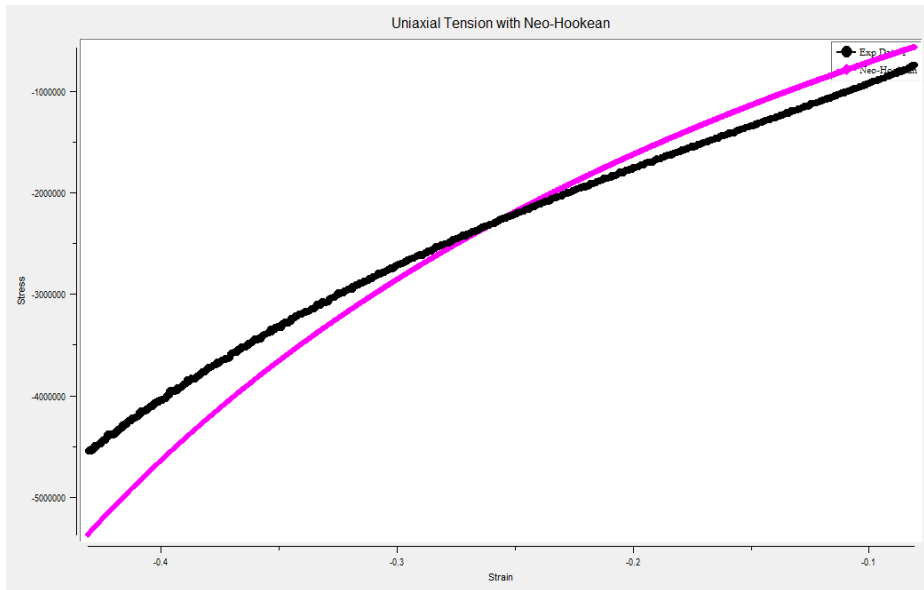


Fig. 35. Diagrama tensión-deformación para densidad 1.03 g/cm^3 (Probetas grandes).

Probetas pequeñas

1- 0.68 g/cm^3



Fig. 36. Obtención de parámetros para Neo-Hooke con densidad 0.68 g/cm^3 para probetas pequeñas mediante curve fitting.

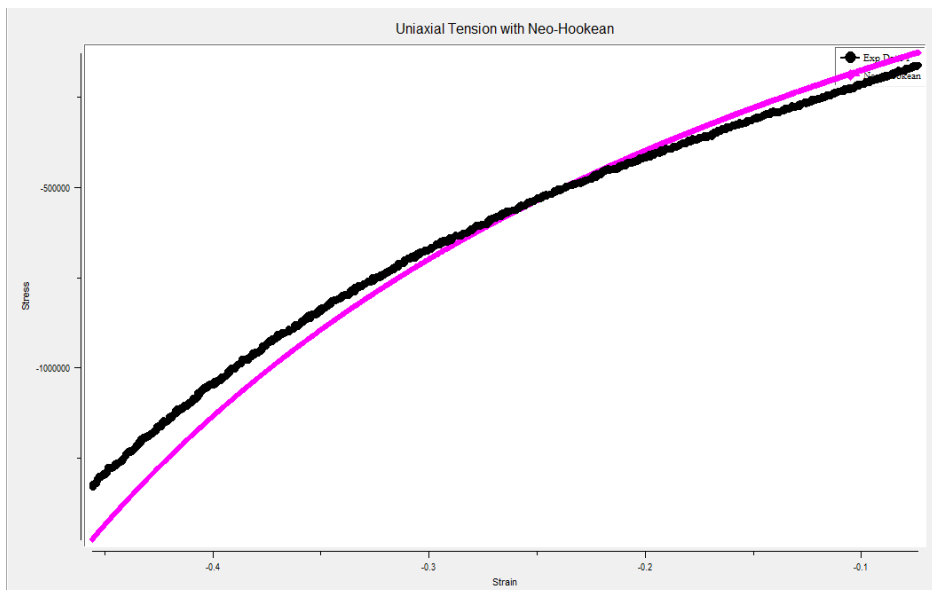


Fig. 37. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.68 g/cm^3 (Probetas pequeñas).

2-0.71 g/cm³

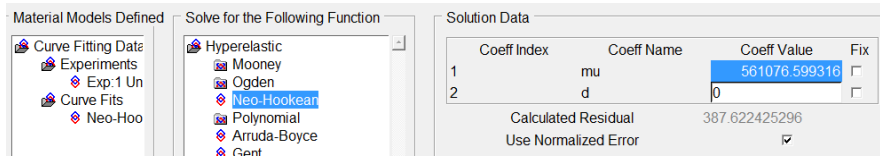


Fig. 38. Obtención de parámetros para Neo-Hooke con densidad 0.71 g/cm³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.

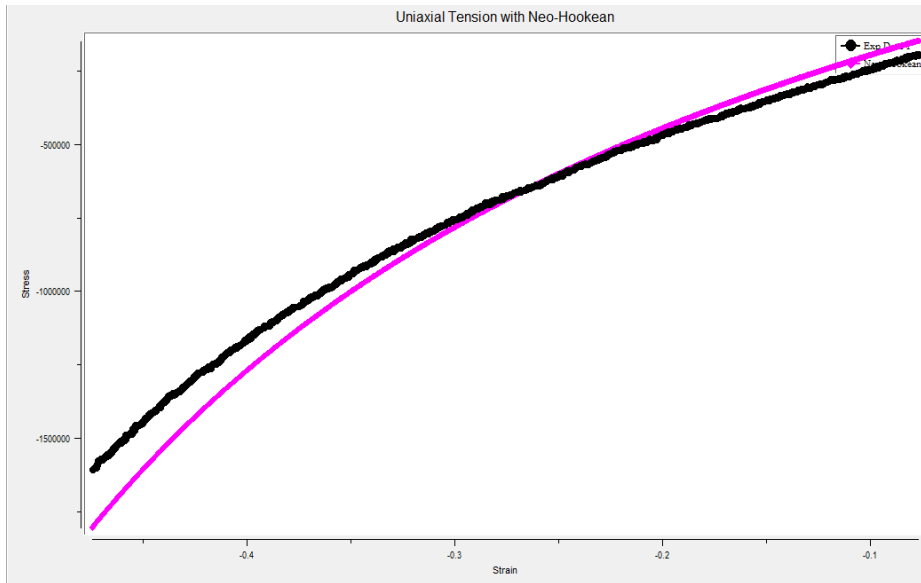


Fig. 39. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.71 g/cm³ (Probetas pequeñas).

3- 0.89 g/cm³

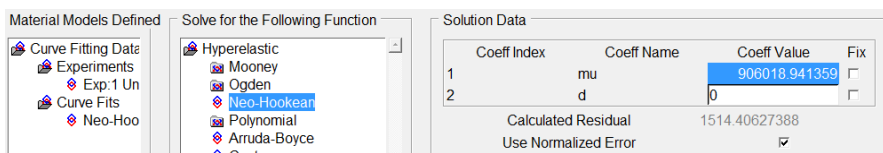


Fig. 40. Obtención de parámetros para Neo-Hooke con densidad 0.89 g/cm³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.

