

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Simulación y validación de la curva de tracción de
materiales metálicos bajo diferentes ritmos de
deformación

Autor: Daniel Jesús Garrido Prados

Tutores: Fátima Ternero Fernández y Eduardo Sánchez Caballero

Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del
Transporte

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Simulación y validación de la curva de tracción de materiales metálicos bajo diferentes ritmos de deformación

Autor:

Daniel Jesús Garrido Prados

Tutores:

Fátima Ternero Fernández

Eduardo Sánchez Caballero

Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Grado: Simulación y validación de la curva de tracción de materiales metálicos bajo diferentes ritmos de deformación

Autor: Daniel Jesús Garrido Prados

Tutores: Fátima Ternero Fernández

Eduardo Sánchez Caballero

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Fecha:

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

A mis padres, por apoyarme siempre en todas mis decisiones y hacerme mucho más liviano este ciclo de mi vida. A mi hermana, por servirme de ejemplo como estudiante. A mi abuela, por transmitirme siempre la mayor positividad. Y a mis amigos, por acompañarme en estos años y ayudarme en todo lo necesario.

Daniel Jesús Garrido Prados

Sevilla, 2020

En este trabajo se ha llevado a cabo la simulación de las curvas de tracción de cinco aleaciones metálicas (acero C45, aluminio 2011, acero 304, fundición gris y latón, con diferentes tratamientos térmicos) para diferentes condiciones de velocidad de deformación, a partir de información obtenida mediante ajuste por mínimos cuadrados de curvas reales, obtenidas experimentalmente.

Este TFG se ha apoyado en ensayos realizados en trabajos previos, en los que se ensayaron versiones más primitivas del modelo. El modelo de sensibilidades, con el que, a partir de una curva de tracción de referencia se pueden determinar las variaciones que introduciría el cambio de la temperatura, es completamente nuevo en este trabajo. El estudio se ha centrado exclusivamente en la influencia de la velocidad de deformación.

Se ha realizado un análisis de los resultados obtenidos que, en general, resultan satisfactorios, muy superiores a los obtenidos con los modelos previos.

Agradecimientos.....	vii
Resumen.....	ix
Índice	xi
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xvi
1 Introducción.....	1
1.1 <i>Ensayo a tracción</i>	<i>1</i>
1.2 <i>Efecto de la temperatura.....</i>	<i>4</i>
1.3 <i>Efecto de la velocidad de deformación.....</i>	<i>5</i>
1.4 <i>Tratamientos térmicos.....</i>	<i>6</i>
1.5 <i>Modelos teóricos.....</i>	<i>8</i>
1.5.1 <i>Modelo teórico de la simulación</i>	<i>8</i>
1.5.2 <i>Modelo teórico de las sensibilidades.....</i>	<i>9</i>
1.6 <i>Finalidad y objetivo del TFG.....</i>	<i>11</i>
2 Aleaciones seleccionadas	13
2.1 <i>Acero C45.....</i>	<i>13</i>
2.2 <i>Acero 304.....</i>	<i>15</i>
2.3 <i>Aluminio 2011</i>	<i>16</i>
2.4 <i>Latón</i>	<i>19</i>
2.5 <i>Fundición gris.....</i>	<i>19</i>
3 Procedimiento experimental	21
3.1 <i>Realización del ensayo a tracción</i>	<i>21</i>
3.2 <i>Método de ajuste de curvas de tracción.....</i>	<i>22</i>
3.3 <i>Ajuste de las sensibilidades del modelo.....</i>	<i>23</i>
4 Análisis de los resultados	25
4.1 <i>Ajustes del acero C45.....</i>	<i>25</i>

4.2	<i>Ajustes del acero 304</i>	40
4.3	<i>Ajustes del aluminio 2011</i>	43
4.4	<i>Ajustes del latón</i>	56
4.5	<i>Ajustes de la fundición gris</i>	64
5	Conclusión	73
6	Planos	75
7	Bibliografía	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Modelo de sensibilidades térmica y de ritmo de deformación.....	15
Tabla 2.1. Nomenclatura del tratamiento para las probetas de Acero C45.....	15
Tabla 2.2. Nomenclatura del tratamiento a diferentes velocidades para las probetas de Acero C45.....	15
Tabla 2.3. Nomenclatura del tratamiento para las probetas de Acero 304	16
Tabla 2.4. Nomenclatura del tratamiento a diferentes velocidades para las probetas de Acero 304	16
Tabla 2.5. Nomenclatura del tratamiento para las probetas de Aluminio 2011.....	18
Tabla 2.6. Nomenclatura del tratamiento a diferentes velocidades para las probetas de Acero 304	18
Tabla 2.7. Nomenclatura del tratamiento para las probetas de Latón	19
Tabla 2.8. Nomenclatura del tratamiento a diferentes velocidades para las probetas de Latón	19
Tabla 2.9. Nomenclatura del tratamiento para las probetas de Fundición gris.....	20
Tabla 2.10. Nomenclatura del tratamiento a diferentes velocidades para las probetas de Fundición gris.	20
Tabla 4.1. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero C45 recocido	26
Tabla 4.2. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero C45 templado.....	28
Tabla 4.3. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero C45 templado con revenido bajo	29
Tabla 4.4. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero C45 templado con revenido alto	30
Tabla 4.5. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero C45 sobrerrevenido	31
Tabla 4.6. Valores de R^2 correspondientes a las probetas de acero C45.....	31
Tabla 4.7. Valores de R^2 correspondientes a las probetas de acero C45 normalizado a diferentes velocidades de ensayo	34
Tabla 4.8. Comparativa de R^2 de los modelos de ajuste anterior y actual.	34
Tabla 4.9. Valores de la curva de tracción del acero C45 normalizado a diferentes velocidades de deformación	36

Tabla 4.10. Valores normalizados de la curva de tracción del acero C45 normalizado a diferentes velocidades de deformación	36
Tabla 4.11. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero 304 en estado de recepción	41
Tabla 4.12. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero 304 estabilizada en agua ..	42
Tabla 4.13. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero 304 estabilizada en salmuera	43
Tabla 4.14. Valores de R^2 correspondientes a las probetas de acero 304.....	43
Tabla 4.15. Valores de los parámetros implicados en la simulación del aluminio 2011 ensayada con un lapso después del tratamiento.....	45
Tabla 4.16. Valores de los parámetros implicados en la simulación del aluminio 2011 con recocido contra acritud.....	45
Tabla 4.17. Valores de los parámetros implicados en la simulación del aluminio 2011 con solubilización y enfriamiento lento.	46
Tabla 4.18. Valores de los parámetros implicados en la simulación del aluminio 2011 con solubilización y atemperado.....	47
Tabla 4.19. Valores de los parámetros implicados en la simulación del aluminio 2011 con tratamiento T7	48
Tabla 4.20. Valores de R^2 correspondientes a las probetas de aluminio 2011.....	48
Tabla 4.21. Valores de R^2 correspondientes a las probetas de aluminio 2011 con tratamiento T6 a diferentes velocidades de ensayo.....	51
Tabla 4.22. Valores de la curva de tracción del aluminio 2011 normalizado a diferentes velocidades de deformación	52
Tabla 4.23. Valores normalizados de la curva de tracción del aluminio 2011 normalizado a diferentes velocidades de deformación	52
Tabla 4.24. Valores de R^2 correspondientes a las probetas de Latón a diferentes velocidades de ensayo.....	59
Tabla 4.25. Valores de la curva de tracción del latón en los ensayos a diferentes velocidades de deformación.....	60
Tabla 4.26. Valores normalizados de la curva de tracción del latón en los ensayos a diferentes velocidades de deformación	60

Tabla 4.27. Valores de R^2 correspondientes a las probetas de fundición gris a diferentes velocidades de ensayo	67
Tabla 4.28. Valores de la curva de tracción de la fundición gris en los ensayos a diferentes velocidades de deformación.	68
Tabla 4.29. Valores normalizados de la curva de tracción de la fundición gris en los ensayos a diferentes velocidades de deformación.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Comparativa entre la curva de tracción real e ingnieril.....	3
Figura 1.2. Curva de ensayo a tracción	4
Figura 1.3. Influencia de la temperatura al esfuerzo máximo, límite elástico y alargamiento (A).....	5
Figura 1.4. Comparativa de la curva de ensayos entre dos probetas de aluminio 2011 con tratamiento T6, donde la gris ha sido ensayado a mayor velocidad de deformación que la naranja.....	6
Figura 3.1. Universal Testing Machine de 100kN (Instron 5505).....	21
Figura 3.2. Hoja de Excel para realizar la simulación de la curva de tracción del Acero C45 recocido ...	24
Figura 3.3. Valores de datos conocidos facilitados al programa de ajuste para facilitar su tarea.....	23
Figura 3.4. Valores a obtener mediante el programa de ajuste	23
Figura 3.5. Hoja de Excel para realizar el ajuste.....	24
Figura 4.1. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 recocido (R01).	26
Figura 4.2. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 recocido (R02).	26
Figura 4.3. Curvas de tracción y simulación del del acero C45 templado (TE01).....	27
Figura 4.4. Curvas de tracción y simulación del del acero C45 templado (T02) (descartada).....	28
Figura 4.5. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 templado con revenido bajo (TB1).....	29
Figura 4.6. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 templado con revenido alto (TA01)	30
Figura 4.7. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 con sobrerrevenido (TR01).....	31
Figura 4.8. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 normalizado a velocidad recomendada (N02)	32
Figura 4.9. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 normalizado a 0,3350 mm/s (N09).....	32
Figura 4.10. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 normalizado a 0,1 mm/s (N12).....	33
Figura 4.11. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 normalizado a 0,0035 mm/s (N14).....	33
Figura 4.12. Comparación de los diferentes ensayos del acero C45 normalizado a velocidades de deformación diferentes	35

Figura 4.13. Comparación de las diferentes simulaciones del acero C45 normalizado a velocidades de deformación diferentes	35
Figura 4.14. Representación normalizada de la deformación del límite elástico a la izquierda y a la derecha el intervalo de la zona de fluencia frente a la velocidad de deformación normalizada del acero C45.....	37
Figura 4.15. Representación normalizada de la deformación máxima a la izquierda y a la derecha la de fractura frente a la velocidad de deformación normalizada del acero C45.....	37
Figura 4.16. Representación normalizada del límite elástico superior a la izquierda y a la derecha el superior frente a la velocidad de deformación normalizada del acero C45	38
Figura 4.17. Representación normalizada de la resistencia máxima a la izquierda y a la derecha la resistencia a fractura frente a la velocidad de deformación normalizada del acero C45	38
Figura 4.18. Representación normalizada del parámetro k normalizado a la izquierda y a la derecha el m normalizado frente a la velocidad de deformación normalizada del acero C45	39
Figura 4.19. Representación normalizada del parámetro n normalizado a la izquierda y a la derecha el ñ normalizado frente a la velocidad de deformación normalizada del acero C45	39
Figura 4.20. Representación normalizada del parámetro p frente a la velocidad de deformación normalizada del acero C45.....	40
Figura 4.21. Comparación entre las tendencias de la deformación promedio a la izquierda y del esfuerzo promedio a la derecha, con la tendencia del modelo teórico de sensibilidades del acero C45.....	40
Figura 4.22. Curvas de tracción y simulación del acero 304 en estado de recepción (A-03).....	41
Figura 4.23. Curvas de tracción y simulación del acero 304 estabilizada en agua (A-01).....	42
Figura 4.24. Curvas de tracción y simulación del acero 304 estabilizada en salmuera (A-11).....	43
Figura 4.25. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 recocido ensayada justo después del tratamiento (O-01).	44
Figura 4.26. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 ensayada con un lapso después del tratamiento (O-03).	44
Figura 4.27. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con recocido contra acritud (H2-01)...	45
Figura 4.28. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con solubilización y enfriamiento lento (O1-01).	46
Figura 4.29. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con solubilización y atemperado (SH-03)	47
Figura 4.30. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con tratamiento T7 (T7-01).	48

Figura 4.31. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con tratamiento T6 a 0,0125 mm/s (T6-01).	49
Figura 4.32. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con tratamiento T6 a 0,335 mm/s (T6-03).	49
Figura 4.33. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con tratamiento T6 a 0,1 mm/s (T6-05).	50
Figura 4.34. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con tratamiento T6 a 0,0035 mm/s (T6-07).	50
Figura 4.35. Comparación de los diferentes ensayos del aluminio 2011 T6 a velocidades de deformación diferentes.....	51
Figura 4.36. Comparación de las diferentes simulaciones del Aluminio 2011 T6 a velocidades de deformación diferentes.	52
Figura 4.37. Representación normalizada de la deformación del límite elástico a la izquierda y a la derecha el intervalo de la zona de fluencia frente a la velocidad de deformación normalizada del aluminio 2011 .	53
Figura 4.38. Representación normalizada de la deformación máxima a la izquierda y a la derecha la de fractura frente a la velocidad de deformación normalizada del aluminio 2011	54
Figura 4.39. Representación normalizada del límite elástico superior a la izquierda y a la derecha el superior frente a la velocidad de deformación normalizada del aluminio 2011	54
Figura 4.40. Representación normalizada de la resistencia máxima a la izquierda y a la derecha la resistencia a fractura frente a la velocidad de deformación normalizada del aluminio 2011.....	54
Figura 4.41. Representación normalizada del parámetro k normalizado a la izquierda y a la derecha el m normalizado frente a la velocidad de deformación normalizada del aluminio 2011	55
Figura 4.42. Representación normalizada del parámetro n normalizado a la izquierda y a la derecha el ñ normalizado frente a la velocidad de deformación normalizada del aluminio 2011	55
Figura 4.43. Representación normalizada del parámetro p frente a la velocidad de deformación normalizada del aluminio 2011.....	56
Figura 4.44. Comparación entre las tendencias de la deformación promedio a la izquierda y del esfuerzo promedio a la derecha, con la tendencia del modelo teórico de sensibilidades del aluminio 2011	56
Figura 4.45. Curvas de tracción y simulación del latón a 0,0125 mm/s (L-01).....	57
Figura 4.46. Curvas de tracción y simulación del latón a 0,335 mm/s (L-03).....	57
Figura 4.47. Curvas de tracción y simulación del latón a 0,1 mm/s (L-05).....	58

Figura 4.48. Curvas de tracción y simulación del latón a 0,0035 mm/s (L-08)	58
Figura 4.49. Comparación de los diferentes ensayos del latón a velocidades de deformación diferentes	59
Figura 4.50. Comparación de las diferentes simulaciones del latón a velocidades de deformación diferentes	60
Figura 4.51. Representación normalizada de la deformación del límite elástico a la izquierda y a la derecha el intervalo de la zona de fluencia frente a la velocidad de deformación normalizada del latón	60
Figura 4.52. Representación normalizada de la deformación máxima a la izquierda y a la derecha la de fractura frente a la velocidad de deformación normalizada del latón.....	61
Figura 4.53. Representación normalizada del límite elástico superior a la izquierda y a la derecha el superior frente a la velocidad de deformación normalizada del latón.....	61
Figura 4.54. Representación normalizada de la resistencia máxima a la izquierda y a la derecha la resistencia a fractura frente a la velocidad de deformación normalizada del latón	62
Figura 4.55. Representación normalizada del parámetro k a la izquierda y a la derecha el m frente a la velocidad de deformación normalizada del latón	62
Figura 4.56. Representación normalizada del parámetro n a la izquierda y a la derecha el ñ frente a la velocidad de deformación normalizada del latón	63
Figura 4.57. Representación normalizada del parámetro p frente a la velocidad de deformación normalizada del latón.....	63
Figura 4.58. Comparación entre las tendencias de la deformación promedio a la izquierda y del esfuerzo promedio a la derecha, con la tendencia del modelo teórico de sensibilidades del latón.	64
Figura 4.59. Curvas de tracción y simulación de la fundición gris a 0,0125 mm/s (F-02).....	64
Figura 4.60. Curvas de tracción y simulación de la fundición gris a 0,335 mm/s (F-04).....	65
Figura 4.61. Curvas de tracción y simulación de la fundición gris a 0,1 mm/s (F-05).....	65
Figura 4.62. Curvas de tracción y simulación de la fundición gris a 0,0035 mm/s (F-07).....	66
Figura 4.63. Comparación de los diferentes ensayos de la fundición gris a velocidades de deformación diferentes.	66
Figura 4.64. Comparación de las diferentes simulaciones de la fundición gris a velocidades de deformación diferentes.	68
Figura 4.65. Representación normalizada de la deformación del límite elástico a la izquierda y a la derecha el intervalo de la zona de fluencia frente a la velocidad de deformación normalizada de la fundición gris	69

Figura 4.66. Representación normalizada de la deformación máxima a la izquierda y a la derecha la de fractura frente a la velocidad de deformación normalizada de la fundición gris.	69
Figura 4.67. Representación normalizada del límite elástico superior a la izquierda y a la derecha el superior frente a la velocidad de deformación normalizada de la fundición gris.	70
Figura 4.68. Representación normalizada de la resistencia máxima a la izquierda y a la derecha la resistencia a fractura frente a la velocidad de deformación normalizada de la fundición gris.....	70
Figura 4.69. Representación normalizada del parámetro k a la izquierda y a la derecha el m frente a la velocidad de deformación normalizada de la fundición gris.....	71
Figura 4.70. Representación normalizada del parámetro n a la izquierda y a la derecha el ñ frente a la velocidad de deformación normalizada de la fundición gris.....	71
Figura 4.71. Representación normalizada del parámetro p frente a la velocidad de deformación normalizada de la fundición gris.	71
Figura 4.72. Comparación entre las tendencias de la deformación promedio a la izquierda y del esfuerzo promedio a la derecha, con la tendencia del modelo teórico de sensibilidades de la fundición gris	71
Figura 6.1. Probeta cilíndrica usada para los ensayos a tracción.....	72

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Ensayo a tracción

Este trabajo se centra en la obtención del comportamiento mecánico de determinados metales mediante el ensayo de tracción, debido a que es uno de los más importantes para este tipo de materiales. Se hará una breve explicación de este ensayo y las propiedades a obtener. Para ello, nos tendremos que apoyar en los fundamentos teóricos que se han estudiado a lo largo de los años sobre el comportamiento de los materiales frente a una carga de tracción, a diferentes temperaturas y velocidades.

En primer lugar, se explicará de manera breve cómo se ha llevado a cabo el ensayo de tracción realizado, consistente en la aplicación de una carga uniaxial sobre una probeta del material elegido, cuyas dimensiones están normalizadas según la norma UNE-EN ISO 6892-1. Esta aplicación de carga se realiza mediante una máquina universal de ensayos, dotada de unas mordazas para la sujeción de la probeta. Solo una de las mordazas es móvil.

En esencia, un ensayo de tracción consiste en estirar una probeta de material hasta que rompe. Debido a la aplicación de la carga, la probeta sufrirá unos esfuerzos que provocarán su deformación y su correspondiente aumento de longitud en la dirección de la aplicación de la carga (longitudinalmente), hasta que finalmente se produce su rotura. Al mismo tiempo que se produce este incremento de longitud, la probeta sufrirá una reducción de área, es decir, se acortará transversalmente.

En realidad, existen dos modalidades de ensayos de tracción: por control en desplazamiento y por control en carga. En la primera modalidad se establece el ritmo constante al que se irá incrementando la deformación uniaxial de la probeta. En la segunda, lo que se establece es el ritmo con el que se incrementa la carga uniaxial que se aplicará en cada instante. En este trabajo se ha optado por la modalidad de control en desplazamiento, ya que este permite diferenciar las diferentes etapas del comportamiento de nuestro material (incluida la zona de fluencia).

Los esfuerzos y deformaciones obtenidas a partir de este ensayo son las conocidas como *ingenieriles*. Esto es así porque son referidas a las dimensiones originales de la probeta, por lo que serán más realistas cuanto menor sea la deformación de la muestra, por ejemplo, en la zona elástica, donde la deformación suele ser muy pequeña. El valor correspondiente del esfuerzo ingenieril es:

$$s = F/A_0 \quad (1)$$

donde A_0 representa el área de la sección inicial de probeta. El esfuerzo real, Ec. (1) y su relación correspondiente al ingenieril, Ec. (3), serán:

$$\sigma = F/A \quad (2)$$

$$\sigma = s \cdot (1 + e) \quad (3)$$

siendo A el área en cada instante de tiempo y e la deformación ingenieril. A su vez, la deformación real, ε , y la ingenieril tendrá su relación:

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (4)$$

(Estas relaciones, no obstante, no son válidas superado el máximo de la curva).

Como se puede observar, cuanto mayor es la deformación, mayor será la diferencia entre estas, sobre todo, en la zona plástica, cuando se produce una gran estricción de la probeta reduciéndose bastante el área, que es algo que las variables ingenieriles no tienen en cuenta. Superado el máximo de la curva, deberíamos plantearnos usar las variables reales con las dimensiones en cada instante de tiempo, sin embargo, la industria, se prefiere trabajar con las ingenieriles, tales como el sector de la metalurgia, siderurgia y de la construcción, para comprobar la calidad de sus materiales o en el sector aeronáutico, para obtener diferentes parámetros necesarios para el uso de los materiales compuestos.

Este tipo de ensayo va a permitir obtener unos valores muy importantes, que se usan en el mundo de la industria para determinar la utilización o no de un material dependiendo de los requerimientos mecánicos. Los valores más importantes son el módulo de Young, E , el límite elástico, s_{LE} y su correspondiente deformación e_{LE} , la resistencia máxima a tracción, s_M y su correspondiente deformación e_M , la resistencia a la fractura s_F y su correspondiente deformación e_F y la curva esfuerzo (s) frente a deformación (e), que permite visualizar su comportamiento de una manera clara.

En primer lugar, nuestro material tendrá un comportamiento elástico lineal hasta llegar a un cierto valor de carga, que es el llamado límite elástico, en esta zona el material tendrá una deformación proporcional a la aplicación de la carga, lo cual se observa gráficamente como una pendiente constante, que es lo que se conoce como módulo de Young, E , mencionado anteriormente y el cual permite relacionar el esfuerzo con la deformación en esta etapa. Es lo que se conoce como *Ley de Hooke*:

$$E = \sigma/\varepsilon \quad (5)$$

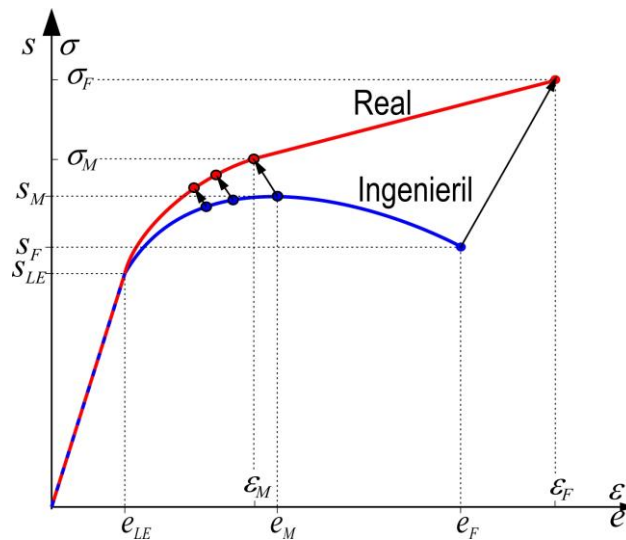


Figura 1.1. Comparativa entre la curva de tracción real e ingenieril. [2]

Tras llegar a ese valor, para algunos metales, en el paso al comportamiento elástico al plástico, el material experimenta un estado de transición que se conoce como un estado de fluencia, el cual se caracteriza porque al principio el esfuerzo aumenta considerablemente y seguidamente disminuye hasta un valor donde el material se deforma a un esfuerzo casi constante, con leves oscilaciones, hasta llegar a un valor de deformación que puede ser hasta de 0,05 y que superficialmente se puede apreciar por la aparición de lo que se conoce como *Bandas de Lüders*, dando lugar a un defecto superficial que se aprecia a 45° de la dirección de carga.

Tras acabar esta zona de fluencia, entramos en la etapa plástica del material, donde al retirar la carga, este recuperará la deformación producida en la zona elástica, pero tendrá una deformación residual correspondiente a esta nueva etapa. A medida que el material plastifica, se produce lo que se conoce como endurecimiento por deformación, por lo que, para aumentar la deformación del material, habrá que aumentar la carga aplicada, como se aprecia en la Fig. 1.2.

Primero hay un comportamiento plástico uniforme, que llega hasta el valor de resistencia máxima a tracción, el cual, para materiales metálicos como los que se tratan en este trabajo, se puede aproximar mediante la *Ecuación de Hollomon*:

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n \quad (6)$$

siendo k el coeficiente de resistencia y n el exponente de endurecimiento por deformación, cuyos valores dependen del material a tratar.

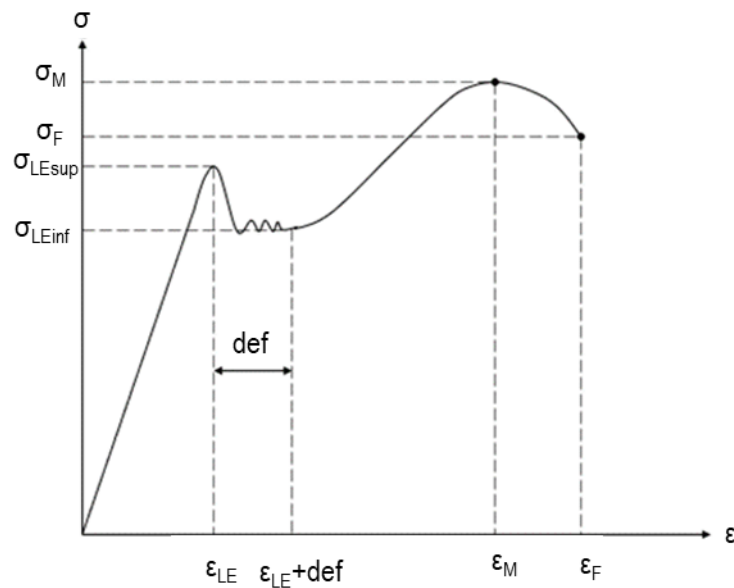


Figura 1.2. Curva de ensayo a tracción.

Tras llegar a un valor, pasamos a un comportamiento plástico no uniforme, en el que se encuentra hasta que se produce la rotura del material. Esta zona puede modelarse con la ecuación de una línea recta, siempre y cuando se cumpla que $\varepsilon_M \leq \varepsilon < \varepsilon_F$, la cual quedaría:

$$\sigma = k' + k'' \cdot \varepsilon \quad (7)$$

siendo $k' = k \cdot (1-n) \cdot \varepsilon^n$ y $k'' = k \cdot n \cdot \varepsilon_M^{n-1}$ para garantizar la continuidad y derivabilidad con la *Ecuación de Hollomon* en $\varepsilon = \varepsilon_M$.

