

Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Simulación y validación de la curva de tracción de
materiales metálicos bajo diferentes temperaturas

Autor: Jesús Redondo Jurado

Tutor: Fátima Ternero Fernández y Juan Manuel Montes Martos

Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Autor:

Jesús Redondo Jurado

Tutores:

Fátima Ternero Fernández

Juan Manuel Montes Martos

Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Grado: Simulación y validación de la curva de tracción de materiales metálicos bajo diferentes temperaturas.

Autor: Jesús Redondo Jurado

Tutor: Fátima Ternero Fernández y Juan Manuel Montes Martos

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Fecha:

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

A Marina, por ser mi apoyo incondicional.

Jesús Redondo Jurado

Sevilla, 2022

Resumen

En este trabajo se ha llevado a cabo la simulación de las curvas de tracción de distintas probetas metálicas a diferentes temperaturas, previo ajuste mediante mínimos cuadrados de las curvas reales obtenidas experimentalmente. Las aleaciones que se han ensayado son: acero C45, acero 304, aluminio 2011, fundición gris y latón.

Este TFG se ha apoyado en trabajos anteriores, en los cuales se hacía uso de versiones más primitivas del modelo. El estudio y análisis de los resultados se ha centrado exclusivamente en la influencia que la variación de la temperatura tiene en el comportamiento de las curvas de tracción de los materiales mencionados.

Abstract

In this work, the simulation of the tensile curves of different metallic specimens at different temperatures has been carried out, after fitting by means of least squares of the real curves obtained experimentally. The alloys that have been tested are: C45 steel, 304 steel, 2011 aluminum, gray cast iron and brass.

This work has been based on previous works, in which more preliminary versions of the model were used. The study and analysis of the results has focused exclusively on the influence that the variation in temperature has on the behavior of the tensile curves of the mentioned materials.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
1 Introducción	1
1.1. <i>Conceptos teóricos</i>	1
1.1.1. <i>Ensayo de tracción</i>	1
1.1.2. <i>Efecto de la velocidad de deformación y temperatura</i>	3
1.2. <i>Modelos teóricos</i>	3
1.2.1. <i>Modelo teórico de la simulación</i>	3
1.2.2. <i>Modelo teórico de las sensibilidades</i>	4
1.3. <i>Objetivo del TFG</i>	6
2 Materiales estudiados	7
2.1. <i>Acero C45</i>	7
2.2. <i>Acero 304</i>	8
2.3. <i>Aluminio 2011</i>	8
2.4. <i>Latón</i>	9
2.5. <i>Fundición gris</i>	10
3 Procedimiento experimental	11
3.1. <i>Realización de los ensayos</i>	11
3.2. <i>Método de ajuste</i>	11

3.3.	<i>Ajuste de las sensibilidades</i>	13
4	Análisis de los resultados	15
4.1.	<i>Ajuste del acero C45</i>	15
4.2.	<i>Ajuste del acero AISI 304</i>	25
4.3.	<i>Ajuste del aluminio 2011</i>	33
4.4.	<i>Ajuste del latón</i>	41
4.5.	<i>Ajuste de la fundición gris</i>	49
4.6.	<i>Comparativa final</i>	56
5	Conclusión	61
	Referencias	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Modelo de sensibilidad frente a la temperatura y el ritmo de deformación	5
Tabla 2.1. Nomenclatura de las probetas de acero C45 normalizado ensayadas a alta temperatura.....	3
Tabla 2.2. Nomenclatura de las probetas de acero C45 normalizado ensayadas a temperatura ambiente.	3
Tabla 2.3. Nomenclatura de las probetas de acero AISI 304.	8
Tabla 2.4. Nomenclatura de las probetas de aluminio 2011 ensayadas a alta temperatura.....	9
Tabla 2.5. Nomenclatura de las probetas de aluminio 2011 ensayadas a temperatura ambiente.	9
Tabla 2.6. Nomenclatura de las probetas de latón.	9
Tabla 2.7. Nomenclatura de las probetas de fundición gris.....	10
Tabla 4.1. Parámetros de la curva de tracción del acero C45 normalizado a diferentes temperaturas.....	21
Tabla 4.2. Parámetros normalizados de la curva de tracción del acero C45 a diferentes temperaturas.	21
Tabla 4.3. Parámetros de la curva de tracción del acero AISI 304 a diferentes temperaturas.	29
Tabla 4.4. Parámetros normalizados de la curva de tracción del acero AISI 304 a diferentes temperaturas.....	29
Tabla 4.5. Parámetros de la curva de tracción del aluminio 2011 a diferentes temperaturas.	37
Tabla 4.6. Parámetros normalizados de la curva de tracción del aluminio 2011 a diferentes temperaturas.....	37
Tabla 4.7. Parámetros de la curva de tracción del latón a diferentes temperaturas.	45
Tabla 4.8. Parámetros normalizados de la curva de tracción del latón a diferentes temperaturas.....	45
Tabla 4.9. Parámetros de la curva de tracción de la fundición gris a diferentes temperaturas.....	53
Tabla 4.10. Parámetros normalizados de la curva de tracción de la fundición gris a diferentes temperaturas.	53
Tabla 4.11. Valores de las ecuaciones de sensibilidad del acero C45.	57
Tabla 4.12. Valores de las ecuaciones de sensibilidad del acero AISI 304.....	57
Tabla 4.13. Valores de las ecuaciones de sensibilidad del aluminio 2011.....	58
Tabla 4.14. Valores de las ecuaciones de sensibilidad del latón.....	58
Tabla 4.15. Valores de las ecuaciones de sensibilidad de la fundición gris.	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Curva de tracción ingenieril de un metal genérico.	2
Figura 3.1. Simulador de curvas desarrollado en Visual Basic de Excel.	12
Figura 3.2. Datos de partida para llevar a cabo el ajuste.	12
Figura 3.3. Parámetros obtenidos mediante el programa de ajuste.	13
Figura 3.4. Base de datos de los parámetros utilizados en el ajuste para cada temperatura del acero AISI 304.	13
Figura 3.5. Hoja de Excel para analizar la tendencia de los parámetros.	14
Figura 4.1. Curvas de tracción experimental y simulada del acero C45-T1 (T = 100 °C).	16
Figura 4.2. Curvas de tracción experimental y simulada del acero C45-T2 (T = 100 °C).	16
Figura 4.3. Curvas de tracción experimental y simulada del acero C45-T3 (T = 200 °C).	17
Figura 4.4. Curvas de tracción experimental y simulada del acero C45-T4 (T = 200 °C).	17
Figura 4.5. Curvas de tracción experimental y simulada del acero C45-T5 (T = 300 °C).	18
Figura 4.6. Curvas de tracción experimental y simulada del acero C45-T6 (T = 300 °C).	18
Figura 4.7. Curvas de tracción experimental y simulada del acero C45-N02 (temperatura ambiente).	19
Figura 4.8. Comparativa de curvas experimentales de acero C45 normalizado a diferentes temperaturas.	20
Figura 4.9. Comparativa de curvas simuladas de acero C45 normalizado a diferentes temperaturas.	20
Figura 4.10. Representación normalizada de la deformación del límite elástico (izquierda) y el tamaño de la zona de fluencia (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero C45.	22
Figura 4.11. Representación normalizada de la deformación máxima (izquierda) y deformación de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero C45.	22
Figura 4.12. Representación normalizada del límite elástico superior (izquierda) y límite elástico inferior (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero C45.	23
Figura 4.13. Representación normalizada de la resistencia máxima (izquierda) y resistencia de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero C45.	23
Figura 4.14. Representación normalizada del parámetro k (izquierda) y del parámetro m (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero C45.	24
Figura 4.15. Representación normalizada del parámetro n (izquierda) y del parámetro \tilde{n} (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero C45.	24
Figura 4.16. Representación normalizada del parámetro p respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero C45.	24
Figura 4.17. Comparación entre las tendencias de la deformación promedio (izquierda) y del esfuerzo promedio (derecha) con la tendencia del modelo teórico de sensibilidades del acero C45.	25
Figura 4.18. Curvas de tracción experimental y simulada del acero AISI 304-A20 (temperatura ambiente).	25
Figura 4.19. Curvas de tracción experimental y simulada del acero AISI 304-A28 (T = 100 °C).	26
Figura 4.20. Curvas de tracción experimental y simulada del acero AISI 304-A30 (T = 200 °C).	26
Figura 4.21. Curvas de tracción experimental y simulada del acero AISI 304-A33 (T = 300 °C).	27
Figura 4.22. Comparativa de curvas experimentales de acero AISI 304 a diferentes temperaturas.	28
Figura 4.23. Comparativa de curvas simuladas de acero AISI 304 a diferentes temperaturas.	28

Figura 4.24. Representación normalizada de la deformación del límite elástico (izquierda) y el tamaño de la zona de fluencia (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.	29
Figura 4.25. Representación normalizada de la deformación máxima (izquierda) y deformación de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.	30
Figura 4.26. Representación normalizada del límite elástico superior (izquierda) e inferior (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.	30
Figura 4.27. Representación normalizada de la resistencia máxima (izquierda) y resistencia de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.	31
Figura 4.28. Representación normalizada del parámetro k (izquierda) y del parámetro m (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.	31
Figura 4.29. Representación normalizada del parámetro n (izquierda) y del parámetro \tilde{n} (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.	32
Figura 4.30. Representación normalizada del parámetro p respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.	32
Figura 4.31. Representación de la tendencia de la deformación promedio (izquierda) y la tensión promedio (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.	33
Figura 4.32. Curvas de tracción experimental y simulada del aluminio 2011 O-04 (temperatura ambiente).	33
Figura 4.33. Curvas de tracción experimental y simulada del aluminio 2011 Al-T1 (T = 100 °C).	34
Figura 4.34. Curvas de tracción experimental y simulada del aluminio 2011 Al-T3 (T = 200 °C).	34
Figura 4.35. Curvas de tracción experimental y simulada del aluminio 2011 Al-T6 (T = 300 °C).	35
Figura 4.36. Comparativa de curvas experimentales del aluminio 2011 a diferentes temperaturas.	36
Figura 4.37. Comparativa de curvas simuladas del aluminio 2011 a diferentes temperaturas.	36
Figura 4.38. Representación normalizada de la deformación del límite elástico (izquierda) y el tamaño de la zona de fluencia (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.	38
Figura 4.39. Representación normalizada de la deformación máxima (izquierda) y deformación de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.	38
Figura 4.40. Representación normalizada del límite elástico superior (izquierda) e inferior (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.	39
Figura 4.41. Representación normalizada de la resistencia máxima (izquierda) y resistencia de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.	39
Figura 4.42. Representación normalizada del parámetro k (izquierda) y del parámetro m (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.	40
Figura 4.43. Representación normalizada del parámetro n (izquierda) y del parámetro \tilde{n} (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.	40
Figura 4.44. Representación normalizada del parámetro p respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.	40
Figura 4.45. Representación de la tendencia de la deformación promedio (izquierda) y la tensión promedio (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.	41
Figura 4.46. Curvas de tracción experimental y simulada del latón L-02 (temperatura ambiente).	42
Figura 4.47. Curvas de tracción experimental y simulada del latón L-T2 (T = 100 °C).	42
Figura 4.48. Curvas de tracción experimental y simulada del latón L-T4 (T = 200 °C).	43
Figura 4.49. Curvas de tracción experimental y simulada del latón L-T5 (T = 300 °C).	43
Figura 4.50. Comparativa de curvas experimentales del latón a diferentes temperaturas.	44

Figura 4.51. Comparativa de curvas simuladas del latón a diferentes temperaturas.....	44
Figura 4.52. Representación normalizada de la deformación del límite elástico (izquierda) y el tamaño de la zona de fluencia (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.	46
Figura 4.53. Representación normalizada de la deformación máxima (izquierda) y la deformación de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.....	46
Figura 4.54. Representación normalizada del límite elástico superior (izquierda) e inferior (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.	47
Figura 4.55. Representación normalizada de la resistencia máxima (izquierda) y la resistencia de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.....	47
Figura 4.56. Representación normalizada del parámetro k (izquierda) y del parámetro m (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.	48
Figura 4.57. Representación normalizada del parámetro n (izquierda) y del parámetro \tilde{n} (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.	48
Figura 4.58. Representación normalizada del parámetro p respecto a la temperatura de ensayo del latón.	48
Figura 4.59. Representación de la tendencia de la deformación promedio (izquierda) y la tensión promedio (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.....	49
Figura 4.60. Curvas de tracción experimental y simulada de fundición gris F-01 (temperatura ambiente).....	49
Figura 4.61. Curvas de tracción experimental y simulada de fundición gris Fund-T1 ($T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$).	50
Figura 4.62. Curvas de tracción experimental y simulada de fundición gris Fund-T4 ($T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$).	50
Figura 4.63. Curvas de tracción experimental y simulada de fundición gris Fund-T5 ($T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$).	51
Figura 4.64. Comparativa de curvas experimentales de fundición gris a diferentes temperaturas.	52
Figura 4.65. Comparativa de curvas simuladas de fundición gris a diferentes temperaturas.	52
Figura 4.66. Representación normalizada de la deformación del límite elástico (izquierda) y el tamaño de la zona de fluencia (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.....	53
Figura 4.67. Representación normalizada de la deformación máxima (izquierda) y la deformación de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.	54
Figura 4.68. Representación normalizada del límite elástico superior (izquierda) e inferior (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.	54
Figura 4.69. Representación normalizada de la deformación máxima (izquierda) y la deformación de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.	55
Figura 4.70. Representación normalizada del parámetro k (izquierda) y del parámetro m (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.	55
Figura 4.71. Representación normalizada del parámetro n (izquierda) y del parámetro \tilde{n} (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.	55
Figura 4.72. Representación normalizada del parámetro p respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.....	56
Figura 4.73. Representación de la tendencia de la deformación promedio (izquierda) y la tensión promedio (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.....	56
Figura 4.74. Tendencia de la deformación promedio (izquierda) y la tensión promedio (derecha) del acero C45 ante la variación del ritmo de deformación (v) y la temperatura de ensayo (t).....	59
Figura 4.75. Tendencia de la deformación promedio (izquierda) y la tensión promedio (derecha) del latón ante la variación del ritmo de deformación (v) y la temperatura de ensayo (t).....	59
Figura 4.76. Tendencia de la deformación promedio (izquierda) y la tensión promedio (derecha) de la fundición gris ante la variación del ritmo de deformación (v) y la temperatura de ensayo (t).	59

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Conceptos teóricos

Este trabajo se centra en el análisis del comportamiento mecánico de una serie de metales seleccionados bajo el ensayo de tracción. En este apartado se llevará a cabo una breve explicación de los fundamentos teóricos relativos a este ensayo, así como de las propiedades y las curvas obtenidas que serán objeto de estudio.

1.1.1 Ensayo de tracción

Las propiedades mecánicas de los materiales indican su comportamiento cuando están sometidos a sollicitaciones externas. Para la obtención de dichas propiedades mecánicas de los materiales el ensayo de tracción es uno de los más extendidos a día de hoy, debido a su simplicidad y a que es un tipo de ensayo relativamente barato y totalmente normalizado.

El ensayo de tracción consiste en someter una probeta normalizada, sujeta por sus extremos, a una carga uniaxial creciente de tracción hasta su rotura, con el fin de determinar ciertas características mecánicas a través de la carga aplicada y el alargamiento. A partir de estos valores se obtienen el esfuerzo y la deformación necesarios para la representación de las curvas s - e . La realización de dicho ensayo se ha llevado a cabo mediante una máquina universal de ensayos siguiendo la norma UNE 7-474-92 Parte 5 (Julio 1992) que se corresponde al método de ensayo para materiales metálicos a temperatura elevada.

Debido a la deformación que sufre la probeta ensayada (aumento de la dimensión longitudinal y disminución del área transversal) en el contexto de la Ingeniería se puede trabajar con dos definiciones diferentes: reales (σ , ε) e ingenieriles (s , e) Por un lado el esfuerzo real es el cociente entre la fuerza aplicada, F , y el área real en cada instante de la sección transversal, A :

$$\sigma = F/A$$

Por otro lado, el valor correspondiente al esfuerzo ingenieril está relacionado con el área inicial de la probeta, A_0 :

$$s = F/A_0$$

Hay que tener en cuenta que las variables ingenieriles serán tanto más adecuadas cuanto menor sea la deformación que sufre la probeta, esto ocurre cuando la muestra se comporta de forma elástica. Para establecer una relación entre ambas variables se supone que la variación del volumen de la probeta es nula, es decir, que el material tiene un comportamiento incompresible. De este modo se llega a las siguientes expresiones:

$$\sigma = s (1 + e)$$

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

Sin embargo, lo cierto es que casi siempre son preferidas las variables ingenieriles debido a la convergencia de la curva obtenida, aunque las deformaciones sean tan grandes que se haya alcanzado la zona de plastificación. Los materiales metálicos en general tienen un comportamiento dúctil, siendo capaces de soportar grandes deformaciones permanentes antes de romperse. Para el análisis de su comportamiento mecánico se estudia la curva esfuerzo-deformación haciendo uso de las variables ingenieriles, en la siguiente figura se puede observar la forma que tendría dicha curva para el caso de un metal genérico.

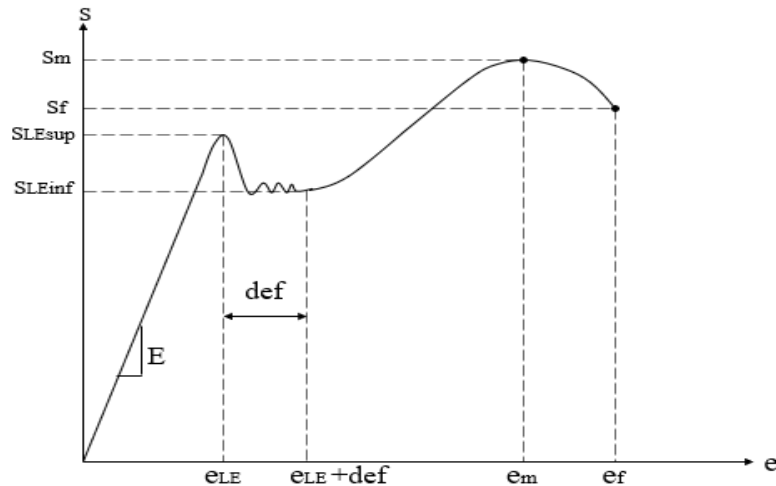


Figura 1.1. Curva de tracción ingenieril de un metal genérico.

En la Figura 1.1 se pueden diferenciar dos zonas o comportamientos diferentes. En primer lugar, el material presenta un comportamiento elástico lineal de pendiente constante, volviendo a su estado original cuando se deja de aplicar esfuerzo mecánico a la probeta. Este comportamiento se caracteriza por la rigidez del material o el módulo de Young (E), que es la pendiente de la curva en esta zona y el cual permite relacionar el esfuerzo con la deformación mediante la ley de Hooke:

$$E = \sigma / \varepsilon$$

Superada la deformación que marca el límite elástico (e_{LE}) se pasa del comportamiento elástico al plástico (deformaciones permanentes). Existen metales cuya curva esfuerzo-deformación presenta una zona de transición conocida como zona de fluencia. La fluencia se debe al bloqueo de las dislocaciones en la red cristalina impidiendo su deslizamiento, esto se traduce en la deformación plástica del material aplicando un esfuerzo relativamente constante. Externamente, se caracteriza por la aparición de las Bandas de Lüders, zonas donde se ha conseguido liberar las dislocaciones, lo que da lugar a una elevada concentración del esfuerzo. No obstante, como se verá más adelante en las gráficas obtenidas, esta zona no siempre aparece.

A continuación se alcanza la zona de deformación plástica uniforme, dando lugar a un comportamiento plástico del material y al endurecimiento por deformación. Dicho comportamiento suele aproximarse a través de la ecuación de Hollomon:

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n$$

siendo k el coeficiente de resistencia y n el exponente de endurecimiento por deformación, el cual se encuentra directamente relacionado con la resistencia del material durante la deformación plástica. Nótese que para el caso en el que $k = 1$ la ecuación de Hollomon predice el comportamiento de un material elástico lineal y para el caso opuesto en el que $k = 0$ se alcanzaría la deformación plástica ideal. Por otro lado, la zona plástica no uniforme se aproxima por la ecuación de una recta.¹

1.1.2 Efecto de la velocidad de deformación y de la temperatura

Aunque la curva s - e presenta una información fundamental para el estudio del comportamiento de los materiales, se hace necesario introducir magnitudes que ayuden a compararlos entre sí. Así es como se llega a los conceptos de ductilidad y fragilidad. Dependiendo de la capacidad que tiene un material para deformarse plásticamente y absorber energía antes de la fractura se pueden diferenciar dos tipos de materiales: dúctil (si admite fuertes deformaciones antes de romperse) o frágil (se considera un material frágil aquel que rompe antes del 5% de deformación plástica).

La ductilidad y la fragilidad de un material dependen fuertemente de su microestructura y de las condiciones a las que se encuentre sometido dicho material, por lo tanto se hace necesario el estudio de la sensibilidad de los materiales ante la variación de variables como velocidad de deformación y temperatura.

De forma general, al aumentar la velocidad de deformación de un material este se vuelve más frágil. Un ejemplo de ello puede ser cuando se somete una pieza a ensayo de impacto para medir su tenacidad a la fractura, esta rompe de manera frágil dada la alta velocidad que alcanza el péndulo. Por otro lado, la temperatura juega un papel fundamental en la fragilidad o la ductilidad de un material, ya que ante un aumento de la temperatura, el material pierde rigidez y se comporta de forma dúctil. Esto se debe a la mejor fluencia de las dislocaciones ante aumentos del 0.3-0.4 de la temperatura de fusión del material. Sin embargo, cuando se somete a bajas temperaturas se observa un comportamiento frágil.²

1.2 Modelos teóricos

1.2.1 Modelo teórico de la simulación

Para establecer un modelo que permitiera la reconstrucción de las curvas s - e , se han establecido los siguientes parámetros:

- e , deformación ingenieril.
- e_{LE} , deformación ingenieril en el límite elástico.
- e_M , deformación ingenieril en la resistencia a tracción.
- e_F , deformación ingenieril en la fractura.
- def , intervalo de fluencia.

- $S_{LE\ sup}$, límite elástico superior (MPa).
- $S_{LE\ inf}$, límite elástico inferior (MPa).
- S_M , resistencia a tracción (MPa).
- S_F , resistencia a la rotura (MPa).

Estas propiedades pueden observarse representadas en la Figura 1.1. Naturalmente, solo algunas de ellas serán aplicables a ciertos materiales, no obstante dado que el objetivo es crear un modelo lo más general posible que permita abarcar el más amplio conjunto de curvas, habrá que considerarlos todos. Además, para garantizar un buen ajuste, se introducen otros parámetros como: k , m , n , \tilde{n} , p .

Como ya se ha comentado anteriormente, la curva puede dividirse en cuatro zonas diferentes según el comportamiento del material (zona elástica, zona de transición o de fluencia, zona plástica uniforme y zona plástica no uniforme). El modelo utilizado también diferencia estas cuatro zonas: el modelado de las zonas elástica y plástica se llevan a cabo mediante funciones exponenciales cuyos exponentes varían linealmente con la deformación, mientras que el rizado de la zona de fluencia se modelará mediante una función coseno.

El método utilizado para simular la curva se basa en ajustar mediante mínimos cuadrados los valores concretos de los distintos parámetros a partir de algunas curvas reales de referencia. De esta forma, el trabajo que se lleva a cabo consiste en fijar manualmente algunos valores característicos y dejar libre el resto para el proceso de ajuste.

Debido a compromisos de confidencialidad, el código fuente que permite trazar la curva de tracción no será mostrado en este documento.

1.2.2 Modelo teórico de las sensibilidades

Este modelo permite describir las sensibilidades frente a la temperatura y frente al ritmo de deformación y su acople entre ellas. Como ya se ha comentado anteriormente, el comportamiento dúctil o frágil de los materiales depende en gran medida de la velocidad de deformación a la que está asociado y de la temperatura. Aunque cualitativamente las tendencias están claras, no existe consenso en los modelos teóricos que podrían describir estas sensibilidades; ninguna ecuación sencilla, basada en la Ciencia de los Materiales, puede describir el comportamiento de la sensibilidad a la velocidad de deformación para todas las temperaturas, ya que el mecanismo responsable de los cambios de deformación cambia a medida que aumenta la temperatura. Por ello, aquí se adoptará un modelo semicuantitativo, muy simple y solo justificable para propósitos didácticos. Las ecuaciones del modelo de sensibilidades se han recogido en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Modelo de sensibilidad frente a la temperatura y el ritmo de deformación

Factor de sensibilidad a la temperatura
$f_t = 1 + (f_{t \text{ máx}} - 1) \cdot \left(\frac{t - t_a}{t_s - t_a} \right)$
Factor de sensibilidad al ritmo de deformación
$f_d = 1 + \left(\frac{f_{d \text{ máx}}}{f_t} - 1 \right) \cdot \left(\frac{v - v_R}{v_{\text{máx}} - v_R} \right)$
Corrección de esfuerzos
$e = e \cdot \left(\frac{f_t}{f_d} \right)$
Corrección de deformaciones
$s = s \cdot \left(\frac{f_d}{f_t} \right)$

En la primera ecuación de la Tabla 1.1 se define el factor de sensibilidad térmico f_t , t es la temperatura a la que se realiza el ensayo, t_a es la temperatura ambiente y t_s es la temperatura de fusión del material (todas en grados centígrados). Por otro lado, el factor $f_{t \text{ máx}}$ representa el valor máximo que puede tomar el factor de sensibilidad térmico, $f_{t \text{ máx}}$ es siempre mayor o igual a uno. En caso de que $t = t_a$ se obtiene $f_t = 1$ y si $t = t_s$ entonces $f_t = f_{t \text{ máx}}$. Es preciso tener en cuenta que para aquellos valores en los que $f_{t \text{ máx}}$ sea cercano a uno, el material será menos sensible a la temperatura en general.

Por otro lado, en la segunda ecuación de la Tabla 1.1 se define el factor de sensibilidad frente al ritmo de deformación, v representa la velocidad con la que se realiza el ensayo, v_R es la velocidad de referencia recomendada por la norma y $v_{\text{máx}}$ es la velocidad máxima que permite la norma, al igual que para el factor térmico se define $f_{d \text{ máx}}$ que es el valor máximo que puede tomar el factor f_d (mayor o igual a 1).

Dado que un material no responde del mismo modo frente al ritmo de deformación a una temperatura que a otra superior (en la expresión de f_d el valor $f_{d \text{ máx}}$ aparece dividido por el factor f_t). Esto implica que ante un aumento de la temperatura, el cociente $\frac{f_{d \text{ máx}}}{f_t}$ debería aumentar desde su valor máximo $f_{d \text{ máx}}$ a temperatura ambiente, hasta la unidad a temperaturas altas, por ejemplo a temperaturas superiores a la temperatura de recristalización.

Una vez conocidos los factores f_t y f_d se calcularán los valores de los parámetros de la curva de tracción haciendo uso de las dos últimas expresiones de la Tabla 1.1 dependiendo de si se tratan de esfuerzos o deformaciones.

1.3 Objetivo del TFG

Como ya se ha comentado anteriormente, el ensayo de tracción es uno de los más extendidos para el estudio de las propiedades y comportamiento de los materiales arrojando resultados muy fiables. Es por ello que el principal objetivo de este trabajo se centra analizar la validez de un simulador del ensayo de tracción en metales variando las condiciones de temperatura y del modelo de sensibilidades frente a la temperatura utilizado. Los datos que alimentan al simulador se han obtenido mediante el ajuste por mínimos cuadrados de curvas de tracción procedentes de ensayos reales. Por otro lado, los resultados que se obtienen de la simulación serán comprobados con las curvas obtenidas experimentalmente en los ensayos de tracción para garantizar la fiabilidad del simulador utilizado o, en caso de no ajustar de manera adecuada, desechar el modelo y buscar otro que concuerde mejor con el comportamiento del material.