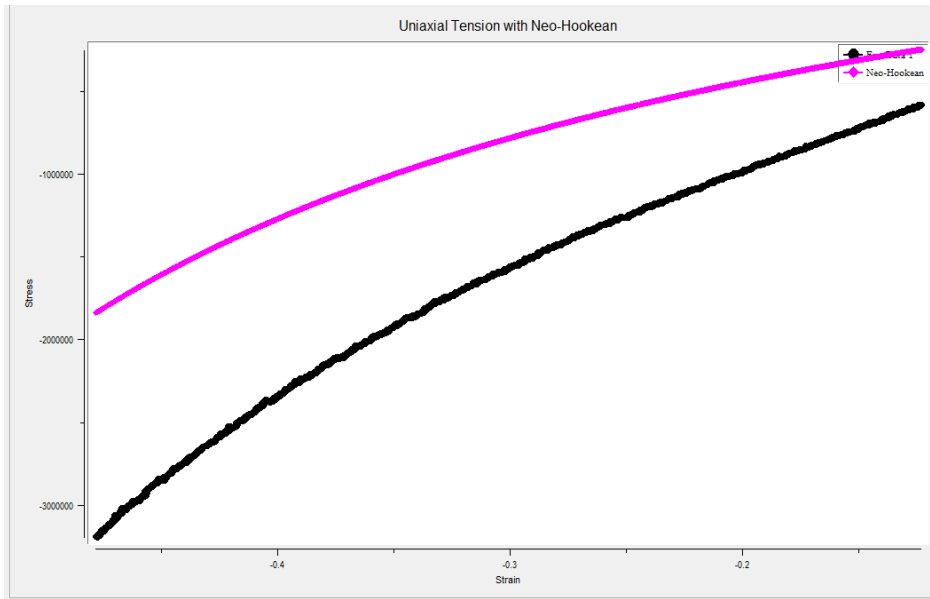


Fig. 41. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.89 g/cm^3 (Probetas pequeñas).

4- 0.91 g/cm^3

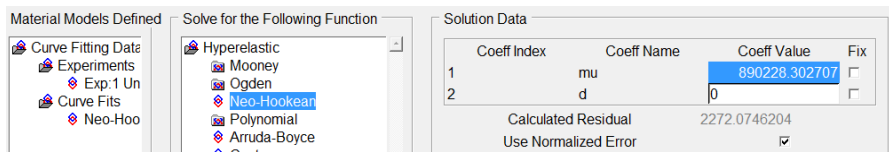


Fig. 42. Obtención de parámetros para Neo-Hooke con densidad 0.91 g/cm^3 para probetas pequeñas mediante curve fitting.

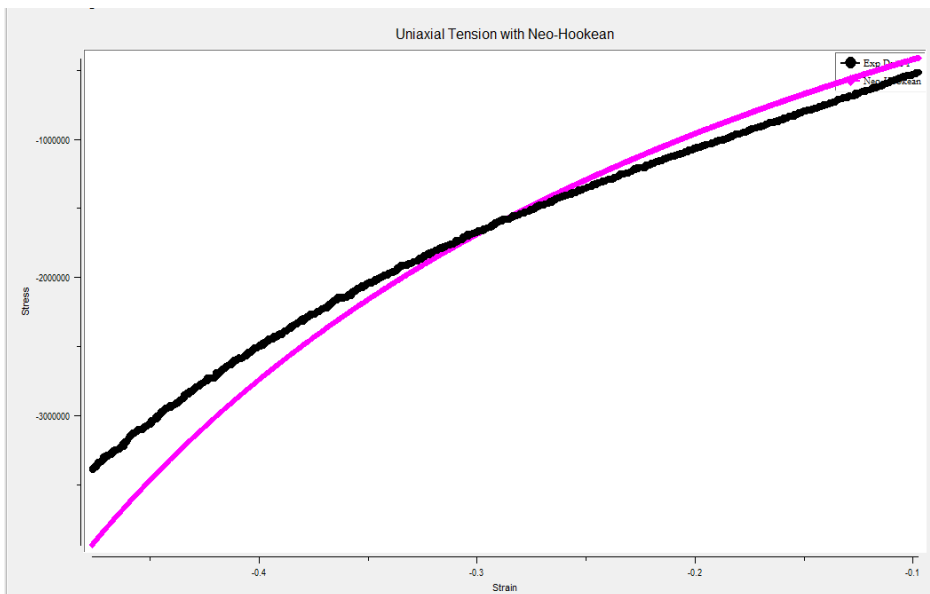


Fig. 43. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.91 g/cm^3 (Probetas pequeñas).

5- 0.97 g/cm³

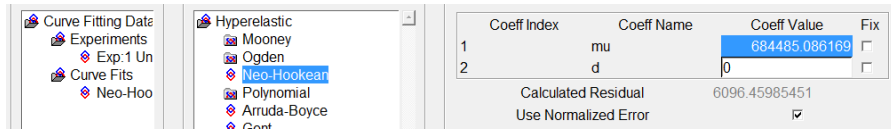


Fig. 44. Obtención de parámetros para Neo-Hooke con densidad 0.97 g/cm³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.

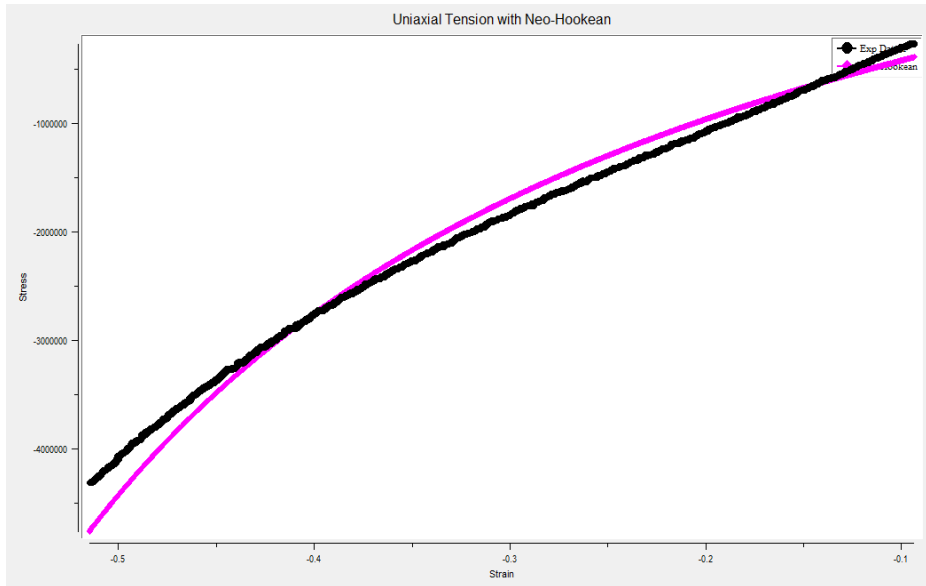


Fig. 45. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.97 g/cm³ (Probetas pequeñas).

6- 0.99 g/cm³



Fig. 46. Obtención de parámetros para Neo-Hooke con densidad 0.99 g/cm³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.