En la zona plástica no uniforme, se produce lo que se conoce como cuello o estrangulamiento, caracterizada porque en un punto de la probeta su sección empieza a disminuir considerablemente, formándose una especie de cuello, que es por donde finalmente se produce la rotura del material. [2]

1.2 Efecto de la temperatura

Las condiciones en las que los metales trabajan a temperaturas muy altas o negativas son innumerables en el mundo de la industria, por ello es un factor a tener en cuenta, ya que el comportamiento de un metal a una temperatura distinta de la del ambiente puede suponer un punto crítico en la aplicabilidad de ese material. El efecto más característico de la variación de la temperatura es en el *módulo de Young*. Este al aumentar la temperatura se verá afectado de manera que disminuirá su valor, debido a que afecta al enlace entre los átomos, aumentando la distancia promedio de equilibrio entre los átomos. Así mismo, el

enfriamiento supone el aumento del módulo de Young. A su vez, al aumentar la temperatura también se ven afectados el *límite elástico* y la *resistencia máxima a la tracción*, los cuales se alcanzan a un valor de esfuerzo menor. La *ductilidad*, que es la capacidad que tiene un material para deformarse, aumenta a medida que aumentamos la temperatura. La evolución de estos factores se puede observar en la Fig. 1.3. Al llegar a valores de alrededor de un 30% o 40 % de la temperatura de fusión del material, se produce un fenómeno en el metal conocido como *termofluencia*, en el cual el material se deforma muy fácilmente sin necesidad de aplicar más carga. [4]

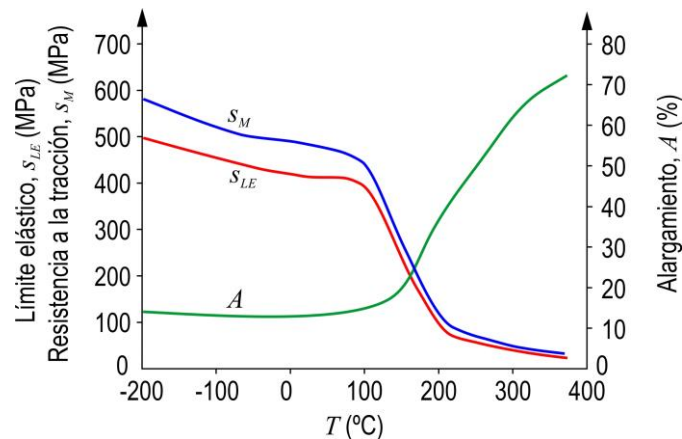


Figura 1.3. Influencia de la temperatura al esfuerzo máximo, límite elástico y alargamiento (A). [2]

1.3 Efecto de la velocidad de deformación

En general, el aumento de la velocidad de deformación provoca el efecto contrario al que provoca el aumento de la temperatura, es decir, provoca que el material sea menos dúctil y más duro. Así al aplicar una mayor velocidad se alcanzarán valores del límite elástico mayores y en algunos casos de velocidades muy elevadas, puede llegarse a comportarse el material de manera frágil. Este tipo de comportamiento se puede apreciar en la Fig. 1.4, donde se han ensayado dos probetas de aluminio 2011 con tratamiento T6 ha diferentes velocidades, una de ellas a velocidad de 0,0125 mm/s (va) y otra a 0,1 mm/s (v+). Además, los efectos del ritmo de deformación sobre el esfuerzo son mayores cuanto mayor sea la temperatura. Por ejemplo, en el caso del acero, a temperaturas superiores a 500°C, aumentar la velocidad de deformación en diez puede proporcionar un aumento en la resistencia de un 25%. [4]

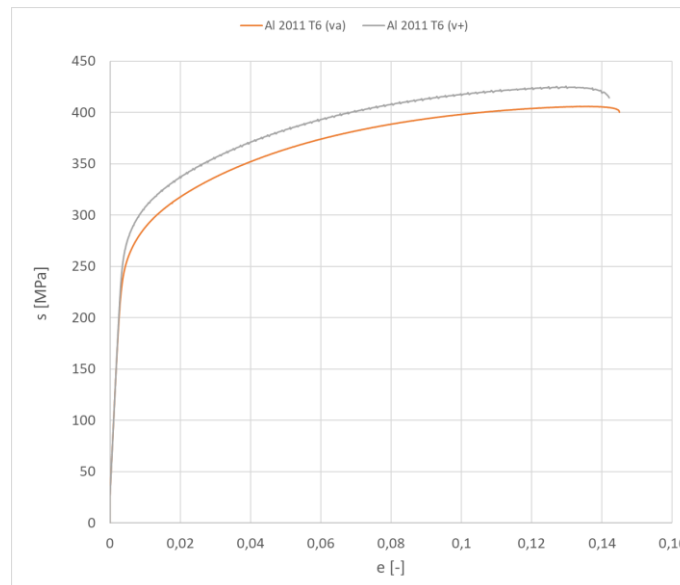


Figura 1.4. Comparativa de ensayos realizados a diferentes velocidades de deformación.

1.4 Tratamientos térmicos

En este apartado de la introducción se va a hacer una breve descripción de los diferentes tratamientos térmicos a los que se han sometido los materiales ensayados en este trabajo. En concreto, los diferentes tratamientos térmicos han sido realizados con las probetas de acero y de aluminio.

Los tratamientos térmicos aplicados a las probetas de acero han sido:

- *Recocido*: enfriamiento muy lento que se consigue dejando la pieza en el horno hasta llegar a la temperatura ambiente. Permite una transformación lenta de la austenita en ferrita o cementita y en perlita, dando tiempo a la nucleación y el crecimiento y consiguiendo unas propiedades de dureza mínima para el acero, pero con una gran tenacidad, permitiendo una gran maquinabilidad. [3]
- *Normalizado*: enfriamiento un ritmo mayor que el recocido, para ello se deja enfriando en contacto con el aire y obteniendo una transformación de la austenita en ferrita o cementita y perlita, pero debido a esa diferencia de velocidad de enfriamiento, le confiere al acero una mayor dureza, aunque reduciendo su tenacidad. [5]
- *Temple*: enfriamiento rápido que generalmente se realiza en agua, salmuera o aceite produciendo una transformación de fase austenítica a ferrita o cementita y a la martensítica en lugar de la perlítica, con lo que se consigue un gran aumento de la dureza y resistencia del acero y una disminución importante de la tenacidad. [7]

- *Revenido*: Tratamiento realizado tras el temple donde se calienta el acero hasta una determinada temperatura y se mantiene un cierto tiempo y finalmente se enfría otra vez. En nuestro trabajo se van a tratar dos tipos de revenidos, uno bajo y otro alto. Esto confiere al acero una leve reducción de su resistencia y dureza, pero permite que el material no sea tan rígido y más dúctil, aliviando muchas de las tensiones internas que se produce en el temple. [7]
- *Sobrerrevenido*: Este tratamiento es un caso extremo del visto anteriormente en el que se a una temperatura levemente superior se mantiene mucho más tiempo. Suele oscilar entre 660°C durante 8 horas, produciéndose una globulización en la microestructura. El acero resultante tiene las características comentadas en el revenido, pero mayores. [8]
- *Estabilización*: Consiste en dejar la pieza de acero durante cierto tiempo en un horno a altas temperaturas, permitiendo un gran alivio de las tensiones internas del material. Hay diferentes tipos de estabilizaciones para el acero, en nuestro caso se han realizado durante 1 hora a 1060°C y posteriormente han sido templadas. [11]

A continuación, se van a comentar los tratamientos realizados al aluminio en este trabajo (existen muchos más, pero no los describiremos). Alguna secuencia de estos tratamientos térmicos, tienen en el mundo de la industria su propia nomenclatura de numeración, como se verá en el capítulo 2:

- *Recocido total*: Al igual que en el acero, el recocido realizado aquí se basa en un enfriamiento muy lento dentro del horno, que permita una homogeneización de todos los componentes en el material y conseguir eliminar cualquier tensión interna. Sin embargo, aquí alcanza una temperatura mucho menor, entre 450°C y 550°C. [6]
- *Recocido contra acritud*: se llegan a temperaturas que oscilan entre 300°C y 400°C (superando la temperatura de cristalización) y posteriormente enfriar lentamente en el horno. El objetivo es eliminar la acritud del material que se ha podido producir por el mecanizado en frío. [6]
- *Solubilización*: calentamiento hasta llegar a una temperatura adecuada manteniéndola un determinado tiempo y así conseguir una mejor homogenización, permitiendo que alguna cantidad de elementos que no se hubieran disueltos se unan a la solución, otorgando mejores propiedades. [9]
- *Atemperación*: El proceso es similar al que se realiza en el acero, únicamente que este se realiza a una temperatura mucho menor que oscila los 500°C, impidiendo así que los compuestos intermetálicos precipiten. [10]

- *Maduración natural*: Tratamiento térmico a temperatura ambiente de algunas aleaciones de aluminio que da lugar a la formación de precipitados, que es la fase endurecedora. [9]
- *Maduración artificial*: Tratamiento térmico realizado a temperatura inferior a la temperatura de solubilización permitiendo la difusión y precipitación de los compuestos químicos y así una mejora en sus propiedades. [9]
- *Sobremaduración*: es una maduración artificial, pero de mayor duración, produciendo un aumento de tamaño de los precipitados y así un ablandamiento de la pieza. El objetivo de este tratamiento es lograr una mejor resistencia a la corrosión en detrimento de las propiedades mecánicas. [10]

1.5 Modelos teóricos

1.5.1 Modelo teórico de la simulación

Para establecer un modelo que permita la construcción de la curva de tracción, se ha establecido una serie de parámetros claves en los que se basará. Una parte de estos parámetros son los vistos en la introducción, los cuales son:

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

Estas son las propiedades características de las curvas a tracción. Naturalmente algunas de ellas solo serán aplicables a ciertos materiales (como la existencia de intervalos de fluencia), 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 considerar todos estos parámetros.

Además de los parámetros ya mostrados, para conseguir una correcta descripción de la curva, serán necesarios un mayor número de parámetros, que permitan un mejor ajuste de la curvatura en distintos tramos. Estos parámetros son los siguientes: k , m , n , \tilde{n} , p . A partir de estos parámetros se procederá a establecer el modelo teórico que permita implementar la curva. El modelo identifica en la curva cuatro zonas diferentes que también explicamos en la introducción, las cuales son: la zona elástica, una eventual zona de fluencia, la zona plástica uniforme y la zona plástica no uniforme. El rizado de la zona de fluencia se modelará mediante una función coseno, mientras que el resto de las zonas se modelarán mediante funciones potenciales cuyos exponentes varían linealmente con la deformación.

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. Por consiguiente, la estrategia seguida consiste en fijar manualmente algunos valores muy claros e importantes como δ , S_{LEinf} , e_M , S_M , e_F y S_F y dejar libre para el proceso de ajuste los demás parámetros (e_{LE} , S_{LEsup} , k , m , n , \tilde{n} , p).

El código fuente exacto que permite trazar la curva de tracción, no se muestra en este documento al ser todavía secreto.

1.5.2 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 explicó en la introducción, generalmente al aumentar la temperatura del ensayo, el material se vuelve menos rígido, blando y dúctil, pudiendo llegar incluso a un estado de termofluencia cuando se alcanzan temperaturas superiores de 0,3-0,4 veces la temperatura de fusión, provocando que el material se pueda deformar sin aumentar el esfuerzo. También se comentó que con el aumento de la velocidad de deformación ocurre el efecto adverso, es decir, el material se vuelve más rígido y duro. Además, cabe destacar que estos efectos entre sí están relacionados, ya que a una temperatura mayor el efecto de aumentar el ritmo de deformación tiene un mayor peso en su comportamiento.

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 y velocidades de deformación, 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 reunido en la Tabla 1.1.

En la primera ecuación de la Tabla 1.1, que define el *factor de sensibilidad térmico* (f_t), t es la temperatura a la que se realiza el ensayo (°C), t_a es la temperatura ambiente (°C), t_s es la temperatura de

fusión (sólidos) del material ($^{\circ}\text{C}$) y $f_{t\text{máx}}$ es el máximo valor que puede tomar el factor f_t (mayor o igual que 1). Observe que se cumple que si $t = t_a$, entonces $f_t = 1$ y que si $t = t_s$, entonces $f_t = f_{t\text{máx}}$.

Por otro lado, en la segunda ecuación de la Tabla 1.1, que define el *factor de sensibilidad con el 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, y $f_{d\text{máx}}$ el máximo valor que puede tomar el factor f_d (mayor o igual que 1). Advierta que se cumple que si $v = v_R$, entonces $f_d = 1$ y que si $v = v_{\text{máx}}$, entonces $f_d = f_{d\text{máx}}$.

Dado que un material no responde frente al ritmo de deformación del mismo modo a una temperatura que a otra superior, en la expresión de f_d , el valor $f_{d\text{máx}}$ aparece multiplicado por el factor f_t . Con el aumento de la temperatura, el producto $f_{d\text{máx}} \cdot f_t$ debería aumentar desde su valor 1 a temperatura ambiente, hasta su valor máximo $f_{d\text{máx}}$ a temperaturas altas (por ejemplo, a temperaturas superiores a su temperatura de recristalización).

Tabla 1.1. Modelo de sensibilidades térmica y de 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
$f_d = 1 + (f_{d\text{máx}} \cdot f_t - 1) \cdot \left(\frac{v - v_R}{v_{\text{máx}} - v_R} \right)$
Corrección de esfuerzos
$e = e \cdot \left(\frac{f_t}{f_d} \right)$
Corrección de deformaciones
$s = s \cdot \left(\frac{f_d}{f_t} \right)$

Una vez conocidos los factores de sensibilidades, f_t y f_d , los valores de los distintos parámetros característicos de la curva de tracción se calcularán por medio de las expresiones tercera y cuarta de la Tabla 1.1, dependiendo de si se tratan de esfuerzos o deformaciones.

1.6 Finalidad y objetivo del TFG

Este ensayo es el más utilizado para estudiar las propiedades mecánicas en los metales, ya que proporciona suficientes valores, y muy fiables, para utilizarlos en la mayoría de las aplicaciones que se dan en la industria. Por todo esto, para llevar a cabo el ensayo a tracción se requiere un gasto para el mecanizado de las probetas.

Con este trabajo se pretende crear un simulador sencillo de este ensayo de tracción en metales, que permita predecir el comportamiento de los metales elegidos en diferentes circunstancias de temperatura y velocidad de deformación. El problema, como se ha visto en la introducción, es que estos dos factores se afectan entre sí, por lo que no se pueden considerar de forma independiente, sino que hay que tener en cuenta el acoplamiento que se produce entre ellos. Los datos que alimentan al simulador se han extraído mediante ajuste por mínimo cuadrados de curvas de tracción procedentes de ensayos reales, a diferentes condiciones de velocidad de deformación y temperatura. Los resultados conseguidos, se compararán con unos reales de materiales ensayados para ver la fiabilidad del modelo usado y saber si se puede seguir usando o habrá que desecharlo y buscar otro que concuerde mejor con el comportamiento del material.

Este trabajo no parte de cero. En realidad, este trabajo se tratará de optimizar un trabajo anterior, similar a este, pero realizado con un modelo más primitivo. Con el nuevo modelo se espera obtener mejores resultados, lo cual se valorará en el apartado de conclusiones. Lamentablemente, debido a la problemática que ha supuesto ensayar materiales a temperaturas superiores debido al deslizamiento que se producía entre el material y las mordazas, únicamente se valorarán muestras a diferentes velocidades de deformación, quedando para futuro trabajo el análisis a diferentes temperaturas. De todas maneras, en este trabajo se considerará la presencia de diferentes temperaturas para mostrar el modelo teórico completo.

Este objetivo también será muy útil en el mundo académico, ya que permitirá al alumnado comprobar cómo afectan estos factores a los metales y permitirle de una mayor facilidad de comprensión, al no solo leerlo en un libro y de ajustarnos cada vez más a la enseñanza que recomienda el Plan Bolonia.

2 ALEACIONES SELECCIONADAS

En este trabajo se han analizado cinco aleaciones metálicas (Acero C45, Aluminio 2011, Acero 304, Latón y Fundición gris) que han sido sometidas a diferentes tratamientos térmicos, como normalizado, recocido, temple, que les condieren diferentes propiedades mecánicas. Estos cambios serán apreciados al comparar los diferentes ensayos a tracción, que son realizados a temperatura ambiente con diferentes velocidades y a diferentes temperaturas mayores que la del ambiente. (Aunque en este trabajo, todo se realizará a temperatura ambiente, para diferentes velocidades de ensayo).

Según la norma UNE-EN ISO 6892, la velocidad de deformación recomendada con la que tiene que realizarse el ensayo es de $0,00025 \times L_0$, y como L_0 que es la longitud del extensómetro que se va a utilizar, es de 50 mm, esta velocidad será de 0,0125 mm/s, la cual será la de referencia y con la que se hará los diferentes ensayos a diferentes temperaturas. A continuación, se muestran las diferentes probetas con sus respectivos tratamientos: [1]

2.1 Acero C45

El acero C45 o F114, se trata de un acero al carbono, cuya concentración está entre 0,42-0,5 %. Destaca el uso de manganeso entre 0,5-0,8 %. Suelen estar presentes otros aleantes como el silicio, cromo y níquel con menos de 0,4%, y molibdeno con menos de un 0,1%. Es un acero que destaca por su alta resistencia debido a esa presencia del manganeso, lo cual ha llegado a dificultar en algunas ocasiones el ensayo. Se puede encontrar en piezas como engranajes o ejes. Además, tiene una gran soldabilidad y maquinabilidad.

Para este material hay diferentes probetas a las que se les han tratado térmicamente. Estos tratamientos realizados, se explican a continuación de manera detallada:

- Recocido:
 1. Austenización en vacío (o gas inerte) a 840 °C durante 45 minutos.
 2. Enfriamiento en horno.
- Normalizado:
 1. Austenización en vacío (o gas inerte) a 870 °C durante 45 minutos.
 2. Enfriamiento al aire.

- Temple:
 1. Austenización en vacío (o gas inerte) a 840 °C durante 45 minutos.
 2. Temple en aceite. (Horno a 858°C)
- Temple+Revenido bajo
 1. Austenización en vacío (o gas inerte) a 840 °C durante 45 minutos.
 2. Temple en aceite.
 3. Revenido a 350 °C durante 1,5 h.
- Temple+Revenido alto
 1. Austenización en vacío (o gas inerte) a 840 °C durante 45 minutos.
 2. Temple en aceite.
 3. Revenido a 600 durante 1,5 h
- Temple+Sobrerrevenido
 1. Austenización en vacío (o gas inerte) a 840 °C durante 45 minutos.
 2. Temple en aceite.
 3. Revenido a 600 durante 10 h

A continuación, se detalla la nomenclatura que se empleará para aludir a las distintas probetas con su tratamiento específico:

- N para normalizadas.
- R para las que han sido sometidas a un recocido.
- T las que han sido sometidas a temple que en este trabajo serán T01, T02, TE01 y TE02. Además de temple, a las probetas T03, T04, TB01 y TB02 se les ha realizado un revenido, a T05, T06, TA01 y TA02 un revenido alto y a T07, T08 y TR01 un sobrerrevenido.

Todo esto se sintetiza en las tablas que siguen. En la Tabla 2.1. se muestran las probetas ensayadas a la velocidad de referencia, con los diferentes tratamientos térmicos y a diferentes temperaturas. En la Tabla 2.2 se muestran las probetas ensayadas a diferentes velocidades.

En algunos ensayos, debido a la alta resistencia del material se presentaron complicaciones, se presentaron complicaciones que obligaron a repetir el ensayo. Esta circunstancia fue indicado con un “*” en las casillas correspondientes. En estas casillas, las probetas T01, T02, T03, T04, T05, T06, T07, T08 fueron ensayadas con la aparición de grietas longitudinales, mientras que las probetas TE01, TE02, TB01, TB02, TA01, TA02, TR01 si fueron realizadas con una rotura correcta.

En este trabajo se estudiarán únicamente las probetas a temperatura ambiente, debido a que no se pudieron realizar los demás ensayos. Estas son R01, R02, N01, N02, T01, T02, TE01, TE02, T03, T04, TB01, TB02, T05, T06, TA01, TA02, T07, T08 y TR01.

Tabla 2.1. Nomenclatura del tratamiento para las probetas de Acero C45.

<i>A temperatura ambiente</i>	
Recocido	R01, R02
Normalizado	N01, N02
Temple	T01, T02, TE01, TE02*
Temple + Revenido bajo	T03, T04, TB01, TB02*
Temple + Revenido alto	T05, T06, TA01, TA02 (reciclada)*
Temple + Sobrerrevenido	T07, T08, TR01 (reciclada)*
<i>A alta temperatura</i>	
Normalizado a $t^+ = 100\text{ °C}$	N03, N04
Normalizado a $t^{++} = 200\text{ °C}$	N05, N06
Normalizado a $t^{+++} = 300\text{ °C}$	N07, N08

Tabla 2.2. Nomenclatura del tratamiento a diferentes velocidades para las probetas de Acero C45.

<i>A temperatura ambiente</i>	
Normalizado a $v^{++} = (0,0067 \cdot L_0)\text{ mm/s} = 0,3350\text{ mm/s}$	N09, N010
Normalizado a $v^+ = (0,002 \cdot L_0)\text{ mm/s} = 0,1000\text{ mm/s}$	N011, N012
Normalizado a $v^- = (0,00007 \cdot L_0)\text{ mm/s} = 0,0035\text{ mm/s}$	N013, N014

2.2 Acero 304

El acero 304 es un tipo de acero inoxidable austenítico, con un contenido en carbono de no más del 0,08%, el cual como todos los inoxidables destaca por su alto contenido en cromo 18-20 % y, los de este tipo, con

níquel entre un 8-10,5 %, además de otros aleantes como el manganeso y silicio. Esta composición les permite ser muy resistentes a la corrosión y por ello constituyen el acero inoxidable más usado. Su uso destaca en fregaderos, sanitarios y tuberías.

Con estas probetas se ha adoptado una nomenclatura de enumeración, que ha permitido una mejor identificación en el ensayo, con una A al principio identificable con el material a tratar, Acero. Esta nomenclatura se muestra en las Tablas 2.3 y 2.4.

Tabla 2.3. Nomenclatura del tratamiento para las probetas de Acero 304.

<i>A temperatura ambiente</i>	
Estado de recepción	A-03
Estabilizada en agua 1h*	A-01, A-02
Estabilizada en salmuera 1h*	A-11, A-12
<i>A alta temperatura</i>	
Estado de recepción t+ = 100 °C	A-15 A-16
Estado de recepción t++ = 200 °C	A-17 A-18
Estado de recepción t+++ = 300 °C	A-19

*Las probetas estabilizadas fueron introducidas en el horno a 1060°C 1 hora y posteriormente templadas en agua o salmuera (En ambos casos se produjeron precipitados).

Tabla 2.4. Nomenclatura del tratamiento a diferentes velocidades para las probetas de Acero 304.

<i>A temperatura ambiente</i>	
Estado de recepción v++ = (0,0067*Lo) mm/s = 0,3350 mm/s	A-04, A-05
Estado de recepción v+ = (0,002*Lo) mm/s = 0,1000 mm/s	A-06, A-07
Estado de recepción v- = (0,00007*Lo) mm/s = 0,0035 mm/s	A-08, A-09

De estas probetas únicamente se ha realizado el ensayo a temperatura ambiente con la velocidad de ensayo recomendada, las cuales son T6-03, T6-04, T6-05, T6-06, T6-07 y T6-08.

2.3 Aluminio 2011

Este aluminio corresponde a la serie 2000, la cual se caracteriza por el uso de cobre, entre un 5-6 % y otros aleantes como el bismuto y el plomo, ambos entornos al 0,6 %. Se caracterizan por ser dentro del grupo de

los aluminios, de alta resistencia mecánica, siendo excelentes en relación resistencia/peso, aunque no tienen una buena resistencia a la corrosión. Entre sus aplicaciones destacan psitones, arandelas o poleas.

Para este material se han realizado un gran número de tratamientos térmicos, los cuales se especifican a continuación, junto con su nomenclatura indicada entre paréntesis y posteriormente en las Tablas 2.5 y 2.6:

- Recocido Total (O)
 1. Calentamiento en vacío (o gas inerte) a 420 °C durante 2 h
 2. Enfriamiento lento en horno (sacadas cuando llegaron a <250 °C)
- Recocido contra Acritud (H2)
 1. Calentamiento en vacío (o gas inerte) a 340°C durante 2 h
 2. Enfriamiento lento en horno (sacadas cuando llegaron a <250 °C).
- Solubilización+enfriamiento lento en horno (O1)
 1. Calentamiento en vacío (o gas inerte) a 500 °C durante 2 h.
 2. Enfriamiento lento en horno (sacadas cuando llegaron a <100 °C).
- Solubilización+Atemperación (SH)
 1. Calentamiento en vacío (o gas inerte) a 500 °C durante 2 h.
 2. Atemperación en agua.
- Solubilización+ Atemperación +Maduración Natural (T4)
 1. Calentamiento en vacío (o gas inerte) a 500 °C durante 2 h.
 2. Atemperación en agua.
 3. Maduración durante 5 días a temperatura ambiente (aproximadamente a 20 °C).
- Solubilización+ Atemperación +Maduración Artificial (T6)
 1. Calentamiento en vacío (o gas inerte) a 500 °C durante 2 h.
 2. Atemperación en agua.
 3. Maduración a 165 °C durante 14 h.
- Solubilización+ Atemperación +Sobremaduración (T7)
 1. Calentamiento en vacío (o gas inerte) a 500 °C durante 2 h.
 2. Atemperación en agua.

3. Maduración a 275 °C durante 14 h.

Tabla 2.5. Nomenclatura del tratamiento para las probetas de Aluminio 2011.

<i>A temperatura ambiente</i>	
Recocido total (O)	O-01, O-02, O-03, O-04
Recocido contra acritud (H2)	H2-01, H2-02
Solubilización+Enfriamiento lento en horno (O1)	O1-01, O1-02
Solubilización+Atemperación (SH)	SH-03, SH-04
Solubilización+Atemperación+Maduración Natural (T4)	T4-01, T4-02
Solubilización+Atemperación+Maduración Artificial (T6)	T6-01, T6-02
Solubilización+Atemperación+Sobremaduración (T7)	T7-01, T7-02
<i>A alta temperatura</i>	
T6 a t+ = 100 °C	T6-09, T6-10
T6 a t++ = 200 °C	T6-11, T6-12
T6 a t+++ = 300 °C	T6-13, T6-14

Tabla 2.6. Nomenclatura del tratamiento a diferentes velocidades para las probetas de Acero 304.