Otro aspecto a tener en cuenta es que el trabajo no parte de cero, ya que el simulador utilizado es una versión mejorada de un modelo utilizado en trabajos previos, el cual se descartó debido a los fallos que presentaba y a la incapacidad de obtener un buen ajuste de la curva de tracción.

El presente es la continuación de un TFG anterior que se encargaba de simular y validar la curva de tracción aplicando variaciones en la velocidad de deformación. De esta forma, con la presentación de este trabajo se cierra el estudio de la validez de un simulador capaz de ajustar la curva de tracción de una serie de materiales metálicos cuando se hacen variar las condiciones de temperatura y el ritmo de deformación, así como del modelo de sensibilidades explicado en el apartado anterior. Con los resultados que se desprendan de este trabajo se podrá determinar la posibilidad de utilizar el simulador como una herramienta de trabajo que facilitará las labores de la Ingeniería.

2 ALEACIONES SELECCIONADAS

Al igual que en los trabajos anteriores, se han ensayado un total de cinco aleaciones: Acero C45, Acero 304, Aluminio 2011, Latón y Fundición Gris. En lo que concierne a este trabajo, para analizar la influencia de la temperatura en los materiales, cada probeta se ha ensayado a velocidad constante y a diferentes temperaturas: temperatura ambiente, $t_+ = 100$ °C, $t_{++} = 200$ °C y $t_{+++} = 300$ °C. La velocidad de referencia del ensayo viene dada por la norma UNE-EN ISO 6892, la cual establece que la velocidad de deformación recomendada se rige por la siguiente fórmula $0.00025 \times L_0$, siendo dicha longitud igual a 50 mm se obtiene que la velocidad de ensayo es 0.0125 mm/s. Para cada material se han realizado dos ensayos a cada temperatura de las indicadas anteriormente. A continuación, se establece la nomenclatura que se ha usado para cada probeta de cada material.

2.1. Acero C45

Las probetas de acero C45 se han sometido a un tratamiento térmico de normalizado. La nomenclatura empleada para las distintas probetas de este material se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Nomenclatura de las probetas de acero C45 normalizado ensayadas a alta temperatura.

Alta temperatura	
Normalizado a $t_+ = 100$ °C	C45-T1, C45-T2
Normalizado a $t_{++} = 200$ °C	C45-T3, C45-T4
Normalizado a $t_{+++} = 300$ °C	C45-T5, C45-T6

Las probetas de acero C45 normalizado ensayadas a temperatura ambiente se han tomado de trabajos previos, la nomenclatura utilizada se recoge en la siguiente tabla.

Tabla 2.2. Nomenclatura de las probetas de acero C45 normalizado ensayadas a temperatura ambiente.

Temperatura ambiente	
Acero C45 normalizado	N01, N02

2.2. Acero 304

Para esta aleación se han ensayado distintas probetas variando el ritmo de deformación. No obstante, como el objetivo del trabajo es el estudio del comportamiento del material con respecto a la temperatura, solo se han tenido en cuenta las probetas ensayadas a la velocidad de referencia, tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas. Los códigos de las probetas ensayadas se presentan a continuación.

Tabla 2.3. Nomenclatura de las probetas de acero AISI 304.

Temperatura ambiente	
Estado de recepción (velocidad de referencia, v_R)	A-20, A-21
Estado de recepción $v_- = 0.0035$ mm/s	A-22, A-23
Estado de recepción $v_+ = 0.1000$ mm/s	A-24, A-25
Estado de recepción $v_{++} = 0.3350$ mm/s	A-26, A-27
Alta temperatura	
Estado de recepción $t_+ = 100$ °C	A-28, A-29
Estado de recepción $t_{++} = 200$ °C	A-30, A-31
Estado de recepción $t_{+++} = 300$ °C	A-32, A-33

Las probetas que han sido objeto de estudio en este trabajo son aquellas que se han ensayado a temperatura ambiente y alta temperatura a la velocidad de referencia, concretamente A-20, A-21, A-28, A-29, A-30, A-31, A-32 y A-33.

2.3. Aluminio 2011

Las probetas fabricadas en este material no han recibido un tratamiento previo, el estado de este metal es el de recepción de la fábrica. Las probetas de aluminio 2011 se han diferenciado únicamente por su numeración, tal y como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Nomenclatura de las probetas de aluminio 2011 ensayadas a alta temperatura.

Alta temperatura	
Estado de recepción a $t_{+} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	Al-T1, Al-T2
Estado de recepción a $t_{++} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$	Al-T3, Al-T4
Estado de recepción a $t_{+++} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$	Al-T5, Al-T6

Para la obtención de las probetas ensayadas a temperatura ambiente nos hemos apoyado en los resultados obtenidos en trabajos previos, se han utilizado las probetas que han sido sometidas a un recocido total y cuyo ensayo tuvo lugar un lapso después de dicho tratamiento:

Tabla 2.5. Nomenclatura de las probetas de aluminio 2011 ensayadas a temperatura ambiente.

Temperatura ambiente	
Recocido total	O-03, O-04

2.4. Latón

Las probetas fabricadas en latón se han numerado tal y como se muestra a continuación. Aquellos ensayos que no se pudieron llevar a cabo de manera satisfactoria se han marcado con un asterisco (*). Los datos de los ensayos realizados a temperatura ambiente se han extraído de trabajos anteriores.

Tabla 2.6. Nomenclatura de las probetas de latón.

Distintas temperaturas	
Estado de recepción a $t_{+} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	L-T1*, L-T2
Estado de recepción a $t_{++} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$	L-T3, L-T4
Estado de recepción a $t_{+++} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$	L-T5, L-T6
Estado de recepción a temperatura ambiente	L-01, L-02

2.5. Fundición gris

Por último, para el caso de las probetas de fundición gris se ha hecho uso de una nomenclatura similar que en las aleaciones anteriores. En la Tabla 2.7 se muestra la nomenclatura utilizada:

Tabla 2.7. Nomenclatura de las probetas de fundición gris.

Distintas temperaturas	
Estado de recepción a t_+ = 100 °C	Fund-T1, Fund-T2
Estado de recepción a t_{++} = 200 °C	Fund-T3, Fund-T4
Estado de recepción a t_{+++} = 300 °C	Fund-T5, Fund-T6
Estado de recepción a temperatura ambiente	F-01, F-02

3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El contenido de este capítulo se centra en la explicación del camino que se ha seguido en la parte experimental del trabajo y la funcionalidad del programa usado para la simulación de la curva de tracción de los distintos materiales seleccionados.

3.1 Realización del ensayo de tracción

Como ya se comentó en la introducción, para la realización del ensayo de tracción se ha seguido la norma UNE 7-474-92 Parte 5 (Julio 1992): Materiales metálicos. Ensayos de tracción. Parte 5: Método de ensayo a temperatura elevada; versión española de EN 100002-5 (Octubre 1991). Sin embargo, no fue posible adaptar las exigencias de la norma en lo relativo al equipo, a las dimensiones de las muestras y al uso de extensómetros de alta temperatura debido a la falta de este equipamiento en el departamento. No obstante, las normas son bastante flexibles en este aspecto y analizando los resultados se puede llegar a la conclusión de que los ensayos se realizaron de una manera satisfactoria.

La máquina de ensayos utilizada fue una prensa mecánica Instron 5505 a la que se le acopló una cámara térmica que garantizaba la perfecta uniformidad de la temperatura en toda la pieza a ensayar. Las probetas ensayadas de 50 mm de longitud y 8 mm de diámetro fueron fijadas a través de unas mordazas adecuadas para ensayos en caliente para garantizar la perfecta alineación de las cargas aplicadas en la dirección longitudinal a la probeta.

Las curvas de tracción experimentales se han obtenido gracias a la utilización de un programa asociado a la máquina de ensayos, el cual devuelve los valores de carga (tensión ingenieril al dividirlo por el área original) mientras que el extensómetro mide las microdeformaciones. De esta forma, el resultado es la representación de las curvas esfuerzo-deformación.

Para cada temperatura se han ensayado un total de dos probetas de cada material con la intención de garantizar una mayor certeza en el resultado. Los ensayos se han llevado a cabo en los laboratorios del Departamento de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y el Transporte de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

3.2 Método de ajuste

Para la obtención de un simulador que ajuste de forma precisa las curvas de tracción se ha hecho uso de la herramienta Visual Basic de Excel dada su simplicidad y en vista a que la persona que vaya a utilizar dicho simulador no necesite conocimientos de programación para poder ejecutarlo. El programa que se ha desarrollado aprovecha la herramienta SOLVER y contiene un sintetizador de curvas de tracción a partir de parámetros relevantes y el código necesario para efectuar un análisis de regresión por mínimos cuadrados. El

valor de estos parámetros es el que la macro trata de optimizar para que la curva sintetizada case lo mejor posible con la curva que se ha obtenido experimentalmente. A continuación se muestra la hoja de Excel de la cual se obtiene la simulación.

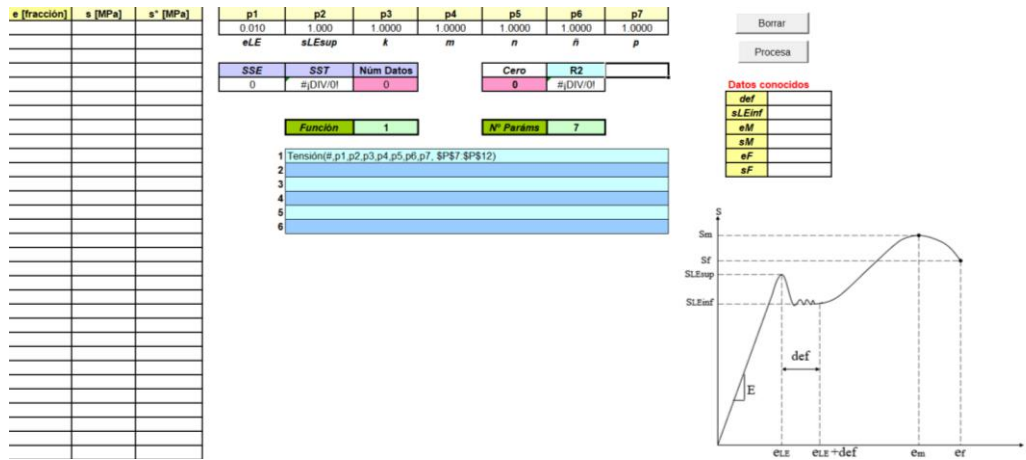


Figura 3.1. Simulador de curvas desarrollado en Visual Basic de Excel.

En primer lugar para la obtención del ajuste de la curva se introducen en las columnas e [fracción] y s [MPa] los datos en bruto obtenidos del ensayo de tracción. Además, para garantizar un buen ajuste de la curva, es necesario introducir una serie de parámetros clave ($def, s_{LE\ inf}, e_M, s_M, e_F, s_F$) para guiar el ajuste.

Los parámetros se introducen en la tabla de la derecha de la Figura 3.1. A mayor precisión de los *Datos conocidos* la simulación se ejecutará en menos tiempo. A continuación se muestra dicha tabla ampliada para una mayor claridad.

Datos conocidos	
def	
sLEinf	
eM	
sM	
eF	
sF	

Figura 3.2. Datos de partida para llevar a cabo el ajuste.

Una vez introducidos todos los datos se ejecuta la simulación pulsando el botón *Procesa* para obtener la curva sintetizada. Dependiendo de la precisión del resultado habrá que pulsar varias veces dicho botón hasta llegar a una curva prácticamente coincidente con la curva experimental. En caso de que no obtener precisión en las curvas ajustadas es necesario realizar cambios en las restricciones que tiene añadida la función SOLVER. Además del botón *Procesa* se incorpora el botón *Borrar* que reinicia el proceso para que no haya errores de ejecución.

En la hoja *Gráfico1* se observa una comparación entre la curva experimental y la sintetizada. Además, el programa devuelve la deformación simulada en la columna s* [MPa] para poder representar la curva ajustada y considerar las diferencias entre el resultado experimental y la simulación. A su vez, se obtienen una serie de parámetros en los que se ha apoyado el programa para la simulación de la curva de tracción, los cuales

quedan representados en la siguiente figura.

p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7
0.010	1.000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
eLE	sLEsup	k	m	n	n̄	p

Figura 3.3. Parámetros obtenidos mediante el programa de ajuste.

3.3 Ajuste de las sensibilidades del modelo

Gracias a las mejoras incluidas en la última versión del programa, se ha logrado un buen ajuste en todas las probetas ensayadas. Por lo tanto, para facilitar el trabajo se ha creado una base de datos donde quedan recogidos todos los parámetros importantes en función de la temperatura, véase la Figura 3.4.

	eLE	def	eM	eF	sLEsup [MPa]	sLEinf [MPa]	sM [MPa]	sF [MPa]	k	m	n	n̄	p
ta	0.013	0	0.4123	0.5032	652.747982	0	774.6945	486.826	0.39506028	32.7328327	1.42720532	-0.1314396	3.36710296
t+ = 100 °C	0.04	0	0.171	0.2762	594.693574	0	634.7635	391.8466	0.60270406	13.4723636	3.78844772	17.8827004	5.01818289
t+ = 100 °C	0.045	0	0.1609	0.2645	594.762144	0	627.4328	383.5965	0.6321833	10.7112729	2.80786979	10.5758977	4.83657231
t++ = 200 °C	0.045	0	0.0976	0.1738	555.235411	0	567.6247	381.7685	0.57210618	10.5133019	2.63709555	10.8495226	3.1096839
t++ = 200 °C	0.04	0	0.092	0.1668	548.729298	0	566.855	379.8252	0.58540788	9.23396593	3.61603752	39.2250853	3.08448436
t+++ = 300 °C	0.04	0	0.087	0.1519	510.771082	0	545.8338	381.2572	0.88136881	11.7096961	3.94767949	0.83079173	2.80067739
t+++ = 300 °C	0.035	0	0.0855	0.1471	488.176795	0	541.5291	381.6517	0.61911922	2.40545806	5.43396219	82.2141381	2.74320128

Figura 3.4. Base de datos de los parámetros utilizados en el ajuste para cada temperatura del acero AISI 304.

Una vez creadas las bases de datos, se ha aplicado el modelo de sensibilidad que se presentó en el apartado anterior y se ha estudiado la sensibilidad a la temperatura para cada probeta, para ello se han representado los parámetros normalizados de las bases de datos que se han obtenido frente a la temperatura en unos ejes normalizados.

Además, para estudiar de forma más profunda la sensibilidad a la temperatura, en otra hoja de excel se ha desarrollado un programa que devuelve directamente el polinomio de tendencia de cada parámetro normalizado y el parámetro estadístico R^2 para llevar a cabo un análisis lo más exacto posible y la viabilidad del mismo. El valor de este último parámetro permite saber si se obtiene un buen ajuste de los valores; en el caso en el que $R^2 = 1$ los parámetros se ajustan perfectamente, por otro lado para $R^2 = 0$ ocurre todo lo contrario. En la Figura 3.5 se puede observar la hoja de Excel que se ha utilizado para el estudio de la sensibilidad del modelo.

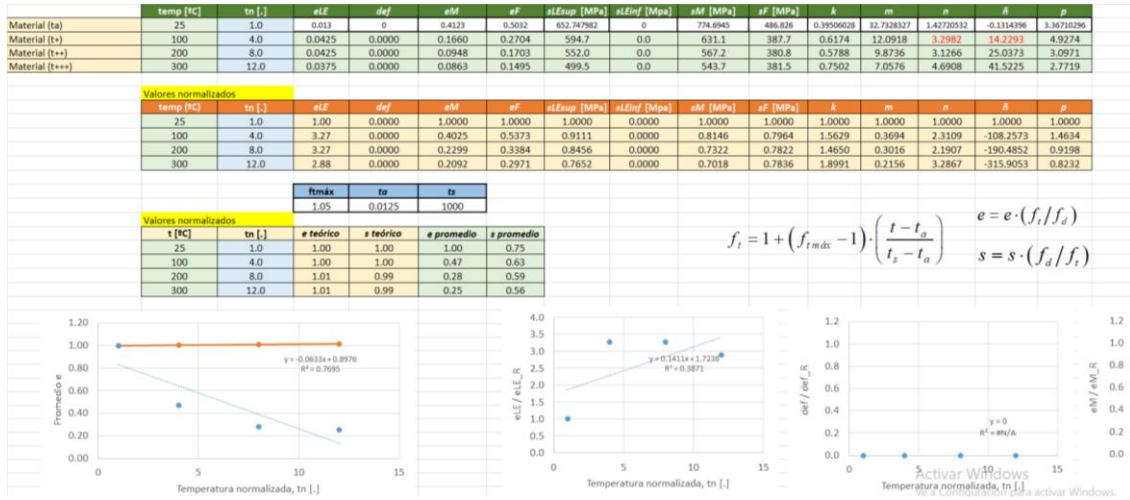


Figura 3.5. Hoja de Excel para analizar la tendencia de los parámetros.

4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez ajustadas las sensibilidades y simuladas todas las curvas, es necesario realizar un estudio de la validez de las gráficas que se han obtenido. En este apartado se llevará a cabo una comparación entre la curva de tracción experimental (azul) y la teórica o simulada (rosa). Además, para validar el modelo de sensibilidades se mostrarán y analizarán las gráficas donde se representan las líneas de tendencia de los distintos parámetros en los que se ha apoyado el programa para llevar a cabo el ajuste. La nomenclatura utilizada se expone en el Capítulo 2.

4.1 Ajuste del acero C45

A continuación se muestran los resultados obtenidos al ensayar las probetas de acero C45 normalizadoⁱ a diferentes temperaturas. Al tratarse del primer apartado dentro de este capítulo se muestran las gráficas correspondientes a las dos muestras ensayadas para cada temperatura. En el análisis de los siguientes materiales se adjuntará solo una gráfica por cada ensayo para no sobrecargar el trabajo con excesivas gráficas y garantizar una lectura lo más amena posible.

En primer lugar se muestran las gráficas correspondientes a las probetas de acero C45 ensayadas a 100°C. Como puede observarse en la Figura 4.1 y Figura 4.2 los resultados obtenidos son similares en ambos casos. Se puede apreciar un pequeño desajuste al comienzo de la zona plástica ($e = 0.035$), no obstante, la variación es pequeña y el ajuste obtenido es prácticamente coincidente en las zonas elástica, de fluencia y plástica.

ⁱ Para la simulación y validación de la curva de acero C45 a diferentes temperaturas solo se ha estudiado el comportamiento del acero normalizado. En trabajos previos se puede acceder al análisis del ajuste de acero C45 sometido a distintos tratamientos térmicos: recocido, templado, templado con revenido bajo, templado con revenido alto y con sobrerrevenido; así como el análisis de la sensibilidad frente al ritmo de deformación de acero C45 normalizado.

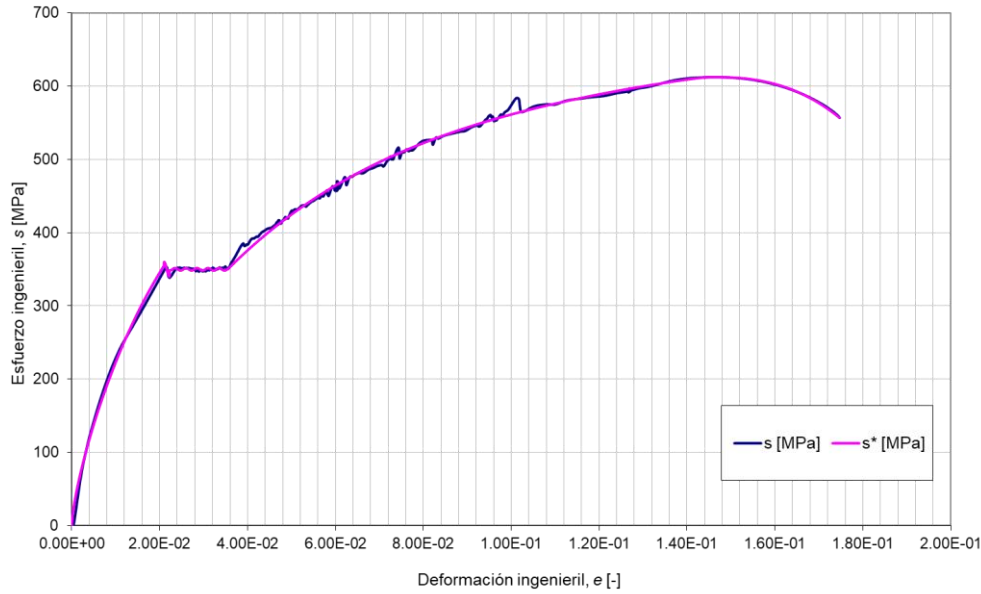


Figura 4.1. Curvas de tracción experimental y simulada del acero C45-T1 ($T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

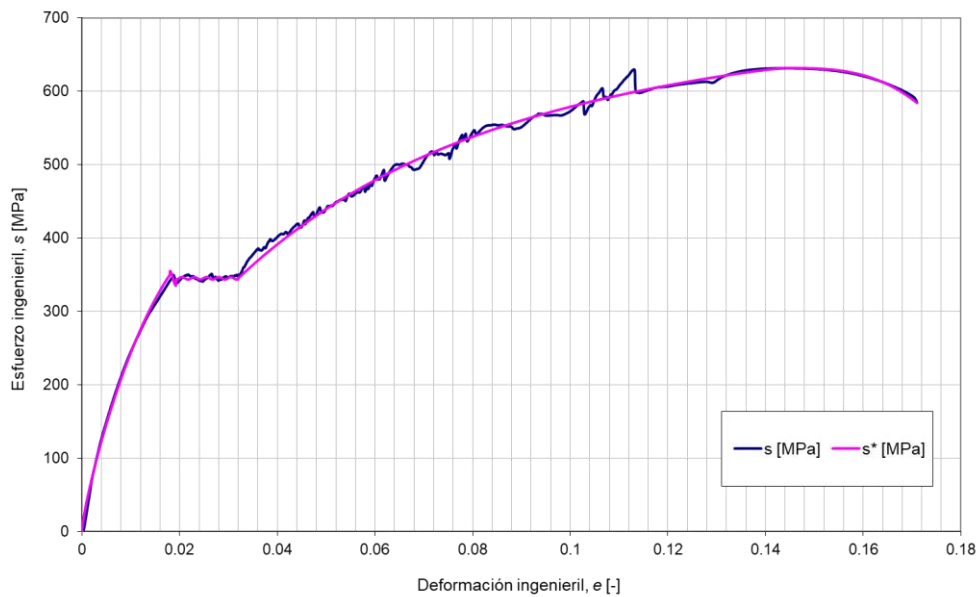


Figura 4.2. Curvas de tracción experimental y simulada del acero C45-T2 ($T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Al igual que en el caso anterior, para las probetas ensayadas a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, el ajuste que se ha obtenido es muy bueno en la zona elástica y plástica aunque no es tan preciso en la zona de fluencia. Como ya ocurrió en las curvas anteriores, el ajuste del inicio de la zona plástica podría ser más preciso, aunque como se observa a partir de $e = 0.05$ ambas curvas son coincidentes para las dos probetas ensayadas. Dada la forma que tiene la zona de fluencia, en este ensayo ha resultado imposible obtener un buen resultado en la simulación, ya que como se comentó en el Capítulo 3 en esta zona la curva simulada se ajusta a través de una función coseno.

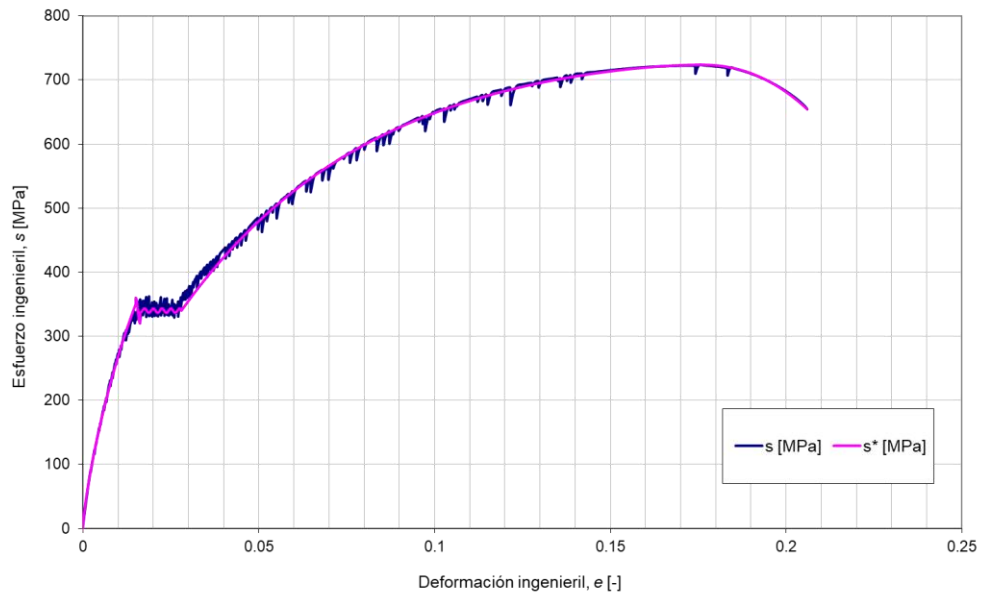


Figura 4.3. Curvas de tracción experimental y simulada del acero C45-T3 ($T = 200$ °C).

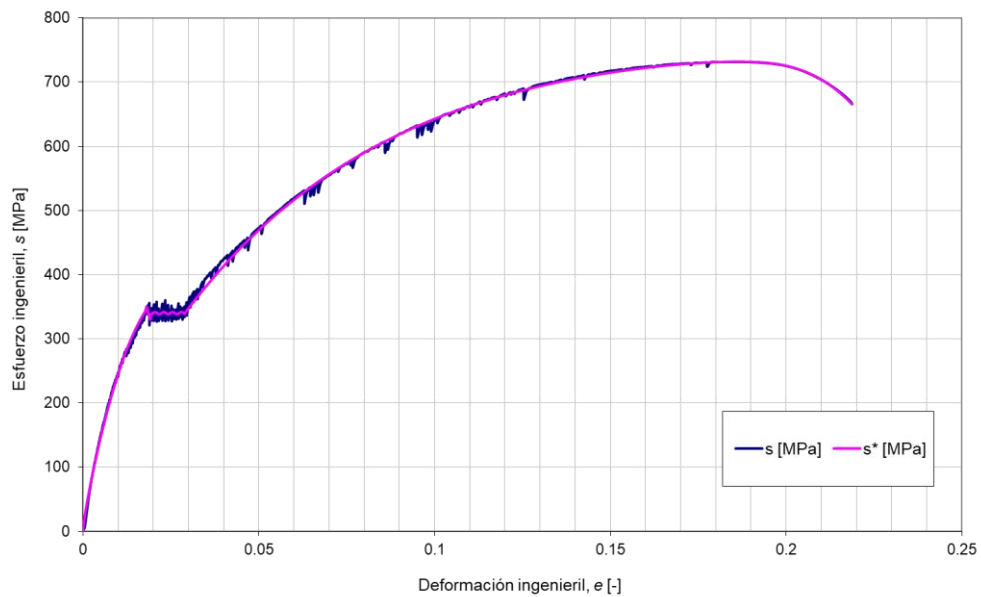


Figura 4.4. Curvas de tracción experimental y simulada del acero C45-T4 ($T = 200$ °C).

Finalmente se presentan las gráficas de las dos probetas ensayadas a mayor temperatura ($T = 300$ °C). Como puede observarse en la Figura 4.5 y 4.6 el ajuste casa a la perfección con la curva experimental en todo momento.