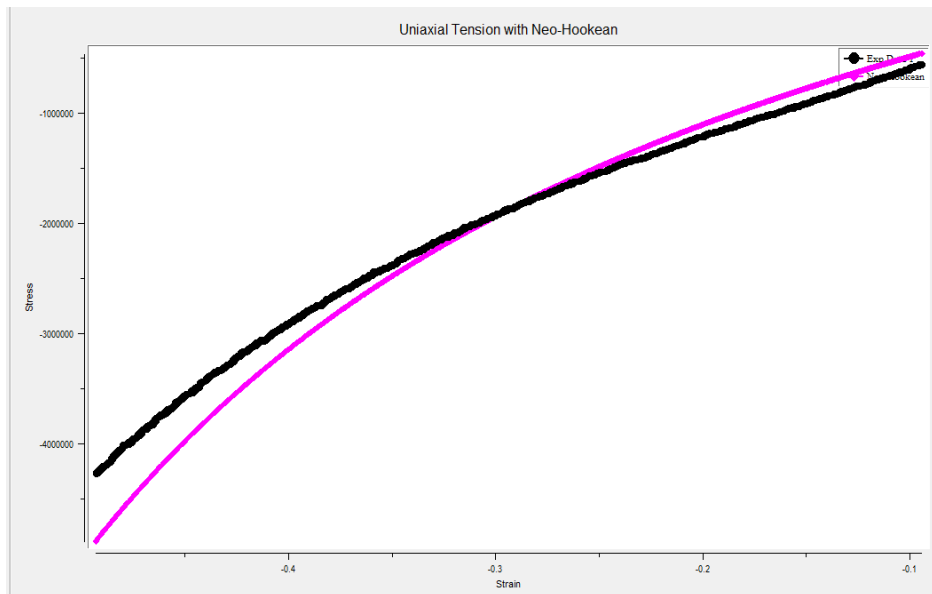


Fig. 47. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.99 g/cm^3 (Probetas pequeñas).

3.2. Mooney-Rivlin

Para el caso de Mooney-Rivlin, el proceso es el mismo que para Neo-Hooke, a diferencia de que para Mooney-Rivlin, los parámetros a obtener son 3.

El procedimiento, por lo tanto sería:

```

/input, menust, tmp, ''
/GRA, POWER
/GST, ON
/PLO, INFO, 3
/GRO, CURL, ON
/CPLANE, 1
/REPLOT, RESIZE
WPSTYLE, , , , , , 0
!*
/NOPR
KEYW, PR_SET, 1
KEYW, PR_STRUC, 1
KEYW, PR_THERM, 0
KEYW, PR_FLUID, 0
KEYW, PR_ELMAG, 0
KEYW, MAGNOD, 0
KEYW, MAGEDG, 0
KEYW, MAGHFE, 0
KEYW, MAGELC, 0
KEYW, PR_MULT I, 0
KEYW, PR_CFD, 0
KEYW, LSDYNA, 0
KEYW, PR_DYNA, 0
/GO
    
```

```
!*  
/COM,  
/COM, Preferences for GUI filtering have been set to display:  
/COM, Structural  
!*  
/PREP7  
!*  
/com, Curve Fitting Experimental Data Written To Geom_UNIA_1. exp  
TBFT, EADD, 1, UNIA, Geom_UNIA_1. exp  
TBFT, FADD, 1, HYPER, MOON, 3  
TBFT, SOLVE, 1, HYPER, MOON, 3, 1
```

Lo que interesa del Log File son los últimos pasos, en los cuales se definen las características de nuestro material y lo que se desea obtener. En la ayuda del programa ANSYS vienen explicados correctamente cada paso:

```
TBFT, EADD, 1, UNIA, Geom_UNIA_1. exp
```

TBFT,EADD,ID,Option1,Option2,Option3,Option4 ! Se introducen los datos experimentales.

Dónde:

ID = Índice que corresponde al número de material

Option1 = UNIA, BIAx, SHEA, SSHE or VOLU (nuestro caso uniaxial = 1)

Option2 = Nombre del archive que contiene los datos experimentales

Option3 = Extensión del archivo

Option4 = Directorio del archivo

```
TBFT, FADD, 1, HYPER, MOON, 3
```

TBFT,FADD,ID,HYPER,Option2,Option3 ! Se introducen las opciones del modelo del material.

Dónde:

ID = Índice que corresponde al número de material

Option2 = Nombre del modelo (en este caso Mooney-Rivlin)

Option3 = Orden o número de coeficientes. (Cómo es Mooney-Rivlin se eligen 3 parámetros)

```
TBFT, SOLVE, 1, HYPER, MOON, 3, 1
```

TBFT,SOLVE,ID,HYPER,Option2,Option3,Option4, ..., Option7 ! Establece los parámetros de control y lo resuelve.

Donde:

ID = Índice que corresponde al número de material

Option2 = Nombre del modelo (Este caso es Mooney-Rivlin)

Option3 = Orden o número de coeficientes (Mooney-Rivlin = 3)

Option4 = Procedimiento de curve fitting

- 0= Mínimos cuadrados no normalizados
- 1= Mínimos cuadrados normalizados (este caso es normalizado)

Option5 = Número máximo de iteraciones.

Option6 = Tolerancia de cambios residuales.

Option7 = Tolerancia de cambios en los coeficientes.

3.2.1. Resultados para Mooney-Rivlin

Probetas grandes

1- 0.73 g/cm³

Coeff Index	Coeff Name	Coeff Value	Fix
1	C10	1367349.65604	<input type="checkbox"/>
2	C01	-728456.496231	<input type="checkbox"/>
3	C11	104344.114078	<input type="checkbox"/>
4	d	0	<input type="checkbox"/>
Calculated Residual		46.2205132298	

Fig. 48. Obtención de parámetros para Mooney-Rivlin con densidad 0.73 g/cm³ para probetas grandes mediante curve fitting.

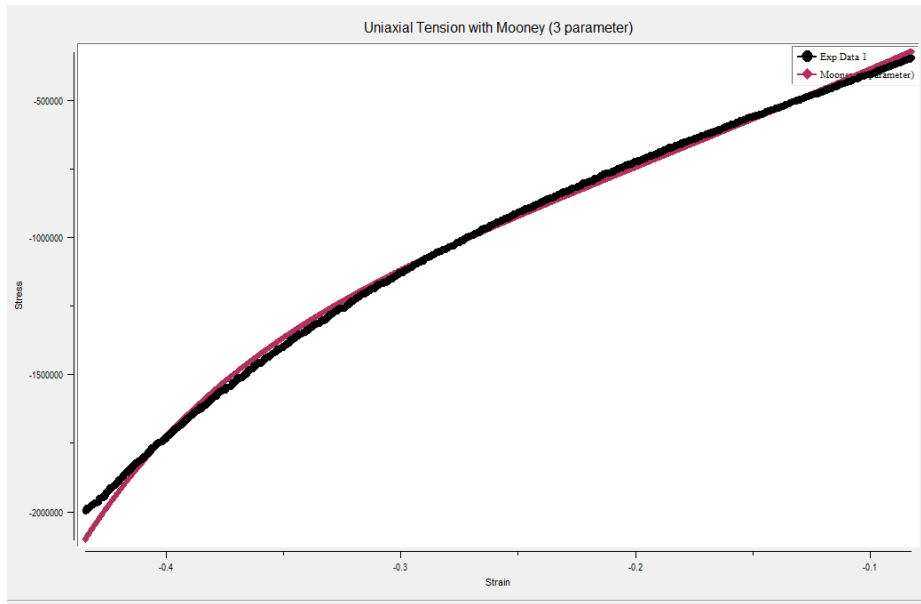


Fig. 49. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.73 g/cm^3 (Probetas grandes).