<i>A temperatura ambiente</i>	
T6 a v++ = (0,0067*Lo) mm/s = 0,3350 mm/s	T6-03, T6-04
T6 a v+ = (0,002*Lo) mm/s = 0,1000 mm/s	T6-05, T6-06
T6 a v- = (0,00007*Lo) mm/s = 0,0035 mm/s	T6-07, T6-08

Las probetas O1-01, O1-02 fueron ensayadas días después del tratamiento y las O1-03, O1-04 fueron ensayadas justo después del tratamiento.

De las probetas de aluminio se han ensayado las que se realizan a temperatura ambiente, tanto las de tratamientos específicos como las de a distintas velocidades, a excepción de las sometidas a solubilización, atemperación y maduración natural (T4). Estas son O-01, O-02, O-03, O-04, H2-01, H2-02, O1-01, O1-02, HS-03, HS-04, T6-01, T6-02, T7-01, T7-02, T6-03, T6-04, T6-05, T6-06, T6-07 y T6-08.

2.4 Latón

A este latón se le ha realizado un ensayo químico para determinar su composición exacta, la cual cuenta como componentes principales un 57,36% de cobre, un 39,14 % de Zn, más una serie de aleantes como son un 2,47% de plomo, 0,34% de hierro, 0,16% de aluminio, 0,02% de cromo, 0,11% de níquel, 0,02% de fósforo, 0,37% de estaño y por último un 0,01% de circonio. Se puede decir que este latón se caracteriza por ser fácil de mecanizar, troquelar y fundir, con buena resistencia a la corrosión y dúctil.

Con estas probetas se ha realizado la misma metodología que para el Acero 304 de enumerarlas en lugar de usar nomenclatura específica. Además, se usa una L antes para identificar el material Latón. Esta numeración se puede observar en las Tabla 2.7 y Tabla 2.8.

Tabla 2.7. Nomenclatura del tratamiento para las probetas de Latón.

<i>A distintas temperaturas</i>	
Estado de recepción a ta	L-01, L-02
Estado de recepción a t+ = 100 °C	L-09, L-10
Estado de recepción a t++ = 200 °C	L-11, L-12
Estado de recepción a t+++ = 300 °C	L-13, L-14

Tabla 2.8. Nomenclatura del tratamiento a diferentes velocidades para las probetas de Latón.

<i>A temperatura ambiente</i>	
Estado de recepción a v++ = (0,0067*Lo) mm/s = 0,3350 mm/s	L-03, L-04
Estado de recepción a v+ = (0,002*Lo) mm/s = 0,1000 mm/s	L-05, L-06
Estado de recepción a v- = (0,00007*Lo) mm/s = 0,0035 mm/s	L-07, L-08

De estas probetas se han ensayado las que son a temperatura ambiente, incluyendo las de a diferentes velocidades. Estas son L-01, L-02, L-03, L-04, L-05, L-06, L-07 y L-08.

2.5 Fundición gris

A este material falta practicarle un ensayo químico para conocer a profundidad el porcentaje de sus componentes. En ámbitos generales, son fundiciones que se caracterizan por tener un contenido en carbono del 2 al 4 % y de silicio entre 1,5 y 3 %, además de manganeso, azufre y fósforo. Destaca por su facilidad de mecanizado, buena resistencia al desgaste lo que, unido a su bajo costo, le hace la fundición más usada.

Algunas aplicaciones con este material son en bancadas de las máquinas, motores de combustión interna, etc.

Nuevamente, al igual que las probetas de Acero 304 y Latón, estas probetas han sido numeradas para su mejor identificación, en lugar de usar una nomenclatura específica. Al principio de cada numeración está la letra F correspondiente al material, Fundición gris. Esta nomenclatura se puede observar con más detalle en las Tabla 2.9 y Tabla 2.10.

Tabla 2.9. Nomenclatura del tratamiento para las probetas de Fundición gris.

<i>A distintas temperaturas</i>	
Estado de recepción a ta	F-01, F-02
Estado de recepción a t+ = 100 °C	F-09, F-10
Estado de recepción a t++ = 200 °C	F-11, F-12
Estado de recepción a t+++ = 300 °C	F-13, F-14

Tabla 2.10. Nomenclatura del tratamiento a diferentes velocidades para las probetas de Fundición gris.

<i>A temperatura ambiente</i>	
Estado de recepción a v++ = (0,0067*Lo) mm/s = 0,3350 mm/s	F-03, F-04
Estado de recepción a v+ = (0,002*Lo) mm/s = 0,1000 mm/s	F-05, F-06
Estado de recepción a v- = (0,00007*Lo) mm/s = 0,0035 mm/s	F-07, F-08

Por concluir, se ha observado que la fundición posee matriz perlítica y cabe indicar, que las probetas que fueron ensayadas de este material, han sido las que se realizan a temperatura ambiente, las cuales son F-01, F-02, F-03, F-04, F-05, F-06, F-07 y F-08.

3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se explica cómo se llevaron a cabo los ensayos y la funcionalidad de los programas que se han usado para llevar a cabo la tarea de ajuste de curvas, simulación y validación del modelo de sensibilidad propuesto.

3.1 Realización del ensayo a tracción

El ensayo de tracción ha sido realizado mediante el uso de una prensa mecánica Instron 5505, que ha permitido el control en desplazamiento de la probeta, hasta efectuar su rotura y mediante la utilización de un extensómetro, de longitud 50 mm, se ha tenido un control preciso de todas las fases por las que el material evoluciona durante este ensayo. Las dimensiones de las probetas se muestran en el capítulo de Planos, en la página 75 de este documento, las cuales han sido mecanizadas según la norma UNE-EN ISO 6892-1. Mediante la utilización de un programa asociado a esta máquina, Fig. 3.1, se visualiza esta curva y los diferentes puntos de importancia que serán necesarios usarlos para la simulación. Además, mediante este programa, también se han variado las diferentes velocidades de deformación.



Figura 3.1. Universal Testing Machine de 100kN (Instron 5505).

Para garantizar que el ensayo se produce de manera correcta y que la curva de tracción que se obtenga se dé como válida, se debe garantizar que los esfuerzos que sufre la probeta están totalmente alineados con el sentido longitudinal de esta. Otro punto para tener en cuenta es la correcta sujeción de la probeta, ya que esto anularía completamente el ensayo. Si todos estos aspectos no se tienen en cuenta, se obtendrán resultados incoherentes que no tendrán ningún valor y quedará invalidado el ensayo. Por otro lado, si está bien realizado, la rotura se producirá mediante una grieta perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta.

Generalmente, los ensayos realizados a las probetas, han sido dos por cada condición para certificar el que el ensayo ha sido ejecutado con certeza. Todos estos ensayos han sido realizados en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

3.2 Método de ajuste de curvas de tracción

Para llevar a cabo los ajustes de las diferentes curvas de tracción se ha usado un programa desarrollado en VBA desde Excel. Ese dicho programa 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 obtenida experimentalmente.

Por confidencialidad, el código de esta macro no puede ser mostrada por lo comentado anteriormente de la privacidad, sin embargo, se muestra la hoja de Excel, Fig. 3.2, donde se introducen los datos para obtener estos ajustes.

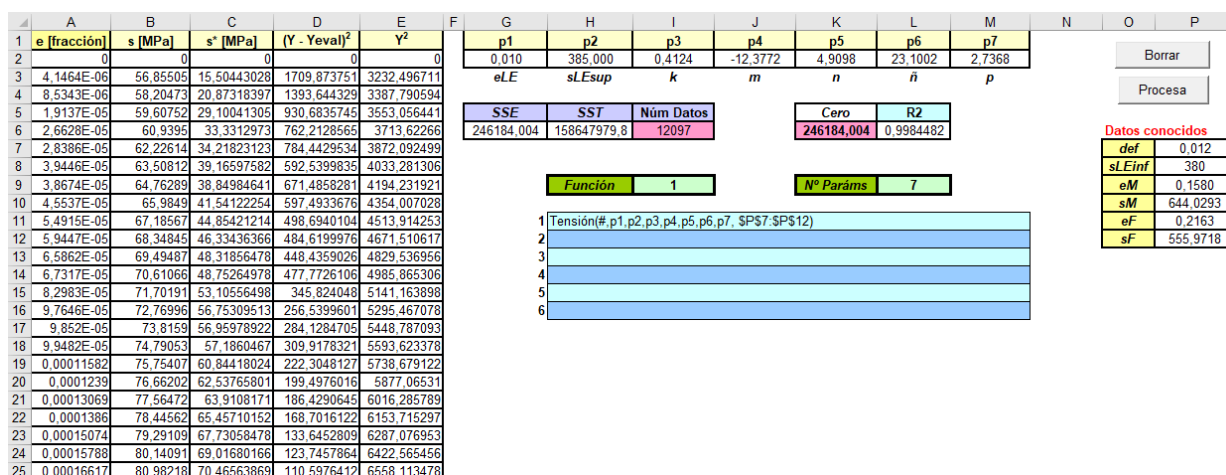


Figura 3.2. Hoja de Excel para realizar la simulación de la curva de tracción del Acero C45 recocido.

Para efectuar el ajuste será necesario introducir los datos conocidos que en la Fig. 3.2 se pueden introducir a la derecha de la imagen y donde en la Fig. 3.3 se muestran de manera más ampliada.

<i>def</i>	0,012
<i>sLEinf</i>	380
<i>eM</i>	0,1580
<i>sM</i>	644,0293
<i>eF</i>	0,2163
<i>sF</i>	555,9718

Figura 3.3. Valores de datos conocidos facilitados al programa de ajuste para facilitar su tarea.

Tras introducir estos datos, para iniciar la síntesis de la curva y ajuste a la curva real se presiona *Procesa* y se obtienen los valores representados en la Fig. 3.2 como *p1*, *p2*, *p3*, *p4*, *p5*, *p6* y *p7*, explicados en el Capítulo de Introducción, que se pueden ver de forma ampliada en la Fig. 3.4. También se obtiene la curva de tracción simulada, que se forma en otra hoja distinta junto con la real para ver sus diferencias, como se verá en el Capítulo 4. A su vez, incorpora un botón de *Borrar* para reiniciar el proceso y que no haya errores de ejecución.

<i>p1</i>	<i>p2</i>	<i>p3</i>	<i>p4</i>	<i>p5</i>	<i>p6</i>	<i>p7</i>
<i>eLE</i>	<i>sLEsup</i>	<i>k</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>ñ</i>	<i>p</i>

Figura 3.4. Valores a obtener mediante el programa de ajuste.

Para analizar los diferentes gráficas y su viabilidad, se apoya en el parámetro estadístico R^2 , que nos permite saber si los valores se ajustan bien a la tendencia que se tiene, siendo de valor 1 cuando los parámetros se ajusten perfectamente y 0 cuando no tengan nada de relación.

3.3 Ajuste de las sensibilidades del modelo

Realizado el proceso de ajuste de todas las curvas experimentales, se dispondrá del valor de los distintos parámetros obtenidos para distintas condiciones de ensayo, especialmente, para distintas velocidades de deformación. Se trata ahora de establecer un modelo que permita correlacionar los valores de los parámetros en función de las distintas condiciones de ensayos. Esto es lo que se explicó en el Capítulo de introducción como Modelo de sensibilidades.

Para comprobar la idoneidad del modelo de sensibilidades propuesto, utilizaremos otra hoja Excel de ajuste por mínimos cuadrados, especialmente adaptada para obtener el valor óptimo de los parámetros f_{dmax} y v_{max} que incorpora el modelo. Este caso corresponde a la Fig. 3.5, donde introduciendo en la columna de la X los valores de las velocidades de deformación normalizadas y en la Y los de las deformaciones o del esfuerzo, pudiendo elegir unos factores u otros según permitan un mejor ajuste. Mediante esto y los demás valores mostrados en la Tabla 1.1, se obtiene el modelo de sensibilidades, en el que se podrá estudiar la tendencia de cada parámetro respecto a la evolución que tienen en las curvas reales.

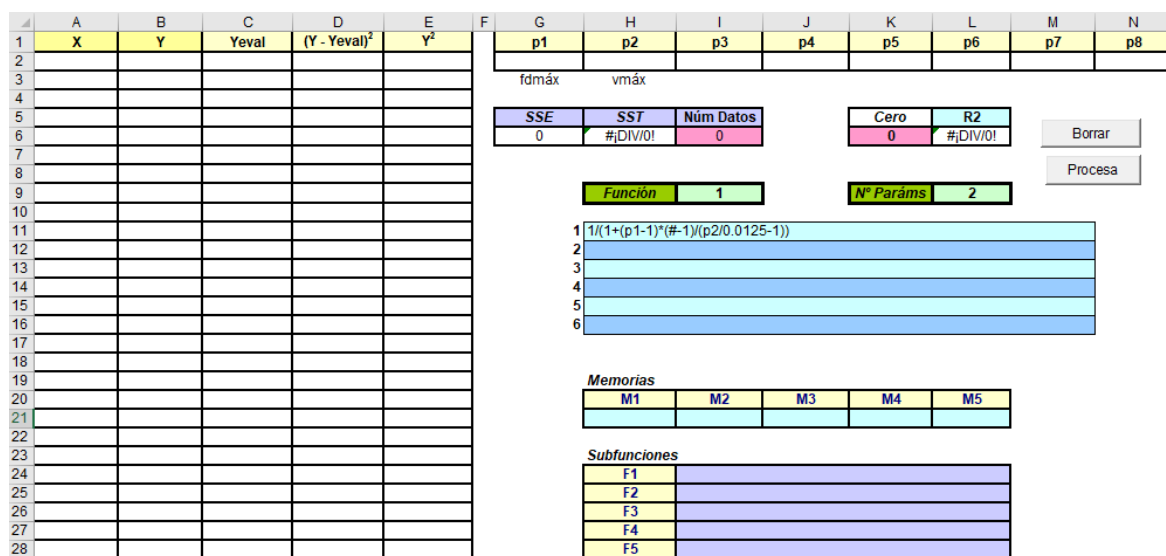


Figura 3.5. Hoja de Excel para realizar el ajuste.

4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se van a mostrar las diferentes curvas de tracción teóricas obtenidas mediante simulaciones, la tendencia de los parámetros del modelo de sensibilidades y se efectuará un análisis de todos estos resultados. Se han comparado las curvas de tracción real y teórica (simulada). En todas las gráficas que siguen, el color violeta representa la curva de tracción simulada, denominada s^* , y el color azul representa la curva de tracción real, denominada s . Por cada condición de ensayo considerada, se han realizado dos gráficas, debido a que como se mencionó en el anterior capítulo, para comprobar el efecto de repetitividad, pero se mostrará únicamente una para favorecer la lectura.

Cabe mencionar que en algunas condiciones se efectuaron ensayos no válidos, los cuales tuvieron que repetirse, que no serán mostrados.

4.1 Ajustes del acero C45

Los primeros resultados a mostrar son los del Acero C45, en concreto, los realizados a temperatura ambiente y a la velocidad recomendada por la norma.

A. Acero C45 recocido

Primeramente, se muestra el caso del Acero C45 recocido. Por ser la primera condición analizada, para demostrar la repetitividad de los ensayos, se mostrarán las gráficas correspondientes a las dos muestras: Fig. 4.1 y Fig. 4.2. En estas figuras se puede apreciar que las curvas experimentales (curvas azules) son similares en ambos ensayos. Además, se observa que nuestro modelo de simulación se adapta muy bien en ambos casos a la curva del ensayo, tanto en la zona elástica, como en las zonas plásticas uniforme y no uniforme. Únicamente hay leves diferencias en la zona de fluencia, donde es perfectamente comprensible.

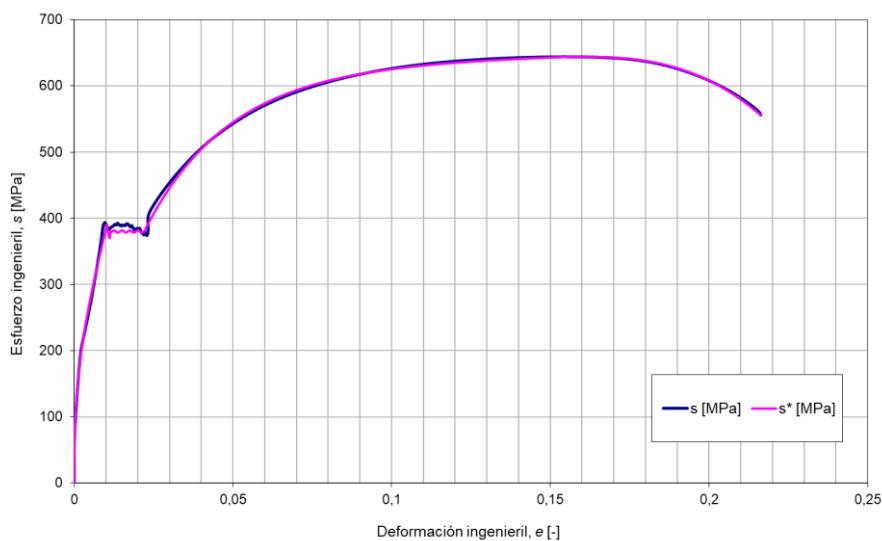


Figura 4.1. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 recocido (R01).

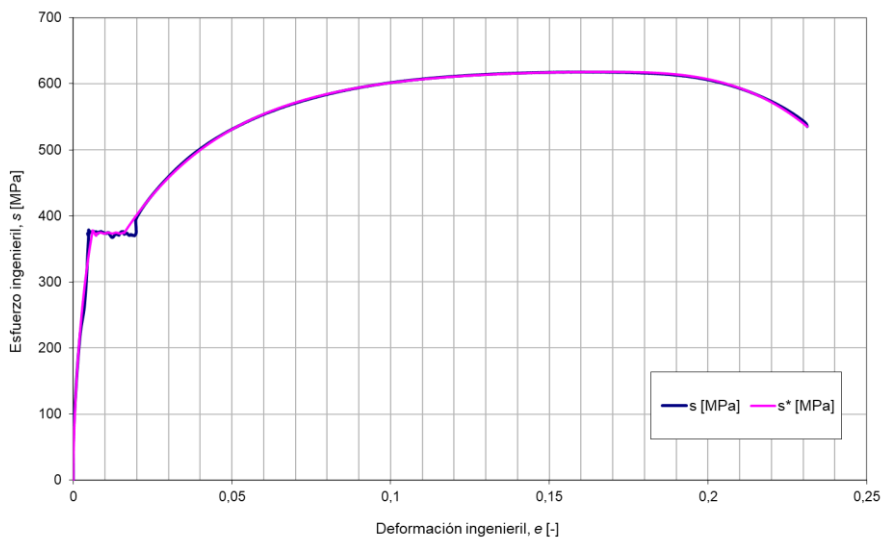


Figura 4.2. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 recocido (R02).

En la Tabla 4.1 se muestran los parámetros obtenidos del ajuste de la curva experimental a la curva simulada. Como se comentó en el capítulo 3, los parámetros def , e_M , e_F , s_{LEinf} , s_M , s_F se suponen conocidos, y el resto se dejan libres. Los resultados mostrados corresponden a los valores medios de los ajustes de las curvas de los dos ensayos.

Tabla 4.1. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero C45 recocido.

e_{LE}	def	e_M	e_F	$s_{LEsup}[MPa]$	$s_{LEinf}[MPa]$	$s_M[MPa]$	$s_F[MPa]$	k	m	n	\tilde{n}	ρ
0,006	0,01	0,1659	0,2312	376	374	617,9342	535,3721	0,5279	15,313	4,5095	14,6179	3,1061

B. Acero C45 templado

Se va a realizar un pequeño salto respecto al orden tomado en el capítulo 2, donde el normalizado se mostraba antes, debido a que este es el que se ha ensayado a diferentes velocidades de deformación, por lo que se ha preferido mostrar al final junto con estos.

En las Figs. 4.3 y 4.4 se muestran las gráficas del acero C45 templado. Como se puede observar, hay una gran diferencia entre una gráfica y otra, lo que se debe a que la probeta T02 sufrió una rotura por una grieta longitudinal, responsable del aspecto serrado, probablemente, y que obliga a descartar estos resultados. Pero también la curva de la Fig. 4.3 muestra un comportamiento aparentemente extraño con una zona plástica creciente y lineal, que no se ajusta al comportamiento esperado. La duda se salva si entendemos que la parte mostrada en la gráfica corresponde exclusivamente a la zona elástica del material. Se apreciaría, entonces, un incremento realmente importante en su resistencia respecto al recocido, debido al efecto del temple, que a su vez provoca que la deformación sea mucho menor, teniendo una única zona elástica lineal. Hay que tener en cuenta que las gráficas no están a la misma escala, ya que, si fuera así, esta se vería mucho más inclinada con un módulo de Young algo mayor. Esto es así para apreciar mejor los resultados obtenidos en cada caso.

Como se puede apreciar la curva simulada ajusta perfectamente a la curva experimental, la cual es prácticamente lineal con un módulo de Young constante. Hay un leve desajuste al comienzo, el cual no tiene importancia.

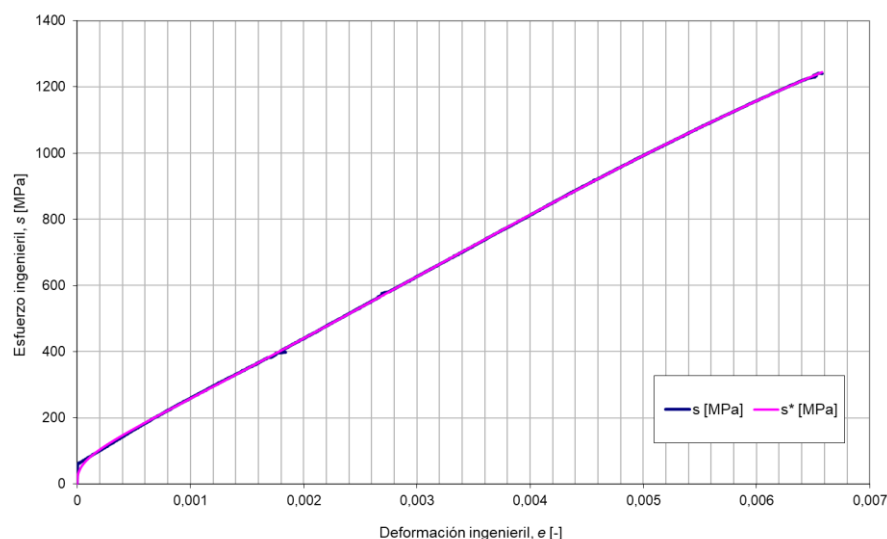


Figura 4.3. Curvas de tracción y simulación del del acero C45 templado (TE01).

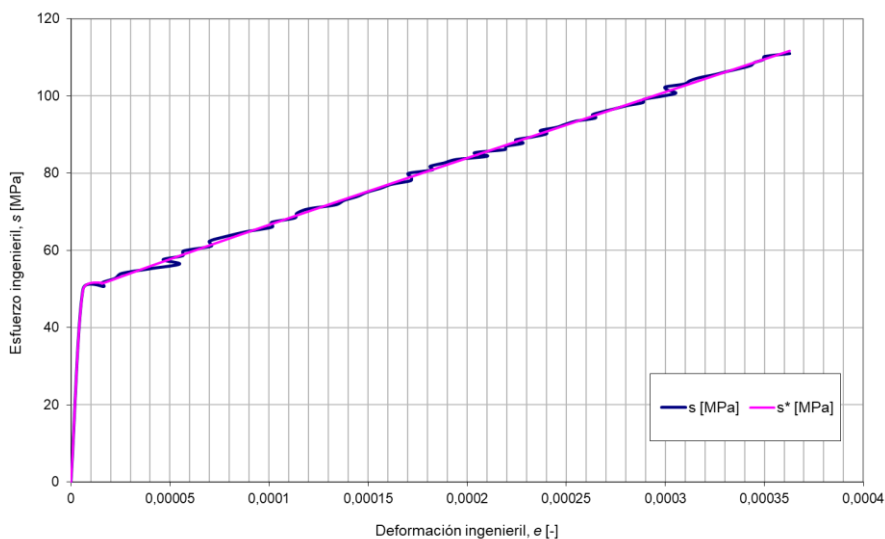


Figura 4.4. Curvas de tracción y simulación del del acero C45 templado (T02) (descartada).

Los valores de los parámetros que permiten simular la curva de tracción de este material se recogen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero C45 templado.

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
0,0268	0	0,0065	0,0065	472,0110	0	1241,828	1240,417	0,3396	156,2824	3,9724	12,3655	2,9865

A partir de aquí, no se mostrarán más gráficas descartadas por errores en el ensayo y el capítulo se centrará en los resultados considerados válidos, para no sobrecargar el trabajo de gráficas y favorecer una lectura más amena.

C. Acero C45 templado con revenido bajo

Tal como se explicó en la introducción, este tratamiento conlleva una reducción en la fragilidad y un incremento en su ductilidad, que se reflejará en la curva en una mayor elongación.

Los ensayos fueron repetidos debido a que aparecieron grietas longitudinales en los dos primeros y el resultado obtenido se muestra en las Fig 4.5, donde ya se alcanzan elongaciones del 8%. Para estas nuevas curvas obtenidas con esta segunda ronda de ensayos, el ajuste que se consigue es muy bueno, además como en el caso anterior, no cuenta con una zona de fluencia, lo que facilita el ajuste.

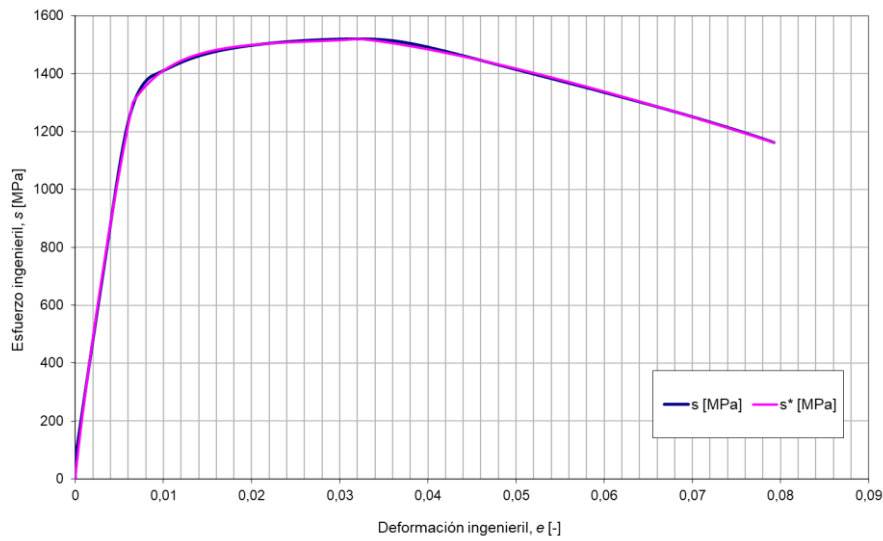


Figura 4.5. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 templado con revenido bajo (TB1).