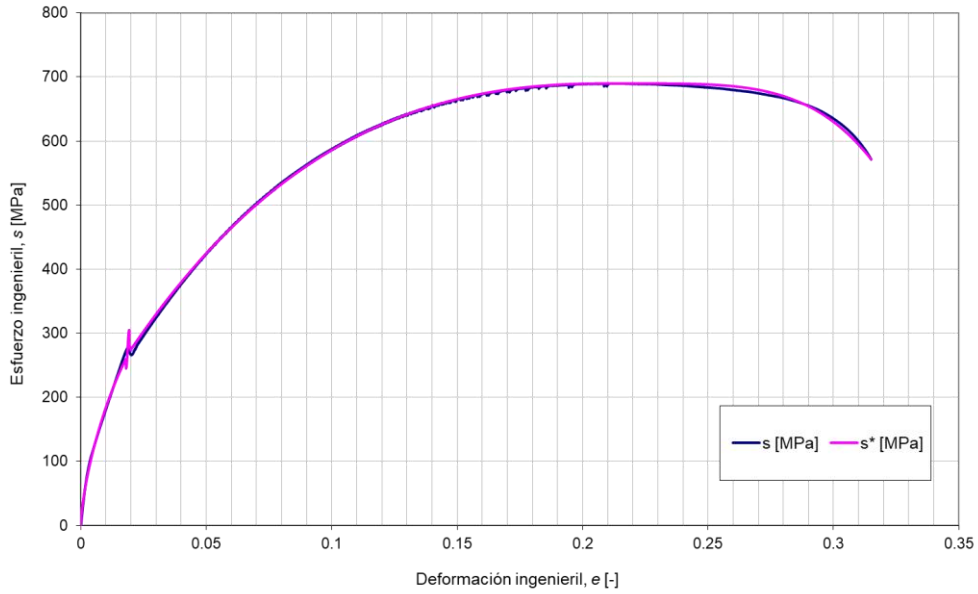


Figura 4.5. Curvas de tracción experimental y simulada del acero C45-T5 ($T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$).

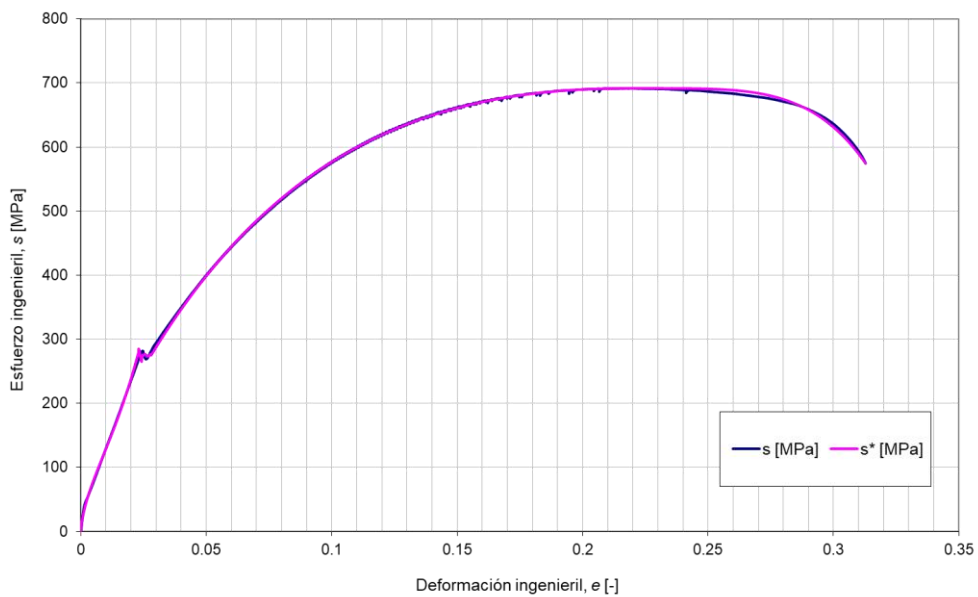


Figura 4.6. Curvas de tracción experimental y simulada del acero C45-T6 ($T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Por último, de un trabajo previo a este se ha obtenido la curva ajustada del acero C45 ensayado a temperatura ambiente. Para llegar a dicha curva se hizo uso del mismo programa, así como el camino seguido hasta los resultados fue el mismo que el que se ha seguido en este trabajo. Al igual que en las gráficas anteriores la curva ajustada y experimental son prácticamente coincidentes a lo largo de toda la vida de la probeta.

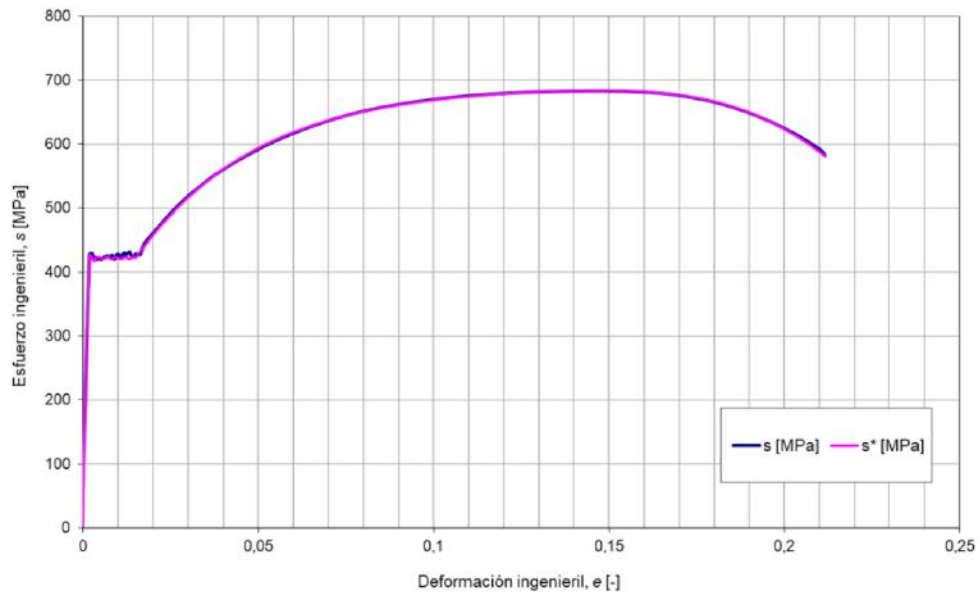


Figura 4.7. Curvas de tracción experimental y simulada del acero C45-N02 (temperatura ambiente).

Se puede observar que ante un aumento de temperatura en el ensayo de tracción se adquiere un comportamiento cada vez más dúctil, esto se traduce en las curvas como una disminución del límite elástico, así como una disminución de la pendiente en la zona elástica, es decir, una disminución de la rigidez de la probeta, lo cual concuerda con la teoría. Además, también se observa un aumento de la deformación de fractura de las probetas ensayadas a mayor temperatura.

En las Figuras 4.8. y 4.9. se puede apreciar con una mayor claridad los cambios que sufren la curva experimental y la simulada con respecto a la temperatura respectivamente.

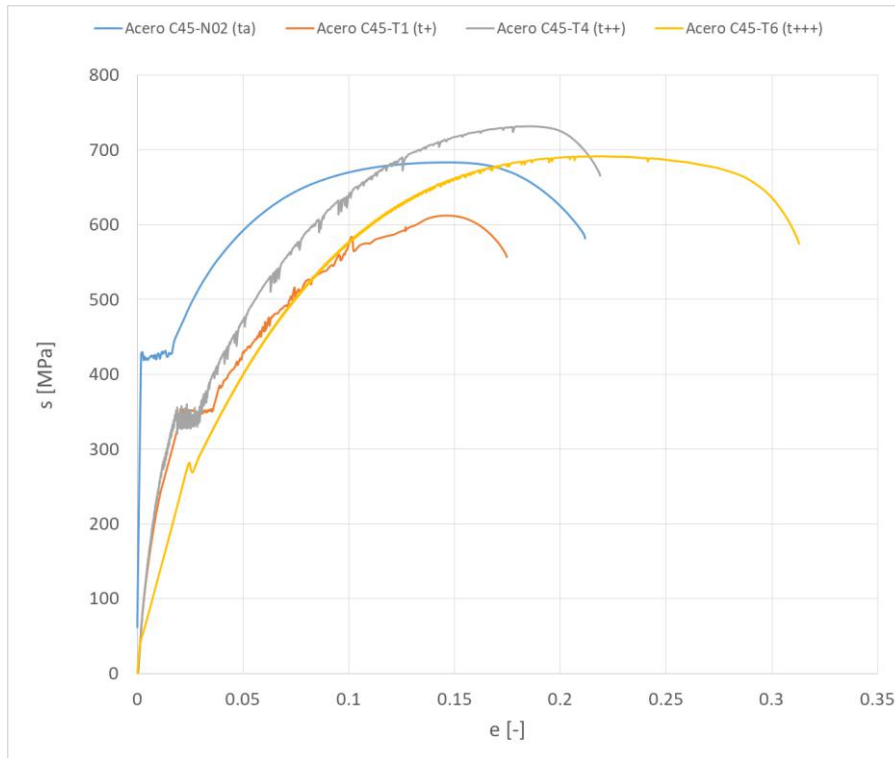


Figura 4.8. Comparativa de curvas experimentales de acero C45 normalizado a diferentes temperaturas.

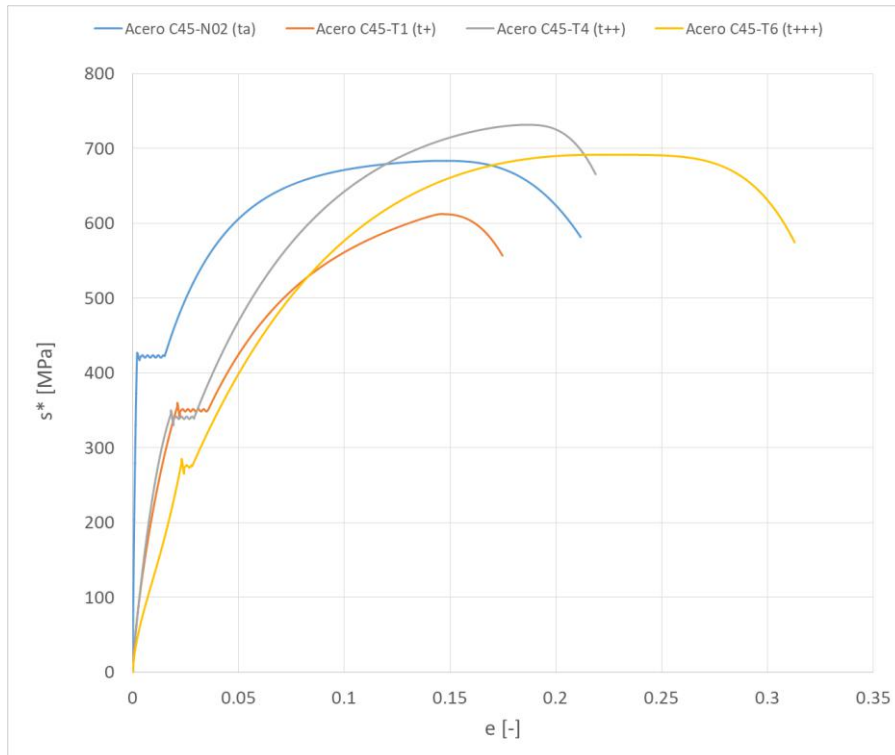


Figura 4.9. Comparativa de curvas simuladas de acero C45 normalizado a diferentes temperaturas.

Llama la atención que las curvas Acero C45-T1 (naranja) y C45-T4 (gris) ensayadas a 100 y 200 °C

respectivamente tienen un límite elástico prácticamente igual. Este fenómeno podría deberse a que al contar con la existencia de una zona de fluencia debida al bloqueo de las dislocaciones, ante un aumento de la temperatura se favorece el deslizamiento provocando la reducción de dicha zona de fluencia en lugar de la reducción del límite elástico del material. Una evidencia de ello se encuentra en la curva Acero C45-T6 (amarillo) donde una vez que se ha conseguido disminuir la zona de fluencia también disminuye el límite elástico. Por otro lado, se puede observar cómo al aumentar la temperatura las probetas ensayadas adquieren un comportamiento dúctil tomando una deformación de rotura cada vez mayor, véase las curvas Acero C45-T4 (t_{++}) y Acero C45-T6 (t_{+++}).

En la Tabla 4.1 se recogen los parámetros obtenidos del ajuste de las curvas. Como ya se comentó en el apartado anterior, partimos de una serie de datos conocidos (Figura 3.2) dejando libre el resto. Los valores que se muestran a continuación se han calculado a través de la media aritmética de los resultados obtenidos en el ajuste de las dos curvas a la misma temperatura. Posteriormente, para analizar la tendencia que siguen estos parámetros de una forma más clara y crear la función polinómica de tendencia, se ha optado por normalizar los parámetros dividiéndolos por los valores medios obtenidos en el ensayo a temperatura ambiente (véase Tabla 4.2).

Tabla 4.1. Parámetros de la curva de tracción del acero C45 normalizado a diferentes temperaturas.

T [°C]	e_{LE}	def	e_M	e_F	$S_{LEsup}[MPa]$	$S_{LEinf}[Mpa]$	$S_M[MPa]$	$S_F[MPa]$	k	m	n	\tilde{n}	p
25	0.0020	0.0130	0.1454	0.2116	427.0	422.0	683.6	581.6	0.7115	73.5688	4.5800	19.7000	2.7634
100	0.0195	0.0143	0.1447	0.1729	352.5	347.5	621.9	570.5	0.7195	9.7470	2.4856	9.8905	2.7924
200	0.0165	0.0120	0.1806	0.2124	347.5	340.0	727.7	660.0	0.7427	12.5908	2.9417	6.9604	2.5302
300	0.0205	0.0035	0.2159	0.3139	270.0	275.0	690.7	573.0	0.6808	-7.5238	2.8186	2.2257	4.3789

Tabla 4.2. Parámetros normalizados de la curva de tracción del acero C45 a diferentes temperaturas.

Tn [.]	e_{LE}	def	e_M	e_F	$S_{LEsup}[MPa]$	$S_{LEinf}[Mpa]$	$S_M[MPa]$	$S_F[MPa]$	k	m	n	\tilde{n}	p
1.0	1.00	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4.0	9.75	0.0000	0.9952	0.8169	0.8255	0.0000	0.9098	0.9810	1.0112	0.1325	0.5427	0.5021	1.0105
8.0	8.25	0.0000	1.2421	1.0038	0.8138	0.0000	1.0644	1.1347	1.0439	0.1711	0.6423	0.3533	0.9156
12.0	10.25	0.0000	1.4849	1.4835	0.6323	0.0000	1.0105	0.9851	0.9569	-0.102	0.6154	0.1130	1.5846

Representando estos valores normalizados frente a la velocidad de deformación normalizada, se elaboran los gráficos que muestran la tendencia de estos parámetros al aumentar la temperatura del ensayo junto a sus polinomios de tendencia y el parámetro que nos permitirá saber la coherencia de la evolución de los valores obtenidos en el ajuste, R^2 .

En primer lugar, en la Figura 4.10 se muestran los gráficos donde se representa la variación de la deformación (e_{LE}) y de la longitud de la zona de fluencia (def) respecto a la temperatura de ensayo normalizada. Con los resultados que arrojan las gráficas se llega a la conclusión de que tanto la deformación del límite elástico como el tamaño de la zona de fluencia aumentan a medida que se incrementa la temperatura de ensayo. No obstante, para el caso del parámetro e_{LE} su R^2 no es muy elevado, por lo que dicha evolución no puede ser considerada del todo fiable.

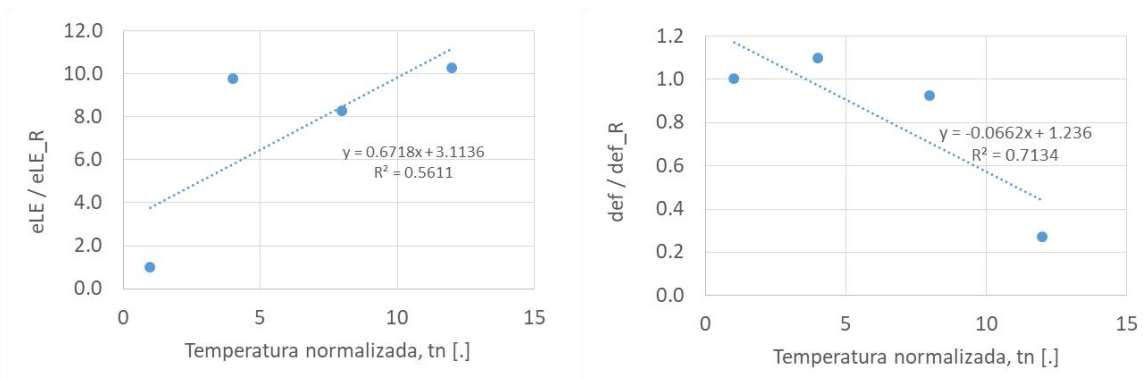


Figura 4.10. Representación normalizada de la deformación del límite elástico (izquierda) y el tamaño de la zona de fluencia (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero C45.

En la siguiente figura, se representa la tendencia que sigue la deformación máxima (e_M) y la deformación de fractura (e_F) frente a la temperatura de ensayo normalizada. Ambas varían de manera creciente lineal con respecto a la temperatura. Teóricamente son los resultados esperados, ya que ante un aumento de la temperatura ha de aumentar ductilidad del material dando lugar a un incremento de la deformación de fractura.

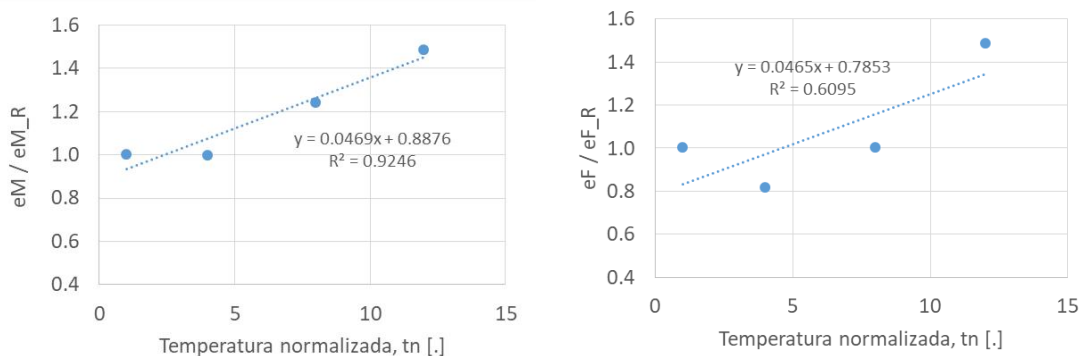


Figura 4.11. Representación normalizada de la deformación máxima (izquierda) y deformación de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero C45.

En la Figura 4.12, se observa la tendencia que sigue el límite elástico superior ($s_{LE\ sup}$) e inferior ($s_{LE\ inf}$) respecto a la temperatura de ensayo normalizada. En el primer caso se puede apreciar un comportamiento lineal decreciente, mientras que para el caso del límite elástico inferior varía de manera parabólica, aunque casi lineal decreciente. En ambos casos el parámetro R^2 es cercano a la unidad, por lo que los valores obtenidos son fiables. Ambos resultados coinciden con la teoría.

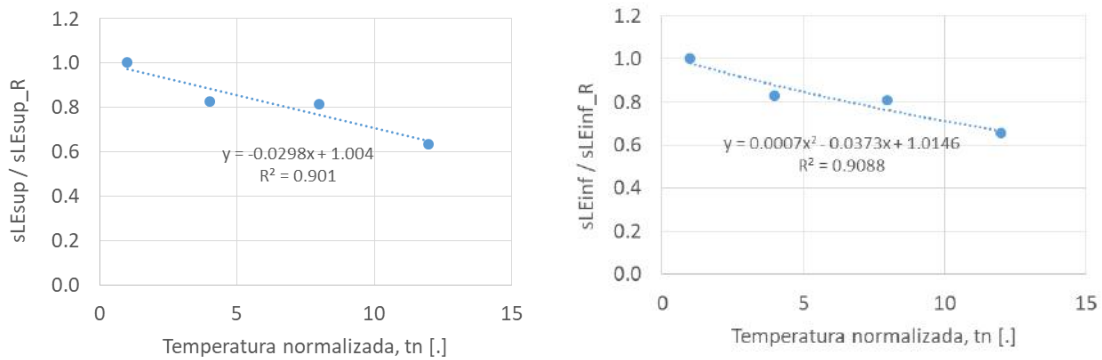


Figura 4.12. Representación normalizada del límite elástico superior (izquierda) y límite elástico inferior (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero C45.

En la Figura 4.13, se muestra el comportamiento del esfuerzo máximo (s_M) y el esfuerzo de fractura (s_F). En ambas gráficas se observa una variación lineal con poca pendiente. Dicho comportamiento es erróneo y una evidencia de ello es la poca fiabilidad que arroja el parámetro R^2 , el cual es muy cercano a cero en ambos casos. Lo esperado hubiera sido una disminución considerable de la tendencia que siguen estos parámetros.

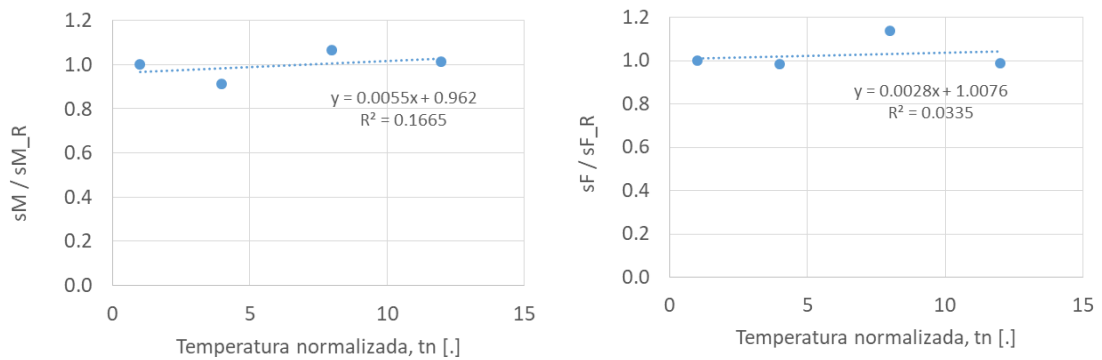


Figura 4.13. Representación normalizada de la resistencia máxima (izquierda) y resistencia de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero C45.

A continuación se muestra el comportamiento de los parámetros utilizados por el programa para el ajuste de las curvas. En las Figuras 4.14 y 4.15 se puede observar que la tendencia que siguen los parámetros k y n no se puede considerar fiable debido a que su R^2 es muy bajo. Por otro lado, el resto de parámetros (m , \tilde{n} , p) que se presentan en las siguientes gráficas adquieren un comportamiento parabólico. El valor de m es el que

varía de forma más abrupta con respecto al aumento de la temperatura de ensayo, mientras que el valor \tilde{n} es el más fiable ($R^2 = 0.9587$) y el que mejor se ajusta parabólicamente.

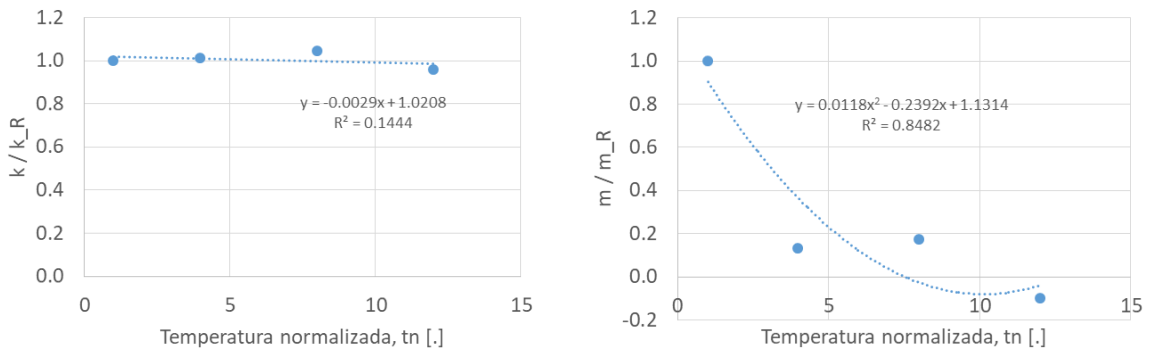


Figura 4.14. Representación normalizada del parámetro k (izquierda) y del parámetro m (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero C45.

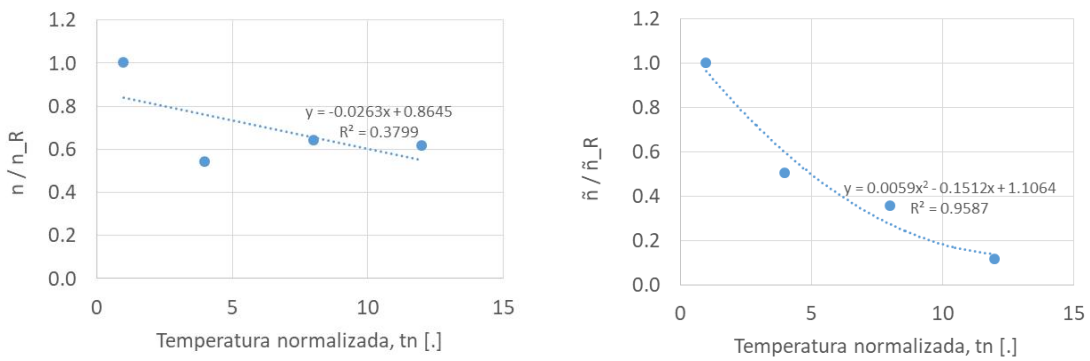


Figura 4.15. Representación normalizada del parámetro n (izquierda) y del parámetro \tilde{n} (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero C45.

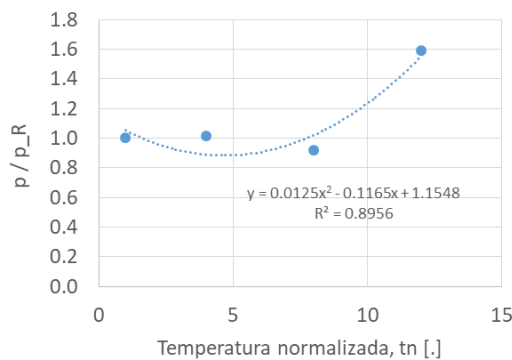


Figura 4.16. Representación normalizada del parámetro p respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero C45.

Finalmente, para acabar de analizar este material y en concreto su sensibilidad frente a la temperatura,

en la Figura 4.17 se compara la tendencia de la deformación (e) y la tensión (s) ambas en promedio de los ensayos (azul), con la tendencia que se obtiene de aplicar el modelo de las sensibilidades (naranja), explicado en el Capítulo 3. Como se puede observar, se obtienen buenos resultados, sobre todo con las tensiones, donde los valores están prácticamente superpuestos. Por lo tanto, podríamos decir que el modelo de sensibilidades es válido para el acero C45, aunque habría que intentar corregir las diferencias en la deformación y usar una población de probetas mayor para verificar la tendencia real.