2- 0.82 g/cm^3

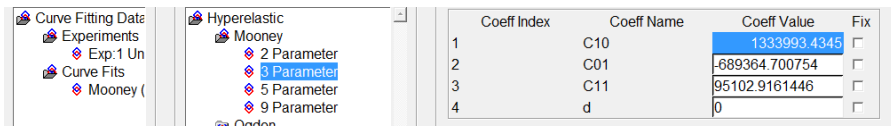


Fig. 50. Obtención de parámetros para Mooney-Rivlin con densidad 0.82 g/cm^3 para probetas grandes mediante curve fitting.

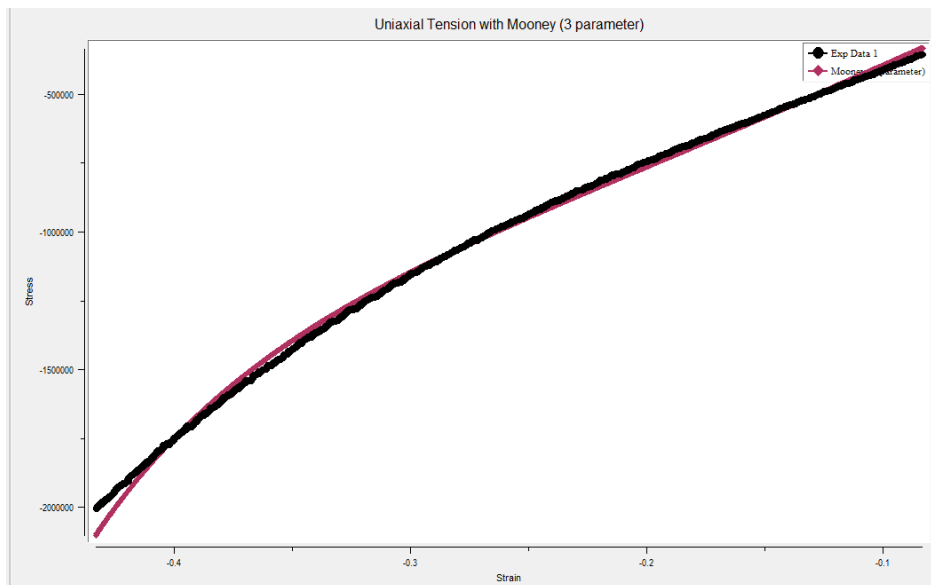


Fig. 51. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.82 g/cm^3 (Probetas grandes).

3- 0.83 g/cm³

Coeff Index	Coeff Name	Coeff Value	Fix
1	C10	696931.807633	<input type="checkbox"/>
2	C01	-209113.581721	<input type="checkbox"/>
3	C11	15872.1159812	<input type="checkbox"/>
4	d	0	<input type="checkbox"/>

Fig. 52. Obtención de parámetros para Mooney-Rivlin con densidad 0.83 g/cm³ para probetas grandes mediante curve fitting.

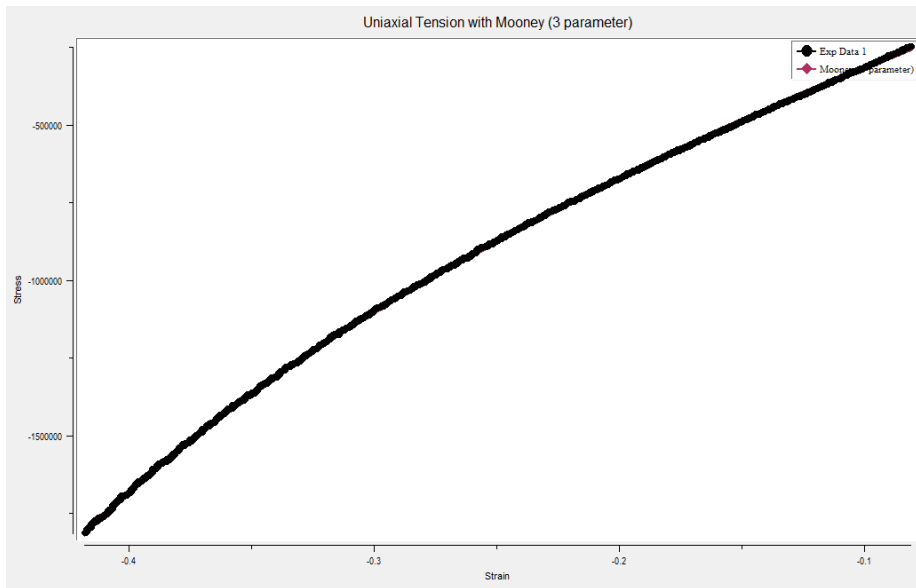


Fig. 53. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.83 g/cm³ (Probetas grandes).

4- 0.92 g/cm³

Coeff Index	Coeff Name	Coeff Value	Fix
1	C10	2917028.23344	<input type="checkbox"/>
2	C01	-1661292.32359	<input type="checkbox"/>
3	C11	259048.120789	<input type="checkbox"/>
4	d	0	<input type="checkbox"/>

Calculated Residual: 25.4437552013

Fig. 54. Obtención de parámetros para Mooney-Rivlin con densidad 0.92 g/cm³ para probetas grandes mediante curve fitting.

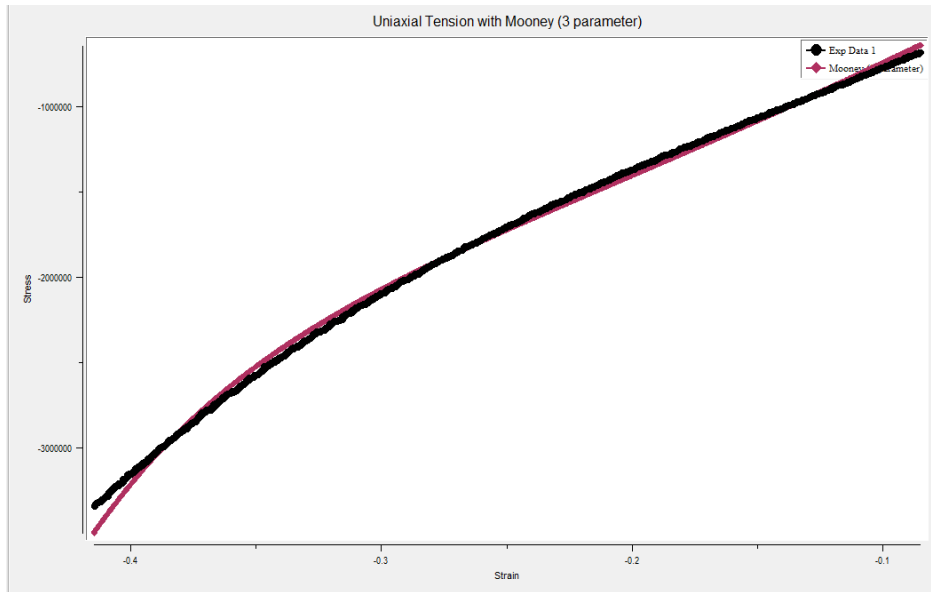


Fig. 55. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.92 g/cm^3 (Probetas grandes).