Los parámetros resultantes del ajuste y que permiten trazar la curva de tracción se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero C45 templado con revenido bajo.

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
0,0065	0	0,0319	0,0792	1300	0	1520,015	1162,266	0,8691	18,9811	5,2916	159,4057	1,2953

D. Acero C45 templado con revenido alto

Este tratamiento mejora la ductilidad de nuestro material, permitiendo alcanzar elongaciones en torno a 17 %, un importante incremento de hasta el 10%, en decremento de la resistencia. Al igual que en el caso anterior, dos ensayos tuvieron que ser descartados. La Fig. 4.6 muestra un nuevo ensayo satisfactorio. Como se puede apreciar los ajustes para este acero son muy buenos, tanto en la zona elástica como en la plástica, aunque con unos pequeños errores en la zona fluencia.

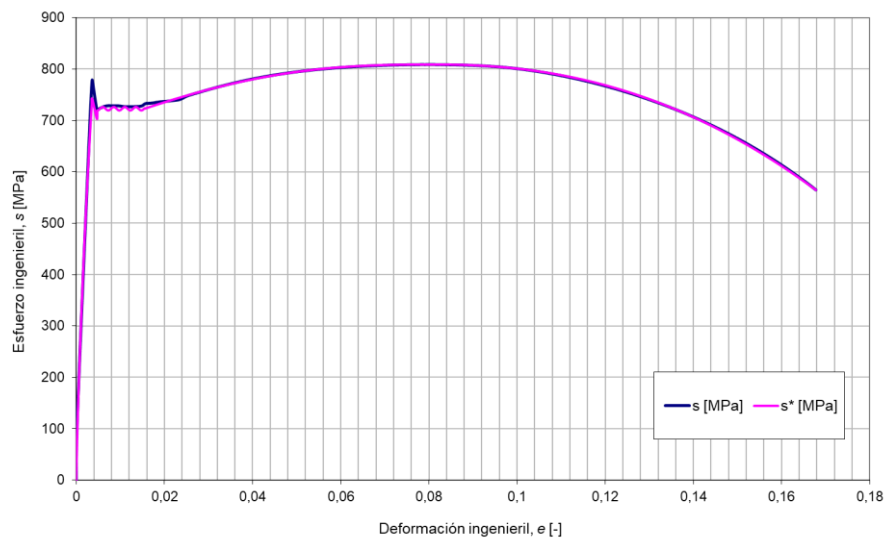


Figura 4.6. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 templado con revenido alto (TA01).

Los valores implicados en el ajuste para este material corresponden a los mostrados en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero C45 templado con revenido alto.

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
0,0035	0,012	0,0813	0,1678	733	723	808,9224	564,7249	0,7600	23,0626	2,1950	-6,4290	2,2393

E. Acero C45 con sobre revenido

Al igual que los anteriores casos, esta condición también tuvo problemas al principio y los dos primeros ensayos fueron descartados. Finalmente, se realizó un ensayo válido, representado en la Fig. 4.7.

No se observan grandes diferencias entre este tratamiento y el de revenido alto, aunque teóricamente este debería contar con mayor ductilidad. Se puede ver que la simulación ha sido realizada con una gran similitud al ensayo real, pero al igual que en los anteriores casos, la zona de fluencia está ligeramente desajustada.

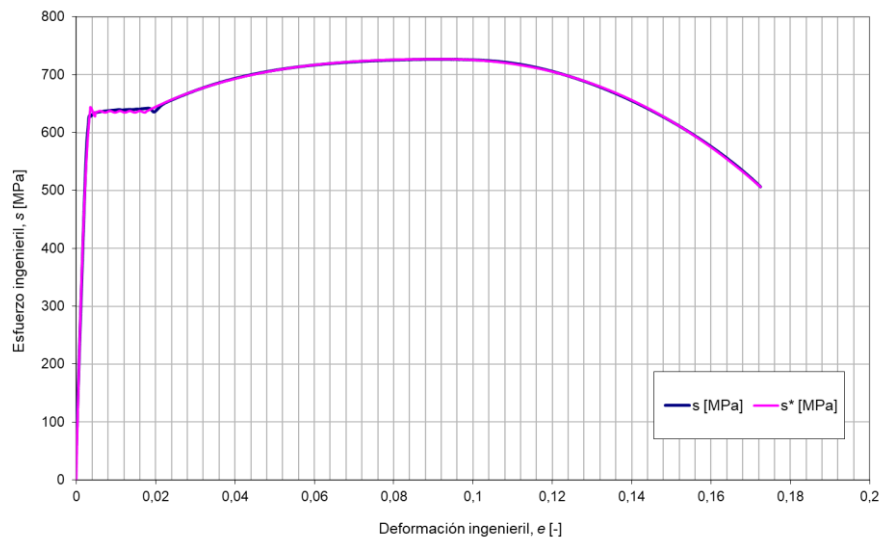


Figura 4.7. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 con sobrerrevenido (TR01).

Los valores de los parámetros característicos resultantes del ajuste se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero C45 sobrerrevenido.

e_{LE}	def	e_M	e_F	$s_{LEsup}[MPa]$	$s_{LEinf}[MPa]$	$s_M[MPa]$	$s_F[MPa]$	k	m	n	\tilde{n}	ρ
0,0035	0,014	0,0917	0,1724	640	636	726,7899	506,2773	0,7993	132,4934	2,8841	6,6359	2,2127

Para concluir, se representan los valores de R^2 de cada gráfico en la Tabla 4.6, es decir, la concordancia que ha tenido el ajuste con la realidad, siendo mejor cuanto más a la unidad se aproxime. Se puede observar que se alcanzan unos valores muy aproximados a este valor, que demuestra la gran calidad del simulador en todas estas condiciones.

Tabla 4.6. Valores de R^2 correspondientes a las probetas de acero C45.

Probeta	R01	R02	TE01	TB01	TA01	TR01
R^2	0,9984	0,9959	0,9999	0,9993	0,9972	0,9985

F. Acero C45 normalizado

Tras los ensayos anteriores se muestran los resultados conseguidos con los aceros normalizados, que fueron realizados a diferentes velocidades de deformación para estudiar su sensibilidad ante este cambio.

En primer lugar, el ensayo realizado a velocidad de deformación recomendada, de 0,0125 mm/s, correspondiente a la Fig. 4.8.

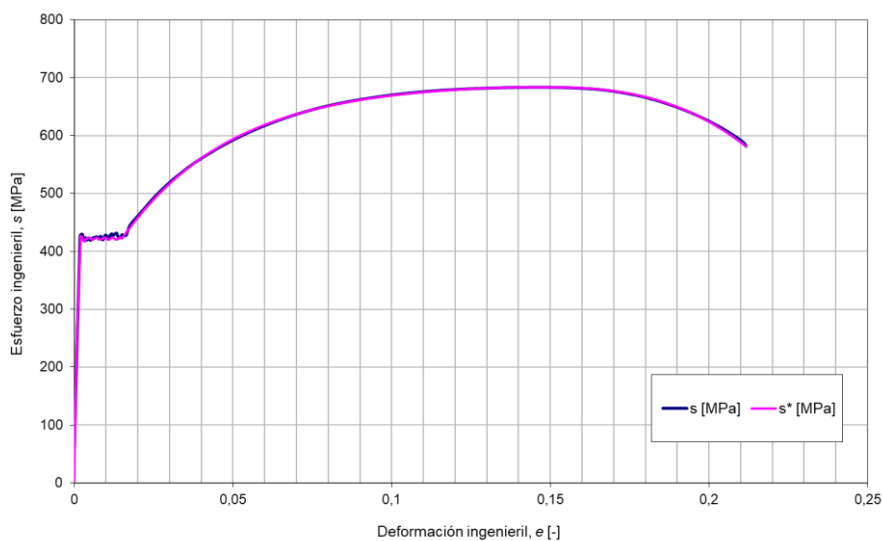


Figura 4.8. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 normalizado a velocidad recomendada (N02).

En segundo lugar, el ensayo realizado a una mayor velocidad de deformación, de 0,3350 mm/s, en la Fig. 4.9, donde hay un aumento en el límite elástico respecto al realizado a velocidad recomendada, tal y como se esperaba teóricamente.

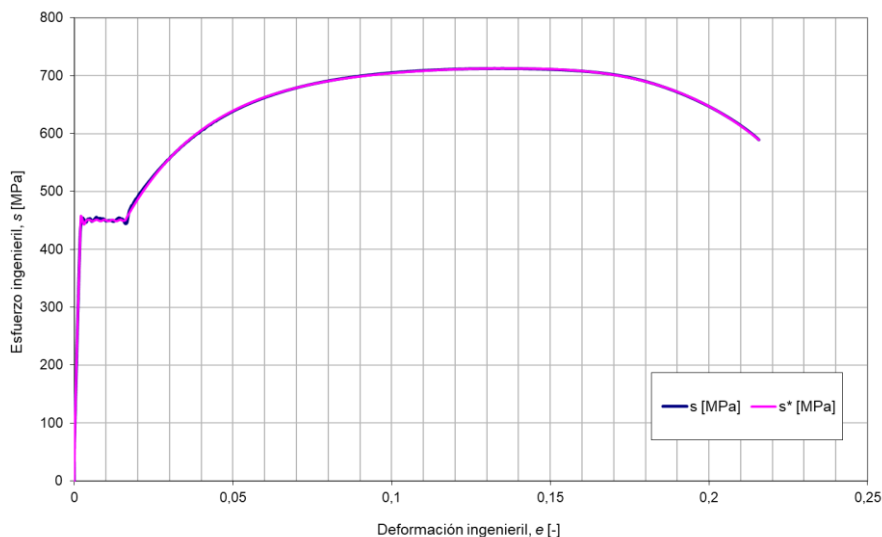


Figura 4.9. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 normalizado a 0,3350 mm/s (N09).

En tercer lugar, el ensayo realizado a 0,1 mm/s, en la Fig. 4.10, que también muestra un ligero incremento en el límite elástico que el de velocidad recomendada, aunque mucho menor que en el caso anterior.

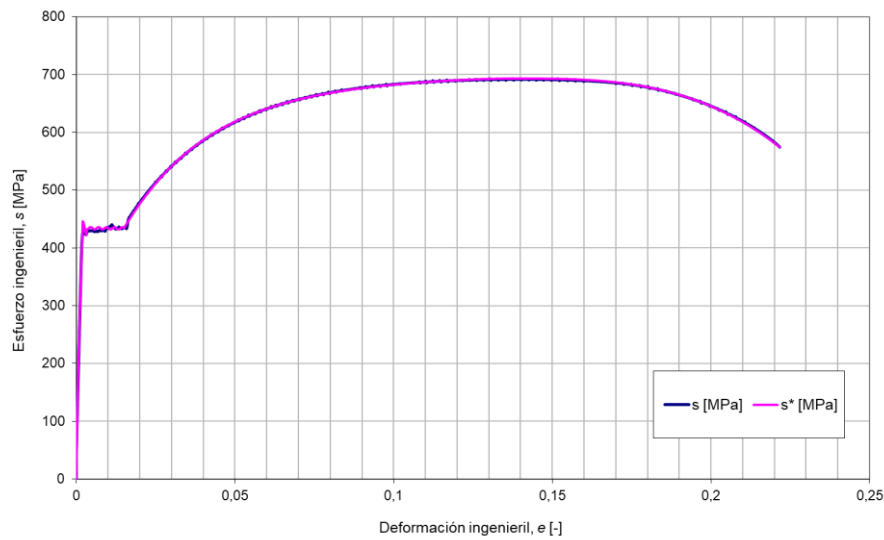


Figura 4.10. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 normalizado a 0,1 mm/s (N12).

Por último, en la Fig 4.11, el ensayo realizado a una menor velocidad que todos los demás, de 0,0035 mm/s, muestra que existen escasas o ninguna diferencia con el de a velocidad recomendada, lo cual es comprensible y por otra parte optimista, ya que reafirma que la velocidad recomendada por la norma en este material es una buena estimación para que no aparezcan efectos dinámicos y que no haría falta disminuirla, lo que supondría un mayor gasto de tiempo.

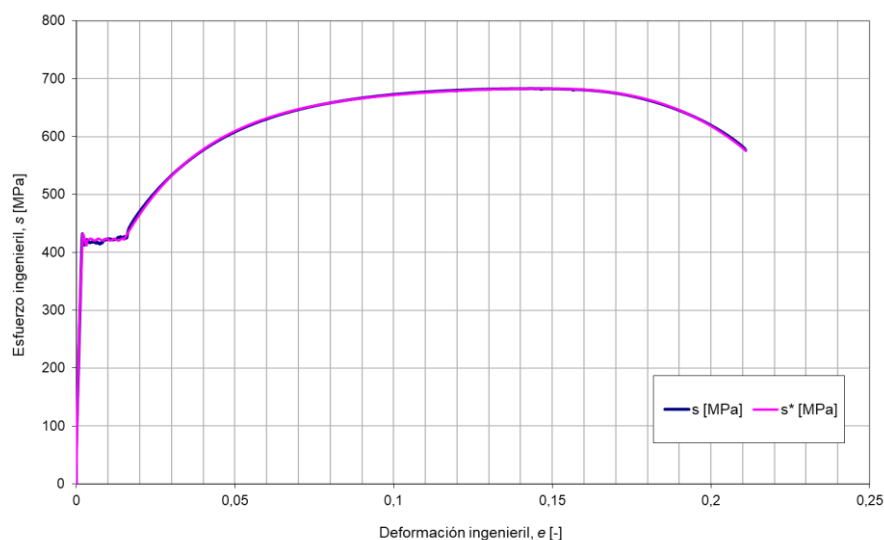


Figura 4.11. Curvas de tracción y simulación del Acero C45 normalizado a 0,0035 mm/s (N14).

La bondad de los ajustes de todas estas curvas se puede apreciar en la Tabla 4.7, donde se muestran los valores de R^2 , todos ellos muy cercanos a la unidad.

Tabla 4.7. Valores de R^2 correspondientes a las probetas de acero C45 normalizado a diferentes velocidades de ensayo.

Probeta	N02	N09	N12	N14
R^2	0,9987	0,9993	0,9994	0,9990

Uno de los objetivos de este trabajo, era conseguir una mejora en el ajuste respecto al simulador usado un trabajo anterior a este, lo cual gráficamente se ha conseguido de manera muy buena. Por poner un ejemplo, en la mayoría de las gráficas anteriores el ajuste conseguido mostraba un valor de resistencia máxima mayor que el del ensayo real y en un nivel de deformación diferente, cosa que no ocurre con este nuevo simulador. Para visualizar esto, en la Tabla 4.8 se muestra una comparativa de los valores de R^2 , en la cual se incluyen las probetas anteriormente mencionadas y correspondientes a la Tabla 4.7, además de las probetas que permitían confirmar la repetitividad del ensayo, mostrando así un abanico mayor de resultados. En esta tabla se puede ver que hay una mejora notable en el nuevo modelo (R^2_1) respecto al antiguo (R^2_2).

Tabla 4.8. Comparativa de R^2 de los modelos de ajuste anterior y actual.

Probeta	N02	N09	N10	N11	N12	N13	N14
R^2_1	0,9987	0,9993	0,9988	0,9992	0,9994	0,9989	0,9990
R^2_2	0,9789	0,9851	0,9857	0,9864	0,9842	0,9842	0,9842

En el resto de los materiales no se mostrará esta tabla comparativa, ya que se obtienen resultados similares, consiguiendo siempre una mejora del nuevo modelo respecto al antiguo.

Todo esto se puede apreciar mejor en la Fig. 4.12, donde se representan los ensayos realizados y en la Fig. 4.13 se representa lo mismo, pero incluyendo las simulaciones.

Además, podemos ver cómo nuestro modelo de ajuste se adapta perfectamente en todos los casos, donde por primera vez, aparecen ensayos a diferentes velocidades de deformación.

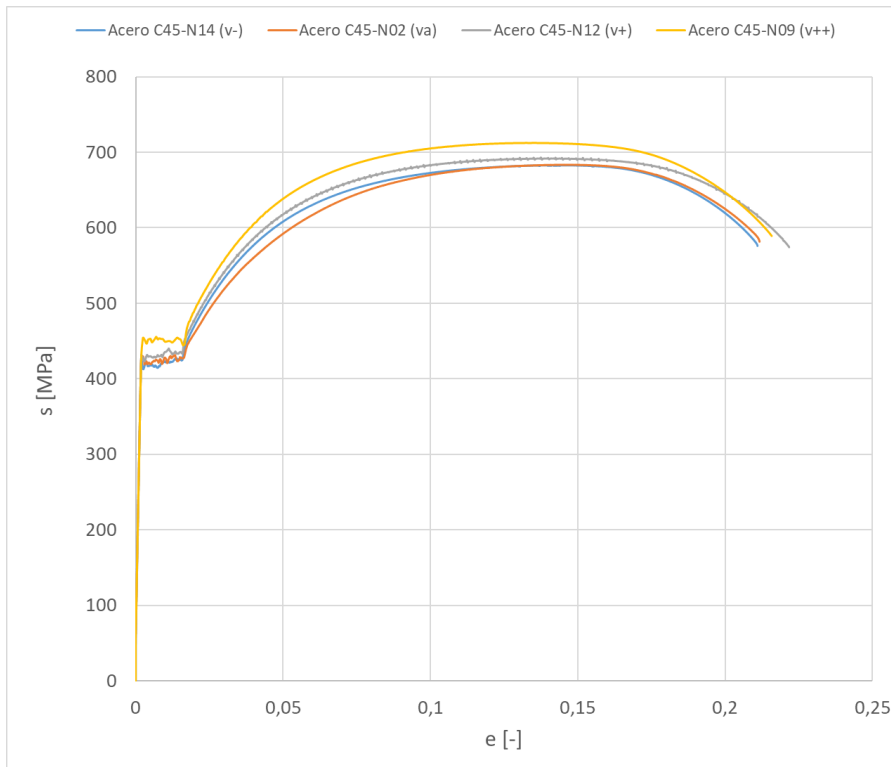


Figura 4.12. Comparación de los diferentes ensayos del acero C45 normalizado a velocidades de deformación diferentes.

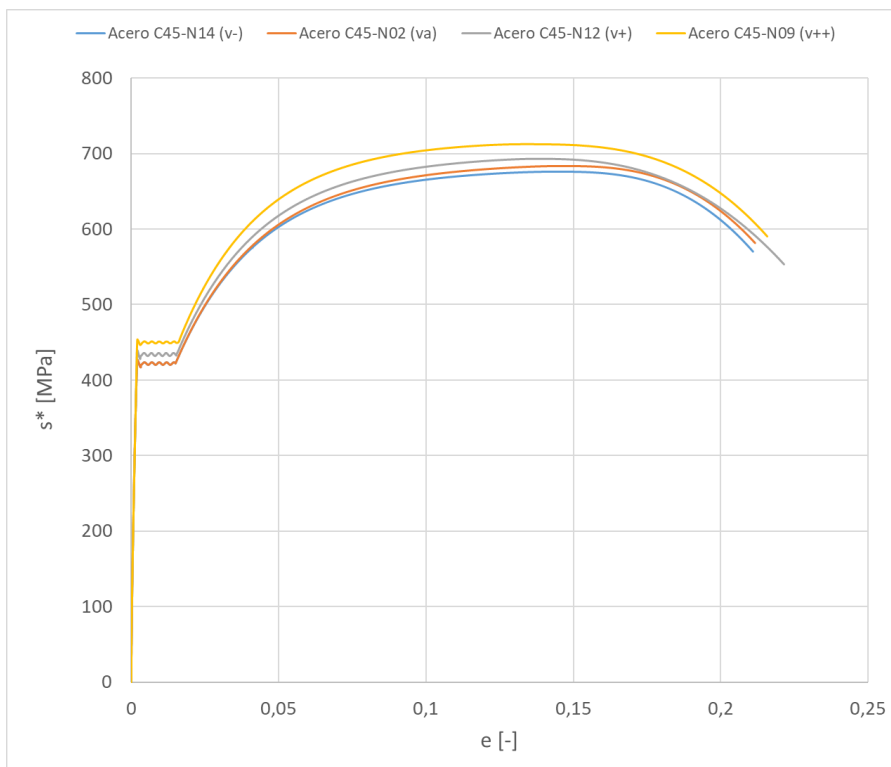


Figura 4.13. Comparación de las diferentes simulaciones del acero C45 normalizado a velocidades de deformación diferentes.

Seguidamente, vamos a comprobar la tendencia que siguen los parámetros característicos de la curva de tracción, en función de la velocidad de deformación. Dado que, generalmente, se tienen dos ensayos por material, se ha decidido hacer la media de los valores proporcionados por estos ensayos, mostrada en la Tabla 4.9. Posteriormente, para poder analizar la tendencia que siguen estos parámetros de una mejor manera y crear la función polinómica de tendencia, se muestra la misma tabla con los datos normalizados, es decir, divididos en este caso por los valores que se obtienen de la velocidad recomendada, de 0,0125 mm/s, logrando los valores en porcentaje referidos a ese ensayo, como se puede ver en la Tabla 4.10.

Tabla 4.9. Valores de la curva de tracción del acero C45 normalizado a diferentes velocidades de deformación.

vel [mm/s]	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
0,0035	0,0020	0,0130	0,1433	0,2109	427,0	422,0	676,1	570,3	0,7301	78,5769	4,5953	19,6649	2,8418
0,0125	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
0,100	0,0020	0,0135	0,1374	0,2113	440,0	434,0	693,1	593,2	0,7523	28,1822	4,3899	19,8744	2,5593
0,335	0,0020	0,0140	0,1326	0,2086	454,0	450,0	712,4	619,4	0,6749	-85,7585	4,3811	19,6366	2,9941

Tabla 4.10. Valores normalizados de la curva de tracción del acero C45 normalizado a diferentes velocidades de deformación.

vn	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
0,3	1,00	1,0000	0,9857	0,9967	1,0000	1,0000	0,9890	0,9805	1,0261	1,0681	1,0033	0,9982	1,0284
1,0	1,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
8,0	1,00	1,0385	0,9452	0,9986	1,0304	1,0284	1,0140	1,0198	1,0574	0,3831	0,9585	1,0089	0,9262
26,8	1,00	1,0769	0,9120	0,9854	1,0632	1,0664	1,0423	1,0650	0,9486	-1,1657	0,9566	0,9968	1,0835

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 velocidad de deformación del ensayo junto a sus polinomios de tendencia y su R^2 , la cual nos permitirá saber la coherencia de la evolución de estos parámetros obtenidos en el ensayo.

En primer lugar, se van a mostrar los gráficos de la variación de la deformación y de la longitud de la zona de fluencia con la velocidad, en la Fig. 4.14. Con estos resultados, se puede deducir que la deformación del límite elástico se mantiene constante siempre, por lo que la variación de esta velocidad de deformación no influye en qué nivel de deformación se llega al valor del límite elástico. En cambio, el intervalo de fluencia si tiene una ligera influencia de esta variación de velocidad en el ensayo, ya que al aumentarla este intervalo crece de manera lineal, aunque de manera muy suave.

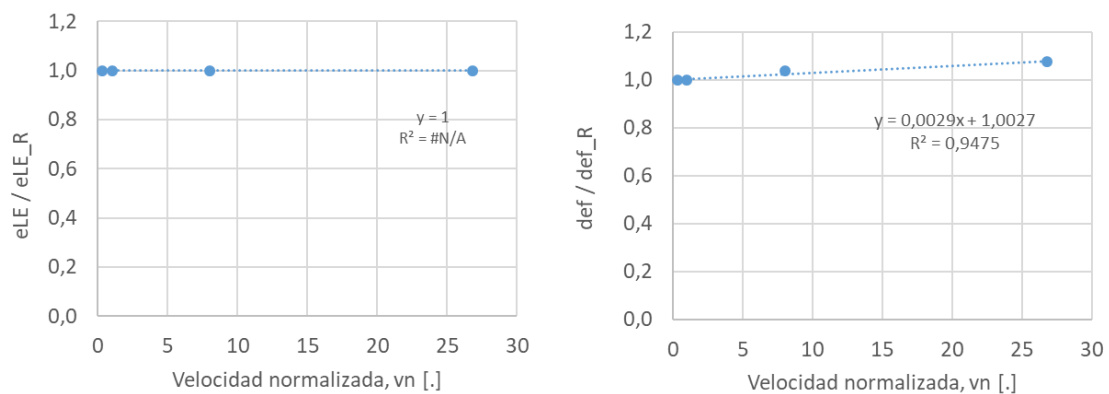


Figura 4.14. Representación normalizada de la deformación del límite elástico a la izquierda y a la derecha el intervalo de la zona de fluencia frente a la velocidad de deformación normalizada del acero C45.

En la Fig. 4.15 se muestra el comportamiento de la deformación máxima y de la deformación de fractura frente a la velocidad de deformación normalizada. Ambas varían de manera decreciente con la velocidad mediante un polinomio de primer grado. La deformación de la fractura se puede considerar casi constante al tener una pendiente tan mínima. Teóricamente son los resultados esperados, ya que debe disminuir su ductilidad, aunque como se puede ver en la deformación de fractura, lo hace de manera muy poco significativa.

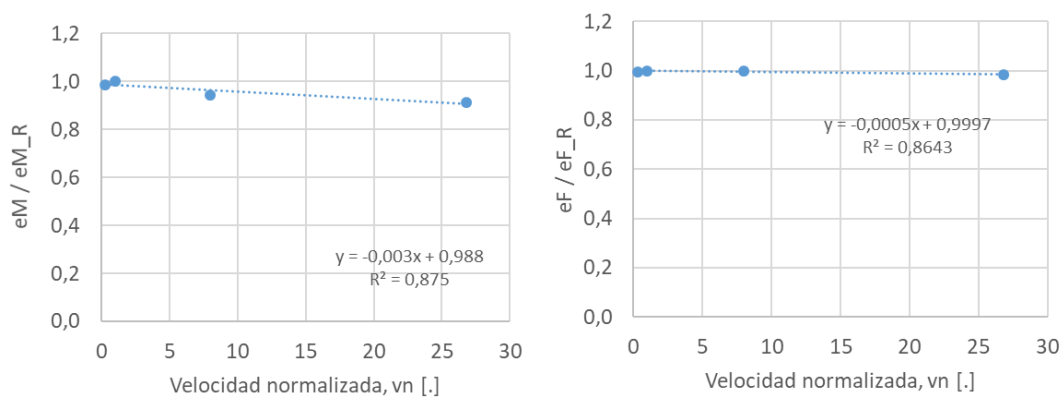


Figura 4.15. Representación normalizada de la deformación máxima a la izquierda y a la derecha la de fractura frente a la velocidad de deformación normalizada del acero C45.

A la Fig. 4.16 se muestra la dependencia de las resistencias del límite elástico superior e inferior, donde se puede apreciar un comportamiento lineal creciente en el de límite superior y un comportamiento parabólico, aunque casi lineal, en el inferior.