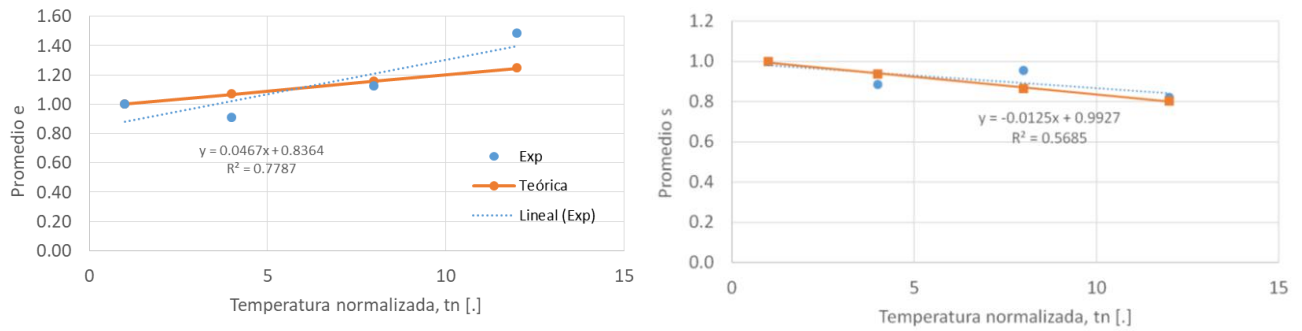


Figura 4.17. Comparación entre las tendencias de la deformación promedio (izquierda) y del esfuerzo promedio (derecha) con la tendencia del modelo teórico de sensibilidades del acero C45.

4.2 Ajuste del acero 304

Pasamos ahora al análisis de los resultados obtenidos en el ajuste de las curvas de acero 304. Al igual que ocurre con el acero C45, en el trabajo anterior se puede consultar el ajuste de los ensayos de este material con distintos tratamientos a la velocidad de referencia. A continuación se presentan una serie de gráficas donde se puede observar la curva experimental (s , en azul) junto con la curva simulada (s^* , en rosa) de las probetas ensayadas a diferentes temperaturas.

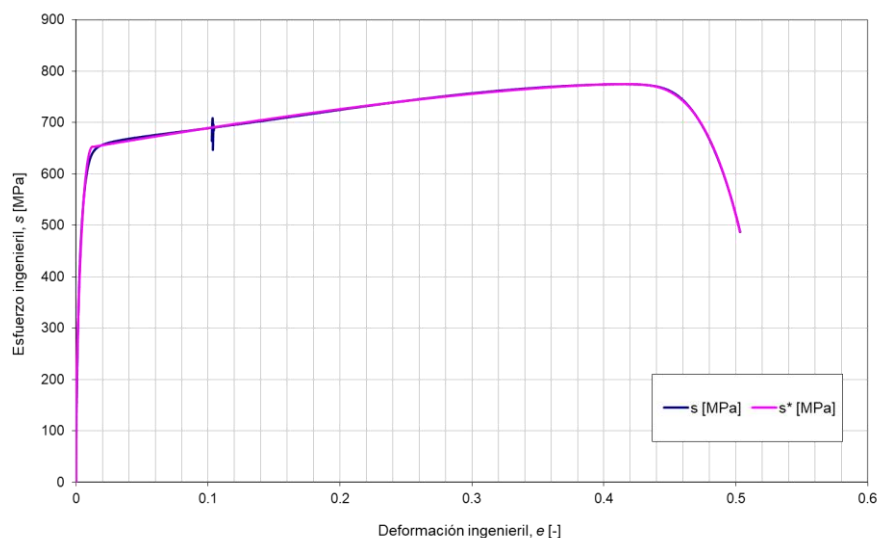


Figura 4.18. Curvas de tracción experimental y simulada del acero AISI 304-A20 (temperatura ambiente).

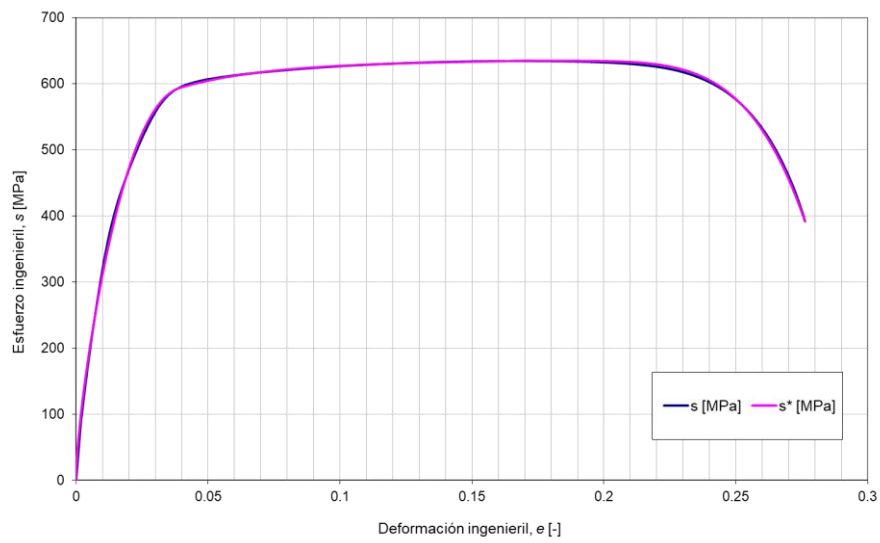


Figura 4.19. Curvas de tracción experimental y simulada del acero AISI 304-A28 ($T = 100$ °C).

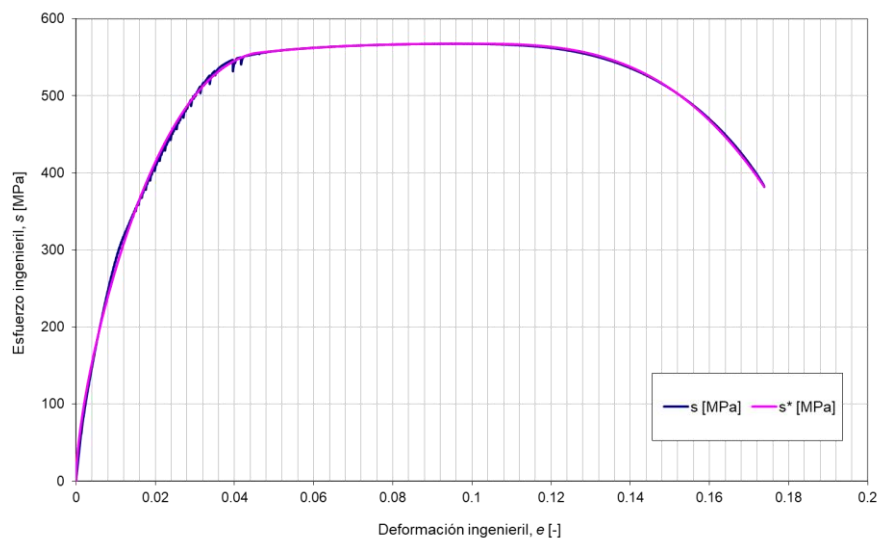


Figura 4.20. Curvas de tracción experimental y simulada del acero AISI 304-A30 ($T = 200$ °C).

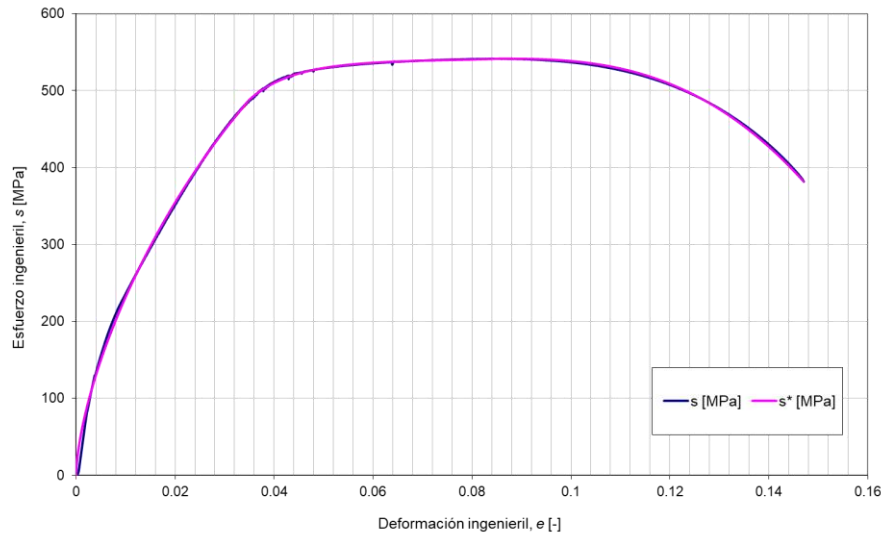


Figura 4.21. Curvas de tracción experimental y simulada del acero AISI 304-A33 ($T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, las curvas experimental y simulada son prácticamente coincidentes a lo largo de toda la vida de la probeta en todos los ensayos que se llevaron a cabo. Por lo que puede asegurarse que el programa utilizado ha superado con creces versiones antiguas del mismo que no eran capaces de obtener resultados tan precisos como los que aquí se muestran. Un aspecto a mejorar sería el cambio abrupto que puede apreciarse en la transición de la zona elástica a la plástica en la Figura 4.18 (temperatura ambiente) ya que, como se verá en los siguientes apartados, es una imprecisión recurrente en el ajuste de la curva debido a un cambio brusco en la pendiente.

Por otro lado, se hace necesario prestar atención a la tendencia que siguen las curvas al variar la temperatura del ensayo. Para ello se facilita la comparativa de cada ensayo en las Figuras 4.22 y 4.23, donde se observa que ante un aumento de la temperatura cambian las propiedades de las probetas de acero AISI-304. Los cambios más notables son la disminución del límite elástico y la rigidez (pendiente de la zona elástica). Además, la presencia de tracciones a elevada temperatura provoca una reducción de la deformación de fractura del material, lo cual contradice a la teoría. Dicho comportamiento puede deberse al rango de temperaturas de ensayo que se ha tomado, ya que teniendo en cuenta la temperatura de fusión del acero AISI 304 ($T = 1454\text{ }^{\circ}\text{C}$) es posible que el comportamiento que aquí se muestra no sea el mismo cuando se ensayen las probetas a mayor temperatura.

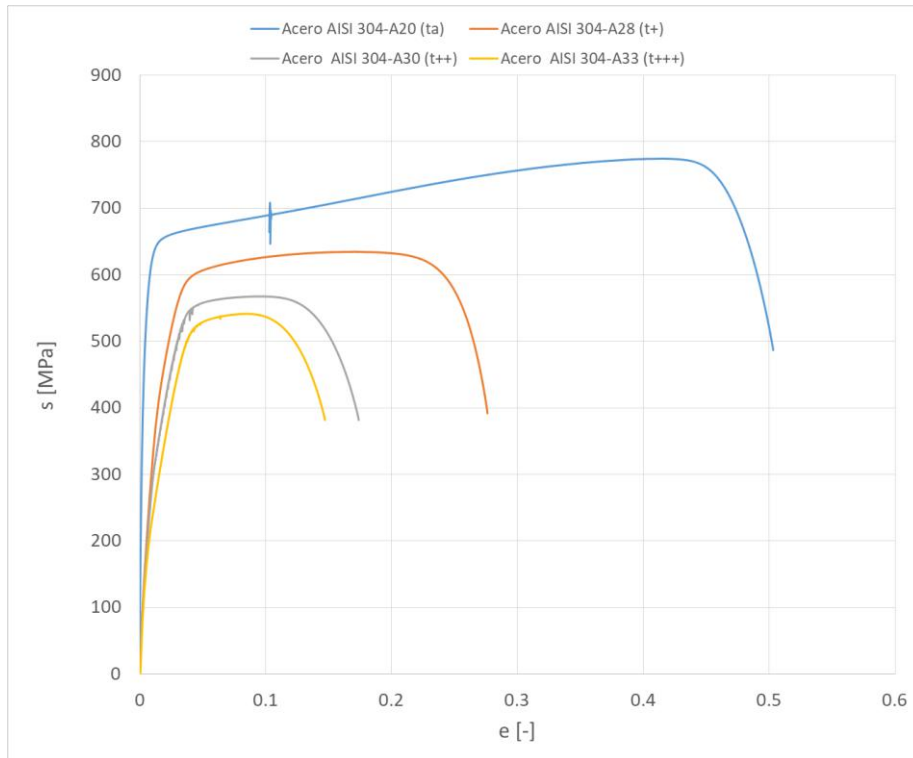


Figura 4.22. Comparativa de curvas experimentales de acero AISI 304 a diferentes temperaturas.

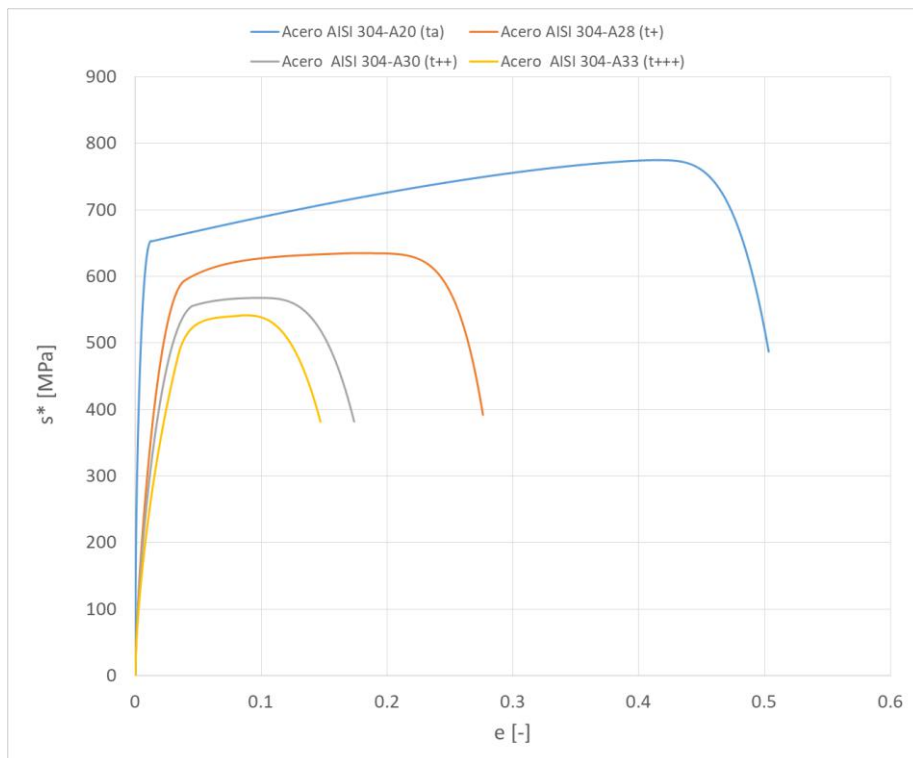


Figura 4.23. Comparativa de curvas simuladas de acero AISI 304 a diferentes temperaturas.

En las siguientes tablas se recogen los parámetros obtenidos del ajuste y sus valores normalizados.

Tabla 4.3. Parámetros de la curva de tracción del acero AISI 304 a diferentes temperaturas.

T [°C]	e_{LE}	def	e_M	e_F	$s_{LEsup}[MPa]$	$s_{LEinf}[Mpa]$	$s_M[MPa]$	$s_F[MPa]$	k	m	n	\tilde{n}	p
25	0.013	0	0.4123	0.5032	652.7470	0	774.6945	486.826	0.3951	32.7328	1.4272	-0.1314	3.3671
100	0.0425	0.0000	0.1660	0.2704	594.7	0.0	631.1	387.7	0.6174	12.0918	3.2982	14.2293	4.9274
200	0.0425	0.0000	0.0948	0.1703	552.0	0.0	567.2	380.8	0.5788	9.8736	3.1266	25.0373	3.0971
300	0.0375	0.0000	0.0863	0.1495	499.5	0.0	543.7	381.5	0.7502	7.0576	4.6908	41.5225	2.7719

Tabla 4.4. Parámetros normalizados de la curva de tracción del acero AISI 304 a diferentes temperaturas.

Tn [-]	e_{LE}	def	e_M	e_F	$s_{LEsup}[MPa]$	$s_{LEinf}[Mpa]$	$s_M[MPa]$	$s_F[MPa]$	k	m	n	\tilde{n}	p
1.0	1.00	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4.0	3.27	0.0000	0.4025	0.5373	0.9111	0.0000	0.8146	0.7964	1.5629	0.3694	2.3109	-108.257	1.4634
8.0	3.27	0.0000	0.2299	0.3384	0.8456	0.0000	0.7322	0.7822	1.4650	0.3016	2.1907	-190.485	0.9198
12.0	2.88	0.0000	0.2092	0.2971	0.7652	0.0000	0.7018	0.7836	1.8991	0.2156	3.2867	-315.905	0.8232

Una vez establecida la base de datos obtenida del ajuste, se va a representar la tendencia de los parámetros así como el polinomio de tendencia al que mejor se ajustan los datos obtenidos. En primer lugar, pasará a comentarse el caso de la deformación del límite elástico (e_{LE}) y el tamaño de la zona de fluencia (def), ambas gráficas se observan en la Figura 4.23. Como puede apreciarse en dichas gráficas, la deformación del límite elástico es poco fiable dado su R^2 , mientras que el tamaño de la zona de fluencia es nulo ya que las curvas de tracción de dicho material no cuentan con una zona de fluencia propiamente dicha.

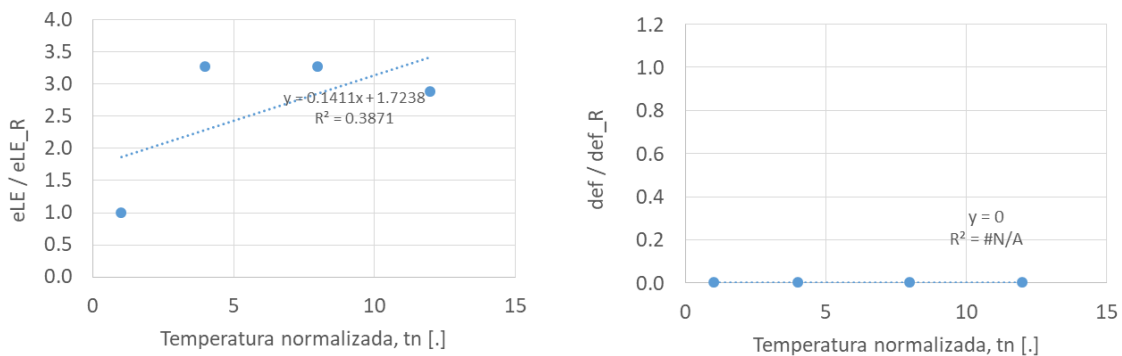


Figura 4.24. Representación normalizada de la deformación del límite elástico (izquierda) y el tamaño de la zona de fluencia (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.

En la Figura 4.25 se muestra el comportamiento de la deformación máxima (e_M) y de fractura (e_F) ante la temperatura de ensayo normalizada. En ambos casos la tendencia de los parámetros varía linealmente con pendiente negativa, siendo bastante fiable el ajuste. Sin embargo, dicho comportamiento no se corresponde con lo que se esperaba teóricamente en el caso de la deformación de fractura puesto que, ante un aumento de la temperatura de ensayo, cabe esperar que el material se vuelva más dúctil y por lo tanto dicho parámetro debería de adquirir un comportamiento creciente lineal.

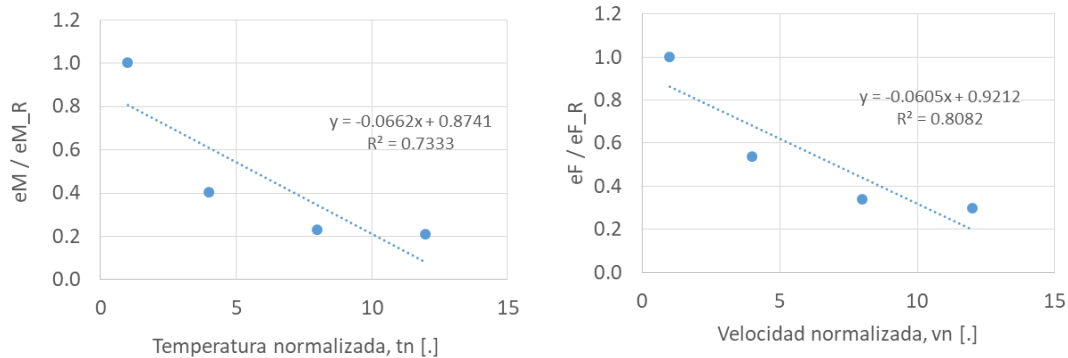


Figura 4.25. Representación normalizada de la deformación máxima (izquierda) y deformación de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.

En las siguientes gráficas se muestra el comportamiento del límite elástico superior ($s_{LE\ sup}$) e inferior ($s_{LE\ inf}$) del acero AISI 304 ante una variación en la temperatura de ensayo. Se puede observar cómo en el caso del límite elástico inferior la tendencia es nula debido a la inexistencia de zona de fluencia en las curvas de tracción del material; así como un comportamiento lineal decreciente para el caso del límite elástico superior, lo cual tiene sentido debido a la pérdida de rigidez ante un aumento de la ductilidad.

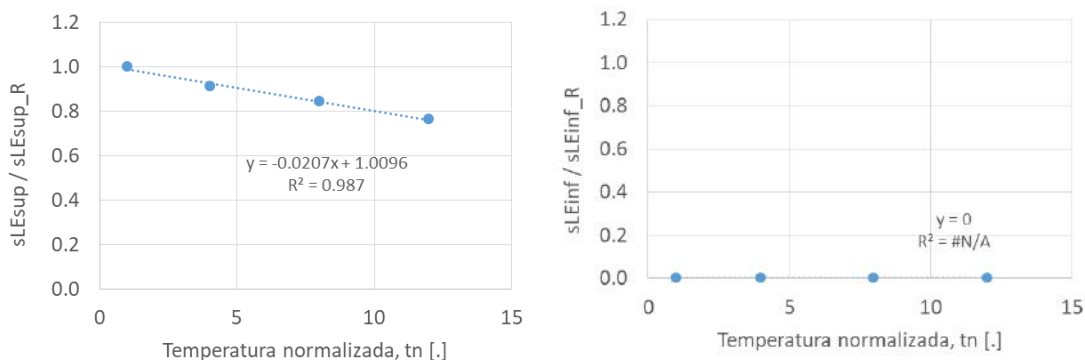


Figura 4.26. Representación normalizada del límite elástico superior (izquierda) e inferior (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.

A continuación se observa la sensibilidad de la tensión máxima (s_M) y de fractura (s_F) frente a la temperatura. En este caso, ambos resultados arrojan comportamientos linealmente decrecientes como se puede

comprobar teóricamente, aunque dado el valor de R^2 en el caso de la resistencia a fractura dicha representación no es del todo fiable.

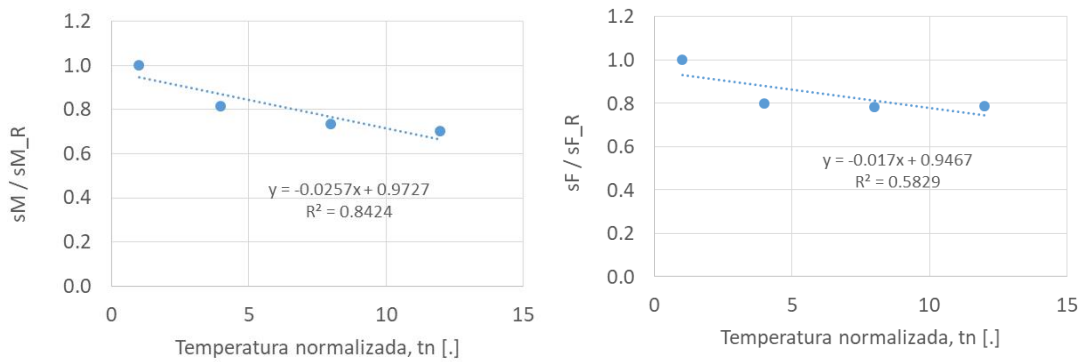


Figura 4.27. Representación normalizada de la resistencia máxima (izquierda) y resistencia de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.

Por último, en las Figuras 4.28, 4.29 y 4.30 se muestra el comportamiento de los parámetros en los que se ha apoyado el programa para el ajuste de las curvas respecto a la temperatura de ensayo normalizada. Como puede apreciarse la fiabilidad de las mismas es alta salvo en el caso del parámetro p . Por otro lado, se observa que tanto k y n adquieren un comportamiento lineal mientras que los parámetros m , \tilde{n} y p lo hacen parabólicamente; no obstante el parámetro \tilde{n} varía de forma casi lineal siendo el que mejor se ajusta.

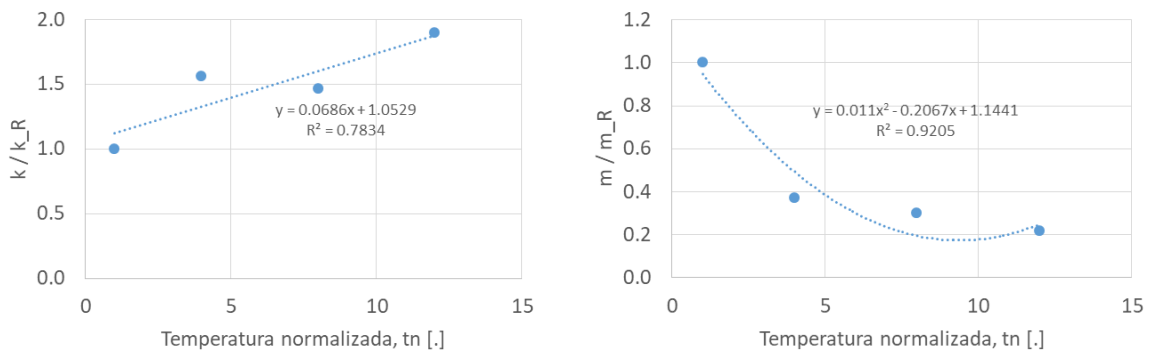


Figura 4.28. Representación normalizada del parámetro k (izquierda) y del parámetro m (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.

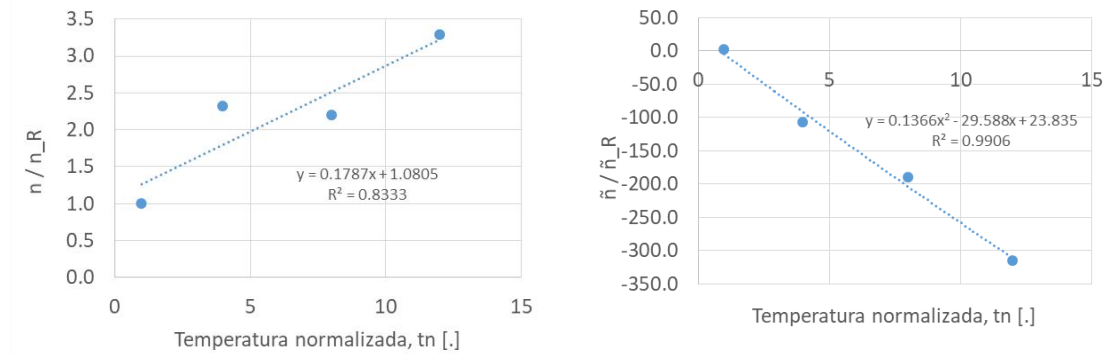


Figura 4.29. Representación normalizada del parámetro n (izquierda) y del parámetro \tilde{n} (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.

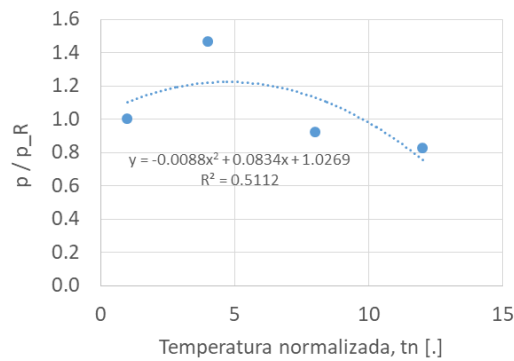


Figura 4.30. Representación normalizada del parámetro p respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.