5- 0.93 g/cm^3

Coeff Index	Coeff Name	Coeff Value	Fix
1	C10	2795290.80601	<input type="checkbox"/>
2	C01	-1591790.35674	<input type="checkbox"/>
3	C11	246502.477935	<input type="checkbox"/>
4	d	0	<input type="checkbox"/>

Fig. 56. Obtención de parámetros para Mooney-Rivlin con densidad 0.93 g/cm^3 para probetas grandes mediante curve fitting.

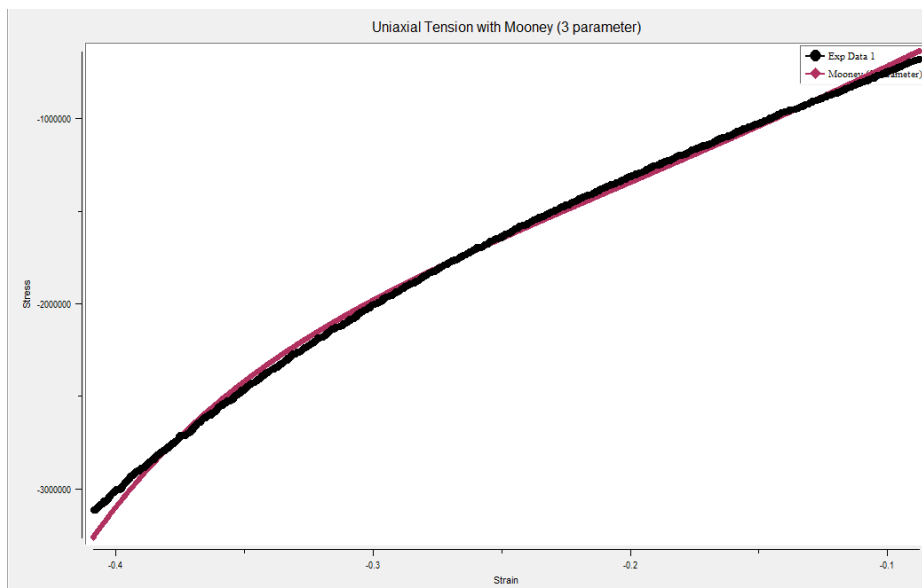


Fig. 57. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.93 g/cm^3 (Probetas grandes).

6- 1.01 g/cm³

Coeff Index	Coeff Name	Coeff Value	Fix
1	C10	1217507.6194	<input type="checkbox"/>
2	C01	-353354.596622	<input type="checkbox"/>
3	C11	24149.0401038	<input type="checkbox"/>
4	d	0	<input type="checkbox"/>

Fig. 58. Obtención de parámetros para Mooney-Rivlin con densidad 1.01 g/cm³ para probetas grandes mediante curve fitting.

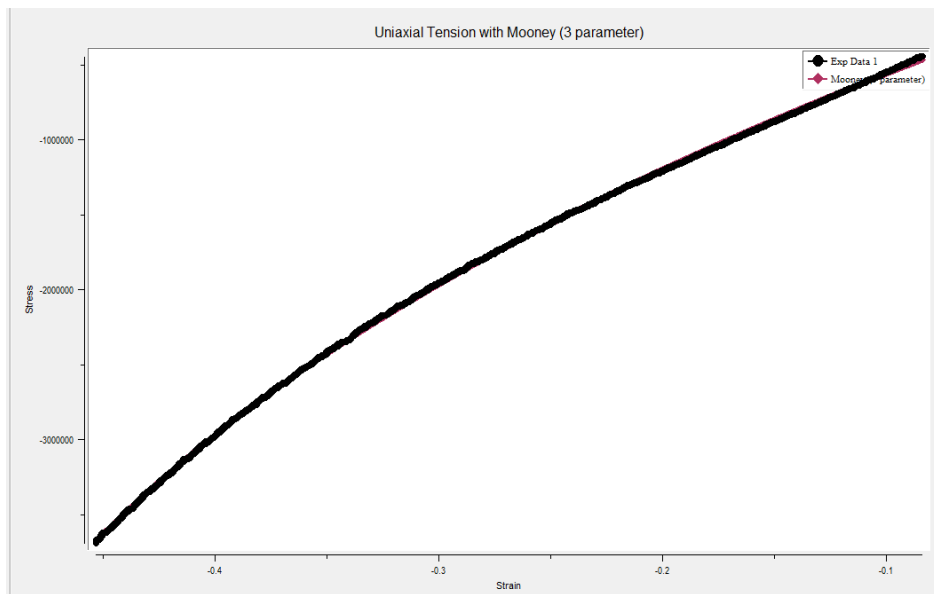


Fig. 59. Diagrama tensión-deformación para densidad 1.01 g/cm³ (Probetas grandes).

7- 1.03 g/cm³

Coeff Index	Coeff Name	Coeff Value	Fix
1	C10	3032341.43926	<input type="checkbox"/>
2	C01	-1542665.66347	<input type="checkbox"/>
3	C11	207616.075316	<input type="checkbox"/>
4	d	0	<input type="checkbox"/>

Fig. 60. Obtención de parámetros para Mooney-Rivlin con densidad 1.03 g/cm³ para probetas grandes mediante curve fitting.

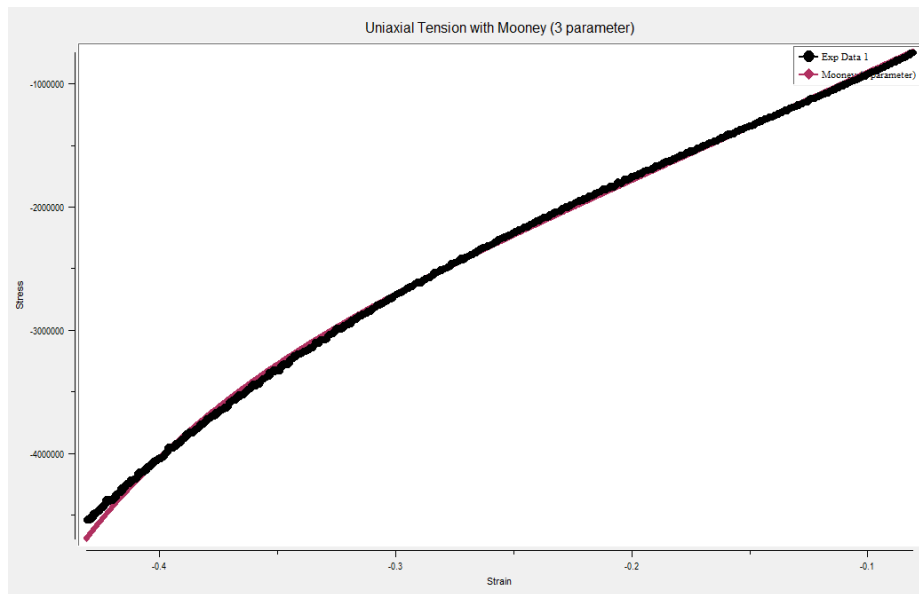


Fig. 61. Diagrama tensión-deformación para densidad 1.03 g/cm^3 (Probetas grandes).