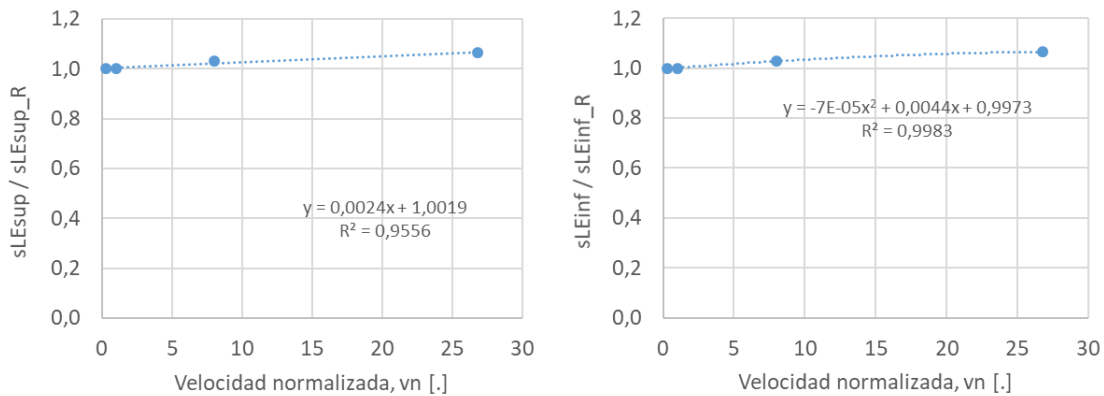


Figura 4.16. Representación normalizada del límite elástico superior a la izquierda y a la derecha el superior frente a la velocidad de deformación normalizada del acero C45.

La Fig. 4.17 muestra el comportamiento de la resistencia máxima y resistencia a fractura, que resulta ser similar: creciendo de manera lineal con poca pendiente. Todos estos gráficos del comportamiento de las resistencias, tanto en la Fig. 4.16 como en la Fig. 4.17, se ajusta a lo que se esperaba teóricamente, aumentando a medida que aumenta la velocidad de deformación.

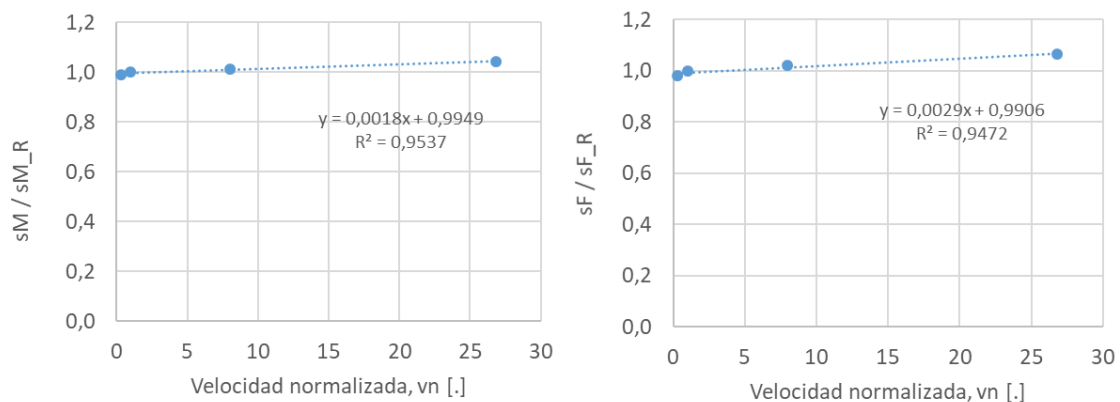


Figura 4.17. Representación normalizada de la resistencia máxima a la izquierda y a la derecha la resistencia a fractura frente a la velocidad de deformación normalizada del acero C45.

Por último, se observa el comportamiento de los parámetros ajustados, para realizar correctamente el ajuste, como se explicó en el Capítulo 3, en las Fig. 4.18, Fig. 4.19 y Fig. 4.20, donde se puede ver que el parámetro k , aunque su comportamiento sea lineal decreciente, su R^2 es muy baja, por lo que esa evolución no puede ser considerada fiable. El valor m lo hace de manera parabólica decreciente de manera muy abrupta, siendo el parámetro al que más le afecta esta variación en la velocidad de deformación y dado que su R^2 es 1, es bastante fiable. El valor m lo hace de manera parabólica decreciente de manera muy abrupta,

siendo el parámetro al que más le afecta esta variación en la velocidad de deformación y dado que su R^2 es 1, es bastante fiable. El valor n , también lo hace parecido al valor m , aunque su valor R^2 es bajo y mirando el gráfico se podría decir que la disminución de este valor se hace de manera muy abrupta y linealmente, aunque luego parece mantenerse casi constante. Finalmente, tanto el valor \tilde{n} como el p se ajustan parabólicamente de manera muy buena

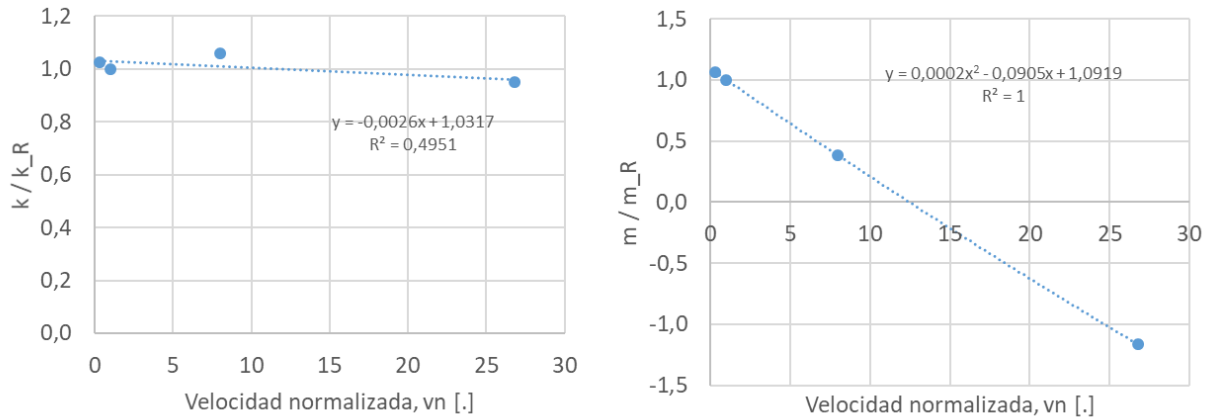


Figura 4.18. Representación normalizada del parámetro k a la izquierda y a la derecha el m frente a la velocidad de deformación normalizada del acero C45.

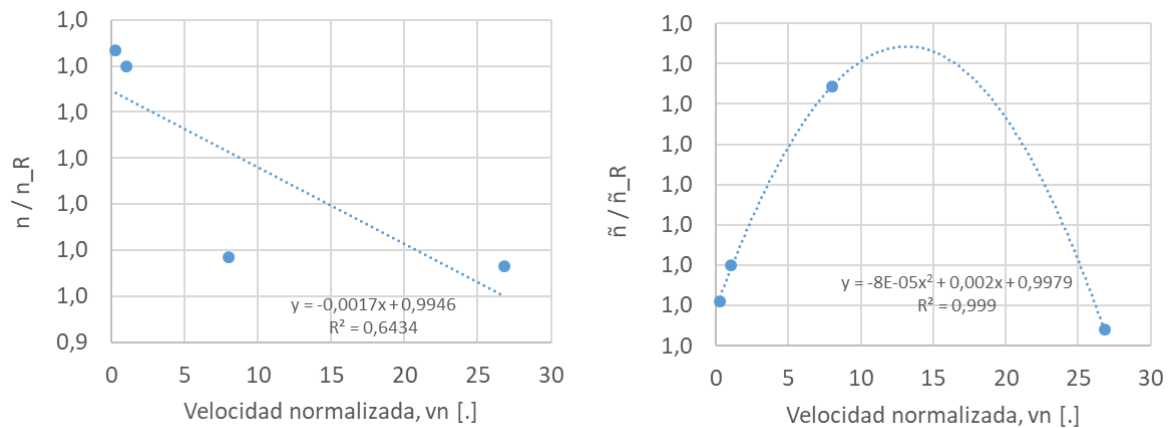


Figura 4.19. Representación normalizada del parámetro n a la izquierda y a la derecha el \tilde{n} frente a la velocidad de deformación normalizada del acero C45.

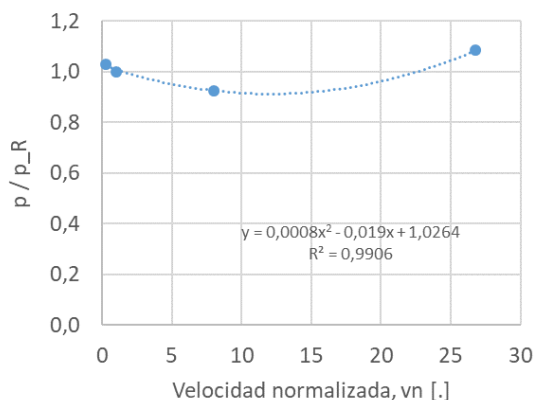


Figura 4.20. Representación normalizada del parámetro p frente a la velocidad de deformación normalizada del acero C45.

Para acabar de analizar este material y en concreto su sensibilidad, en la Fig. 4.21 se muestran los gráficos que comparan la tendencia de la deformación en promedio y de la tensión en promedio de los ensayos, mostrada en azul, con la tendencia que se obtiene de aplicar el modelo de las sensibilidades, explicado en el capítulo 3. Como se puede ver, se obtienen buenos resultados, sobre todo con las tensiones, donde los valores están prácticamente superpuestos. Por lo tanto, podríamos decir que nuestro modelo es relativamente válido para este material, aunque habría que intentar corregir las diferencias en la deformación y usar una población de probetas mayor para verificar la tendencia real.

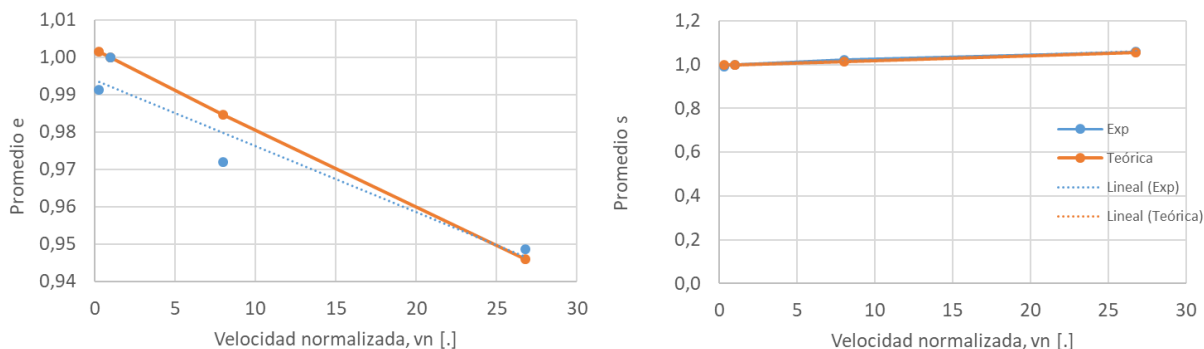


Figura 4.21. Comparación entre las tendencias de la deformación promedio a la izquierda y del esfuerzo promedio a la derecha, con la tendencia del modelo teórico de sensibilidades del acero C45.

4.2 Ajustes del acero 304

Para este material como se comentó en el capítulo anterior, consta únicamente de ensayos con distintos tratamientos realizados a velocidad de deformación recomendada de 0,0125 mm/s, uno como se recibió y

dos con estabilizados distintos, quedando para un futuro trabajo el análisis de las sensibilidades. En este material no se produce zona de fluencia como en el anterior material.

A. Acero 304 en estado de recepción

La curva obtenida en el ensayo es la mostrada en la Fig. 4.22. El ajuste producido es bastante bueno, tanto en la zona elástica como en la plástica, sin embargo, en la zona de unión de estas zonas, no se consigue que se adapte la curva real y realizando una transición un poco brusca con ese pico que se produce en lugar de una manera suave como se produce en el ensayo. Este aspecto sería de interés corregirlo en futuras investigaciones.

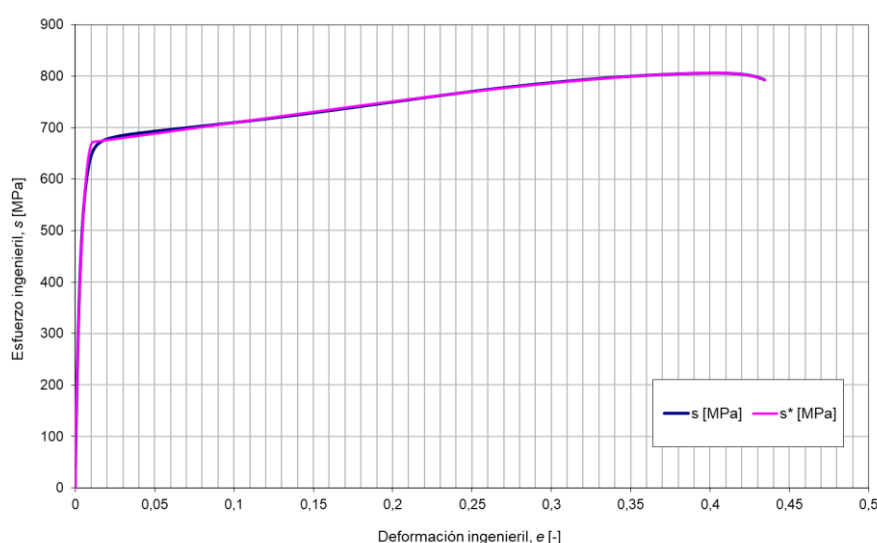


Figura 4.22. Curvas de tracción y simulación del acero 304 en estado de recepción (A-03).

Los valores de los parámetros correspondientes a esta condición se pueden ver en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero 304 en estado de recepción.

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
0,01094	0	0,3995	0,4343	672,2586	0	806,3383	792,6848	0,5329	45,2736	1,1936	-0,7203	3,3680

B. Acero 304 estabilizado en agua (1h)

Las curvas obtenidas para el ensayo de tracción de este material se muestran en la Fig. 4.23. El tratamiento permite un gran alivio de las tensiones internas del material y como se puede observar un aumento importante de su ductilidad, llegando a superar el 60 % de elongación. Este aumento de la ductilidad también va acompañado de una reducción de la resistencia mecánica del material, el cual lo ha hecho en torno a 100 MPa.

La simulación realizada para este material es de una gran calidad, aunque al igual que pasaba en el caso anterior, no se consigue la continuidad suave en la zona de unión de la zona elástica con la plástica de la curva del ensayo.

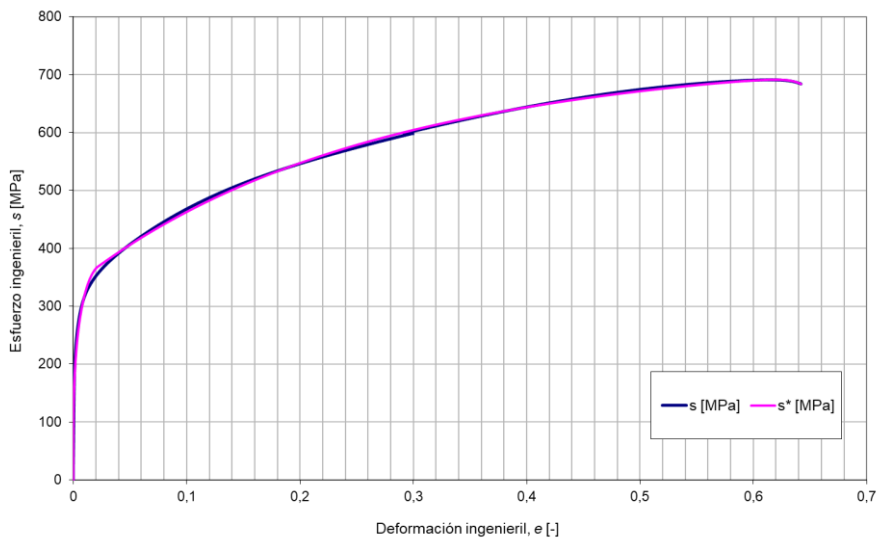


Figura 4.23. Curvas de tracción y simulación del acero 304 estabilizada en agua (A-01).

La Tabla 4.12 muestra los valores resultantes del ajuste.

Tabla 4.12. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero 304 estabilizada en agua.

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
0,0208	0	0,6163	0,6420	367,2350	0	691,2441	684,0121	0,2570	6,9488	2,5989	1,8530	3,2992

C. Acero 304 estabilizado en salmuera (1h)

La curva experimental y simulada de este ensayo se pueden ver en la Fig. 4.24. El tratamiento de este material provocará que el temple sea de mayor rapidez, permitiendo una mayor transferencia de calor por convección. Sin embargo, no se ven cambios significativos con respecto al temple realizado en agua.

El ajuste conseguido es de calidad similar al anterior, con ese problema en la unión de las zonas elástica y plástica. Además, en este caso y el anterior, se han conseguido resultados similares en los dos ensayos realizados por condición, por lo que es indicativo de que se han realizado de manera efectiva.

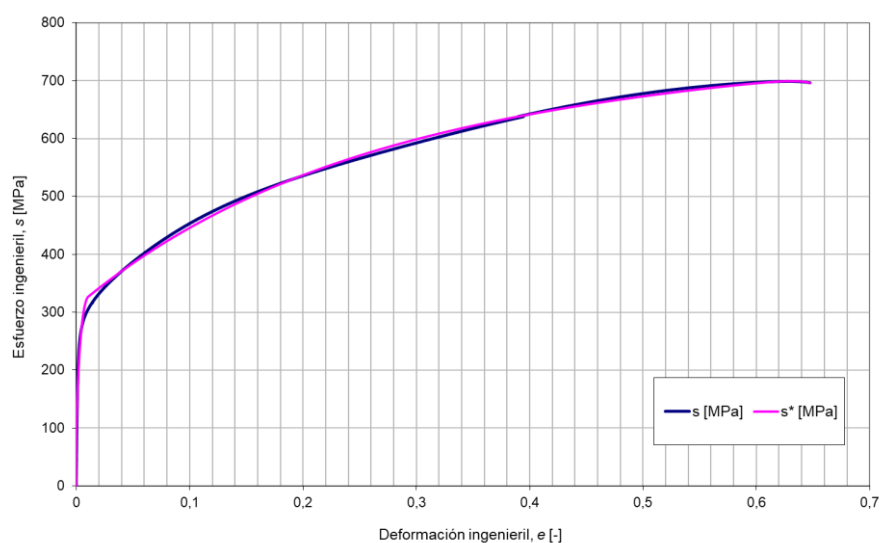


Figura 4.24. Curvas de tracción y simulación del acero 304 estabilizada en salmuera (A-11).

Los valores característicos de estas gráficas se muestran en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Valores de los parámetros implicados en la simulación del acero 304 estabilizada en salmuera.

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
0,0101	0	0,6274	0,6470	326,3317	0	699,1048	696,3581	0,3463	26,1378	2,6297	1,9343	3,3617

Se puede ver la gran efectividad de estos ajustes por los valores conseguidos de la R^2 en estos casos, en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14. Valores de R^2 correspondientes a las probetas de acero 304.

Probeta	A01	A03	A11
R^2	0,9984	0,9987	0,9978

4.3 Ajustes del aluminio 2011

Con este material se van a mostrar probetas ensayadas con seis diferentes tratamientos térmicos y en el caso del tratamiento T6, a velocidades de deformación diferentes, pudiendo ver el modelo de las sensibilidades.

A. Aluminio 2011 con recocido total (O)

En este caso, se han ensayado cuatro probetas, esto se debe a que dos de ellas fueron ensayadas justo a posteriori del tratamiento, la correspondiente a las Fig. 4.25, y las otras dos, días después de este

tratamiento, mostrado en la Fig. 4.26. Se puede apreciar que este lapso ha afectado significativamente al material, aumentando en torno a 40 MPa su resistencia máxima de tracción. Esto se debe a que el paso de los días ha permitido un alivio de las tensiones internas muy importante, permitiendo soportar mayores esfuerzos y manteniendo la ductilidad del material.

En este caso, aunque se puede apreciar un ruido en nuestra curva real el cual se creó que se debe a alguna vibración en el extensómetro, no afecta a la curva de tracción obtenida y nuestra simulación se ajusta muy bien a esta realidad, además de que este material no cuenta con zona de fluencia, lo que lo facilita.

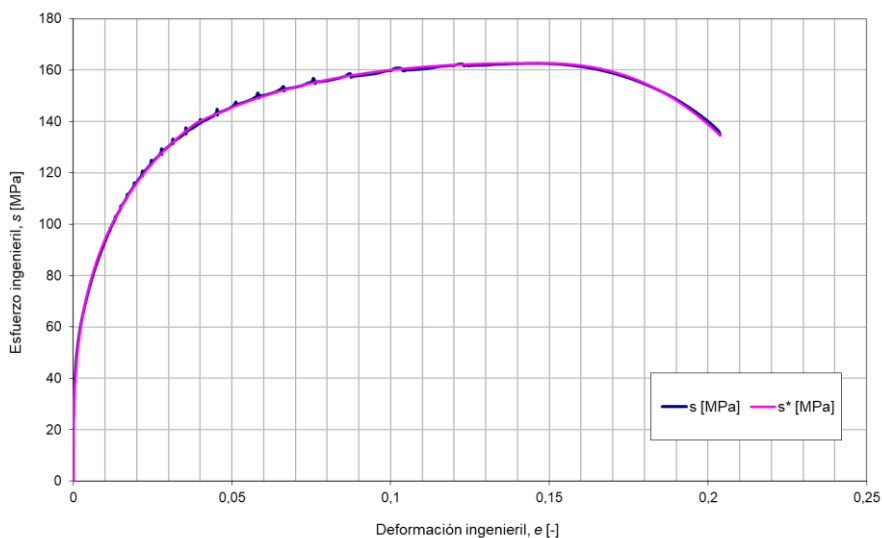


Figura 4.25. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 recocido ensayada justo después del tratamiento (O-01).

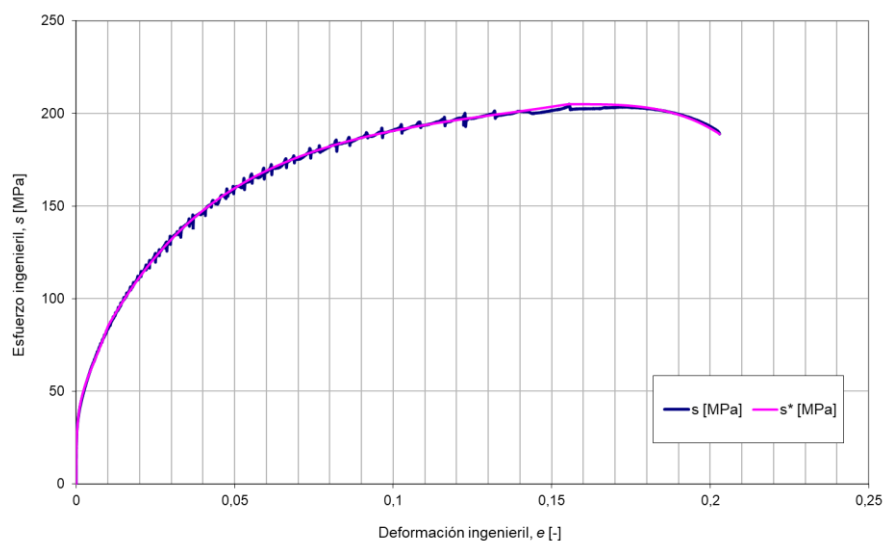


Figura 4.26. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 ensayada con un lapso después del tratamiento (O-03).

Los valores característicos de estas gráficas corresponden a los mostrados en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Valores de los parámetros implicados en la simulación del aluminio 2011 ensayada con un lapso después del tratamiento.

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
0,0385	0	0,1461	0,2037	139,3095	0	162,7007	134,6877	0,3034	1,3703	2,8018	3,8043	2,4118

B. Aluminio 2011 con recocido contra acritud (H2)

En este caso se muestra la gráfica representada en la Fig. 4.27. Con este recocido contra acritud se consiguen efectos similares al recocido total, pero en menor escala, alcanzando una resistencia mecánica y ductilidad menor.

Se puede ver que al igual que en casos anteriores, el ajuste no es tan suave en algunos tramos como lo es el ensayo, sobre todo en la transición del estado elástico al plástico.

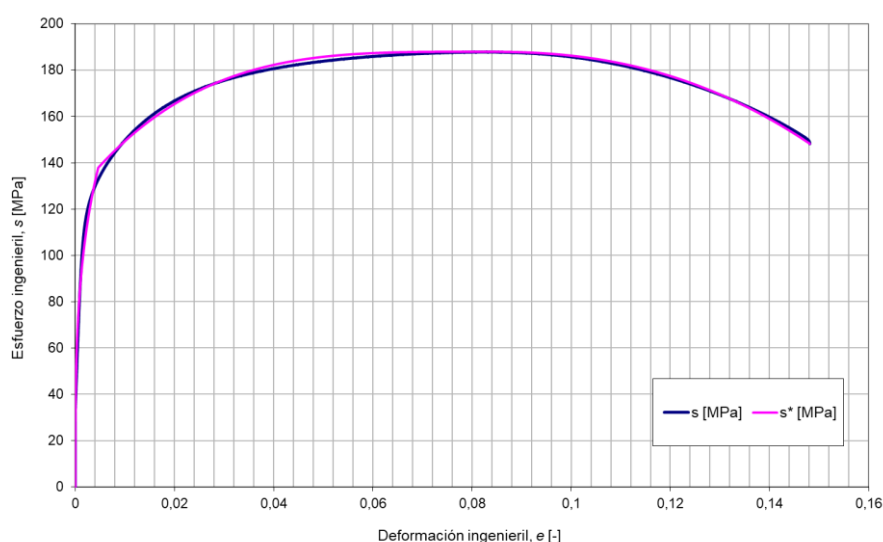


Figura 4.27. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con recocido contra acritud (H2-01).

La Tabla 4.16 muestra los valores usados para la realización del ajuste.

Tabla 4.16. Valores de los parámetros implicados en la simulación del aluminio 2011 con recocido contra acritud.

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
0,0037	0	0,0731	0,1314	131,3486	0	189,541	149,7209	0,4116	90,6130	4,6198	43,4944	2,1244

C. Aluminio 2011 con solubilización y enfriamiento lento (O1)

Como se puede observar en la Fig. 4.28, este tratamiento permite un aumento de la ductilidad y una buena resistencia mecánica, con resultados similares al recocido con lapso.