Para concluir el análisis del ajuste del acero AISI 304 se presentan dos gráficas donde se lleva a cabo una comparación entre la tendencia que sigue la tensión y la deformación experimentales frente a un aumento de la temperatura de ensayo y estos mismos parámetros calculados aplicando el modelo de sensibilidades explicado en el Capítulo 3. Como puede apreciarse en la Figura 4.31 el ajuste obtenido aplicando el modelo teórico se ajusta a los resultados experimentales, en ambos casos se observa que, ante un aumento de temperatura, el material responde con un aumento de la deformación y la disminución de la tensión promedio. Sin embargo, la fiabilidad de la curva de la deformación promedio es reducida y los resultados teóricos de la tensión promedio que se han obtenido, aunque tienen una tendencia similar a los experimentales, quedan lejos de dichos valores pudiendo mejorarse la precisión del modelo teórico para obtener un mejor ajuste. De esta forma, aunque los resultados son aceptables, sería interesante ensayar un mayor número de probetas de cara a la obtención de una tendencia clara de la deformación promedio y mejorar el modelo de sensibilidades para la mejora de los resultados experimentales de la tensión.

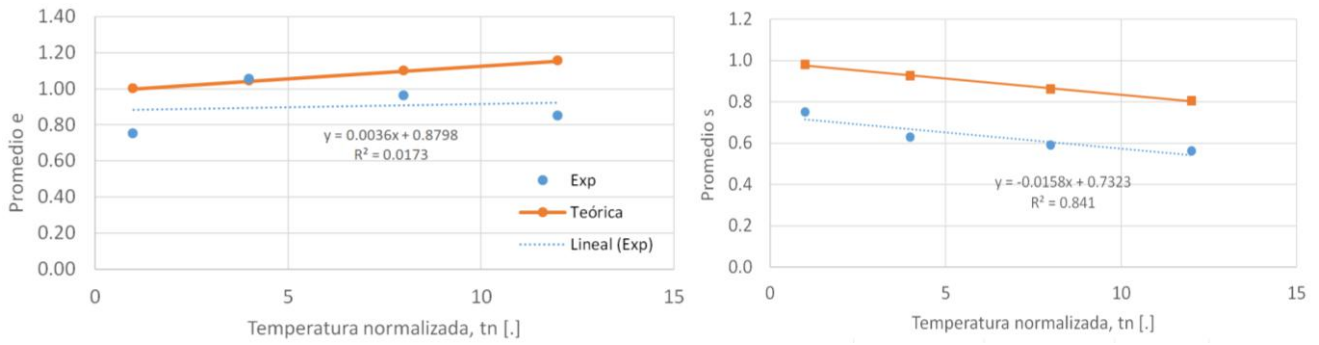


Figura 4.31. Representación de la tendencia de la deformación promedio (izquierda) y la tensión promedio (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del acero AISI 304.

4.3 Ajuste del Aluminio 2011

Siguiendo la misma línea de trabajo que en los apartados anteriores, a continuación se muestran las curvas experimentales y simuladas para comparar la precisión del ajuste. El material ensayado a alta temperatura se trata de un aluminio 2011 en estado de recepción, mientras que para el ensayo a temperatura ambiente se ha hecho uso de un aluminio 2011 con recocido total (O). En la bibliografía de este trabajo queda referenciado el TFG anterior donde se recogen el ajuste de seis probetas de aluminio 2011 con diferentes tratamientos térmicos, así como el análisis de la sensibilidad frente al ritmo de deformación del aluminio 2011 con solubilización, atemperado y maduración artificial (T6).

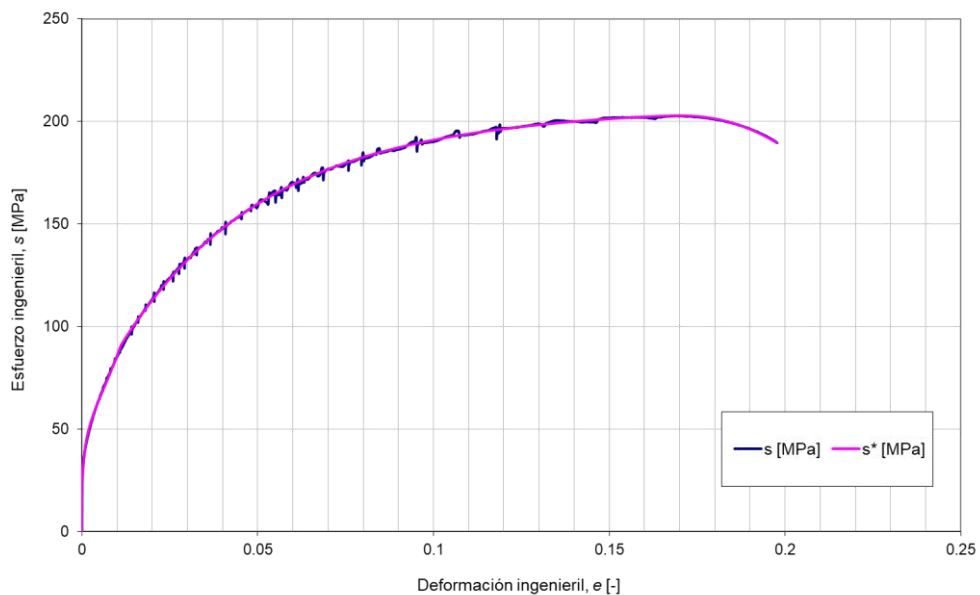


Figura 4.32. Curvas de tracción experimental y simulada del aluminio 2011 O-04 (temperatura ambiente).

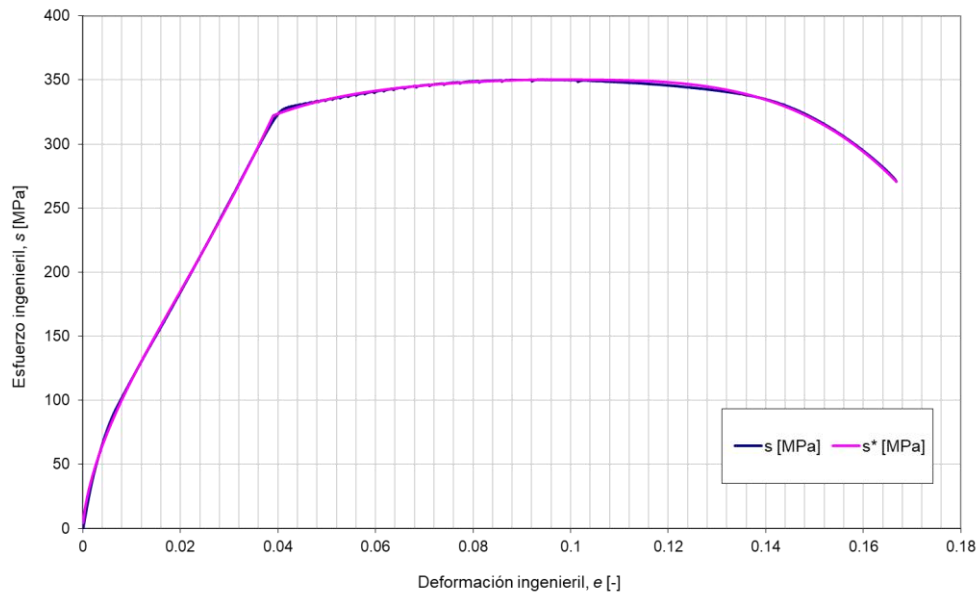


Figura 4.33. Curvas de tracción experimental y simulada del aluminio 2011 Al-T1 ($T = 100\text{ °C}$).

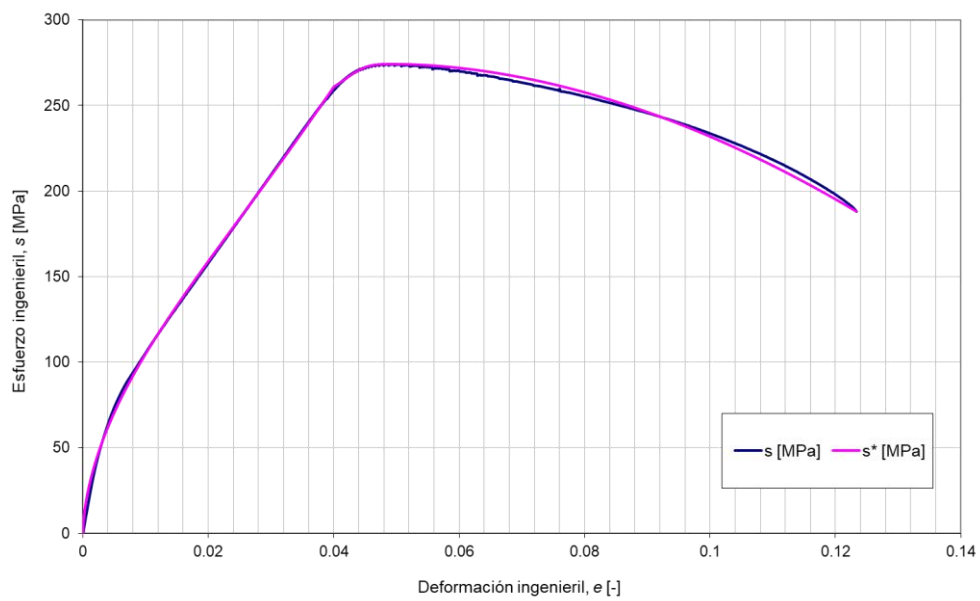


Figura 4.34. Curvas de tracción experimental y simulada del aluminio 2011 Al-T3 ($T = 200\text{ °C}$).

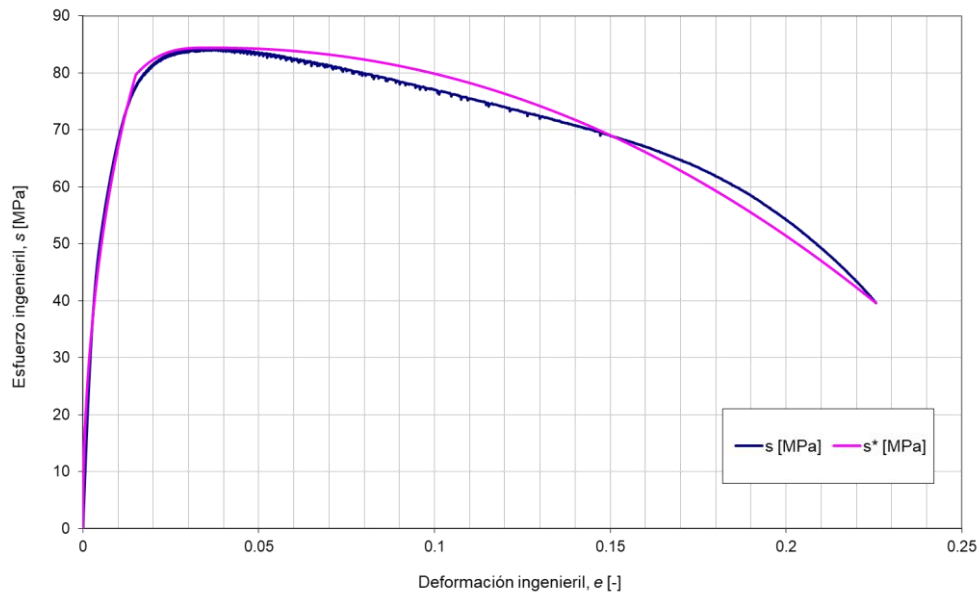


Figura 4.35. Curvas de tracción experimental y simulada del aluminio 2011 Al-T6 ($T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$).

En la Figura 4.34 se puede observar como empieza a darse un ajuste no tan preciso como en los ensayos a temperatura ambiente y a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la zona plástica de la curva. Esta falta de precisión se observa claramente en la gráfica de la Figura 4.35 donde la tendencia que sigue la curva simulada es diferente a la de la curva experimental. Dicho desajuste podría deberse al comportamiento del aluminio 2011 cuando se somete a elevada temperatura, ya que a medida que avanzamos a lo largo de la zona plástica la tensión aplicada es casi lineal decreciente. Además, se da otro desajuste en la transición de la zona elástica a la plástica debido a que dicha curva es más abrupta que en los casos anteriores. Una solución a la imprecisión comentada sería la introducción de más parámetros en el simulador de las curvas.

Para apreciar con una mayor claridad los cambios que sufren las curvas experimental y simulada con respecto al aumento de la temperatura de ensayo se adjuntan las siguientes figuras.

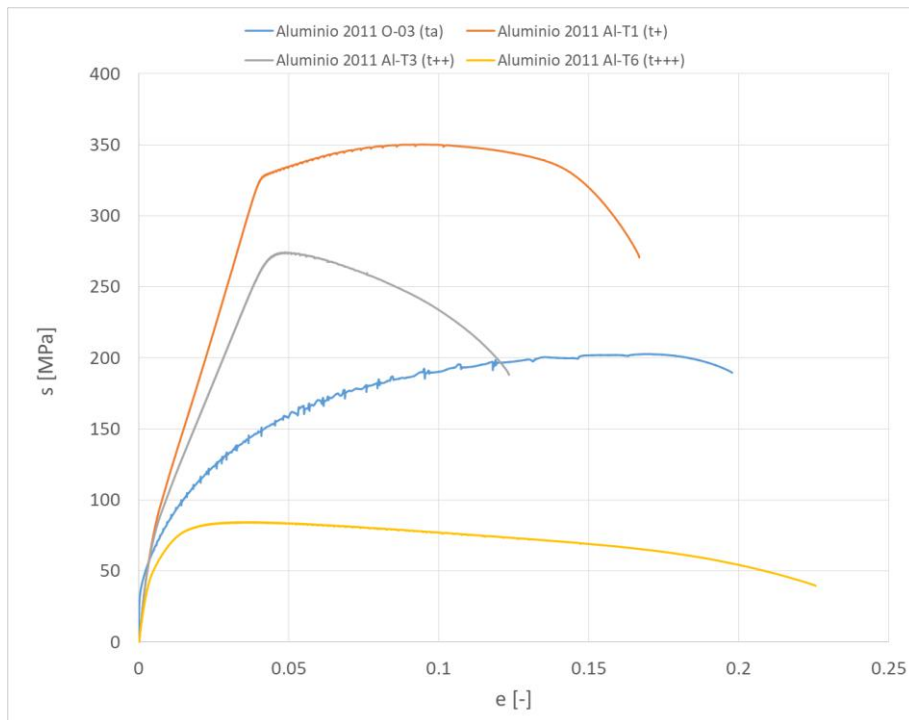


Figura 4.36. Comparativa de curvas experimentales del aluminio 2011 a diferentes temperaturas.

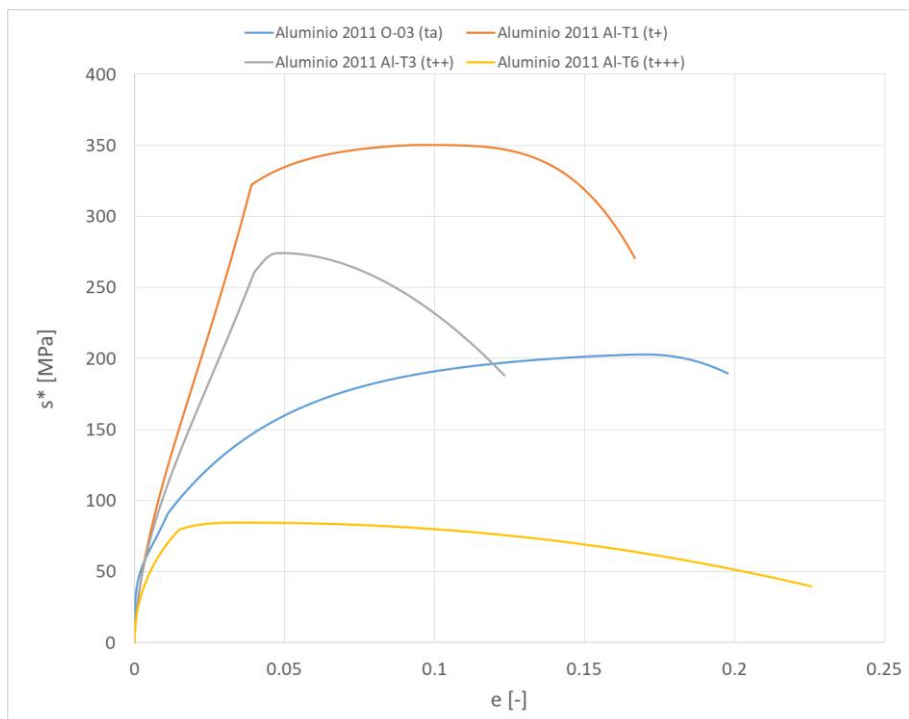


Figura 4.37. Comparativa de curvas simuladas del aluminio 2011 a diferentes temperaturas.

Como se puede observar en las Figuras 4.36 y 4.37, debido al tratamiento térmico de recocido total que se le ha aplicado a las probetas ensayadas a temperatura ambiente, existe una diferencia significativa entre el comportamiento del aluminio 2011 ensayado a temperatura ambiente (curva azul) y el comportamiento del resto de probetas, que no fueron sometidas a ningún tratamiento. Por lo tanto, a causa de la disparidad en los

resultados obtenidos, se ha llegado a la conclusión de que el hecho de haber ensayado materiales sometidos a diferentes tratamientos térmicos es la razón por la cual este material no sigue una tendencia clara como se verá más adelante.

A medida que se aumenta la temperatura de ensayo se observa una pendiente de la zona elástica cada vez menor en las probetas ensayadas a temperatura elevada, lo cual se traduce en una disminución en la rigidez de las probetas, así como la reducción del límite elástico. Además, la deformación cada vez es mayor debido a un aumento de la ductilidad del material. Ambos cambios en el comportamiento del material coinciden con la teoría.

Los parámetros insertados en la tabla *Datos conocidos* y los utilizados por el programa para el ajuste de la curva se presentan en la Tabla 4.5 y en la Tabla 4.6 quedan recogidos esos mismos valores normalizados. Estos datos serán de gran utilidad para el estudio de la tendencia y la validez del ajuste.

Tabla 4.5. Parámetros de la curva de tracción del aluminio 2011 a diferentes temperaturas.

T [°C]	e_{LE}	def	e_M	e_F	$S_{LEsup}[MPa]$	$S_{LEinf}[Mpa]$	$S_M[MPa]$	$S_F[MPa]$	k	m	n	\tilde{n}	p
25	0.0385	0.0000	0.1461	0.2037	139.3	0.0	162.7	134.7	0.3034	1.3703	2.8018	3.8043	2.4118
100	0.0395	0.0000	0.0920	0.1635	318.9	0.0	349.5	268.8	0.6766	-8.8460	3.3015	33.7102	3.3953
200	0.0380	0.0000	0.0447	0.1175	251.8	0.0	260.3	177.5	0.5976	-1.2690	1.8117	-99.676	1.9037
300	0.0225	0.0000	0.0341	0.2134	95.6	0.0	99.6	44.9	0.4708	12.8621	6.4374	0.9784	1.8742

Tabla 4.6. Parámetros normalizados de la curva de tracción del aluminio 2011 a diferentes temperaturas.

Tn [-]	e_{LE}	def	e_M	e_F	$S_{LEsup}[MPa]$	$S_{LEinf}[Mpa]$	$S_M[MPa]$	$S_F[MPa]$	k	m	n	\tilde{n}	p
1.0	1.00	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4.0	1.03	0.0000	0.6294	0.8027	2.2893	0.0000	2.1481	1.9955	2.2300	-6.4555	1.1783	8.8611	1.4078
8.0	0.99	0.0000	0.3060	0.5768	1.8076	0.0000	1.6000	1.3180	1.9697	-0.9261	0.6466	-26.2009	0.7893
12.0	0.58	0.0000	0.2334	1.0474	0.6863	0.0000	0.6119	0.3331	1.5519	9.3863	2.2976	0.2572	0.7771

A continuación se representan las curvas de tendencia de los parámetros mostrados en las tablas anteriores. En primer lugar, se muestran las gráficas de la deformación del límite elástico (e_{LE}) y la zona de fluencia (def). En la Figura 4.38 se puede observar que, ante un aumento de la temperatura, la deformación del límite elástico disminuye con una tendencia lineal. Por otro lado, al no existir zona de fluencia en las curvas de

tracción del aluminio 2011, la tendencia normalizada del parámetro def es nula.

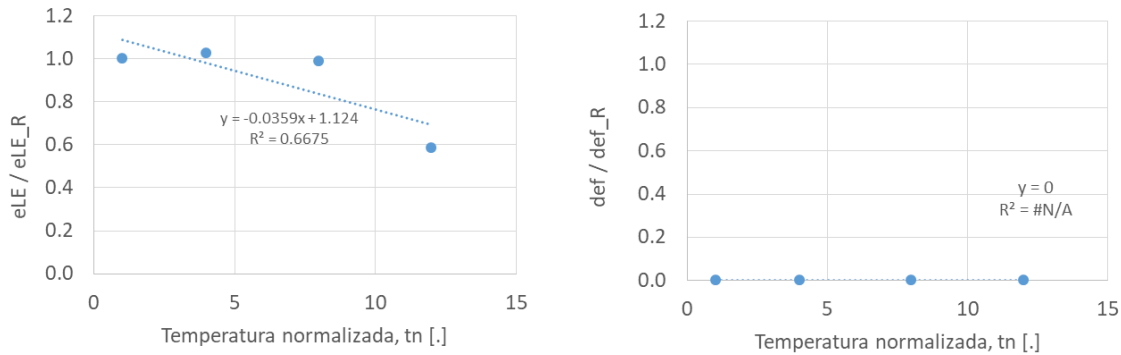


Figura 4.38. Representación normalizada de la deformación del límite elástico (izquierda) y el tamaño de la zona de fluencia (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.

En la Figura 4.39, se muestra la tendencia que siguen la deformación máxima (e_M) y la deformación de fractura (e_F). El comportamiento que sigue la deformación máxima no coincide con la teoría ya que disminuye linealmente. Por otro lado, para el caso de la deformación de fractura se obtiene un ajuste muy poco fiable dado su R^2 prácticamente nulo. De hecho la información que se extrae del polinomio de tendencia del parámetro e_F es un comportamiento prácticamente invariante, lo cual es incorrecto debido a la mayor ductilidad del material ante el aumento de la temperatura de ensayo, como ya se ha visto en los materiales anteriores. Los resultados a los que se ha llegado relacionados con la tendencia de la deformación a fractura pueden estar influenciados en gran medida por el uso de un aluminio 2011 sometido a tratamiento de recocido total en lugar de ensayar todas las probetas de aluminio 2011 en estado de recepción.

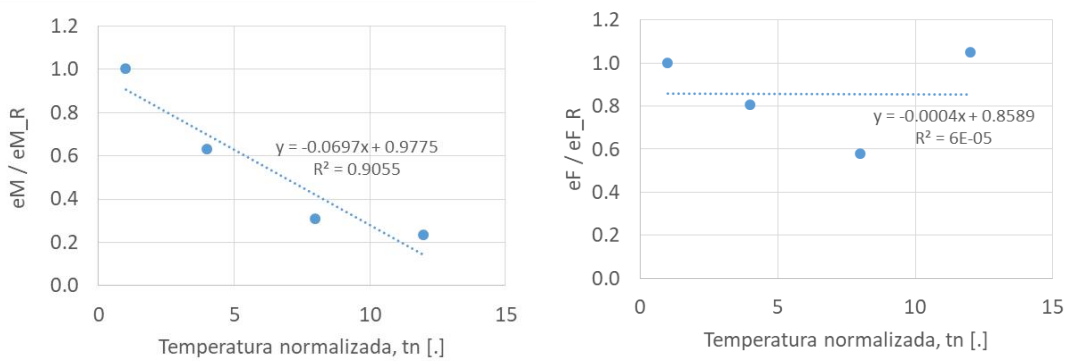


Figura 4.39. Representación normalizada de la deformación máxima (izquierda) y deformación de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.

En la Figura 4.40, se muestra la sensibilidad frente a la temperatura que siguen el límite elástico superior ($s_{LE\ sup}$) e inferior ($s_{LE\ inf}$). Este caso es similar al visto en el apartado anterior ya que como no existe una zona de fluencia, el límite elástico inferior es nulo. El límite elástico superior toma una tendencia lineal decreciente, como marca la teoría, aunque dicha gráfica no es fiable debido al parámetro R^2 .

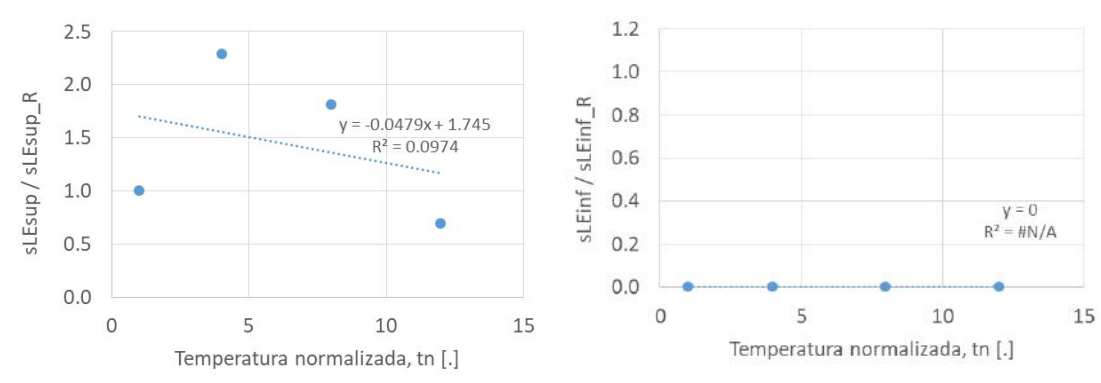


Figura 4.40. Representación normalizada del límite elástico superior (izquierda) e inferior (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.

La información que se desprende de la Figura 4.41 es poco fiable ya que en ambos casos el parámetro R^2 es igual a 0.1509 para el esfuerzo máximo (s_M) y 0.3092 para el esfuerzo de fractura (s_F). Sin embargo, los resultados esperados tendrían una tendencia decreciente al igual que los resultados a los que se ha llegado.

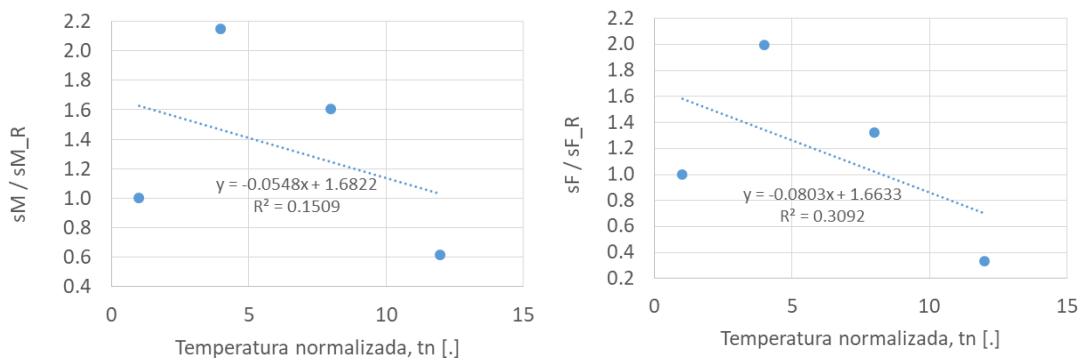


Figura 4.41. Representación normalizada de la resistencia máxima (izquierda) y resistencia de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.

En las siguientes figuras, se observa la evolución de los parámetros utilizados por el simulador para el ajuste de las curvas de tracción ante un aumento de la temperatura. Las tendencias obtenidas para dichos parámetros no garantizan una gran fiabilidad puesto que el valor de R^2 se aleja de la unidad. No obstante, merece la pena destacar el resultado que se obtiene de la evolución que sigue el parámetro m el cual toma un comportamiento parabólico muy preciso.