Probetas pequeñas

1- 0.68 g/cm^3

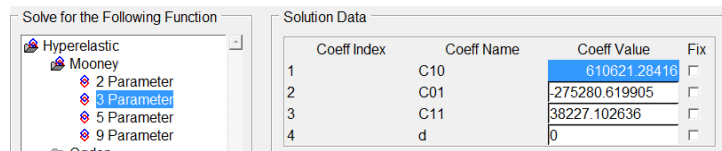


Fig. 62. Obtención de parámetros para Mooney-Rivlin con densidad 0.68 g/cm^3 para probetas pequeñas mediante curve fitting.

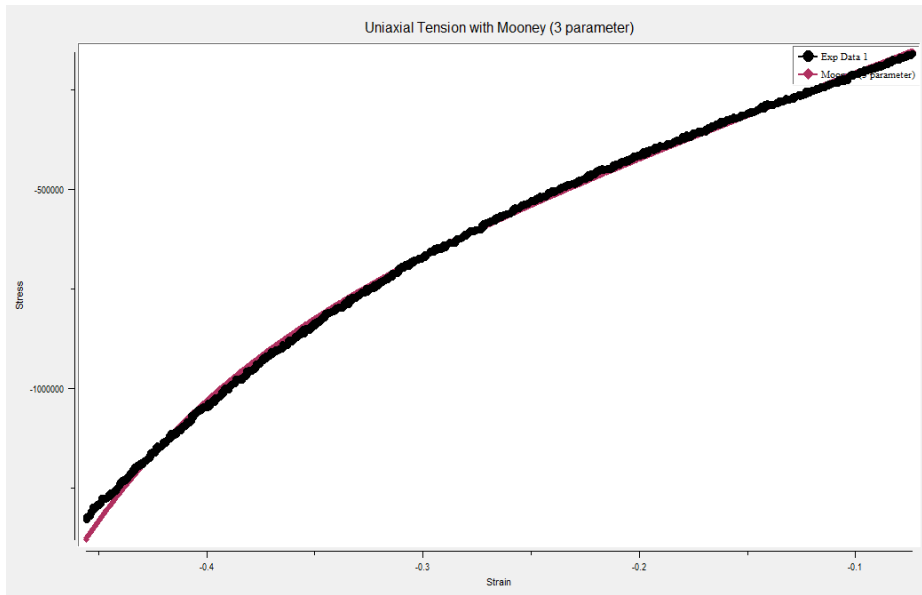


Fig. 63. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.68 g/cm^3 (Probetas pequeñas).

2- 0.71 g/cm^3

Coeff Index	Coeff Name	Coeff Value	Fix
1	C10	592026.084538	<input type="checkbox"/>
2	C01	-224560.529552	<input type="checkbox"/>
3	C11	19341.1688009	<input type="checkbox"/>
4	d	0	<input type="checkbox"/>

Fig. 64. Obtención de parámetros para Mooney-Rivlin con densidad 0.71 g/cm^3 para probetas pequeñas mediante curve fitting.

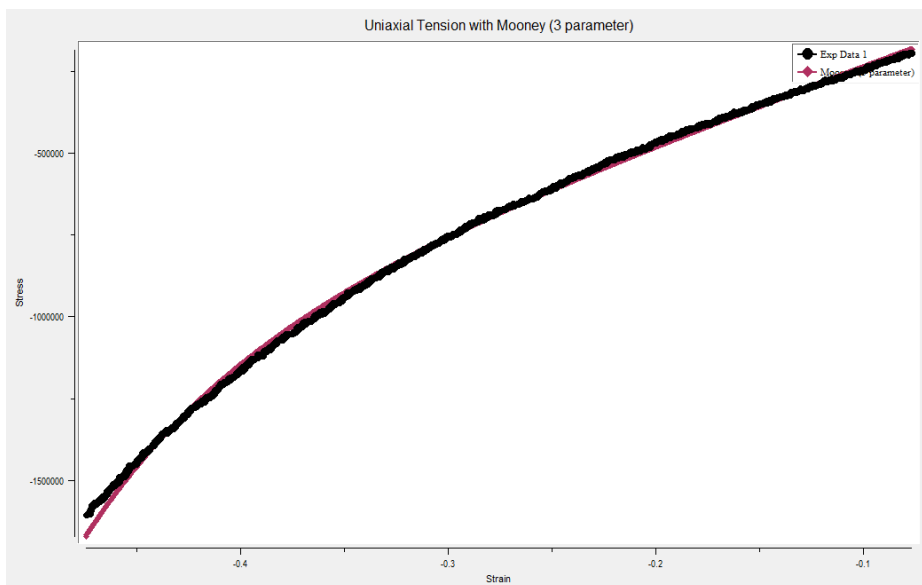


Fig. 65. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.71 g/cm^3 (Probetas pequeñas).

3- 0.89 g/cm³

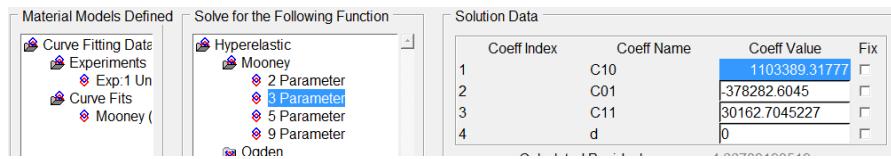


Fig. 66. Obtención de parámetros para Mooney-Rivlin con densidad 0.89 g/cm³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.

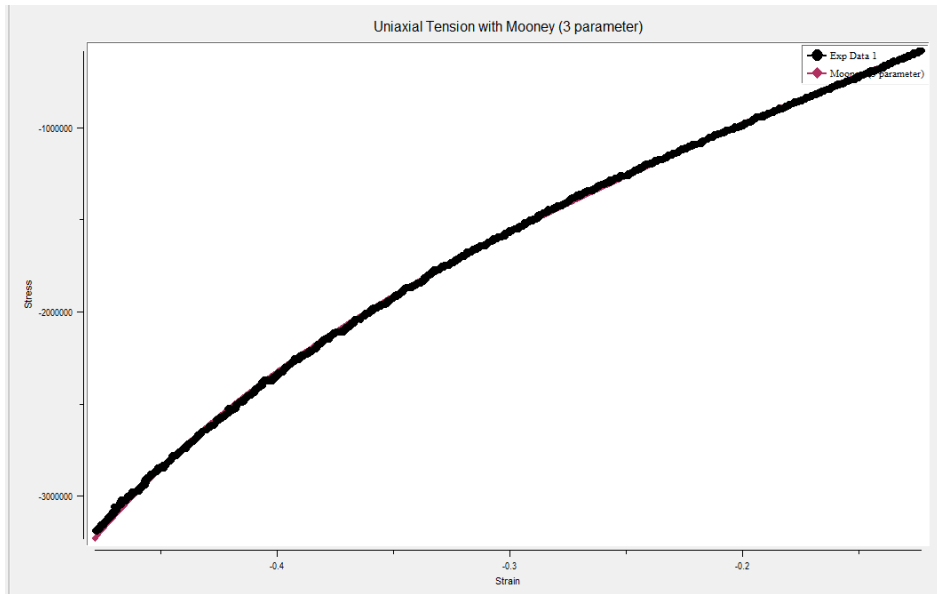


Fig. 67. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.89 g/cm³ (Probetas pequeñas).