En esta condición se consigue un ajuste realmente bueno, como se puede ver en la Fig. 4.28, aunque con esa presencia de ruido en las curvas del ensayo

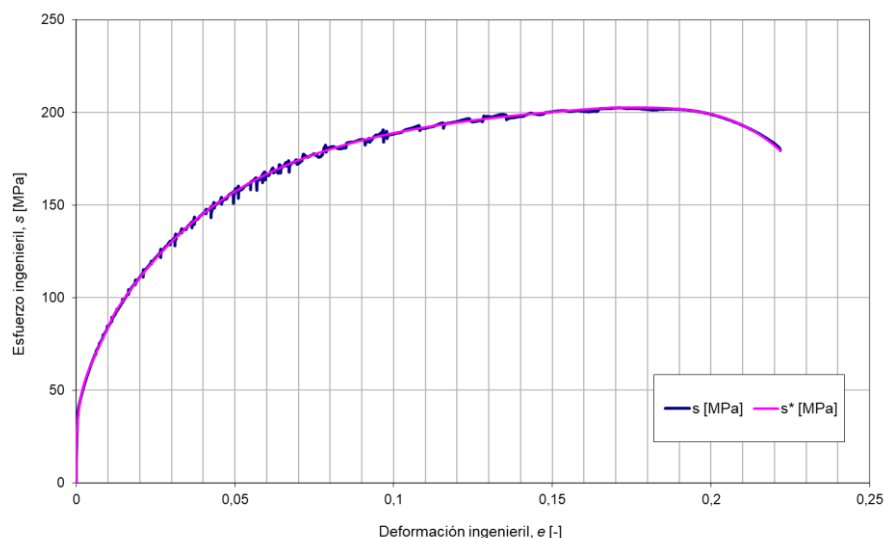


Figura 4.28. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con solubilización y enfriamiento lento (O1-01).

Los valores correspondientes a esta condición se pueden ver en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17. Valores de los parámetros implicados en la simulación del aluminio 2011 con solubilización y enfriamiento lento.

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
0,0121	0	0,1712	0,2218	91,9641	0	202,6665	179,4717	0,2954	-16,9953	3,8081	13,9002	3,3021

D. Aluminio 2011 con solubilización y atemperado (SH)

Como se puede observar en la Fig. 4.29, este tratamiento provoca un gran aumento de la resistencia máxima de tracción, de más de 100 MPa.

El ajuste logrado de la simulación es muy bueno también, se debe en parte a la suavidad con la que evolucionan las curvas de los ensayos realizados, aunque hay un leve desajuste en la transición del estado elástico al plástico, pero de mucha menor importancia que en casos anteriores.

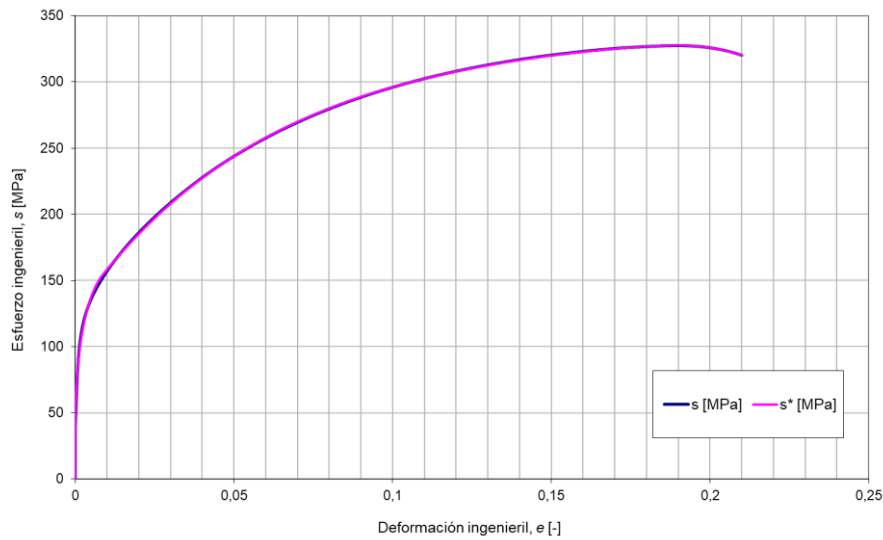


Figura 4.29. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con solubilización y atemperado (SH-03).

Los valores característicos de este ajuste son los mostrados en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18. Valores de los parámetros implicados en la simulación del aluminio 2011 con solubilización y atemperado.

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
0,0084	0	0,1894	0,2099	153,7507	0	327,6273	320,1903	0,2592	9,4602	3,1188	7,5870	2,1809

E. Aluminio 2011 con solubilización, atemperado y sobremadurado (T7)

En vez de seguir el orden establecido en el capítulo 2, al igual que hicimos en el acero C45, se va a variar el orden para dejar al final el tratamiento T6 con sus respectivos ensayos a diferentes velocidades de deformación. Ahora se va a mostrar el ensayo de solubilización más atemperación y una sobremaduración, donde al igual que en el caso anterior se consigue elevar la resistencia máxima de tracción.

El ajuste conseguido para esta condición, como se viene repitiendo para este material, es muy fiel a la realidad, mostrados en las Fig. 4.30.

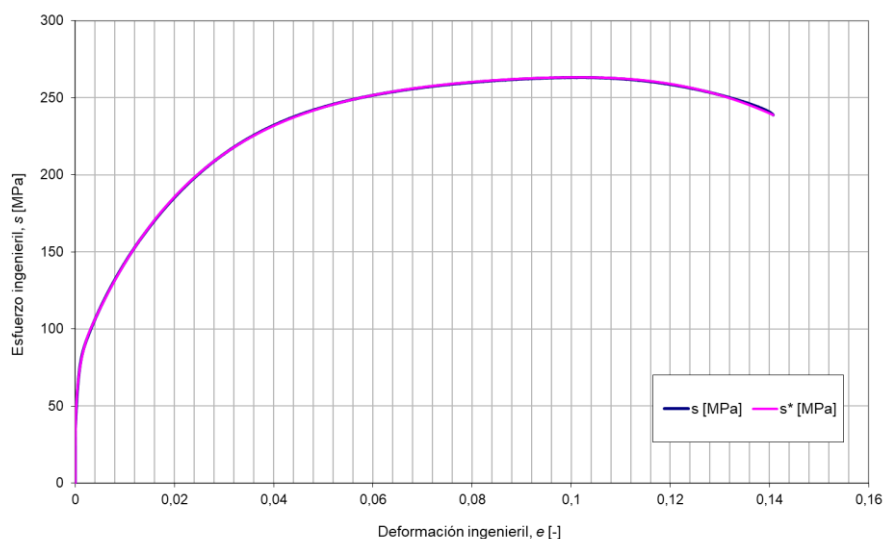


Figura 4.30. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con tratamiento T7 (T7-01).

La Tabla 4.19 muestra los valores característicos de esta condición.

Tabla 4.19. Valores de los parámetros implicados en la simulación del aluminio 2011 con tratamiento T7.

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
0,0033	0	0,1008	0,1407	102,2187	0	263,2758	238,8483	0,2470	6,8639	4,2776	22,0961	2,3833

Como conclusión, en la Tabla 4.20 se representan los valores de R^2 para todos los ajustes de este material, que como viene repitiéndose, son unos valores muy cercanos a la unidad y por lo tanto de gran calidad.

Tabla 4.20. Valores de R^2 correspondientes a las probetas de aluminio 2011.

Probeta	O-01	O-03	H2-01	O1-01	HS-03	T7-01
R^2	0,9993	0,9991	0,9945	0,9995	0,9998	0,9999

F. Aluminio 2011 con solubilización, atemperado y maduración artificial (T6)

A continuación, se van a tratar las diferentes curvas a diferentes velocidades de deformación, para ello el tratamiento elegido para realizar esto ha sido tratar al aluminio 2011 con una solubilización, más una atemperación y finalmente, una maduración artificial. Como se puede comprobar, con este tratamiento se consiguen las mejores propiedades mecánicas, alcanzado el valor más alto de los que hay de máxima resistencia a tracción.

En todos los casos el ajuste es bueno, sin embargo, en la transición de la zona elástica a la plástica hay un ligero desajuste, debido a que esa curva es algo más abrupta que en los anteriores casos, donde si se conseguía un buen ajuste en esa zona, provocando que haya un cambio de pendiente discontinuo.

Primeramente, se muestra el ensayo a velocidad de deformación recomendada por la norma de 0,0125 mm/s, correspondiente a la Fig. 4.31.

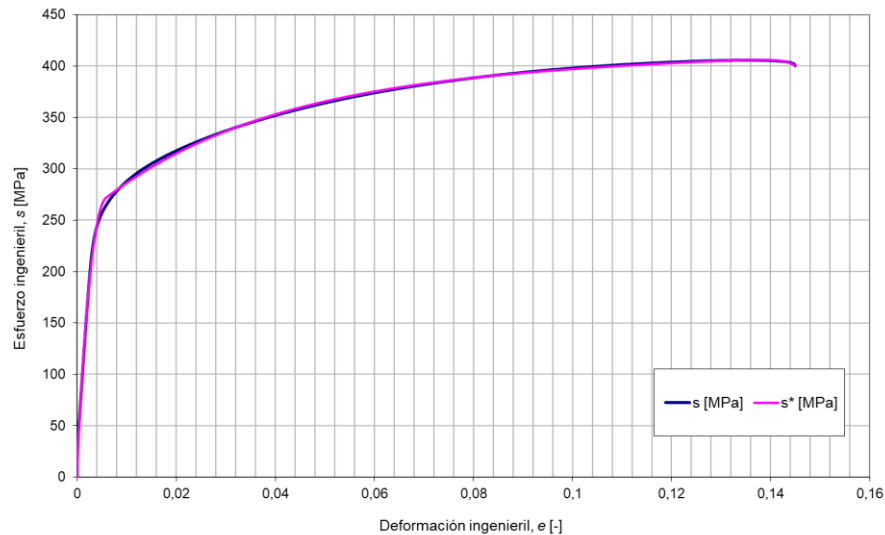


Figura 4.31. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con tratamiento T6 a 0,0125 mm/s (T6-01).

En segundo lugar, el ensayo a 0,335 mm/s, correspondiente a la Fig. 4.32, el cual no cumple con lo esperado teóricamente y no se produce un aumento en los valores de los esfuerzos.

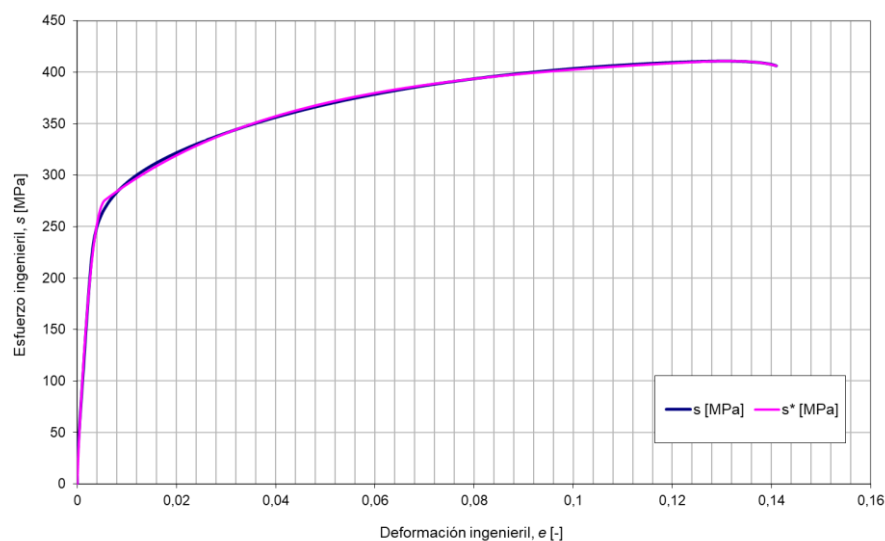


Figura 4.32. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con tratamiento T6 a 0,335 mm/s (T6-03).

En tercer lugar, el ensayo a 0,1 mm/s, mostrado en la Fig. 4.33, en el cual, al aumentar la velocidad de deformación se cumple la teoría y se obtienen valores de resistencia mayores.

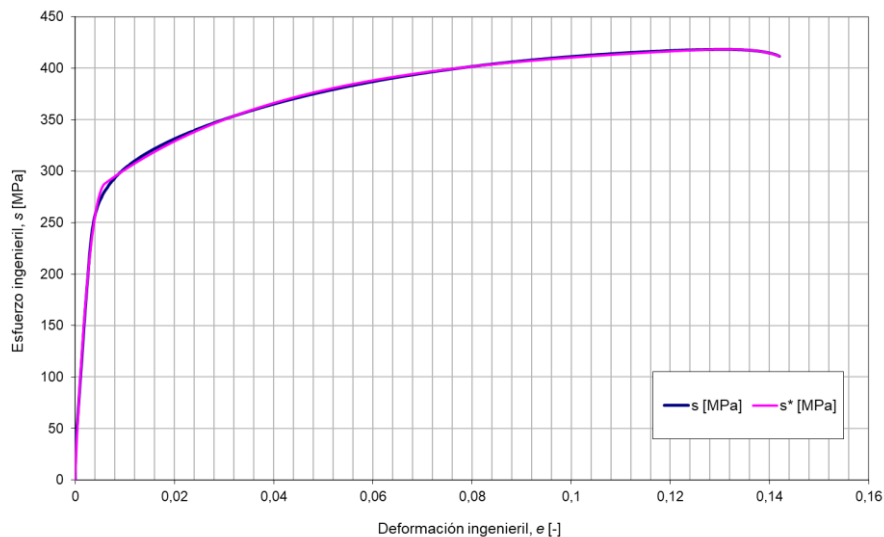


Figura 4.33. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con tratamiento T6 a 0,1 mm/s (T6-05).

Por último, el ensayo a 0,0035 mm/s, en la Fig. 4.34, donde los resultados son idénticos al de velocidad recomendada, lo que permite indicar que es una buena referencia de velocidad recomendada por la norma, ya que no se aprecian los efectos dinámicos con esta.

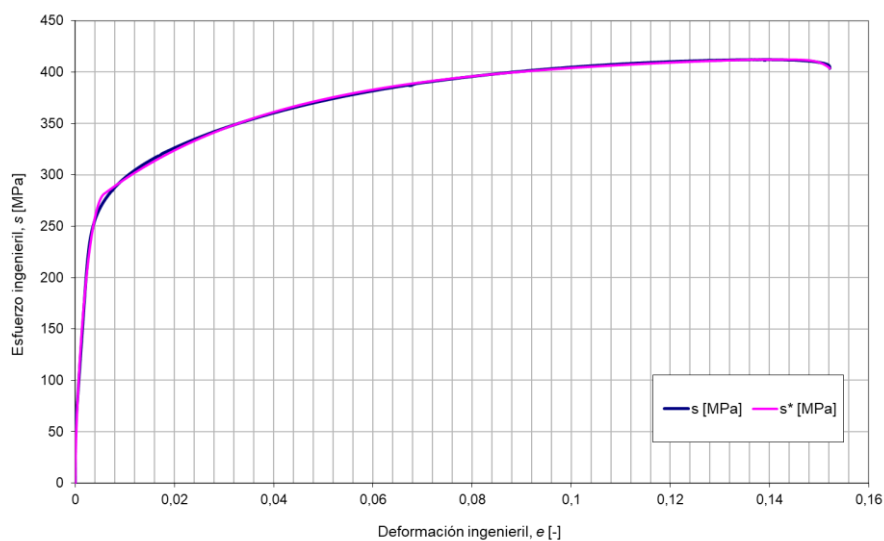


Figura 4.34. Curvas de tracción y simulación del aluminio 2011 con tratamiento T6 a 0,0035 mm/s (T6-07).

Asimismo, se muestran los valores de R^2 para los diferentes ajustes a diferentes velocidades del aluminio 2011 con tratamiento T6, en la Tabla 4.21, donde se aprecia que son muy cercanos a la unidad y, por lo tanto, muy coherentes con el obtenido en el ensayo.

Tabla 4.21. Valores de R^2 correspondientes a las probetas de aluminio 2011 con tratamiento T6 a diferentes velocidades de ensayo.

Probeta	T6-01	T6-03	T6-05	T6-07
R^2	0,9990	0,9991	0,9990	0,9985

Todas estas curvas se recogen en las Fig. 4.35 y Fig. 4.36. La primera representa los ensayos realizados, en la cual se puede ver como no se ajusta a lo que realmente debería salir, ya que tanto en el caso del ensayo realizado a menor velocidad que tiene valores superiores de resistencia que el de la velocidad de referencia, como el de velocidad mayor, que tiene unos valores de resistencia menores que uno hecho a menor velocidad de deformación. Donde si se observa coherencia es en los valores de deformación alcanzados, teniendo un valor mayor cuanto más lento es el ensayo. La segunda muestra las curvas obtenidas mediante los ajustes, en los cuales se puede apreciar que lo obtenido no refleja lo de la realidad, ya que los tres de menores valores de resistencias de tracción obtenidos en los ensayos, se muestran casi superpuestos, no apreciándose diferencia apenas entre estos, solo en la deformación final que si está conseguida al ser un valor que se introduce.

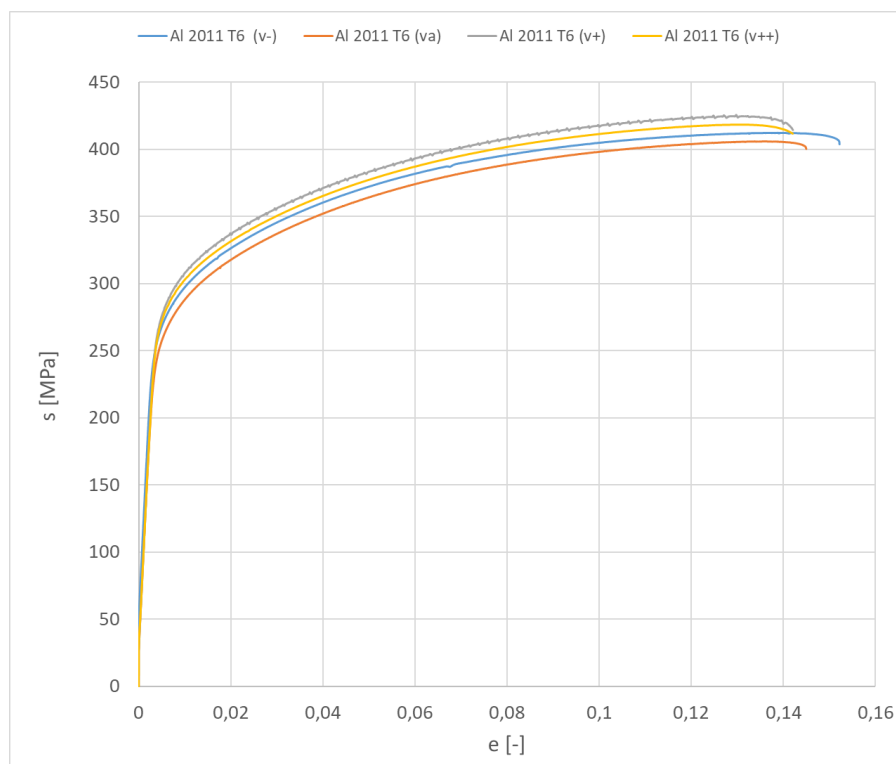


Figura 4.35. Comparación de los diferentes ensayos del aluminio 2011 T6 a velocidades de deformación diferentes.

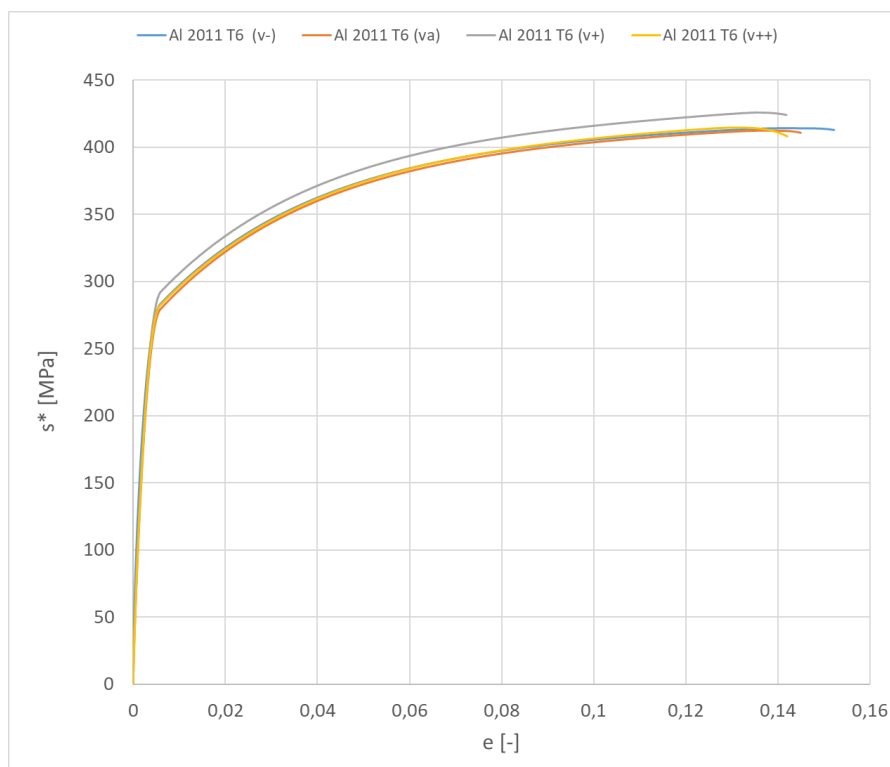


Figura 4.36. Comparación de las diferentes simulaciones del Aluminio 2011 T6 a velocidades de deformación diferentes.

Ahora se va a proceder del mismo modo como se procedió con el acero C45, y se representará la dependencia de los diferentes parámetros a destacar de las curvas de tracción que hemos considerado en el capítulo 3, frente a la velocidad de deformación. Para ello, como se comentó en el material anterior, se procede a realizar una media de estos parámetros al tener normalmente dos ensayos por condición, esto se muestra en la Tabla 4.22.

Tabla 4.22. Valores de la curva de tracción del aluminio 2011 normalizado a diferentes velocidades de deformación.

vel [mm/s]	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
0,0035	0,0060	0,0000	0,1399	0,1589	283,7	0,0	414,1	398,5	0,5295	78,6970	3,6850	15,2859	5,7228
0,0125	0,0059	0,0000	0,1358	0,1492	279,3	0,0	412,3	402,9	0,6924	105,8047	3,6005	15,7051	4,7340
0,100	0,0061	0,0000	0,1352	0,1483	292,5	0,0	425,8	414,6	0,6843	101,8671	3,4516	15,4232	2,8440
0,335	0,0058	0,0000	0,1299	0,1415	282,2	0,0	414,6	408,9	0,6992	109,6921	3,3544	14,7387	3,2301

Posteriormente, se realiza la normalización de estos parámetros respecto a los valores de referencia tomados a velocidad de 0,0125 mm/s, como se puede ver en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23. Valores normalizados de la curva de tracción del aluminio 2011 normalizado a diferentes velocidades de deformación.

vn	e _{LE}	def	e _M	e _F	S _{LEsup} [MPa]	S _{LEinf} [MPa]	s _M [MPa]	s _F [MPa]	k	m	n	n̄	p
0,3	1,02	-	1,0302	1,0651	1,0157	1,0157	1,0044	0,9891	0,7647	0,7438	1,0235	0,9733	1,2089
1,0	1,00	-	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
8,0	1,04	-	0,9956	0,9943	1,0475	1,0475	1,0327	1,0290	0,9883	0,9628	0,9587	0,9820	0,6008
26,8	0,99	-	0,9568	0,9484	1,0105	1,0105	1,0056	1,0150	1,0098	1,0367	0,9316	0,9385	0,6823

Los primeros gráficos de la Fig. 4.37 muestran unas gráficas que no nos muestran un resultado útil. El primero, del límite elástico, con un R² tan bajo, no nos aporta una tendencia fiel a algún comportamiento, por lo que o habría que aumentar los ensayos para ver una posible tendencia o repetirlos de una manera más precisa e intentar obtener algo. El segundo es el gráfico del intervalo de fluencia, el cual en este material es inexistente, por eso que su valor es siempre 0.

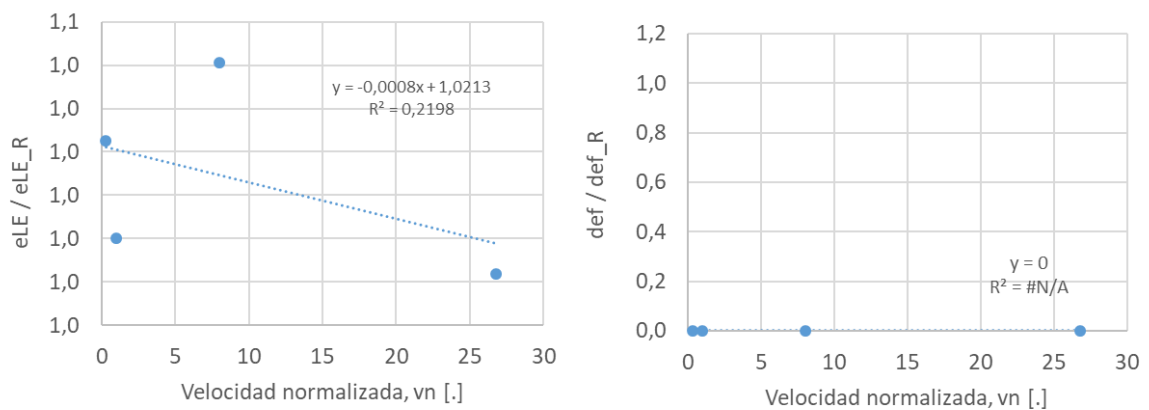


Figura 4.37. Representación normalizada de la deformación del límite elástico a la izquierda y a la derecha el intervalo de la zona de fluencia frente a la velocidad de deformación normalizada del aluminio 2011.

Esta siguiente Fig. 4.38 muestra los gráficos de las deformaciones máxima y de rotura las cuales desciende linealmente. Este comportamiento efectivamente es el esperado por la teoría, donde a medida que aumentamos la velocidad del ensayo disminuye la ductilidad del material.