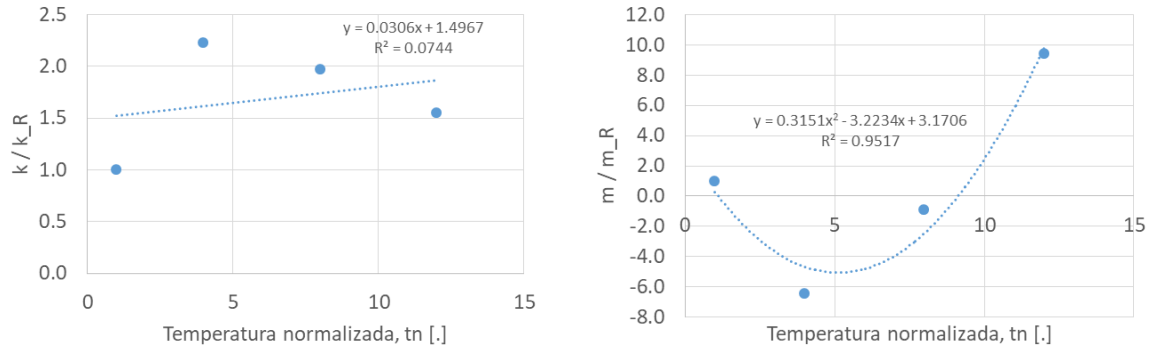


Figura 4.42. Representación normalizada del parámetro k (izquierda) y del parámetro m (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.

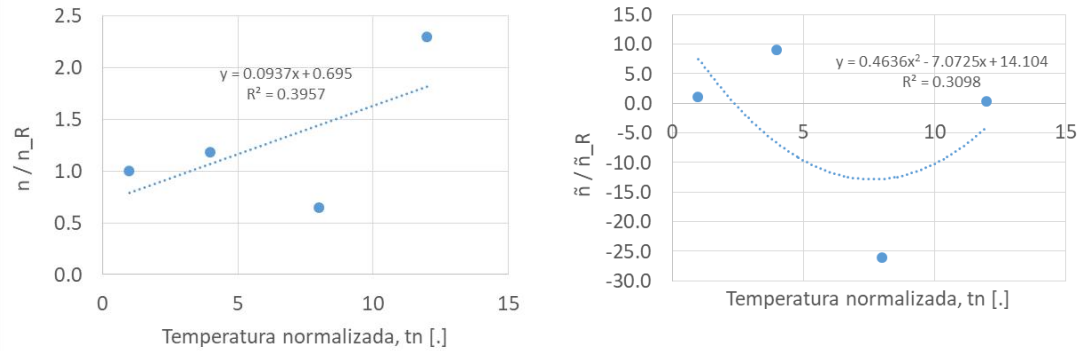


Figura 4.43. Representación normalizada del parámetro n (izquierda) y del parámetro \tilde{n} (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.

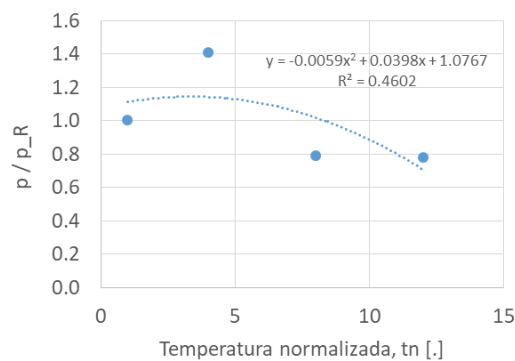


Figura 4.44. Representación normalizada del parámetro p respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.

Finalmente, se muestra la representación de la tendencia de la deformación (e) y la tensión (s) experimentales frente a la variación de la deformación y la tensión teóricas obtenidas al aplicar el modelo de sensibilidades frente a la temperatura de ensayo. Como se puede observar en la Figura 4.45 la tendencia de los parámetros teóricos no se corresponde con la tendencia que siguen los parámetros experimentales. Por lo tanto

se puede concluir que el modelo de sensibilidades no es válido para el caso del aluminio 2011, ya que ante un aumento de la temperatura dicho modelo predice que la deformación de las probetas de aluminio 2011 aumenta, pero experimentalmente la tendencia es decreciente.

Dicho error en la tendencia del modelo de sensibilidades podría estar influenciado por no haber ensayado probetas de aluminio 2011 en estado de recepción a temperatura ambiente, como se comentó en el Capítulo 2 las probetas ensayadas a temperatura ambiente estarían construidas en aluminio 2011 con tratamiento de recocido total (O). Por lo tanto, sería de gran interés realizar una comparativa entre los resultados obtenidos en este trabajo y la tendencia que siguen los parámetros de las probetas de aluminio 2011 en estado de recepción ensayadas a diferentes temperaturas para garantizar la validez o no del modelo de sensibilidades.

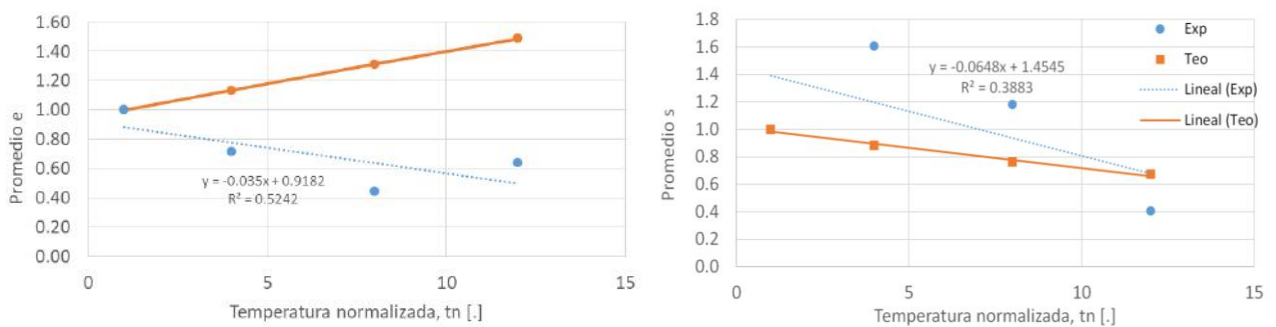


Figura 4.45. Representación de la tendencia de la deformación promedio (izquierda) y la tensión promedio (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del aluminio 2011.

4.4 Ajustes del latón

En este apartado se realiza un estudio de los resultados obtenidos al ajustar las curvas de las probetas de latón, para ello ha sido necesario apoyarse en el trabajo previo donde se realizaban ensayos a temperatura ambiente. A continuación, se presentan las gráficas donde se recoge la curva experimental (s, azul) acompañada de la curva ajustada (s*, rosa) para analizar la precisión del resultado.

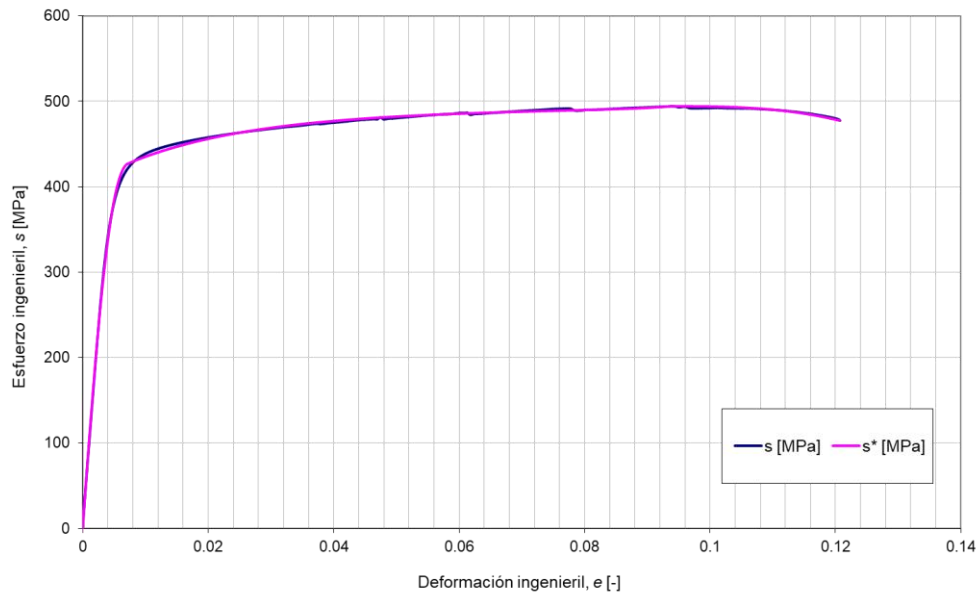


Figura 4.46. Curvas de tracción experimental y simulada del latón L-02 (temperatura ambiente).

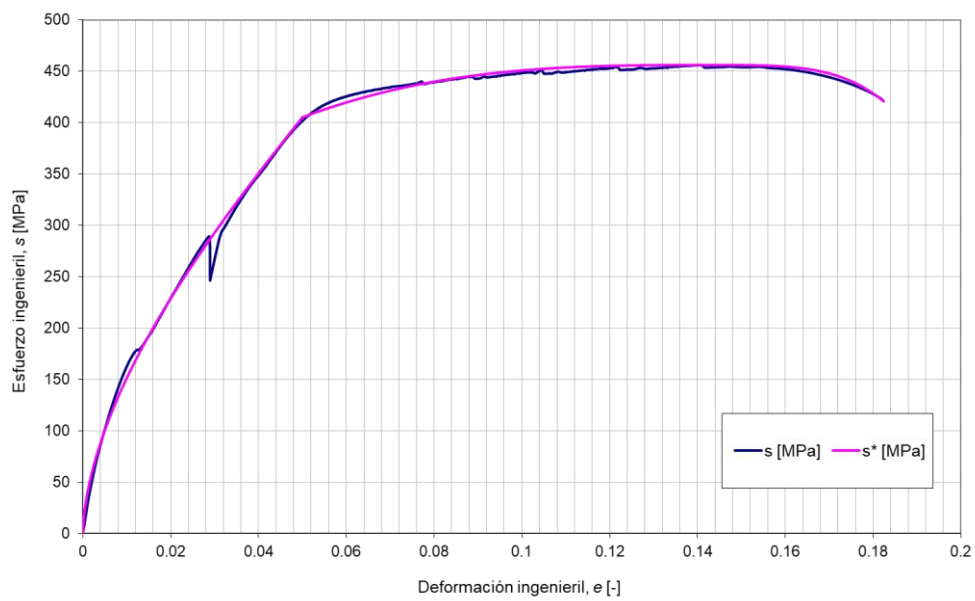


Figura 4.47. Curvas de tracción experimental y simulada del latón L-T2 ($T = 100$ °C).

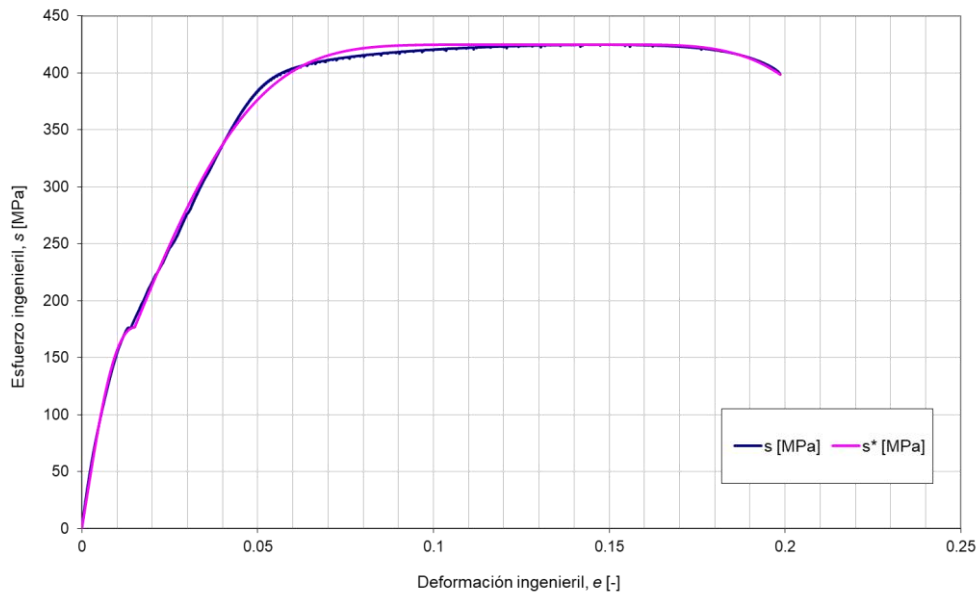


Figura 4.48. Curvas de tracción experimental y simulada del latón L-T4 ($T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$).

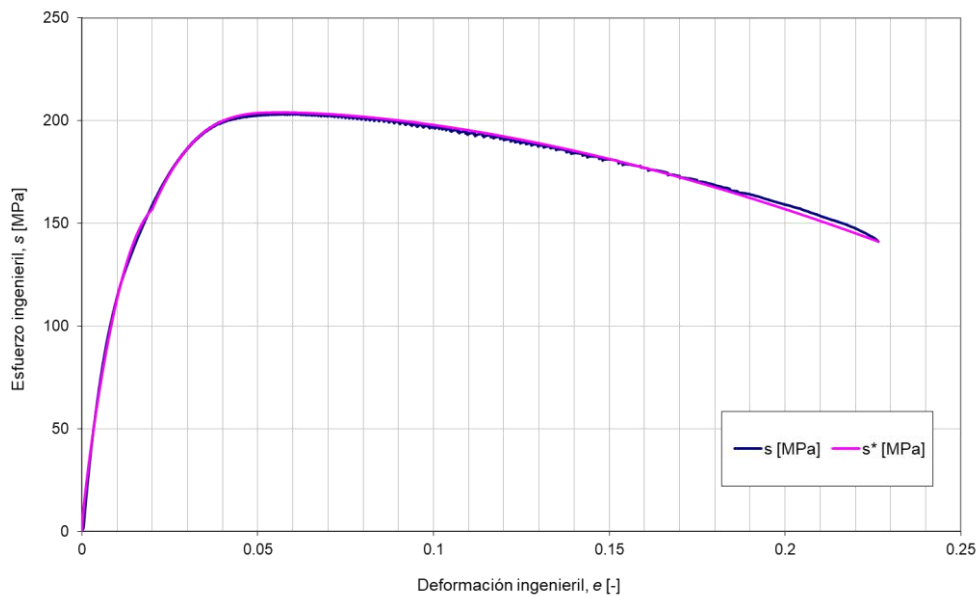


Figura 4.49. Curvas de tracción experimental y simulada del latón L-T5 ($T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Como puede apreciarse en las gráficas anteriores, el ajuste es relativamente bueno en la mayoría de los casos, no obstante, se va a hacer hincapié en los desajustes que han aparecido. En primer lugar señalar el desajuste de la transición de la zona elástica a la plástica que puede observarse en las Figuras 4.46 y 4.47 que como ya se ha comentado en los apartados anteriores es debido al cambio abrupto en la pendiente de la curva. También llama la atención que mientras que el ajuste de la zona elástica de la curva ensayada a 100°C (Figura 4.47) no es del todo preciso, para el caso del ensayo a 200°C (Figura 4.48) la curva se ha ajustado a la perfección en dicho punto, incluso en el cambio de pendiente presente en la zona elástico-lineal.

Por otro lado, en las siguientes gráficas se muestra una comparativa tanto de las curvas experimentales

como de los ajustes para poder llevar a cabo un análisis más claro de las diferencias en el comportamiento de las distintas probetas frente a un aumento en la temperatura de ensayo. Una característica que se mantiene con respecto a los materiales ensayados anteriormente es la pérdida de la rigidez con respecto al aumento de la temperatura y la reducción del límite elástico. Para el caso del latón se observa que las probetas toman una mayor deformación de fractura y una menor tensión de fractura al aumentar la temperatura de ensayo, debido al aumento de la ductilidad del material.

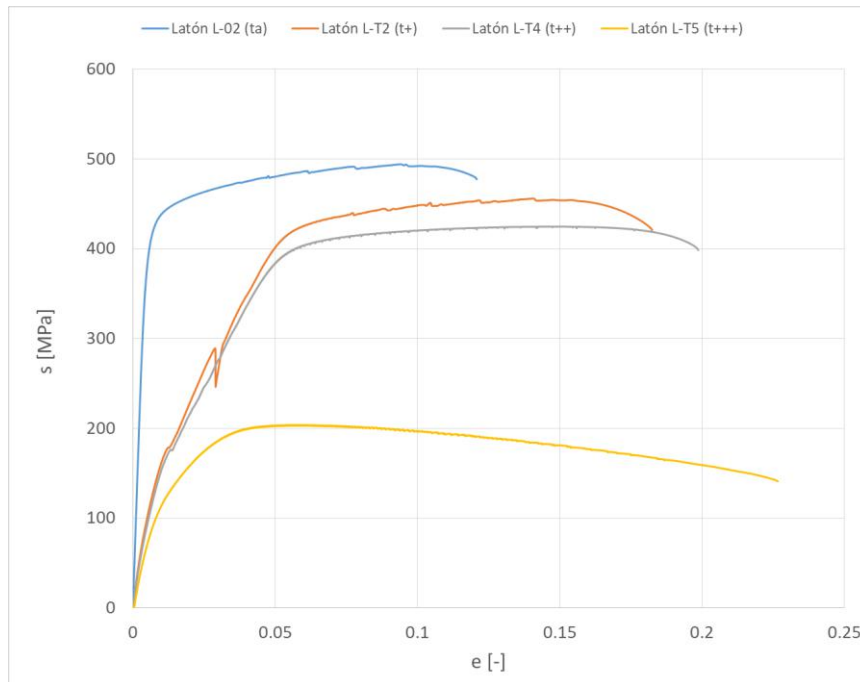


Figura 4.50. Comparativa de curvas experimentales del latón a diferentes temperaturas.

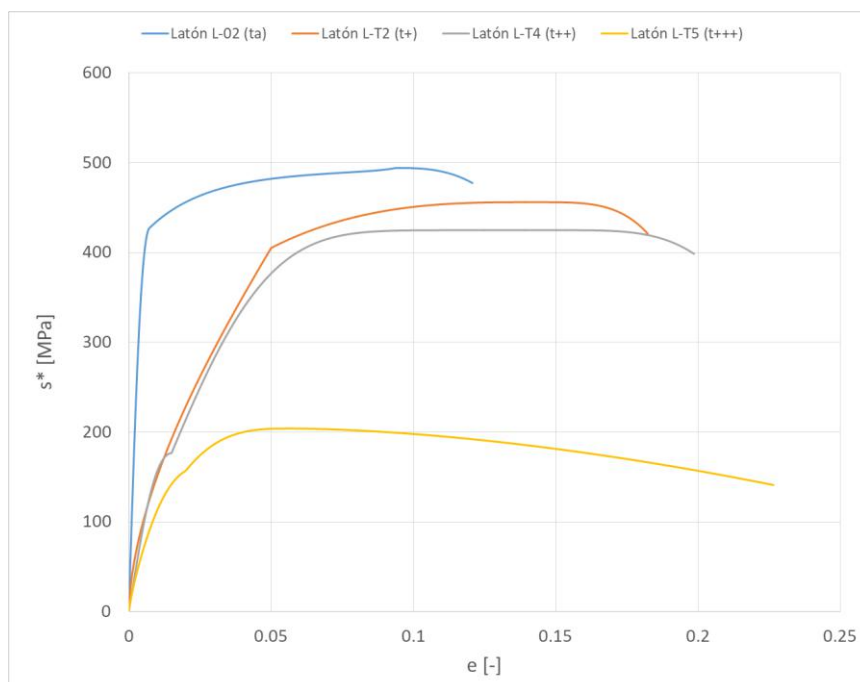


Figura 4.51. Comparativa de curvas simuladas del latón a diferentes temperaturas.

En las siguientes tablas se muestran las bases de datos que se han manejado para el ajuste y el análisis de los parámetros de las curvas de tracción del latón.

Tabla 4.7. Parámetros de la curva de tracción del latón a diferentes temperaturas.

T [°C]	e_{LE}	def	e_M	e_F	$S_{LEsup}[MPa]$	$S_{LEinf}[Mpa]$	$S_M[MPa]$	$S_F[MPa]$	k	m	n	\tilde{n}	p
25	0.0069	0.0000	0.0945	0.1263	423.2	423.2	492.1	472.5	0.8252	109.9499	3.9683	34.1988	3.1329
100	0.0500	0.0000	0.1406	0.1824	405.1	0.0	456.1	420.8	0.6005	-1.1767	2.8776	0.9820	4.1540
200	0.0275	0.0000	0.1490	0.2009	264.4	0.0	421.1	399.6	0.7260	27.1489	4.7433	-18.5603	3.8916
300	0.0200	0.0000	0.0570	0.2308	159.5	0.0	203.0	138.3	0.6549	12.9687	2.9199	0.9606	1.6948

Tabla 4.8. Parámetros normalizados de la curva de tracción del latón a diferentes temperaturas.

Tn [.]	e_{LE}	def	e_M	e_F	$S_{LEsup}[MPa]$	$S_{LEinf}[Mpa]$	$S_M[MPa]$	$S_F[MPa]$	k	m	n	\tilde{n}	p
1.0	1.00	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4.0	7.25	0.0000	1.4878	1.4442	0.9573	0.0000	0.9268	0.8906	0.7277	-0.0107	0.7251	0.0287	1.3259
8.0	3.99	0.0000	1.5762	1.5907	0.6248	0.0000	0.8557	0.8458	0.8798	0.2469	1.1953	-0.5427	1.2422
12.0	2.90	0.0000	0.6026	1.8274	0.3768	0.0000	0.4125	0.2927	0.7936	0.1180	0.7358	0.0281	0.5410

A continuación se llevará a cabo un análisis de la tendencia que siguen todos los parámetros que aparecen en las tablas anteriores con respecto a la temperatura de ensayo. En primer lugar, se muestra el comportamiento de la deformación del límite elástico (e_{LE}) y la zona de fluencia (def). En el primer caso la fiabilidad de la tendencia que sigue el primer parámetro es prácticamente nula, mientras que para el tamaño de la zona de fluencia ocurre lo mismo que en los ensayos de acero AISI 304 y aluminio 2011, donde las curvas no contaban con zona de fluencia por lo que la tendencia de la misma es nula.

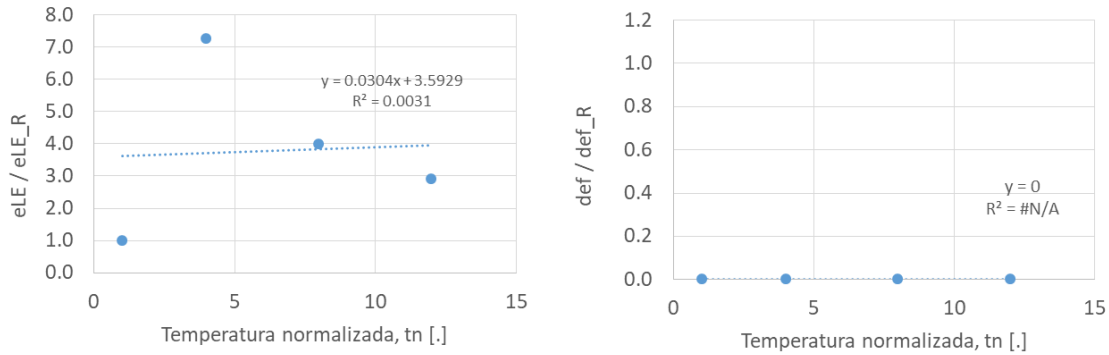


Figura 4.52. Representación normalizada de la deformación del límite elástico (izquierda) y el tamaño de la zona de fluencia (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.

A continuación se pasa al análisis de la deformación máxima (e_M) y la deformación de fractura (e_F). En la Figura 4.53, a la izquierda se muestra la tendencia que sigue la deformación máxima, la cual es acertada con respecto a la teoría, sin embargo dicho resultado resulta poco fiable dado el parámetro R^2 . A la derecha se muestra la tendencia que sigue la deformación de fractura, la cual se ajusta linealmente de forma creciente, ya que ante un aumento de la temperatura a la que se ensaya el material, las probetas alcanzan cada vez mayores deformaciones.

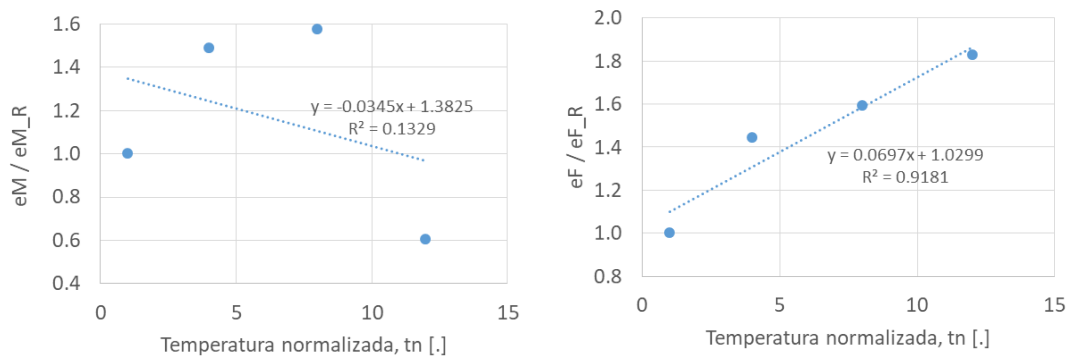


Figura 4.53. Representación normalizada de la deformación máxima (izquierda) y la deformación de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.

En la Figura 4.54, se muestra la variación normalizada del límite elástico superior ($s_{LE\ sup}$) e inferior ($s_{LE\ inf}$). Ante un aumento en la temperatura de ensayo, el límite elástico disminuye y para el caso del latón lo hace de manera lineal ajustándose realmente bien con una fiabilidad muy alta. Por el contrario, el límite elástico inferior tiene un comportamiento parabólico debido a que el valor de dicho parámetro en los ensayos a temperatura elevada es cero.

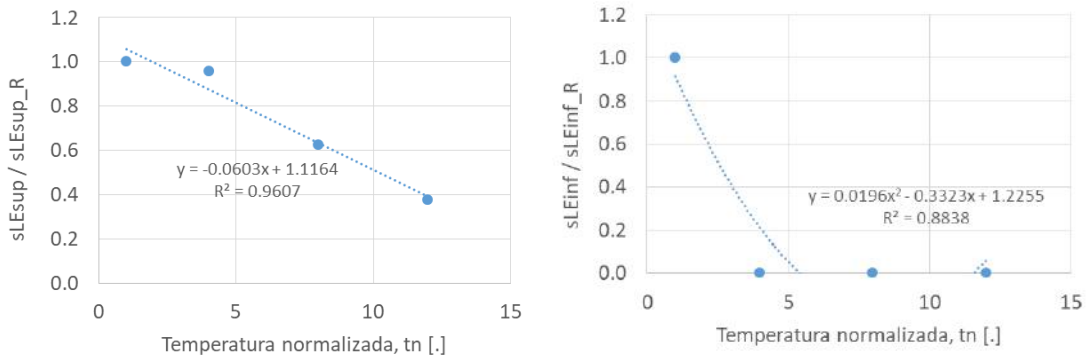


Figura 4.54. Representación normalizada del límite elástico superior (izquierda) e inferior (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.

En la Figura 4.55, se muestra la sensibilidad de la resistencia máxima (s_M) y la resistencia de fractura (s_F) del latón frente a la temperatura de ensayo normalizada. En ambos casos se obtiene un ajuste lineal decreciente, como cabe esperar al aumentar la temperatura hay que aplicar una fuerza menor para que la probeta rompa, es decir, tanto la tensión máxima como la tensión de fractura disminuyen y la deformación aumenta. Además, en ambos casos se obtiene un parámetro R^2 similar, el cual indica una buena fiabilidad.