4- 0.91 g/cm³

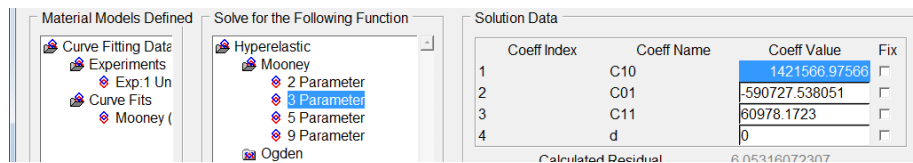


Fig. 68. Obtención de parámetros para Mooney-Rivlin con densidad 0.91 g/cm³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.

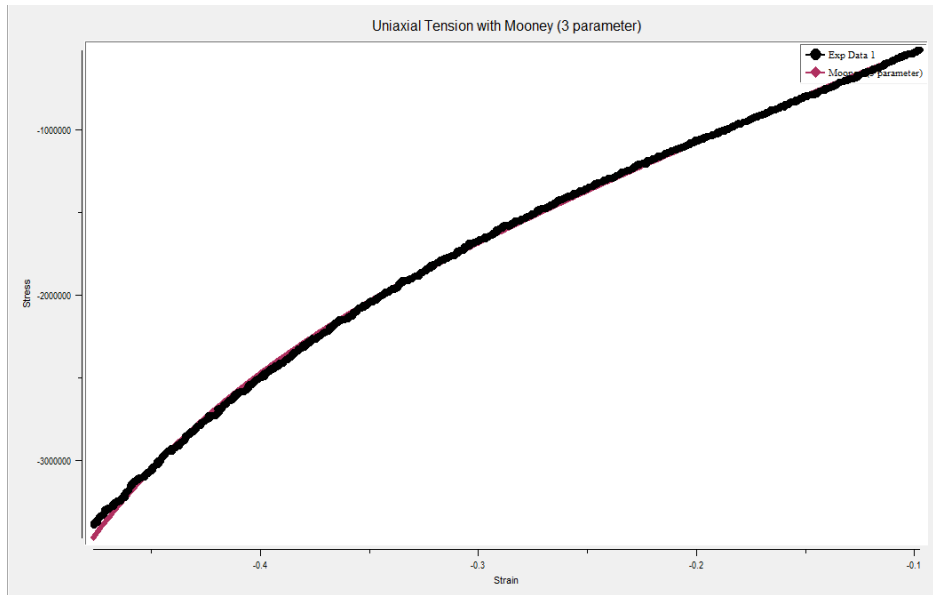


Fig. 69. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.91 g/cm^3 (Probetas pequeñas).

5- 0.97 g/cm^3

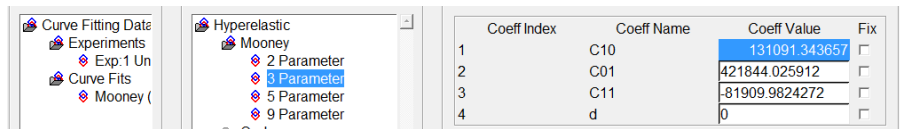


Fig. 70. Obtención de parámetros para Mooney-Rivlin con densidad 0.97 g/cm^3 para probetas pequeñas mediante curve fitting.

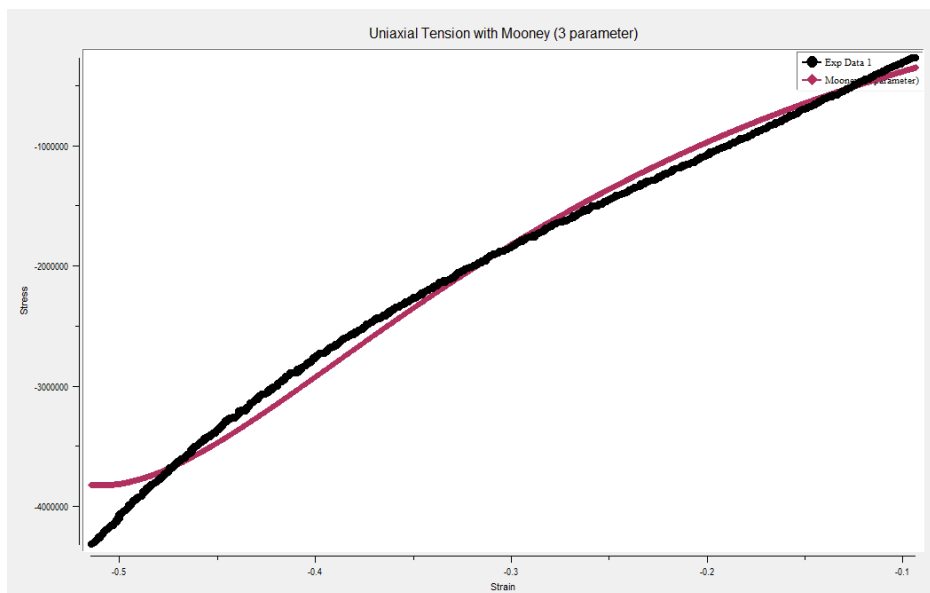


Fig. 71. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.97 g/cm^3 (Probetas pequeñas).

6- 0.99 g/cm³

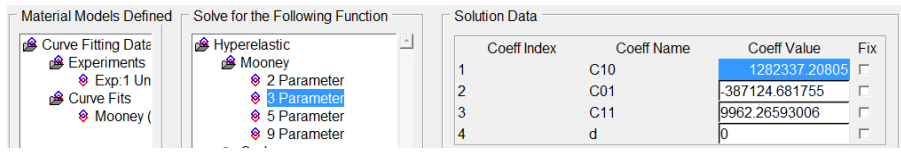


Fig. 72. Obtención de parámetros para Mooney-Rivlin con densidad 0.99 g/cm³ para probetas pequeñas mediante curve fitting.