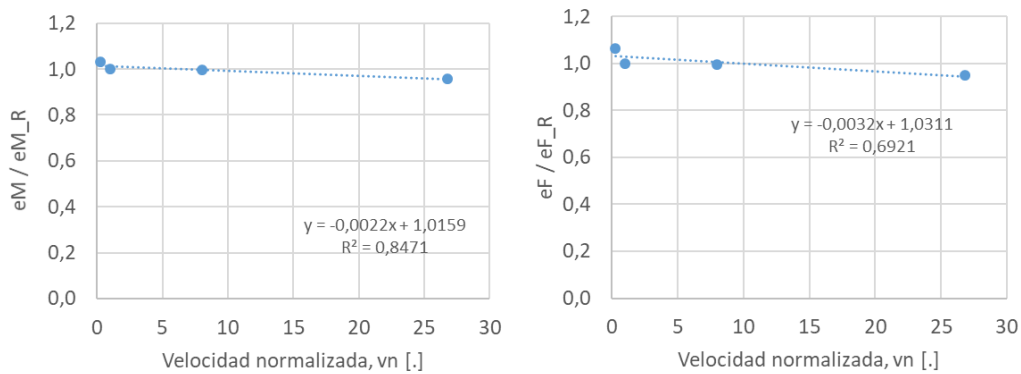


Figura 4.38. Representación normalizada de la deformación máxima a la izquierda y a la derecha la de fractura frente a la velocidad de deformación normalizada del aluminio 2011.

Tanto en la Fig. 4.39 y Fig. 4.40 se observa la variación de las resistencias a tracción, las cuales apenas varían, teniendo una tendencia casi constante, ya que el crecimiento es muy lento. Esto no es lo esperado, pero se trabajará con estos resultados.

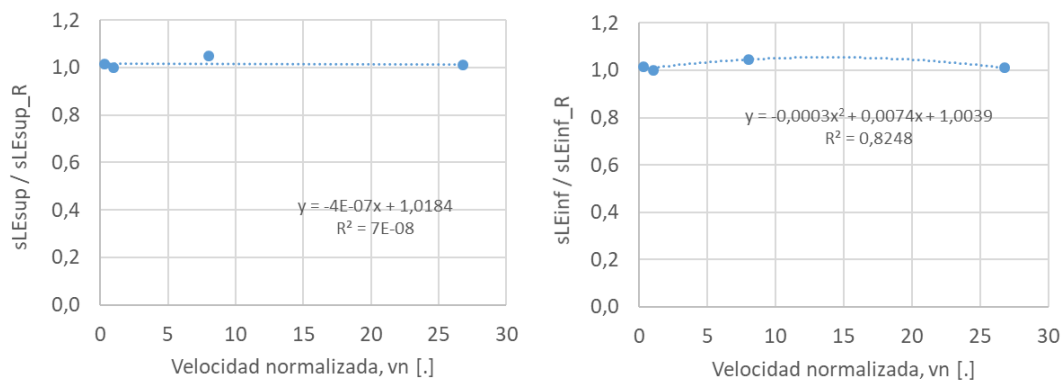


Figura 4.39. Representación normalizada del límite elástico superior a la izquierda y a la derecha el superior frente a la velocidad de deformación normalizada del aluminio 2011.

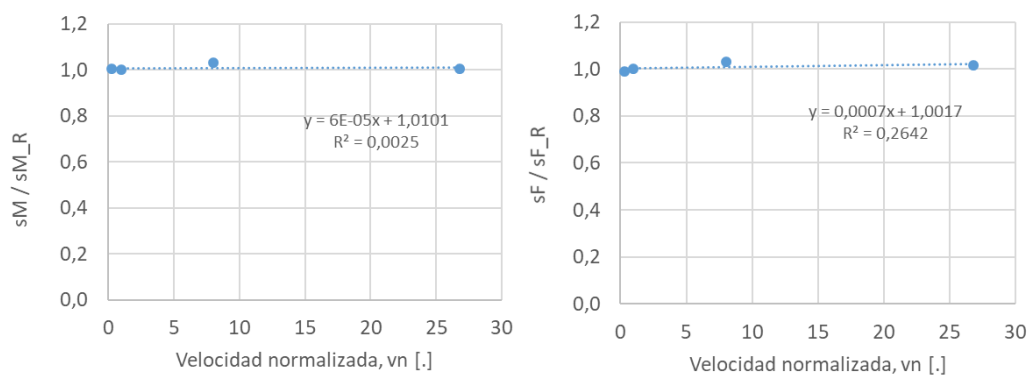


Figura 4.40. Representación normalizada de la resistencia máxima a la izquierda y a la derecha la resistencia a fractura frente a la velocidad de deformación normalizada del aluminio 2011.

Por último, las Fig. 4.41, Fig. 4.42 y Fig. 4.43, representan la evolución de los parámetros k , m , n , \tilde{n} , p frente a distintas velocidades del ensayo, donde se puede ver un comportamiento lineal creciente en k y decreciente en n y unos parabólicos en m , \tilde{n} y p . Los valores de k y m tienen unos valores de R^2 muy bajos, por lo que los resultados obtenidos no dan una tendencia clara de estos parámetros.

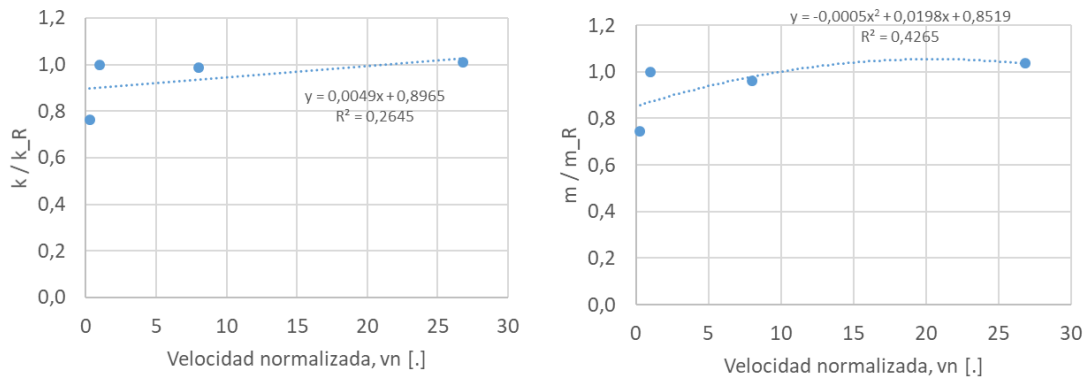


Figura 4.41. Representación normalizada del parámetro k a la izquierda y a la derecha el m frente a la velocidad de deformación normalizada del aluminio 2011.

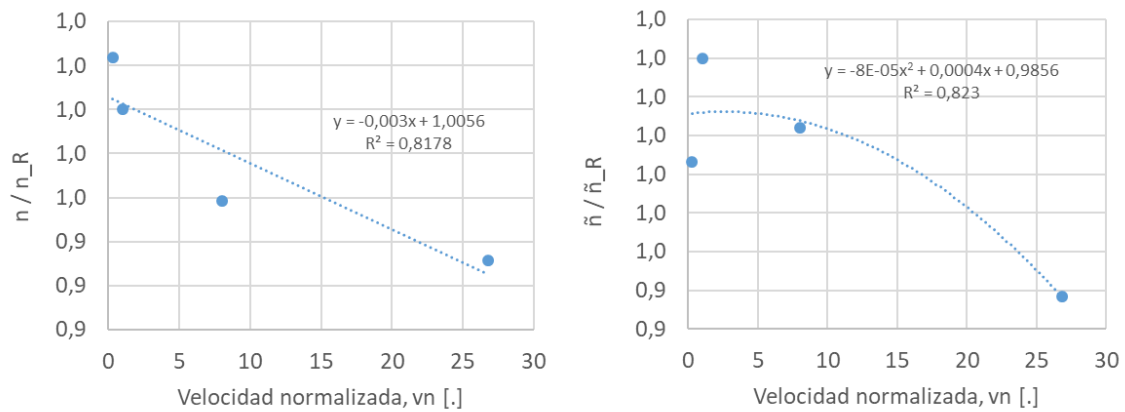


Figura 4.42. Representación normalizada del parámetro n a la izquierda y a la derecha el \tilde{n} frente a la velocidad de deformación normalizada del aluminio 2011.

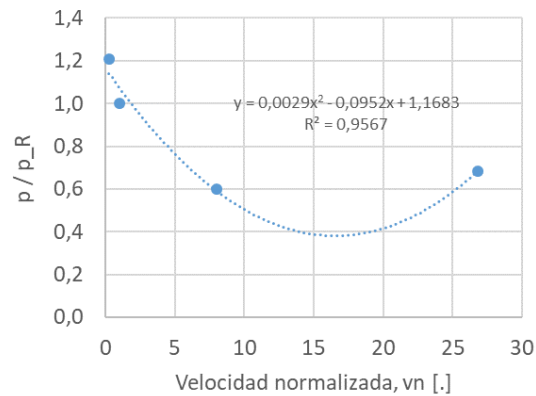


Figura 4.43. Representación normalizada del parámetro p frente a la velocidad de deformación normalizada del aluminio 2011.

Tras esto, como en el caso del acero C45, se muestra la comparativa entre la tendencia que siguen la deformación y el esfuerzo en promedio, con lo que el modelo de sensibilidad proporciona. Esto se ilustra en la Fig. 4.44, donde se puede ver que tiene una buena precisión, también en este caso, mejor en los esfuerzos, con unos resultados coherentes con lo teóricamente esperado.

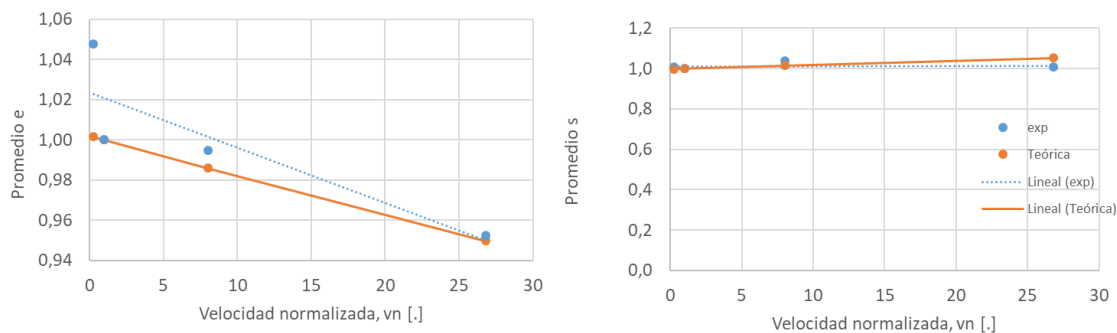


Figura 4.44. Comparación entre las tendencias de la deformación promedio a la izquierda y del esfuerzo promedio a la derecha, con la tendencia del modelo teórico de sensibilidades del aluminio 2011.

4.4 Ajustes del latón

Para este material únicamente se tienen muestras de un mismo tipo de condición, las cuales se han ensayado a diferentes velocidades de deformación.

Como viene pasando desde anteriores condiciones, el ajuste logrado está muy conseguido y además este material no cuenta con zona de fluencia. Sin embargo, el tramo de enlazamiento de la zona elástica con la plástica tiene esa un cambio de pendiente algo grande, en lugar de evolucionar de forma continua como ocurre en la realidad en materiales con ausencia de zona de fluencia.

Primeramente, el ensayo realizado a la velocidad recomendada por la norma, de 0,0125 mm/s, correspondiente a la Fig. 4.45.

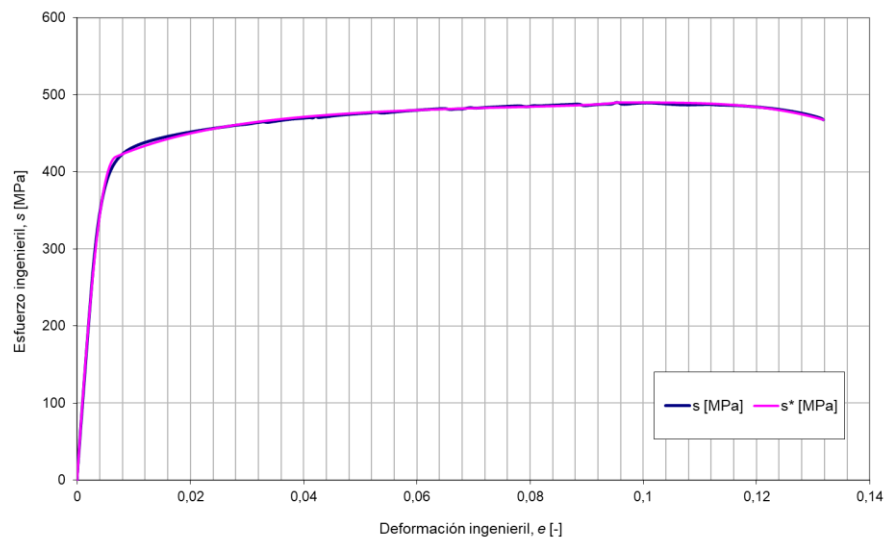


Figura 4.45. Curvas de tracción y simulación del latón a 0,0125 mm/s (L-01).

En segundo lugar, el ensayo a la mayor velocidad de deformación, 0,335 mm/s, mostrado en la Fig. 4.46, que no muestra casi ningún cambio en los valores de esfuerzos alcanzados con el anterior e incluso se puede apreciar un incremento en la ductilidad, al lograr una deformación mayor, lo cual contradice a la teoría.

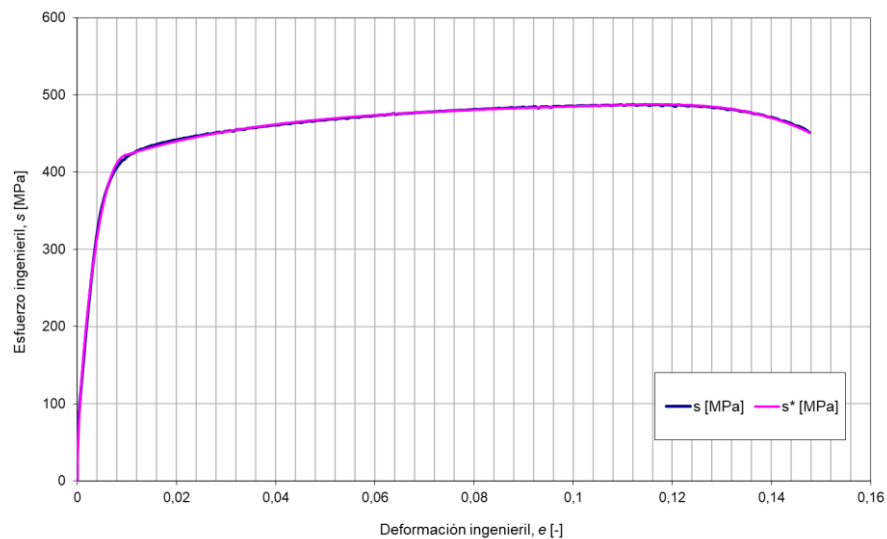


Figura 4.46. Curvas de tracción y simulación del latón a 0,335 mm/s (L-03).

En tercer lugar, el ensayo a 0,1 mm/s, en la Fig. 4.47, donde se puede apreciar un leve incremento en la resistencia máxima alcanzada, lo teóricamente esperado.

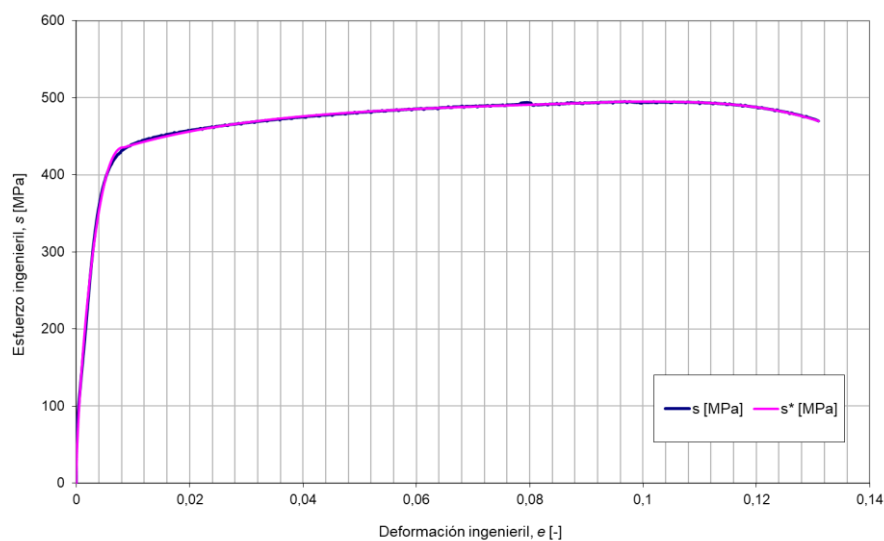


Figura 4.47. Curvas de tracción y simulación del latón a 0,1 mm/s (L-05).

Por último, el ensayo a 0,0035 mm/s, cuya gráfica es la Fig. 4.48, la cual reduce tanto sus valores de esfuerzos alcanzados como su deformación, teóricamente no esperado.

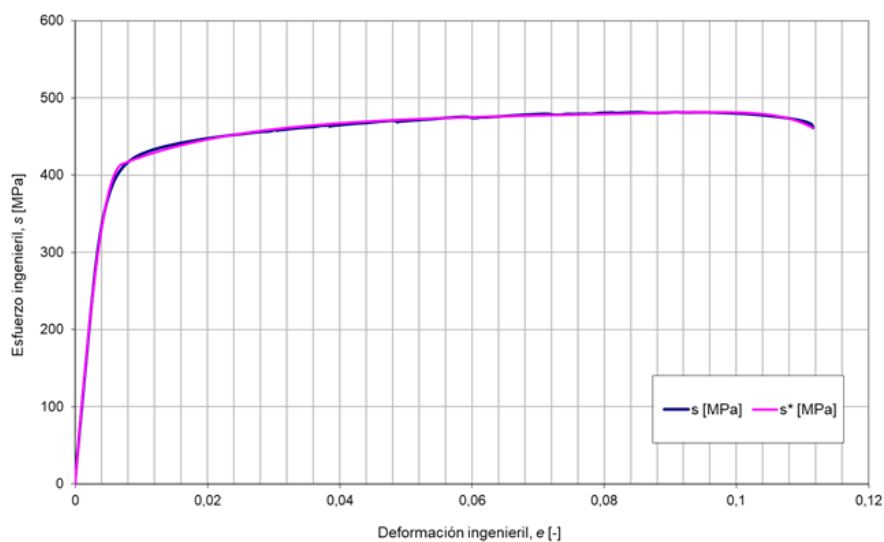


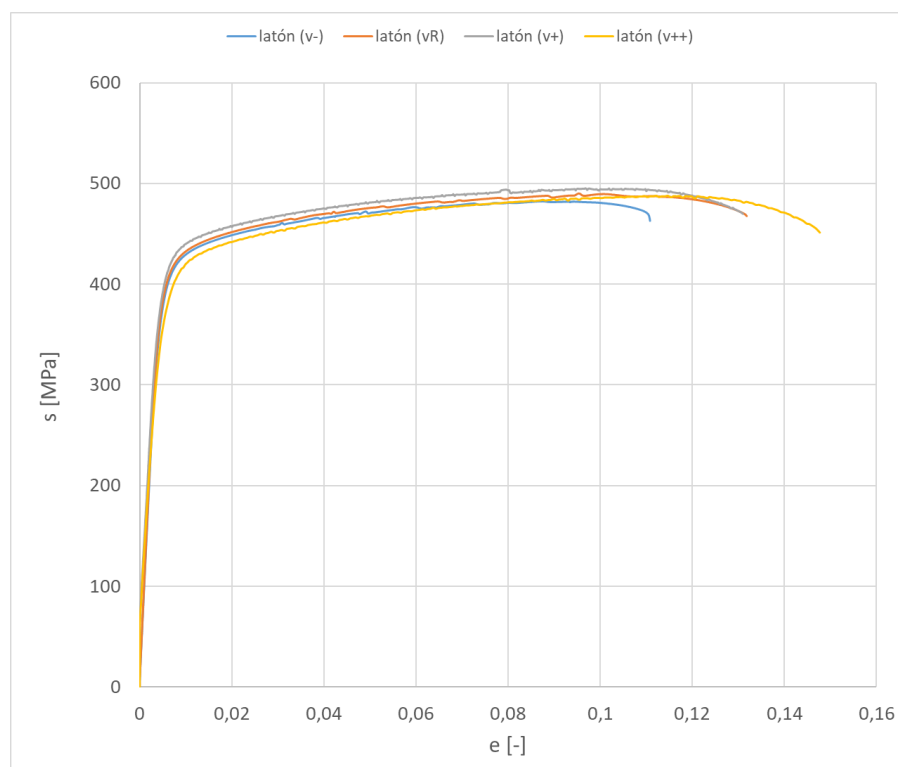
Figura 4.48. Curvas de tracción y simulación del latón a 0,0035 mm/s (L-08).

Como conclusión, se representan los valores de R^2 de estos ajustes en la Tabla 4.24, que al igual que los anteriores casos, son muy cercanos a la unidad, señal de que el simulador logra una gran similitud con la realidad.

Tabla 4.24. Valores de R^2 correspondientes a las probetas de Latón a diferentes velocidades de ensayo.

Probeta	L-01	L-03	L-05	L-08
R^2	0,9993	0,9985	0,9975	0,9993

Todas estas curvas se encuentran resumidas en las Fig. 4.49 y Fig. 4.50, siendo la Fig. 4.49 la que abarca todas las curvas de los ensayos y la Fig. 4.50, la de las simulaciones realizadas. Los resultados obtenidos no concuerdan con la teoría, incluso se contradice en el caso de la ductilidad, ya que teóricamente al aumentar la velocidad disminuye. Dado todo esto, se deberían repetir los ensayos para tener una conclusión más válida. Por lo tanto, no se le puede achacar el mal resultado de la simulación de las curvas al modelo, ya que al ser un intervalo tan pequeño por el que discurren las curvas de tracción ensayadas, e incluso se cruzan entre sí, la simulación no ha logrado una importante distinción entre ellas, sobre todo a la hora de representar los esfuerzos por los que discurren las curvas realmente.

**Figura 4.49.** Comparación de los diferentes ensayos del latón a velocidades de deformación diferentes.

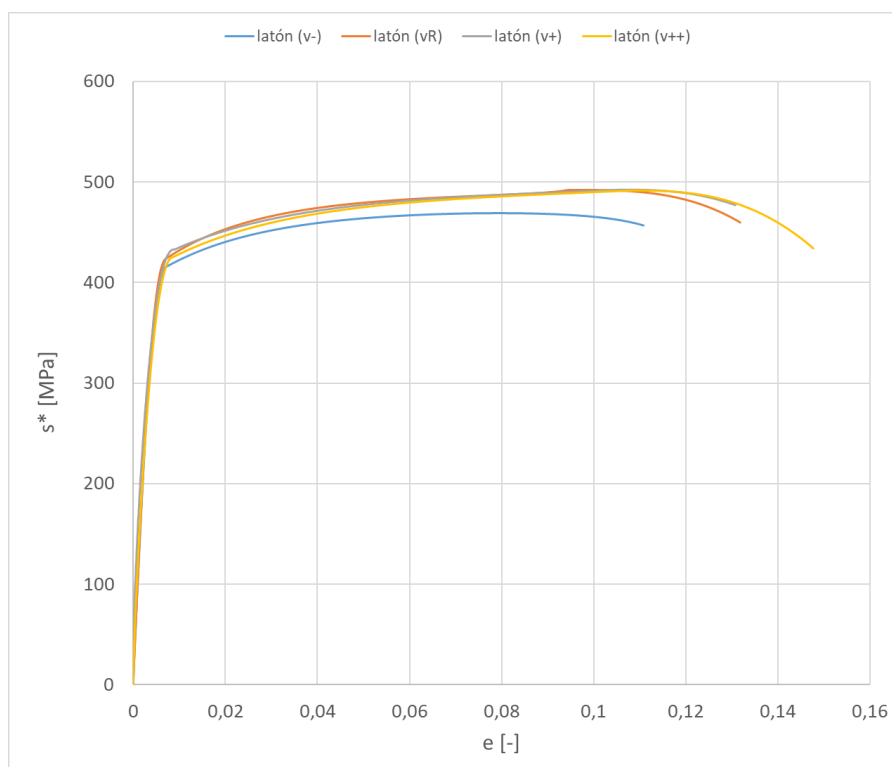


Figura 4.50. Comparación de las diferentes simulaciones del latón a velocidades de deformación diferentes.

A continuación, tal y como hemos realizado con los demás materiales, se elaboran unas tablas donde se sitúan la media de los valores de los ensayos, Tabla 4.25, y los valores normalizados en la Tabla 4.26.

Tabla 4.25. Valores de la curva de tracción del latón en los ensayos a diferentes velocidades de deformación.

vel [mm/s]	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
0,0035	0,0069	0,0000	0,1158	0,1445	414,9	414,9	482,0	462,0	0,8214	108,0414	4,2109	37,4824	5,5252
0,0125	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
0,100	0,0091	0,0000	0,1064	0,1386	432,8	432,8	492,3	460,9	0,5372	61,5270	3,3657	20,8748	2,6226
0,335	0,0087	0,0000	0,1081	0,1417	425,3	425,3	491,5	454,7	0,6595	76,3619	3,4796	21,8259	2,7188

Tabla 4.26. Valores normalizados de la curva de tracción del latón en los ensayos a diferentes velocidades de deformación.

vn	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
0,3	1,00	-	1,2253	1,1448	0,9806	0,9806	0,9795	0,9778	0,9954	0,9826	1,0611	1,0960	1,7636
1,0	1,00	-	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
8,0	1,31	-	1,1262	1,0981	1,0227	1,0227	1,0004	0,9754	0,6510	0,5596	0,8481	0,6104	0,8371
26,8	1,25	-	1,1442	1,1220	1,0050	1,0050	0,9987	0,9624	0,7991	0,6945	0,8768	0,6382	0,8678

Los valores normalizados se representan en las siguientes figuras, donde se ve su tendencia según el incremento de la velocidad del ensayo. Para empezar, como en el caso de aluminio 2011, la fluencia será un gráfico que no se comenta por la ausencia de esta zona en el material, por lo que siempre es 0. El gráfico de la deformación elástica, Fig. 4.51, crece linealmente, al contrario que los demás materiales, lo cual contradice a la teoría, además tenemos una R^2 bastante pequeña lo que muestra la arbitrariedad de los datos conseguidos, con los que no se puede garantizar que tengan esa tendencia.