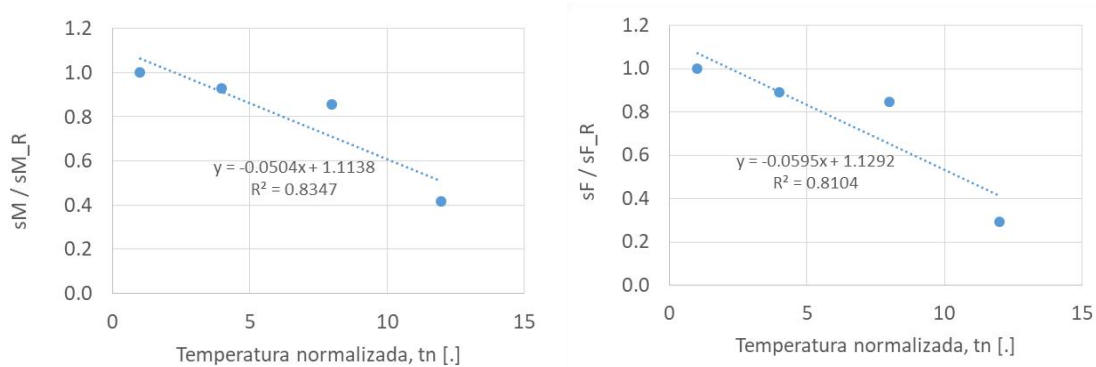


Figura 4.55. Representación normalizada de la resistencia máxima (izquierda) y la resistencia de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.

Por último, al igual que en los apartados anteriores, se presenta la evolución de los parámetros en los que se ha apoyado el programa para el ajuste de las curvas. Como puede observarse en las Figuras 4.56, 4.57 y 4.58 el comportamiento de los parámetros p y \tilde{n} se ajusta perfectamente de forma parabólica. También cabe mencionar la poca fiabilidad del ajuste de los parámetros n y k , cuyo polinomio de tendencia es de primer grado y no consigue adaptarse de manera satisfactoria a los valores que toman dichos parámetros.

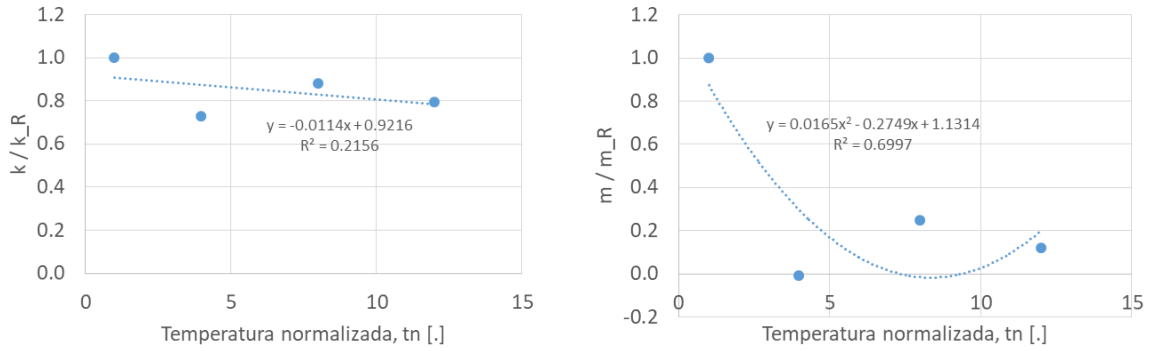


Figura 4.56. Representación normalizada del parámetro k (izquierda) y del parámetro m (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.

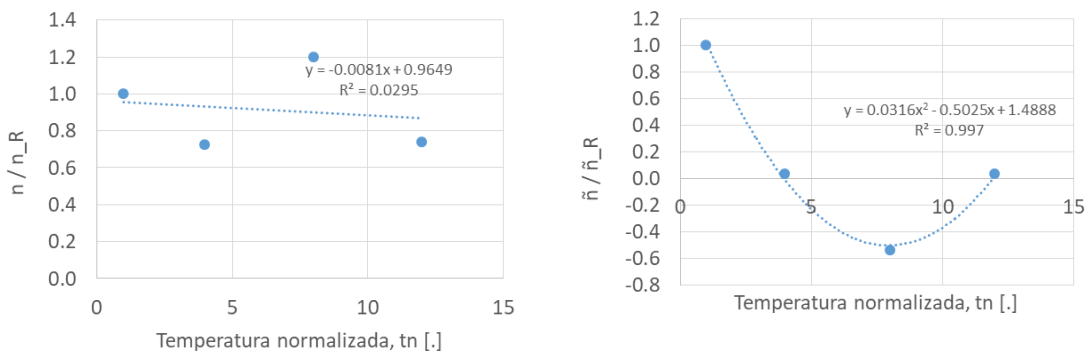


Figura 4.57. Representación normalizada del parámetro n (izquierda) y del parámetro \tilde{n} (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.

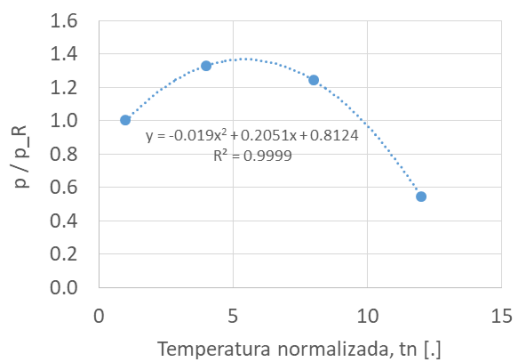


Figura 4.58. Representación normalizada del parámetro p respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.

Por último, para acabar con el análisis de los resultados obtenidos de ensayar probetas de latón a diferentes temperaturas, en la Figura 4.59 se muestra una comparación entre la tendencia teórica y la experimental de la deformación (e) y la tensión (s) promedio. En este caso se puede asegurar que el modelo de

sensibilidades frente a la temperatura es adecuado ya que se ajusta al comportamiento que siguen los parámetros experimentales. No obstante, a pesar de obtener resultados similares, habría que mejorar dicho modelo para garantizar un aumento de la precisión de los valores teóricos obtenidos o al menos realizar más ensayos en el rango de temperaturas analizado para obtener una tendencia lo más fiable posible.

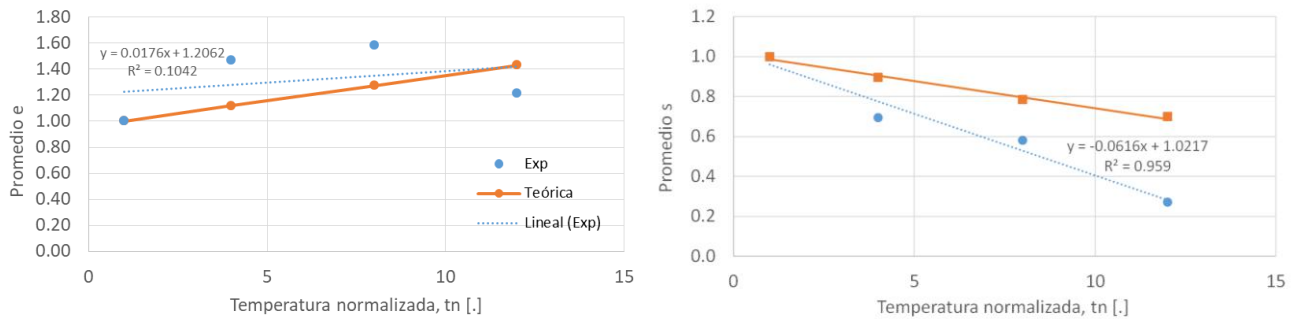


Figura 4.59. Representación de la tendencia de la deformación promedio (izquierda) y la tensión promedio (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada del latón.

4.5 Ajustes de la fundición gris

En este apartado se analizarán los resultados de la última aleación ensayada, la fundición gris. En este caso, las curvas sintetizadas se ajustan perfectamente al resultado experimental debido a que la curva de tracción ensayada evoluciona suavemente, lo cual favorece su adaptación. En las siguiente gráficas se puede observar las distintas curvas experimentales (s, azul) junto con las curvas ajustadas (s*, rosa) a diferentes temperaturas de ensayo.

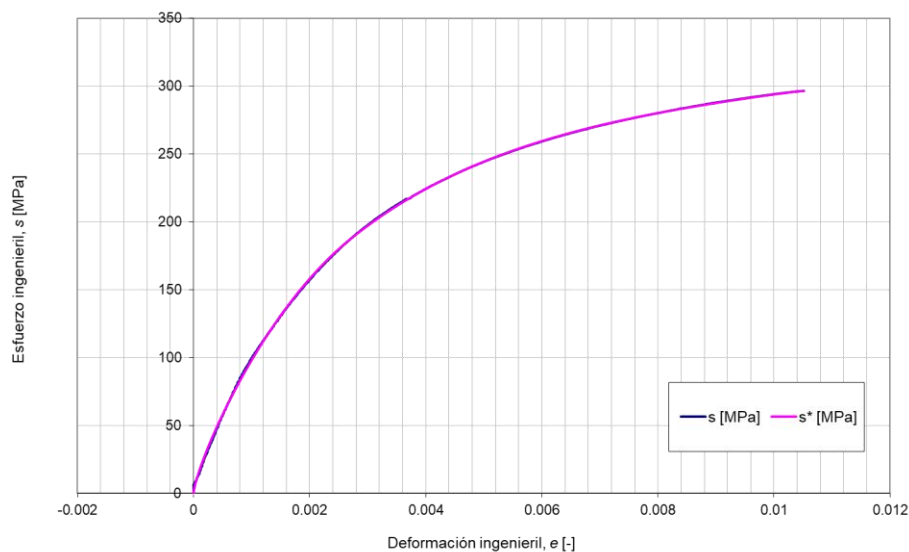


Figura 4.60. Curvas de tracción experimental y simulada de fundición gris F-01 (temperatura ambiente).

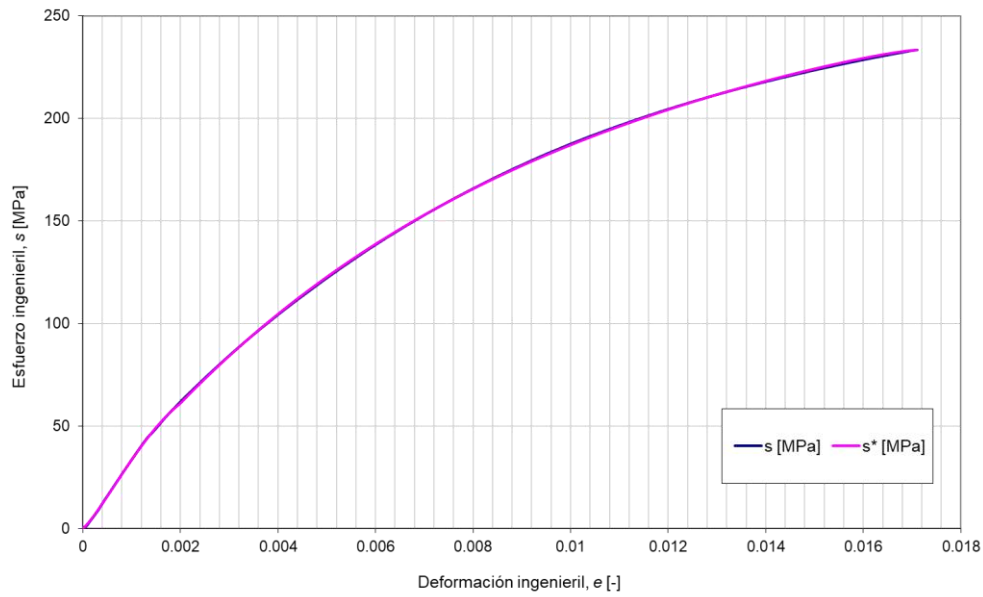


Figura 4.61. Curvas de tracción experimental y simulada de fundición gris Fund-T1 ($T = 100$ °C).

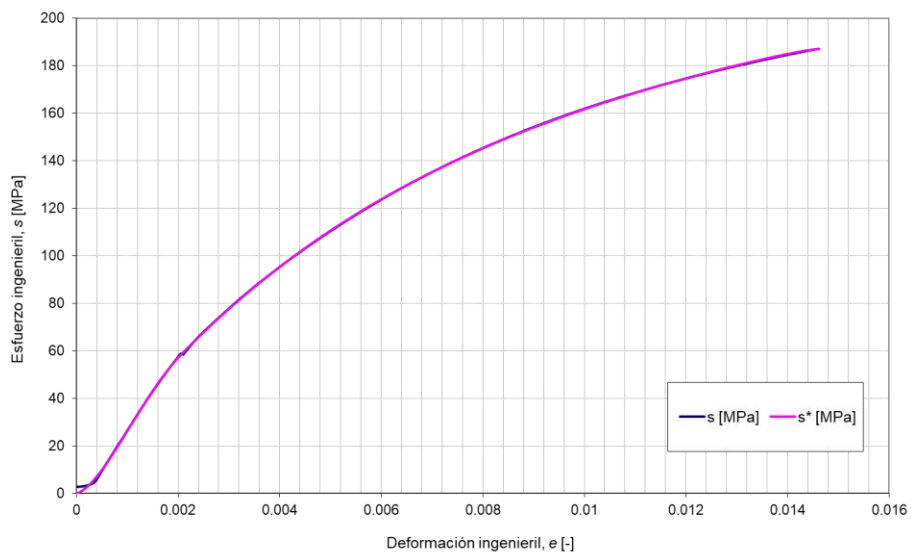


Figura 4.62. Curvas de tracción experimental y simulada de fundición gris Fund-T4 ($T = 200$ °C).

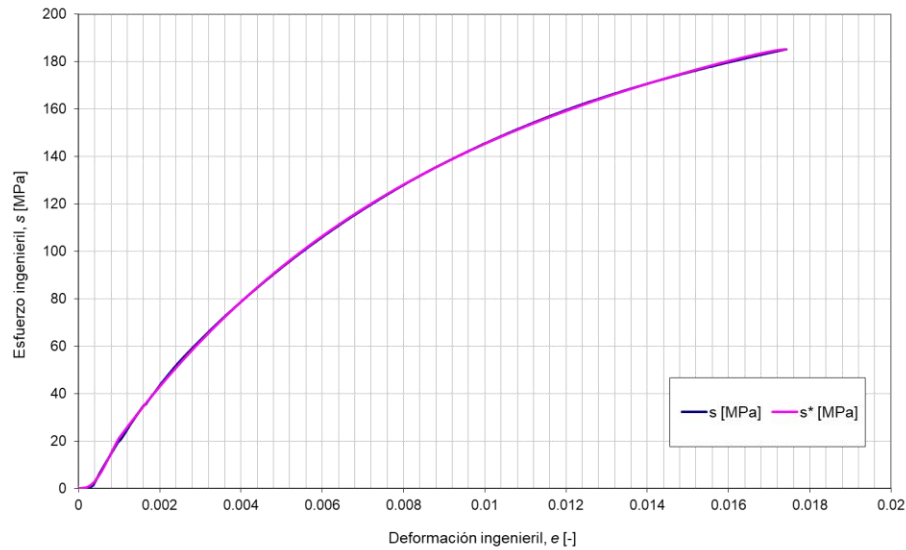


Figura 4.63. Curvas de tracción experimental y simulada de fundición gris Fund-T5 ($T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$).

En lo referente al comportamiento de este material frente a una variación en la temperatura de ensayo puede decirse que tanto la rigidez como el límite elástico disminuyen. Sin embargo, si se atiende a la deformación que sufren las probetas se advierte un aumento significativo de esta propiedad para ensayos a mayor temperatura en comparación con el ensayo a temperatura ambiente, debido a la mejora de la ductilidad. Por otro lado, si se comparan los ensayos a temperatura elevada entre sí se observa que la deformación a rotura no varía en gran medida debido al carácter frágil de este tipo de aleaciones. Para apreciar mejor la tendencia de los parámetros más significativos sería interesante ensayar una serie de probetas a mayor temperatura dado el alto punto de fusión que tiene la fundición gris, así se podría apreciar con una mayor claridad un aumento de la deformación de fractura.

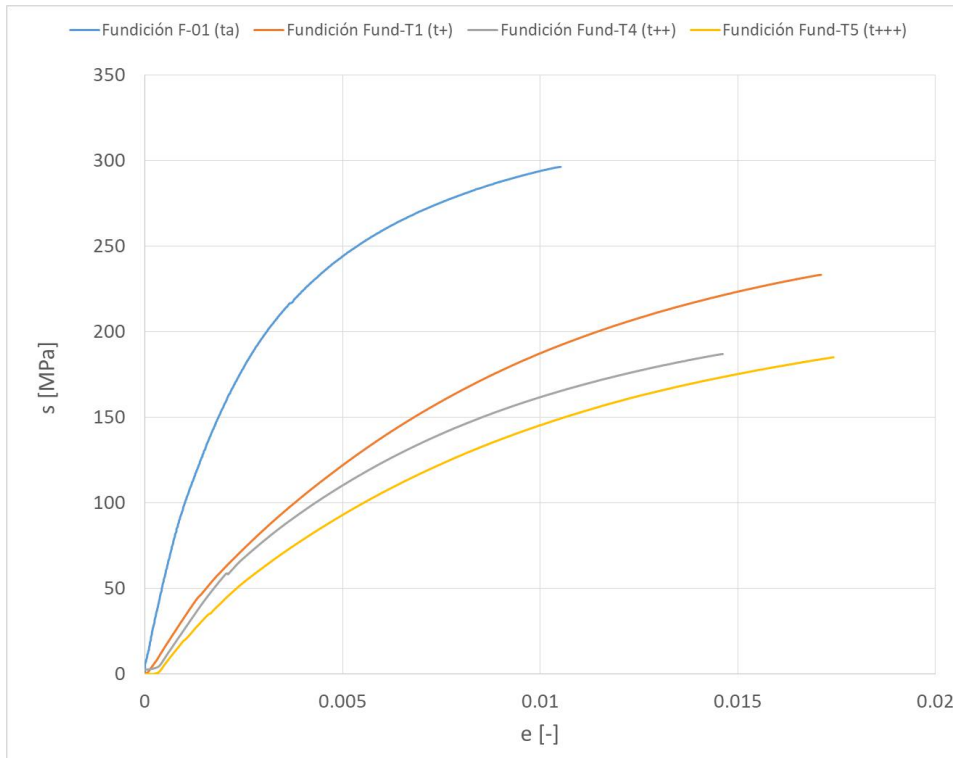


Figura 4.64. Comparativa de curvas experimentales de fundición gris a diferentes temperaturas.

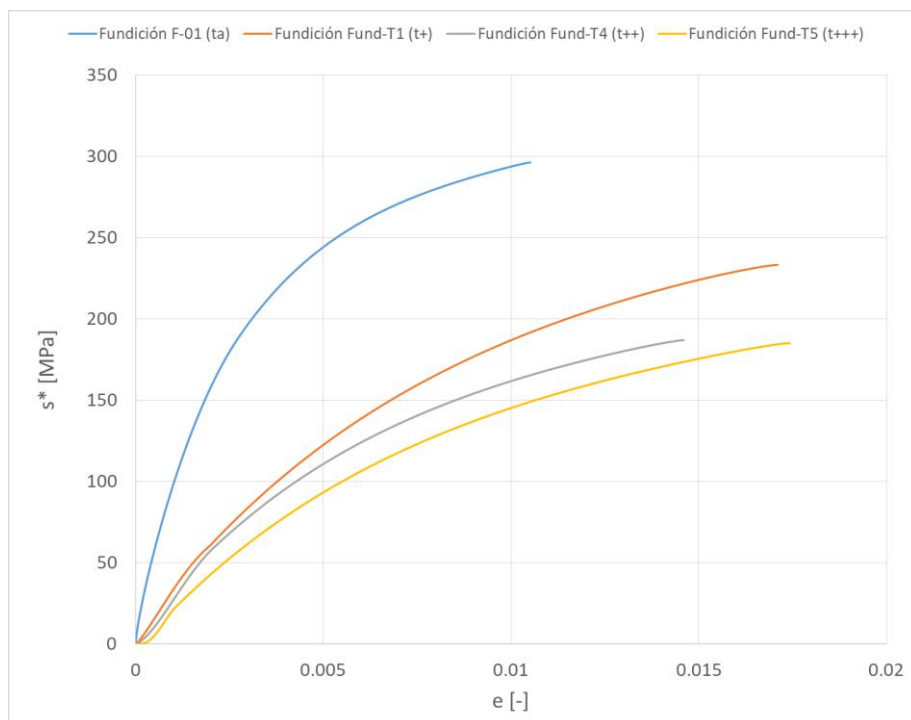


Figura 4.65. Comparativa de curvas simuladas de fundición gris a diferentes temperaturas.

A continuación se recogen los parámetros utilizados para la simulación y la normalización de los mismos para el estudio de la tendencia.

Tabla 4.9. Parámetros de la curva de tracción de la fundición gris a diferentes temperaturas.

T [°C]	e_{LE}	def	e_M	e_F	$S_{LEsup}[MPa]$	$S_{LEinf}[Mpa]$	$S_M[MPa]$	$S_F [MPa]$	k	m	n	\tilde{n}	p
25	0.0016	0.0000	0.0093	0.0093	109.2	109.2	233.4	233.4	0.8430	168.0596	2.5510	166.9339	6.3507
100	0.0020	0.0000	0.0184	0.0184	59.9	0.0	254.6	254.6	1.2328	244.8026	2.1425	47.7476	1.0000
200	0.0020	0.0000	0.0133	0.0133	58.3	0.0	180.8	180.8	1.1496	197.0074	2.0043	61.1707	1.0000
300	0.0015	0.0000	0.0240	0.0240	43.9	0.0	232.6	232.6	1.9128	597.8228	2.0712	42.7449	1.0000

Tabla 4.10. Parámetros normalizados de la curva de tracción de la fundición gris a diferentes temperaturas.

Tn [-]	e_{LE}	def	e_M	e_F	$S_{LEsup}[MPa]$	$S_{LEinf}[Mpa]$	$S_M[MPa]$	$S_F [MPa]$	k	m	n	\tilde{n}	p
1.0	1.00	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4.0	1.25	0.0000	1.9785	1.9785	0.5490	0.0000	1.0910	1.0910	1.4623	1.4566	0.8399	0.2860	0.1575
8.0	1.25	0.0000	1.4247	1.4247	0.5338	0.0000	0.7746	0.7745	1.3637	1.1722	0.7857	0.3664	0.1575
12.0	0.94	0.0000	2.5753	2.5753	0.4020	0.0000	0.9965	0.9965	2.2691	3.5572	0.8119	0.2561	0.1575

Por último, para terminar con el análisis del ajuste de este material se llevará a cabo un estudio de la tendencia de los parámetros que han sido utilizados para la obtención de las curvas sintetizadas. En primer lugar se muestra la tendencia que sigue la deformación del límite elástico (e_{LE}) que en este caso disminuye ante un aumento de la temperatura aunque la tendencia obtenida no es del todo fiable, por lo tanto se debería de ampliar la población de probetas ensayadas. En la Figura 4.66 también se muestra el comportamiento de la zona de fluencia (def), el cual es nulo debido a la inexistencia de una zona de fluencia en las curvas de tracción de la fundición gris.

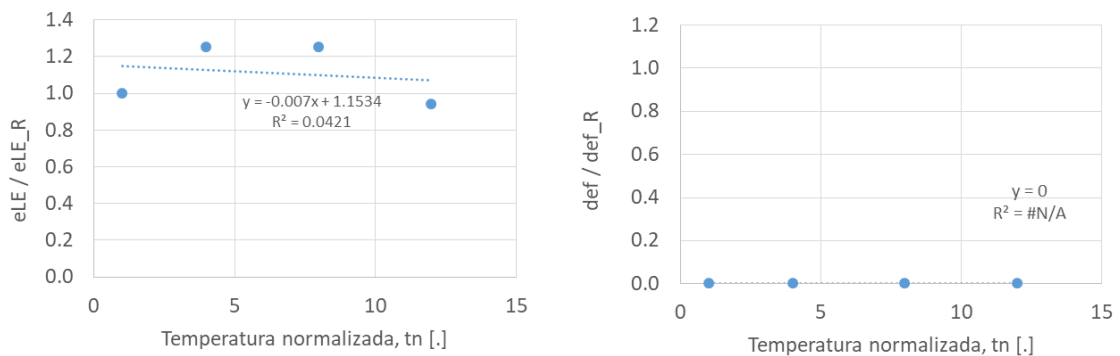


Figura 4.66. Representación normalizada de la deformación del límite elástico (izquierda) y el tamaño de la zona de fluencia (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.

En la Figura 4.67 se muestra la tendencia que siguen las deformaciones máxima (e_M) y de fractura (e_F). Para este material resultan coincidentes ambas gráficas por el hecho de tratarse de un material bastante frágil incluso a elevada temperatura. El ajuste del comportamiento de dicho parámetro se lleva a cabo de manera creciente lineal, aunque la fiabilidad del mismo no es del todo adecuada. No obstante, dicho comportamiento coincide con la teoría ya que al aumentar la temperatura, aumenta la ductilidad y la deformación que alcanzan las probetas ensayadas también aumenta.

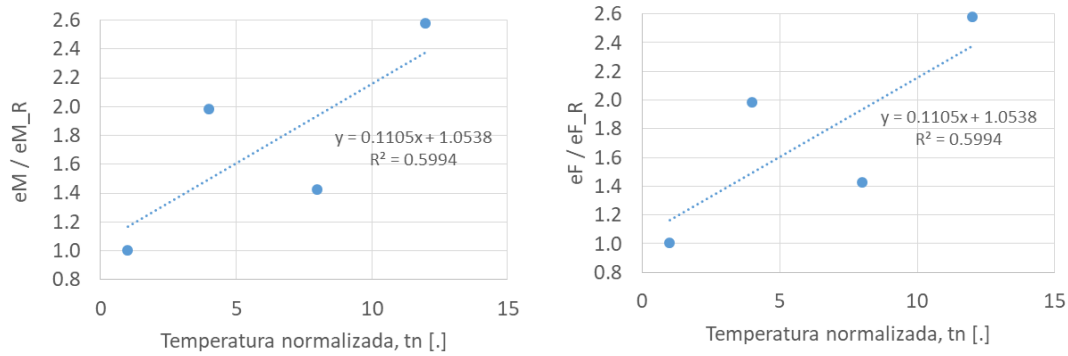


Figura 4.67. Representación normalizada de la deformación máxima (izquierda) y la deformación de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.

Al igual que ocurría en el caso del latón, para la fundición gris también se disminuye el límite elástico superior ($s_{LE\ sup}$), mientras que el límite elástico inferior ($s_{LE\ inf}$) se hace nulo a medida que aumenta la temperatura. El comportamiento del límite elástico superior coincide con lo que se esperaba teóricamente, ya que esto indica que se está perdiendo rigidez.

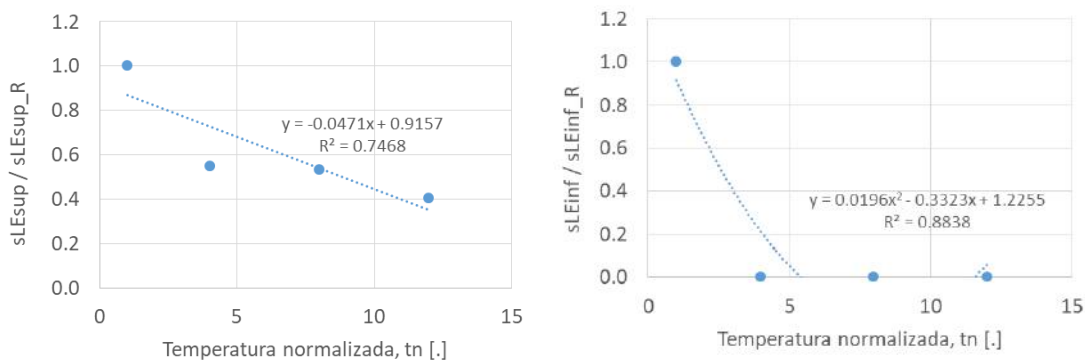


Figura 4.68. Representación normalizada del límite elástico superior (izquierda) e inferior (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.