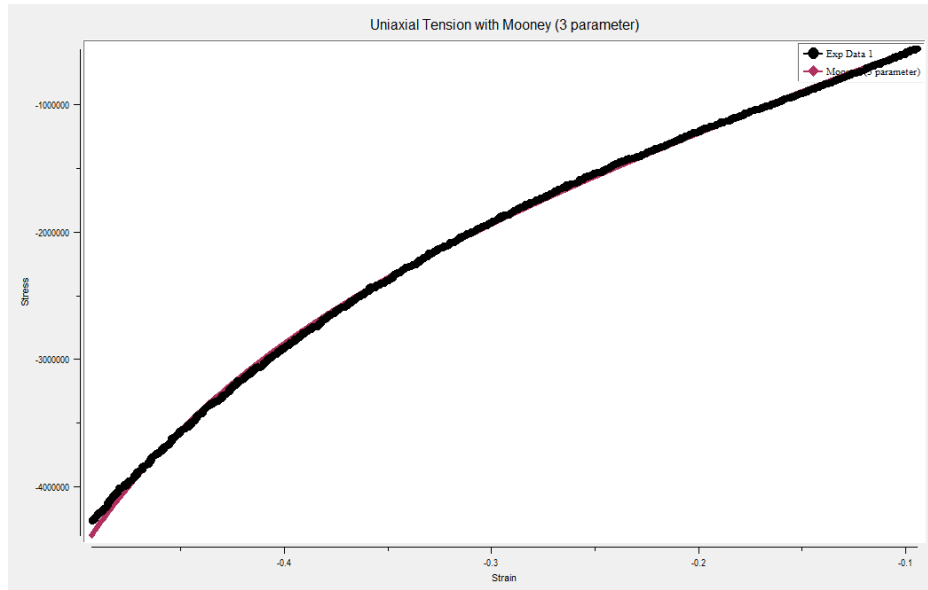


Fig. 73. Diagrama tensión-deformación para densidad 0.99 g/cm³ (Probetas pequeñas).

Capítulo 4. Resumen de resultados

A continuación, a modo de resumen, se exponen mediante tablas los resultados obtenidos para cada método empleado y cada densidad:

4.1. Ajuste mínimos cuadrados (MATLAB)

4.1.1. Neo-Hooke

PROBETAS GRANDES							
	d = 0.7 g/cm³	d = 0.8 g/cm³		d = 0.9 g/cm³		d = 1 g/cm³	
Pa	0.73	0.82A	0.83A	0.92A	0.93A	1.01A	1.03A
C₁₀	2.4421e+05	2.3920e+05	2.2625e+05	4.6515e+05	4.4623e+05	3.8515e+05	5.7061e+05

Tabla 1: Constante hiperelástica para probetas grandes obtenidas mediante ajuste de mínimos cuadrados para modelo Neo-Hooke.

PROBETAS PEQUEÑAS							
	d = 0.7 g/cm³		d = 0.9 g/cm³		d = 1 g/cm³		
Pa	0.68	0.71	0.89A	0.91A	0.97A	0.99A	
C₁₀	1.5115e+05	1.6934e+05	2.7681e+05	3.4536e+05	3.0254e+05	4.4347e+05	

Tabla 2: Constante hiperelástica para probetas pequeñas obtenidas mediante ajuste de mínimos cuadrados para modelo Neo-Hooke.

4.1.2. Mooney-Rivlin

PROBETAS GRANDES								
	d = 0.7 g/cm ³		d = 0.8 g/cm ³		d = 0.9 g/cm ³		d = 1 g/cm ³	
	0.73B		0.82A	0.83A	0.92A	0.93A	1.01A	1.03A
C₁₀ (Pa)	1.21E+06		1.15E+06	5.93E+05	2.71E+06	2.65E+06	1.05E+06	2.61E+06
C₀₁ (Pa)	-5.96E+05		-5.40E+05	-1.27E+05	-1.49E+06	-1.46E+06	-	-1.20E+06
							2.24E+05	
C₁₁ (Pa)	7.66E+04		6.67E+04	1.29E+03	2.21E+05	2.17E+05	3.22E+03	1.42E+05

Tabla 3: Constantes hiperelásticas para probetas grandes obtenidas mediante ajuste de mínimos cuadrados para modelo Mooney-Rivlin.

PROBETAS PEQUEÑAS						
	d = 0.7 g/cm ³		d = 0.9 g/cm ³		d = 1 g/cm ³	
	0.68A	0.71A	0.89A	0.91A	0.97A	0.99A
C₁₀ (Pa)	6.07E+05	7.16E+05	9.43E+05	1.4E+06	5.87E+05	1.58E+06
C₀₁ (Pa)	-2.75E+05	-3.35E+05	-2.56E+05	-5.87E+05	7.13E+04	-6.54E+05
C₁₁ (Pa)	4.19E+04	5.01E+04	1.2E+04	6.88E+04	-3.09E+04	8.39E+04

Tabla 4: Constantes hiperelásticas para probetas pequeñas obtenidas mediante ajuste de mínimos cuadrados para modelo Mooney-Rivlin.

4.2. Curve fitting (ANSYS)

4.2.1. Neo-Hooke

PROBETAS GRANDES							
	d = 0.7 g/cm ³	d = 0.8 g/cm ³		d = 0.9 g/cm ³		d = 1 g/cm ³	
Pa	0.73	0.82A	0.83A	0.92A	0.93A	1.01A	1.03A
C₁₀	8.7392e+05	8.3983e+05	5.7422e+05	1.5855e+06	1.5930e+06	6.6721e+05	4.3279e+05

Tabla 5: Constante hiperelástica para probetas grandes (modelo Neo-Hooke) obtenidas mediante Curve-fitting.

PROBETAS PEQUEÑAS						
	$d = 0.7 \text{ g/cm}^3$		$d = 0.9 \text{ g/cm}^3$		$d = 1 \text{ g/cm}^3$	
Pa	0.68	0.71	0.89A	0.91A	0.97A	0.99A
C₁₀	5.1704e+05	5.6107e+05	9.0608e+05	8.9022e+05	6.8448e+05	7.8624e+05

Tabla 6: Constante hiperelástica para probetas pequeñas (modelo Neo-Hooke) obtenidas mediante Curve-fitting.

4.2.2. Mooney-Rivlin

PROBETAS GRANDES							
	$d = 0.7 \text{ g/cm}^3$	$d = 0.8 \text{ g/cm}^3$		$d = 0.9 \text{ g/cm}^3$		$d = 1 \text{ g/cm}^3$	
	0.73	0.82A	0.83A	0.92A	0.93A	1.01A	1.03A
C₁₀ (Pa)	1.37E+06	1.33E+06	6.97E05	2.91E+06	2.79E+06	1.21E+06	3.03E+06
C₀₁ (Pa)	-7.28E+05	-6.89E+05	-2.09E+05	-1,66E+06	-1.59E+06	-3.5E+05	-1.54E+06
C₁₁ (Pa)	1.04E+05	9.51E+04	1.58E+04	2.59E+05	2.46E+05	2.41E+04	2.08E+05

Tabla 7: Constantes hiperelásticas para probetas grandes (modelo Mooney-Rivlin) obtenidas mediante Curve-fitting.

PROBETAS PEQUEÑAS						
	$d = 0.7 \text{ g/cm}^3$		$d = 0.9 \text{ g/cm}^3$		$d = 1 \text{ g/cm}^3$	
	0.68A	0.71A	0.89A	0.91A	0.97A	0.99A
C₁₀ (Pa)	6.11E+05	5.92E+05	1.1E+06	1.42E+06	1.31E+05	1.28E+06
C₀₁ (Pa)	-2.75E+05	-2.24E+05	-3.78E+05	-5.91E+05	4.21E+05	-3.87E+05
C₁₁ (Pa)	3.82E+04	1.93E+04	3.02E+04	6.1E+04	-8.19E+04	9.96E+03

Tabla 8: Constantes hiperelásticas para probetas pequeñas (modelo Mooney Rivlin) obtenidas mediante Curve-fitting.