En la Figura 4.69 se muestra la tendencia que sigue la resistencia máxima (s_M) y la resistencia a fractura (s_R). En ambos casos la forma de estas gráficas coincide ya que en el momento de la fractura se alcanza la máxima tensión a la que está sometida la probeta. En este caso, el comportamiento se ajusta de forma lineal decreciente, aunque la fiabilidad de dicho ajuste es poco fiable ya que el parámetro $R^2 = 0.1026$.

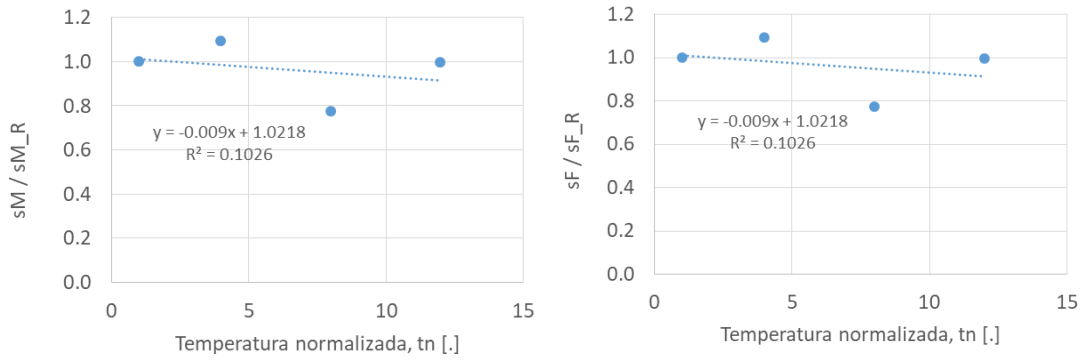


Figura 4.69. Representación normalizada de la deformación máxima (izquierda) y la deformación de fractura (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.

Por último, se muestra la tendencia que siguen los parámetros utilizados por el programa para la obtención del ajuste de las curvas de tracción de fundición gris. En general, los resultados obtenidos para este material, sin llegar a ser perfectos, son los que cuentan con una mayor fiabilidad, por ejemplo los parámetros m y p los cuales se ajustan parabólicamente con un R^2 cercano a uno.

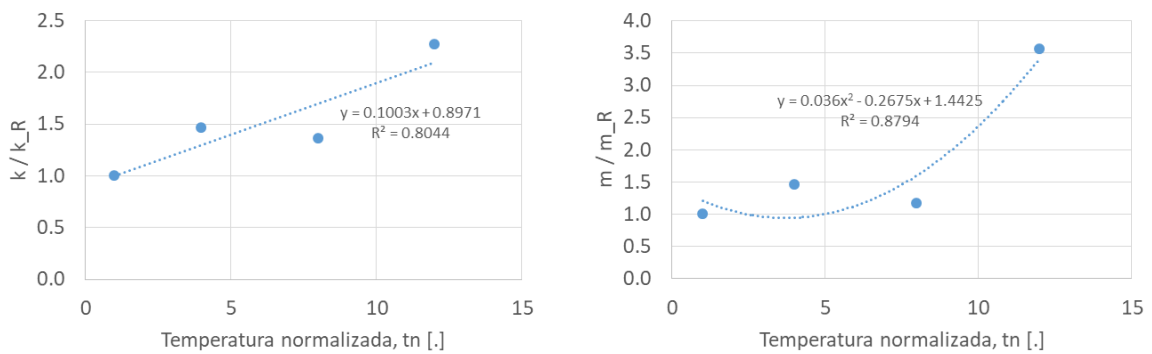


Figura 4.70. Representación normalizada del parámetro k (izquierda) y del parámetro m (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.

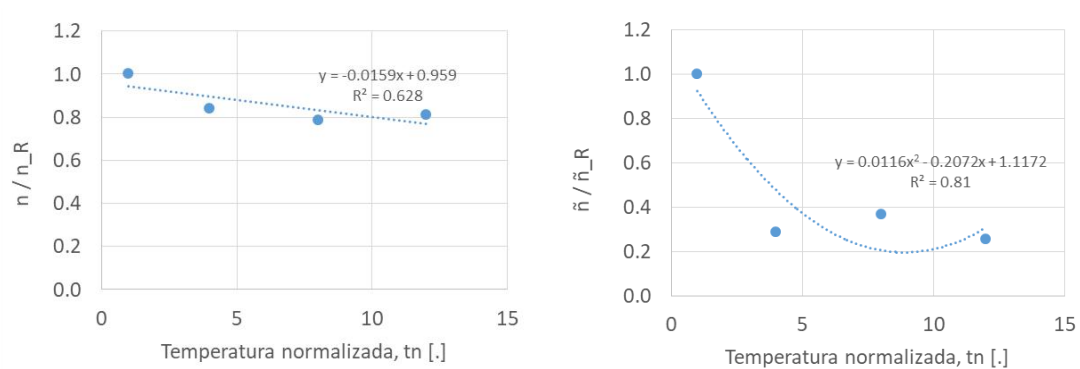


Figura 4.71. Representación normalizada del parámetro n (izquierda) y del parámetro \tilde{n} (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.

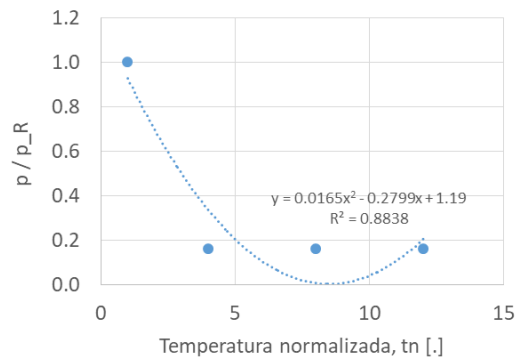


Figura 4.72. Representación normalizada del parámetro p respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.

Finalmente, en la Figura 4.73 se realiza una comparación entre la tendencia que sigue la deformación (e) y la tensión (s) experimentales con la tendencia de los valores de deformación y tensión obtenidos al aplicar el modelo de sensibilidades frente a la temperatura explicado en el Capítulo 3. Para el caso de la fundición gris, el modelo de sensibilidades es adecuado, ya que como se puede observar en las siguientes gráficas la tendencia de ambos parámetros es casi coincidente con los resultados obtenidos en los ensayos, siendo el material para el cual se obtienen los mejores resultados. Como puede observarse en dicha figura, la tendencia de la deformación que sufren las probetas ensayadas es creciente y la tensión decreciente, lo cual coincide con la teoría ya que ante un aumento de la temperatura el material se vuelve más dúctil.

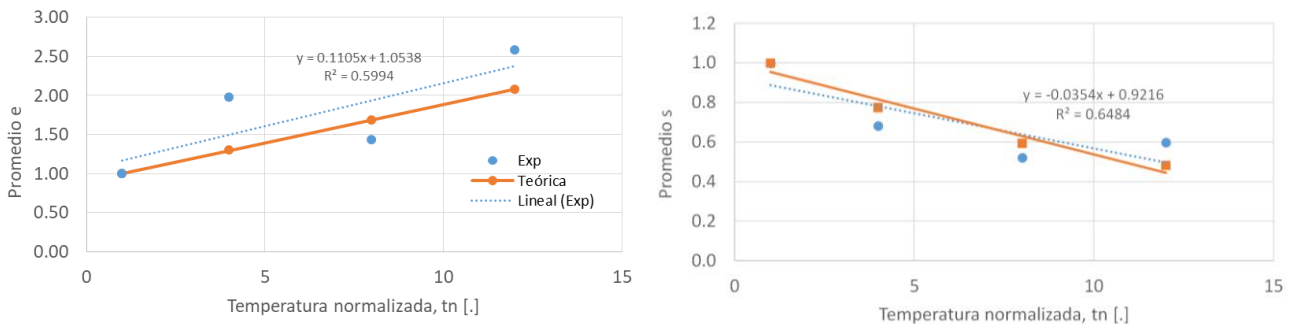


Figura 4.73. Representación de la tendencia de la deformación promedio (izquierda) y la tensión promedio (derecha) respecto a la temperatura de ensayo normalizada de la fundición gris.

4.6 Comparativa final

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para las curvas de tracción variando el ritmo de deformación y la temperatura de ensayo, se puede analizar la distinta influencia que tiene la variación de dichos parámetros en la ductilidad de los materiales ensayados. Para clarificar la comparativa de los resultados, a continuación se recogen los valores de las ecuaciones del modelo de sensibilidad para los promedios de la tensión y la deformación de los diferentes materiales.

Como ya se comentó en el Capítulo 1, el modelo de sensibilidades utilizado queda definido por las siguientes ecuaciones:

$$f_t = 1 + (f_{t \text{ máx}} - 1) \cdot \left(\frac{t - t_a}{t_s - t_a} \right)$$

$$f_d = 1 + \left(\frac{f_{d \text{ máx}}}{f_t} - 1 \right) \cdot \left(\frac{v - v_R}{v_{\text{máx}} - v_R} \right)$$

la primera ecuación representa el factor de sensibilidad a la temperatura (f_t) y la segunda el factor de sensibilidad al ritmo de deformación (f_d). Para la obtención del factor de sensibilidad al ritmo de deformación se ha supuesto que $f_t = 1$, siendo variables la velocidad de deformación y la temperatura de ensayo. En las tablas que se muestran a continuación quedan recogidos los diferentes parámetros empleados en los cálculos, así como los valores de las ecuaciones de sensibilidad para cada material estudiado.

Tabla 4.11. Valores de las ecuaciones de sensibilidad del acero C45.

Probeta	v [mm/s]	va [mm/s]	vmáx [mm/s]	fdmáx	ft	fd
Acero C45 (v-)	0.0035	0.0125	0.4	1.05	1	0.99883871
Acero C45 (va)	0.0125	0.0125	0.4	1.05	1	1
Acero C45 (v+)	0.1	0.0125	0.4	1.05	1	1.01129032
Acero C45 (v++)	0.335	0.0125	0.4	1.05	1	1.0416129
Probeta	t [°C]	ta [°C]	ts [°C]	ftmáx	ft	
Acero C45 (ta)	25	25	870	1.75	1	
Acero C45 (t+)	100	25	870	1.75	1.06656805	
Acero C45 (t++)	200	25	870	1.75	1.15532544	
Acero C45 (t+++)	300	25	870	1.75	1.24408284	

Tabla 4.12. Valores de las ecuaciones de sensibilidad del acero AISI 304.

Probeta	v [mm/s]	va [mm/s]	vmáx [mm/s]	fdmáx	ft	fd
AISI 304 (v-)	-	0.0125	0.4	-	1	-
AISI 304 (va)	-	0.0125	0.4	-	1	-
AISI 304 (v+)	-	0.0125	0.4	-	1	-
AISI 304 (v++)	-	0.0125	0.4	-	1	-
Probeta	t [°C]	ta [°C]	ts [°C]	ftmáx	ft	
AISI 304 (ta)	25	25	1454	1.8	1	
AISI 304 (t+)	100	25	1454	1.8	1.0419874	
AISI 304 (t++)	200	25	1454	1.8	1.09797061	
AISI 304 (t+++)	300	25	1454	1.8	1.15395381	

Tabla 4.13. Valores de las ecuaciones de sensibilidad del aluminio 2011.

Probeta	v [mm/s]	va [mm/s]	vmáx [mm/s]	fdmáx	ft	fd
Al-2011 T6 (v-)	0.0035	0.0125	0.4	1.09	1	0.99790968
Al-2011 T6 (va)	0.0125	0.0125	0.4	1.09	1	1
Al-2011 T6 (v+)	0.1	0.0125	0.4	1.09	1	1.02032258
Al-2011 T6 (v++)	0.335	0.0125	0.4	1.09	1	1.07490323
Probeta	t [°C]	ta [°C]	ts [°C]	ftmáx	ft	
Al-2011 (ta)	25	25	870	-	-	
Al-2011 (t+)	100	25	870	-	-	
Al-2011 (t++)	200	25	870	-	-	
Al-2011 (t+++)	300	25	870	-	-	

Tabla 4.14. Valores de las ecuaciones de sensibilidad del latón.

Probeta	v [mm/s]	va [mm/s]	vmáx [mm/s]	fdmáx	ft	fd
Latón (v-)	0.0035	0.0125	0.4	1.05	1	0.99883871
Latón (va)	0.0125	0.0125	0.4	1.05	1	1
Latón (v+)	0.1	0.0125	0.4	1.05	1	1.01129032
Latón (v++)	0.335	0.0125	0.4	1.05	1	1.0416129
Probeta	t [°C]	ta [°C]	ts [°C]	ftmáx	ft	
Latón (ta)	25	25	980	2.5	1	
Latón (t+)	100	25	980	2.5	1.11780105	
Latón (t++)	200	25	980	2.5	1.27486911	
Latón (t+++)	300	25	980	2.5	1.43193717	

Tabla 4.15. Valores de las ecuaciones de sensibilidad de la fundición gris.

Probeta	v [mm/s]	va [mm/s]	vmáx [mm/s]	fdmáx	ft	fd
Fundición Gris (v-)	0.0035	0.0125	0.4	1.12	1	0.9972129
Fundición Gris (va)	0.0125	0.0125	0.4	1.12	1	1
Fundición Gris (v+)	0.1	0.0125	0.4	1.12	1	1.02709677
Fundición Gris (v++)	0.335	0.0125	0.4	1.12	1	1.09987097
Probeta	t [°C]	ta [°C]	ts [°C]	ftmáx	ft	
Fundición Gris (ta)	25	25	1300	6	1	
Fundición Gris (t+)	100	25	1300	6	1.29411765	
Fundición Gris (t++)	200	25	1300	6	1.68627451	
Fundición Gris (t+++)	300	25	1300	6	2.07843137	

Véase que la Tabla 4.12 donde se recogen los valores de las ecuaciones de sensibilidad del acero AISI 304 está incompleta, debido a que no se ensayaron probetas de este material a diferentes velocidades y por lo tanto se hace imposible poder comparar los resultados obtenidos. Por otro lado, no aparecen los valores de las ecuaciones de sensibilidad frente a la temperatura del aluminio 2011 en la Tabla 4.13. Como ya se comentó en el Apartado 4.3, para el caso de las probetas de aluminio ensayadas a diferentes temperaturas no se obtiene una tendencia clara de los parámetros, debido al uso de probetas a las que se les han aplicado tratamientos térmicos diferentes. Por todo ello, en esta comparativa final, solo se presentará la información que se desprende de los ensayos realizados con probetas de acero C45, latón y fundición gris.

A continuación, se puede ver una representación gráfica donde se muestra la diferencia que existe entre la tendencia de la tensión y la deformación promedio al variar el ritmo de deformación y la temperatura para cada material ensayado. Dicha tendencia se ajusta a lo que se esperaba teóricamente, ya que, como se puede observar en cualquier gráfica, al aumentar la velocidad de deformación aumenta la fragilidad, lo cual se traduce en una disminución de la deformación promedio, y, por otro lado, al aumentar la temperatura de ensayo ocurre justo lo contrario, es decir, el material se vuelve más dúctil y la deformación promedio aumenta a la vez que la tensión promedio disminuye.

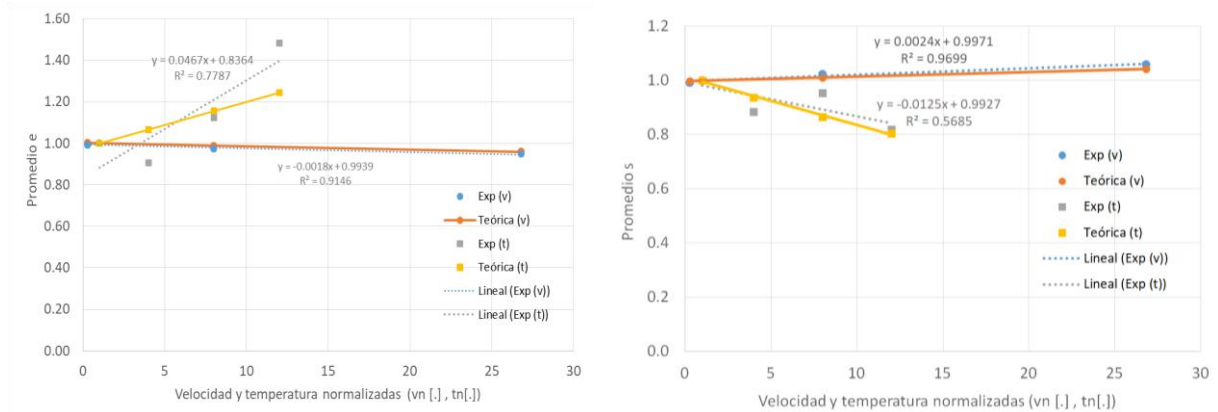


Figura 4.74. Tendencia de la deformación promedio (izquierda) y la tensión promedio (derecha) del acero C45 ante la variación del ritmo de deformación (v) y la temperatura de ensayo (t).

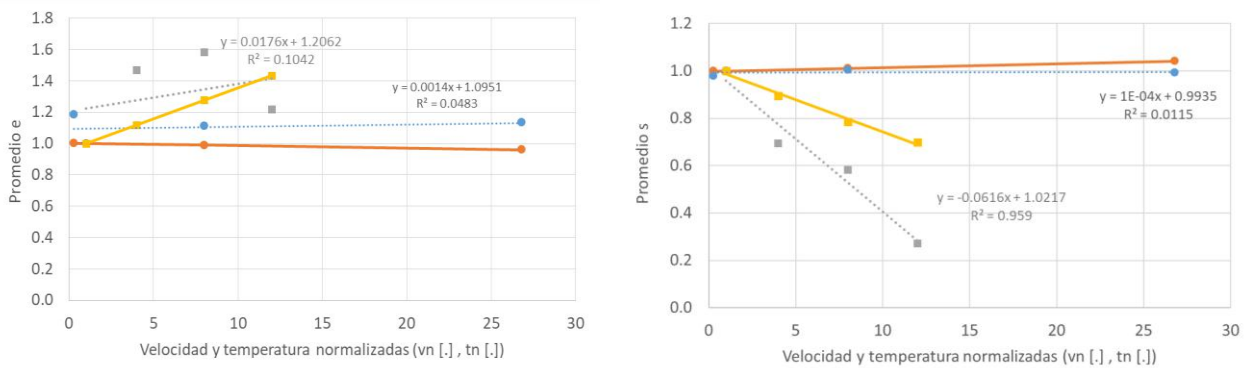


Figura 4.75. Tendencia de la deformación promedio (izquierda) y la tensión promedio (derecha) del latón ante la variación del ritmo de deformación (v) y la temperatura de ensayo (t).

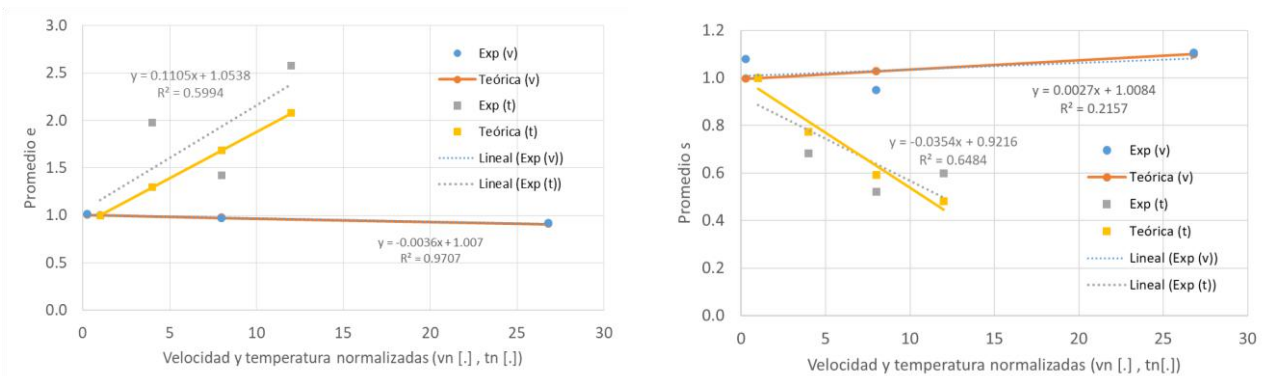


Figura 4.76. Tendencia de la deformación promedio (izquierda) y la tensión promedio (derecha) de la fundición gris ante la variación del ritmo de deformación (v) y la temperatura de ensayo (t).

Como se puede apreciar en las tres figuras anteriores, la tendencia de las probetas que se han ensayado a diferentes temperaturas tiene una mayor pendiente que la tendencia de los ensayos en los que se variaba la velocidad de deformación. Esto significa que los materiales ensayados son más sensibles a la variación de la temperatura de ensayo frente al ritmo de deformación que se llevó a cabo en el trabajo anterior, que a la variación de temperatura, en los intervalos térmicos analizados (muy pequeños). Por otro lado, también resulta apreciable la disparidad en los valores del parámetro estadístico R , el cual adquiere resultados mucho más fiables en los ensayos realizados a un ritmo de deformación diferente (véase las Figuras 4.74 y 4.76), lo que significa que la tendencia de dichos ensayos fue mucho más clara y fiable que la tendencia que siguen los ensayos en los que ha variado la temperatura.

De forma general, para todos los materiales ensayados se da un aumento de la ductilidad ante un aumento de la temperatura o una disminución de la velocidad, como bien se ha demostrado en la teoría. Sin embargo, la pendiente de la línea de tendencia varía dependiendo del tipo de material que se esté ensayando, esto ocurre debido a la naturaleza del propio material, como se pone de manifiesto en las gráficas anteriores donde se puede observar, por ejemplo, cómo la tensión promedio de la fundición gris (Figura 4.76) es más sensible a una variación en el ritmo de deformación que la tensión promedio del acero C45 (Figura 4.74), ya que para el caso de la fundición gris existe una mayor pendiente de la línea de tendencia.

Si se comparan los resultados obtenidos de ambos trabajos, se puede concluir que en general los materiales ensayados presentan una mayor sensibilidad a la variación de la temperatura en los rangos ensayados. Una evidencia de ello son los valores de las ecuaciones presentadas en las tablas o las pendientes de las líneas de tendencia presentadas en las gráficas que se han comentado anteriormente. No obstante, la tendencia que siguen los parámetros e y s promedio resulta más fiable para el caso de las probetas que se han ensayado a velocidades de deformación diferente, como se ha podido comprobar con el parámetro estadístico R . Una de las posibles causas de la menor fiabilidad de los resultados frente a la variación de temperatura es la dificultad que ha presentado la realización de ensayos a elevadas temperaturas, ya que desde un punto de vista experimental depende de más factores y se requiere más esfuerzo variar la temperatura de ensayo que la velocidad de deformación.

5 CONCLUSIÓN

En primer lugar, se puede confirmar la aptitud del programa utilizado para el ajuste de las curvas de tracción. En la mayoría de los casos estudiados a lo largo de este trabajo las curvas de tracción simuladas fueron prácticamente coincidentes a las curvas experimentales. No obstante, como ya ocurrió en el trabajo previo que se encargaba del estudio de la sensibilidad frente al ritmo de deformación, en la zona de unión de la curva cuando se pasa del comportamiento elástico al plástico, haya o no una zona de fluencia, el ajuste realizado no es del todo preciso. Este pequeño desajuste se debe principalmente a la brusquedad con la que se cambia de pendiente en esta zona, por lo tanto para líneas futuras se podría mejorar los fallos de adaptabilidad con la introducción de más parámetros para el ajuste de las curvas.

Como ya se ha comentado a lo largo del trabajo, este se ha centrado única y exclusivamente en el estudio del comportamiento de las probetas frente a la variación de temperatura. Por ello, otro aspecto importante a destacar es la validez del modelo de sensibilidades frente al aumento de temperatura que se ha utilizado. Tras analizar la tendencia que sigue la deformación y la tensión teóricas calculadas aplicando el modelo de sensibilidades descrito en el Capítulo 3 se puede concluir que es válido para todos los materiales salvo para el caso del aluminio 2011, los resultados que se obtienen de aplicar dicho modelo se ajustan de forma adecuada a los valores que se obtuvieron experimentalmente. Sin embargo, aunque para el caso de la fundición gris la tendencia de los parámetros promedio y teóricos es prácticamente coincidente, hay ciertas diferencias en los valores promedio y teóricos obtenidos en el resto de aleaciones como por ejemplo la tendencia que sigue la tensión experimental en el caso del latón cuenta con menor pendiente que la tendencia de la tensión calculada teóricamente o la tendencia teórica del acero 304 que, a pesar de contar con una pendiente similar a la tendencia experimental, no se ajusta a los valores que se han obtenido de los ensayos. Por lo tanto sería interesante mejorar la precisión de dicho modelo de sensibilidades y adaptarlo a los casos en los que no se ha obtenido buenos resultados.

Los resultados obtenidos de ensayar en aluminio 2011, dada la forma tan peculiar que toma la curva ensayada a temperatura ambiente y, teniendo en cuenta que al material ensayado se le ha aplicado un tratamiento térmico diferente al resto de probetas (concretamente a temperatura ambiente se tomaron las curvas de tracción del aluminio 2011 tratado térmicamente con recocido total, mientras que el resto de probetas fueron ensayadas en estado de recepción de fábrica), se ha llegado a la conclusión de que esta es la razón por la que no es válido el modelo de sensibilidades frente a la temperatura para los ensayos de este material, ya que dicho modelo devuelve los resultados esperados para todos los materiales ensayados. Por lo tanto, en el futuro habría que analizar la tendencia que siguen las curvas de tracción de probetas fabricadas en aluminio 2011 a las que se le ha aplicado el mismo tratamiento térmico y poder descartar la conclusión a la que se ha llegado o, por el contrario, descartar el modelo de sensibilidades utilizado para este material en caso de que la tendencia teórica de los parámetros continúe sin ajustarse a los resultados obtenidos experimentalmente.

Otra consideración importante a tener en cuenta para líneas de trabajo futuras es el rango de temperaturas ensayado, ya que sería interesante poder ampliar dicho rango lo suficiente para poder observar mayores variaciones en el comportamiento de las aleaciones ensayadas, así como una tendencia más clara que arroje un valor del parámetro estadístico más fiable. Teniendo en cuenta la temperatura de fusión tan elevada de algunos materiales como por ejemplo el acero AISI 304, el aumento del rango de la temperatura de ensayo ayudaría en gran medida a poder analizar la tendencia de algunos parámetros de forma mucho más clara.

También sería interesante obtener una mayor población de ensayos, ya que como se ha visto en el Capítulo 4, en algunas ocasiones para ciertos parámetros no se obtenía una tendencia clara, así como la obtención del parámetro R^2 cercano a cero provoca una disminución en la fiabilidad del ajuste y que no se pueda asegurar que dicha tendencia sea correcta. Además, si es posible en el futuro continuar esta línea de trabajo, lo más interesante será aplicar el modelo mejorado a todos los materiales posibles para lograr una biblioteca cada vez más amplia y que en el futuro permita poder consultarse cualquier material, logrando una herramienta didáctica y de consulta de gran potencia que facilitaría algunas labores de la Ingeniería.

REFERENCIAS

- [1] Montes JM, Cuevas FG, Cinta J. Propiedades mecánicas de los materiales. Elasticidad. En: Lara C, editor. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 1ª edición. Madrid: Paraninfo; 2014. p 357-376.
- [2] Montes JM, Cuevas FG, Cinta J. Propiedades mecánicas de los materiales. Plasticidad. En: Lara C, editor. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 1ª edición. Madrid: Paraninfo; 2014. p 377-422.
- [3] Garrido Prado DJ. Simulación y validación de la curva de tracción de materiales metálicos bajo diferentes ritmos de deformación [Trabajo Fin de Grado]. Sevilla: Universidad de Sevilla, 2020.