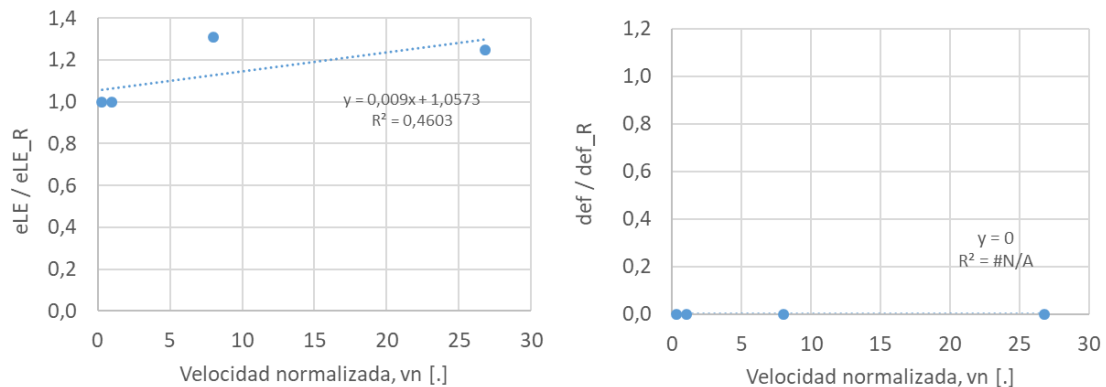


Figura 4.51. Representación normalizada de la deformación del límite elástico a la izquierda y a la derecha el intervalo de la zona de fluencia frente a la velocidad de deformación normalizada del latón.

Con la deformación máxima y de fractura, representados en la Fig. 4.52 pasa algo parecido a lo anteriormente comentado, con unas R^2 mucho más bajas, lo cual no permite hacer un análisis concluyente que se respalde en la teoría.

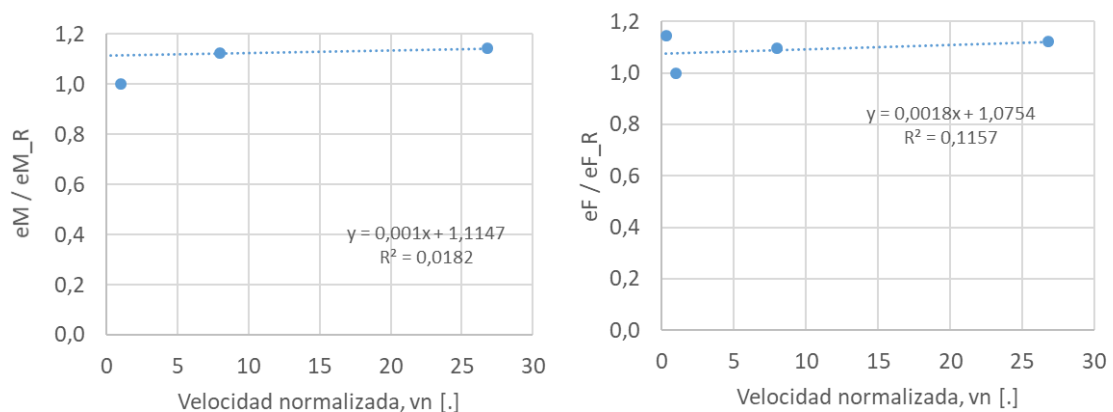


Figura 4.52. Representación normalizada de la deformación máxima a la izquierda y a la derecha la de fractura frente a la velocidad de deformación normalizada del latón.

Los valores de los límites elásticos, superior e inferior, mostrados en la Fig. 4.53, parecen que evolucionan de manera ligeramente creciente con la velocidad del ensayo, aunque el superior tiene una bajada en su ensayo a mayor velocidad. Teóricamente se debería dar este crecimiento con el incremento de la velocidad y se puede decir que los resultados son algo más positivos que el en el caso de las deformaciones, pero siguen sin ser adecuados al tener esa R^2 tan baja en el caso del superior y un ajuste parabólico en el inferior, que no es algo que se adapte a la realidad, por lo que carece de practicidad.

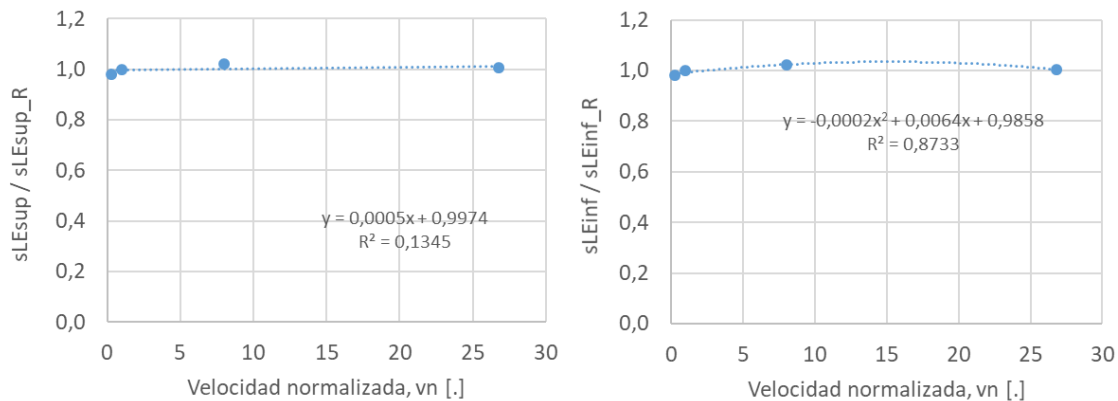


Figura 4.53. Representación normalizada del límite elástico superior a la izquierda y a la derecha el superior frente a la velocidad de deformación normalizada del latón.

Siguiendo con el análisis de la evolución de los esfuerzos, pasamos a la Fig. 4.54, donde la resistencia máxima tiene un comportamiento lineal creciente, aunque de pendiente muy pequeña, pero se ajusta a lo que se esperaría teóricamente, aunque con una R^2 muy bajo. Por otra parte, la resistencia de fractura disminuye linealmente, lo cual no concuerda con la teoría.

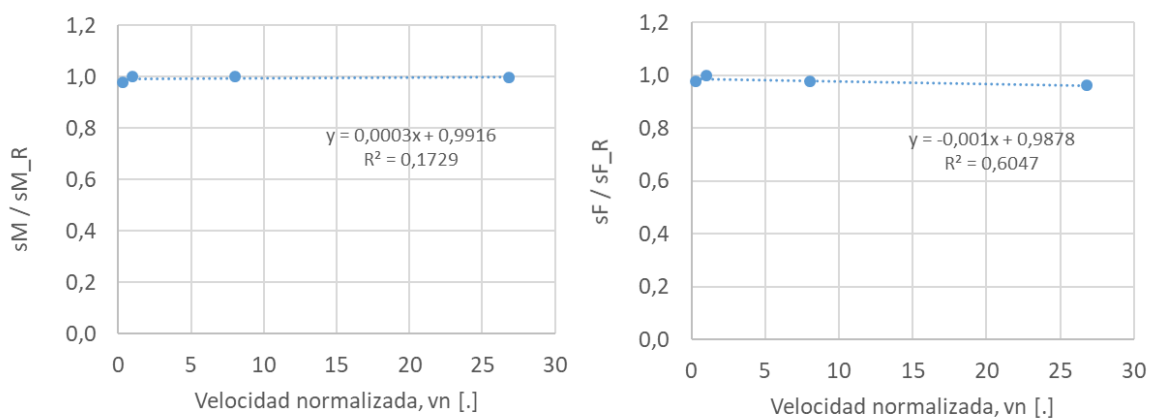


Figura 4.54. Representación normalizada de la resistencia máxima a la izquierda y a la derecha la resistencia a fractura frente a la velocidad de deformación normalizada del latón.

Por último, en las Fig. 4.55, Fig. 4.56 y Fig. 4.57 se observa la evolución de los parámetros de apoyo en el simulador, donde el valor k y n tienen un comportamiento lineal y tanto el m , como el \tilde{n} y el p siguen una tendencia parabólica. Salvo el m y el \tilde{n} , cuenta con una R^2 algo baja, por lo que no son datos muy fiables.

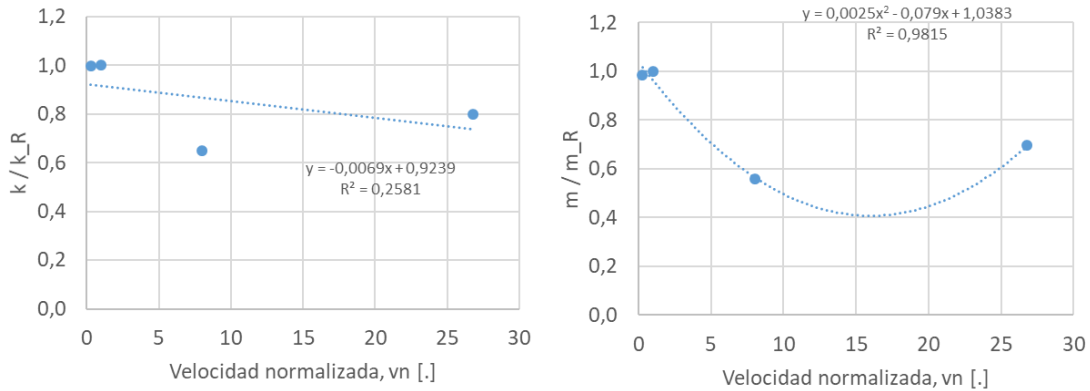


Figura 4.55. Representación normalizada del parámetro k a la izquierda y a la derecha el m frente a la velocidad de deformación normalizada del latón.

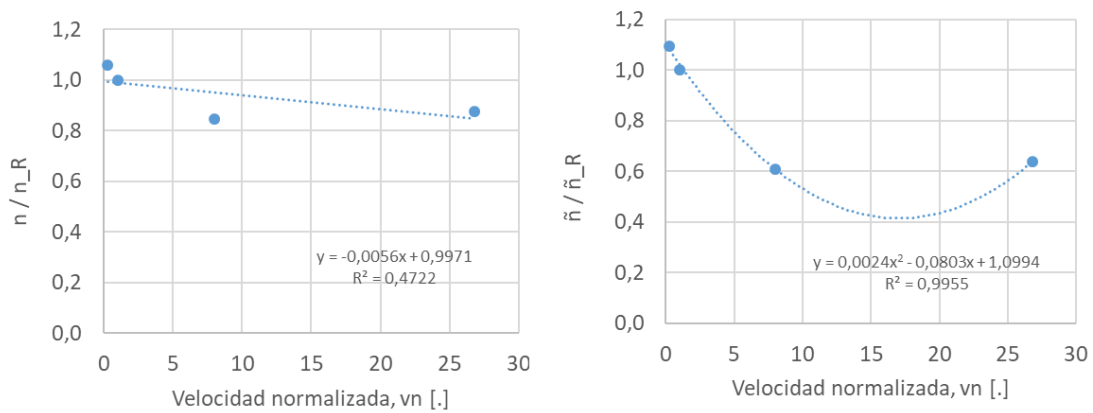


Figura 4.56. Representación normalizada del parámetro n a la izquierda y a la derecha el \tilde{n} frente a la velocidad de deformación normalizada del latón.

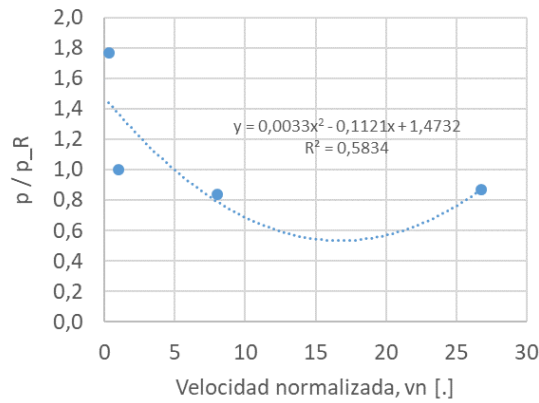


Figura 4.57. Representación normalizada del parámetro p frente a la velocidad de deformación normalizada del latón.

Para concluir, se muestra la comparativa de las tendencias de las deformaciones y esfuerzos promedios con el modelo de sensibilidades, observado en la Fig. 4.58, el cual como vemos en el caso de las deformaciones no consigue tener esa mayor tendencia mostrada por los ensayos. En parte, se debe a la gran arbitrariedad que se ha encontrado en los resultados de los ensayos, como se ha comentado anteriormente, lo que no permite una buena adaptabilidad. En cambio, como se ha visto, los esfuerzos tenían una tendencia mejor, y el modelo de sensibilidades ha conseguido lograr tener esa tendencia de manera muy similar.

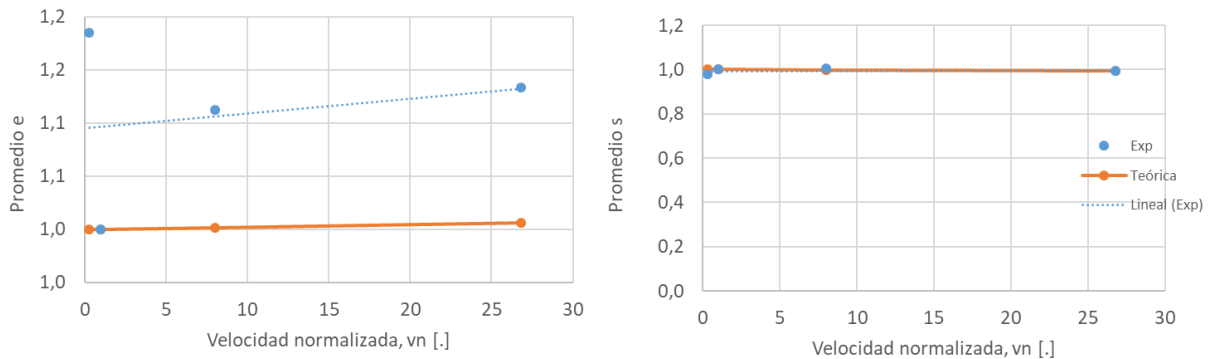


Figura 4.58. Comparación entre las tendencias de la deformación promedio a la izquierda y del esfuerzo promedio a la derecha, con la tendencia del modelo teórico de sensibilidades del latón.

4.5 Ajustes de la fundición gris

Finalmente, este es el último material para tratar, el cual al igual que en el caso anterior, se basa en una única condición de fundición gris que se ha ensayado a diferentes velocidades.

Para todos ellos, los ajustes conseguidos responden muy bien a la realidad, logrando un ajuste casi perfecto en todos los tramos. En parte se ha logrado tan buen ajuste porque la curva de tracción del ensayo

evoluciona de manera muy suave, es decir, sin cambios rápidos en la pendiente, permitiendo que se adapte bien a la realidad.

Primeramente, el ensayo realizado a velocidad de deformación recomendada por la norma (0,0125 mm/s), mostrado en la Fig. 4.59.

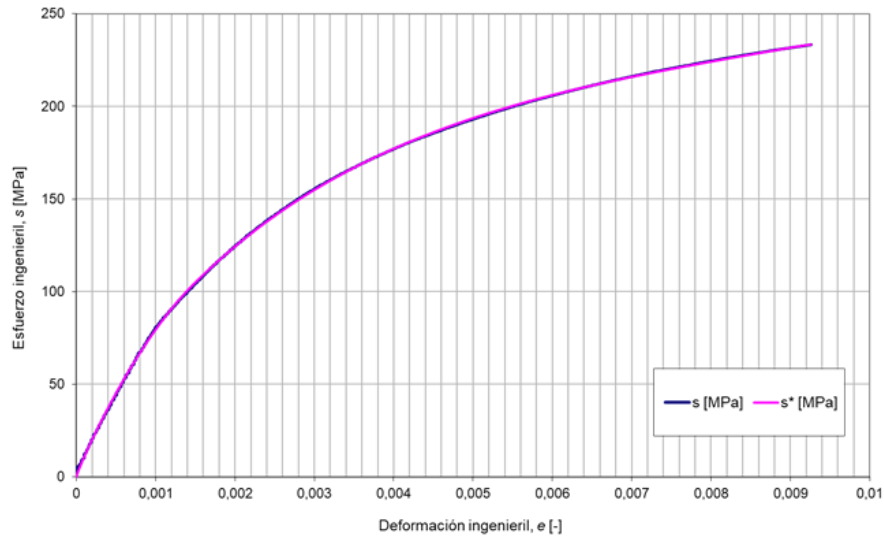


Figura 4.59. Curvas de tracción y simulación de la fundición gris a 0,0125 mm/s (F-02).

En segundo lugar, el ensayo a la velocidad mayor (0,335 mm/s), representado en la Fig. 4.60, que al igual que pasaba en el material anterior, no responde a lo teóricamente predicho, donde tendría que aumentar la resistencia mecánica y disminuir la ductilidad.

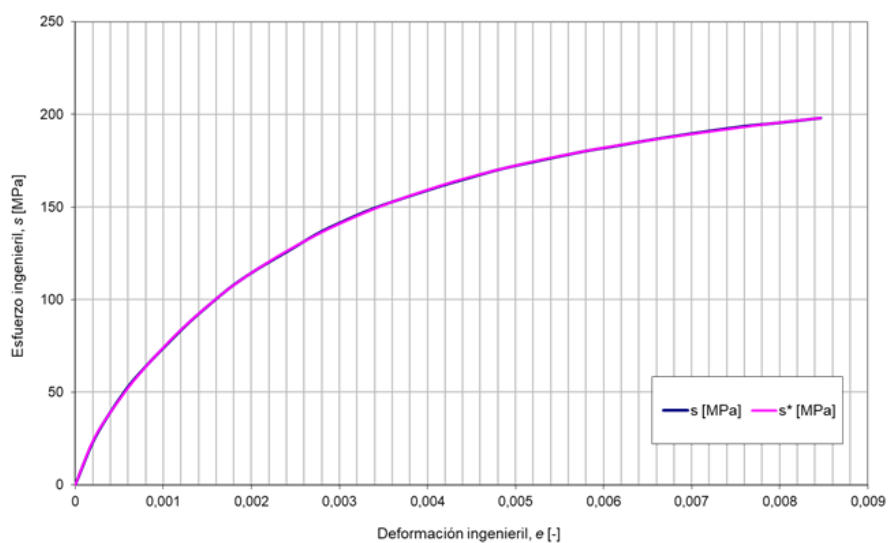


Figura 4.60. Curvas de tracción y simulación de la fundición gris a 0,335 mm/s (F-04).

Posteriormente, se muestra la velocidad de 0,1 mm/s en la Fig. 4.61, que tampoco cumple lo teórico.

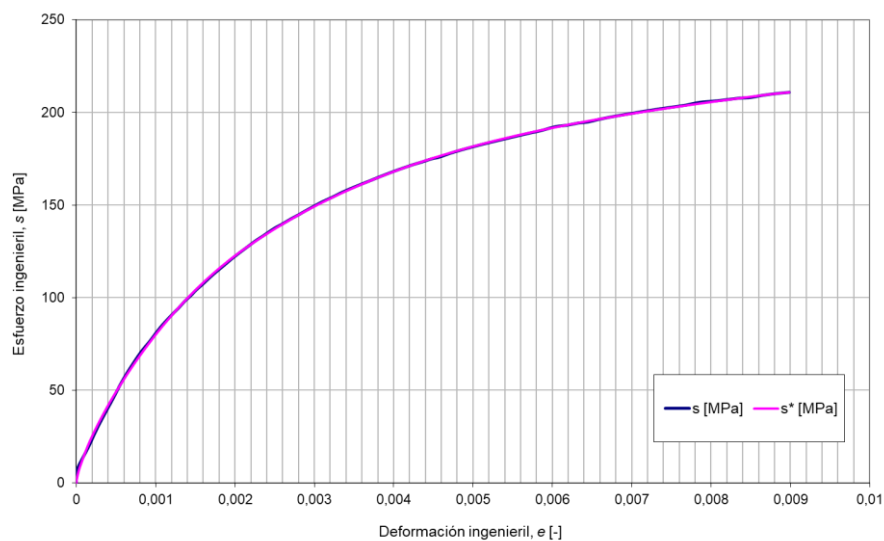


Figura 4.61. Curvas de tracción y simulación de la fundición gris a 0,1 mm/s (F-05).

En último lugar, el ensayo a velocidad menor, de 0,0035 mm/s, mostrado en 4.62 muy similar al de velocidad recomendada.

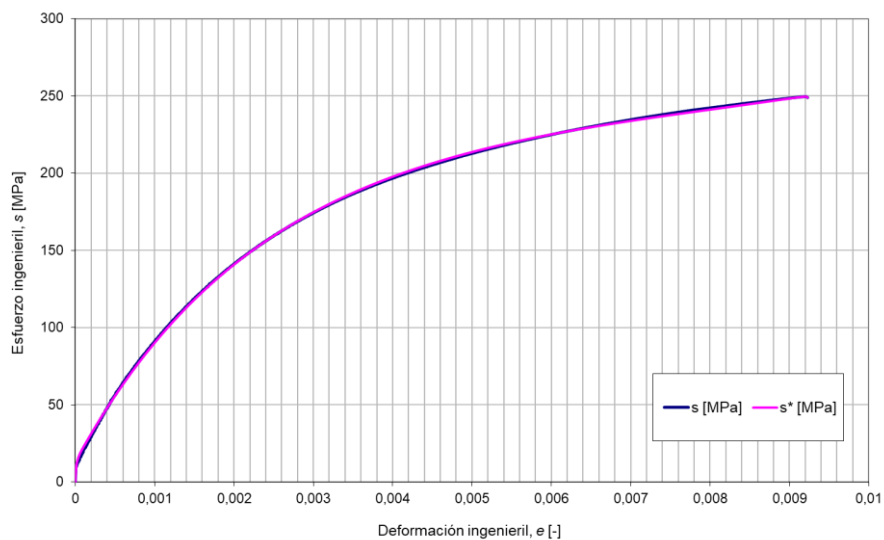


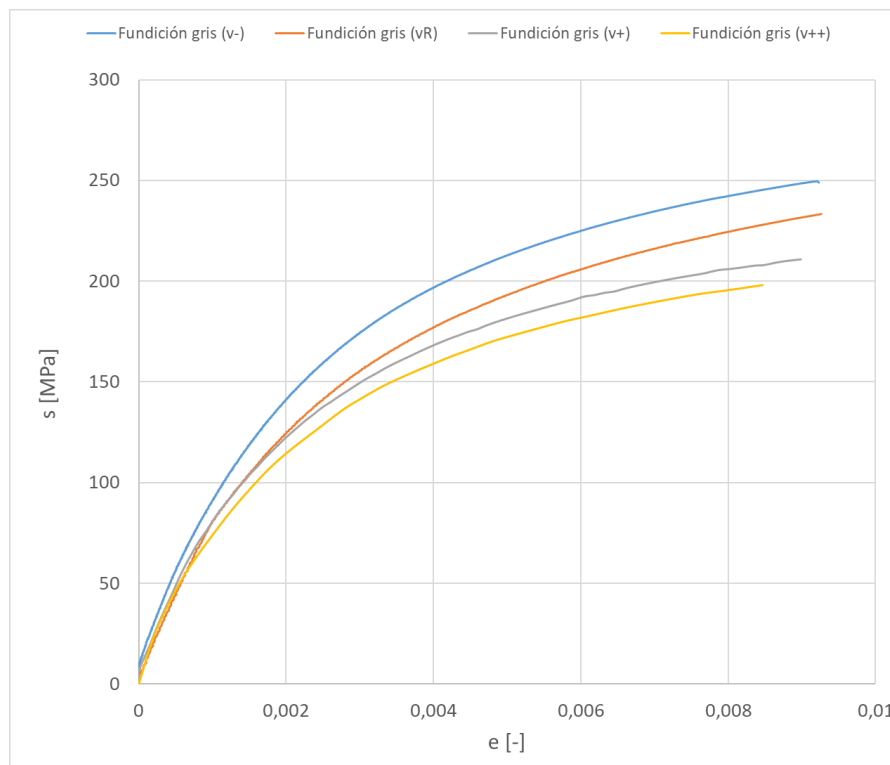
Figura 4.62. Curvas de tracción y simulación de la fundición gris a 0,0035 mm/s (F-07).

Para resumir la efectividad de estos ajustes, la Tabla 4.27 muestra los valores de R^2 que se han logrado y como viene repitiéndose son muy cercanos a la unidad, por consiguiente, se puede decir que son de gran calidad.

Tabla 4.27. Valores de R^2 correspondientes a las probetas de fundición gris a diferentes velocidades de ensayo.

Probeta	F-02	F-04	F-05	F-07
R^2	0,9999	0,9999	0,9997	0,9998

A continuación, se muestran los gráficos donde aparecen el conjunto de las curvas a diferentes velocidades de deformación, las de los ensayos realizados y las del modelo de sensibilidades, Fig. 4.63 y Fig. 4.64 respectivamente, y en el que se puede apreciar mejor sus diferencias. Las curvas obtenidas no responden a la teoría, por una explicación parecida al caso del latón. El comportamiento obtenido por el ensayo de material es distinto al predicho teóricamente, únicamente tiene sentido la elongación conseguida en las diferentes situaciones (de menor a mayor velocidad).

**Figura 4.63.** Comparación de los diferentes ensayos de la fundición gris a velocidades de deformación diferentes.

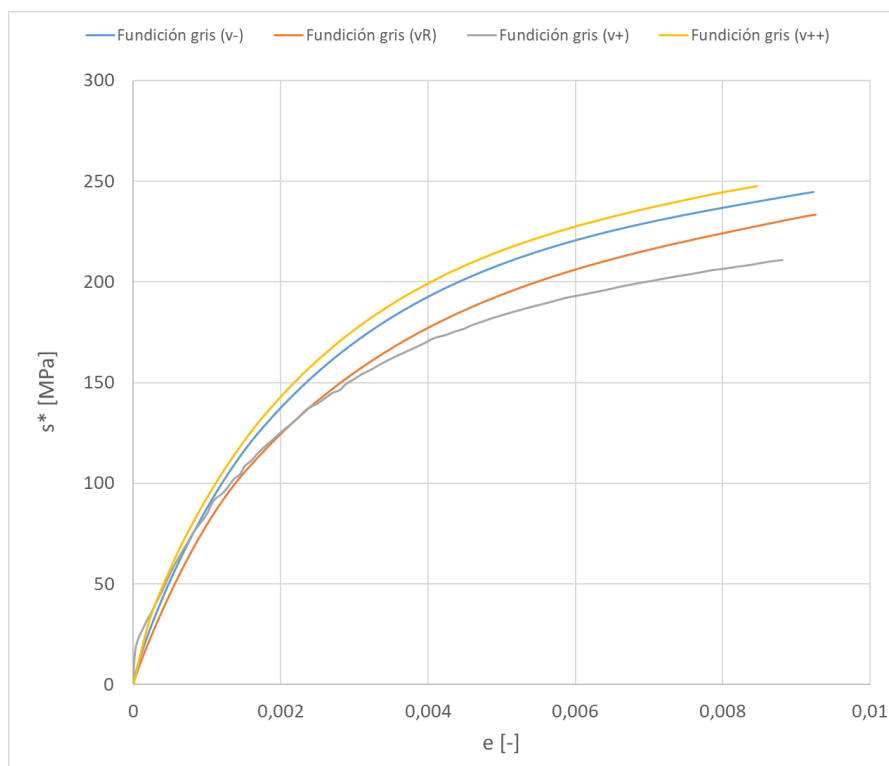


Figura 4.64. Comparación de las diferentes simulaciones de la fundición gris a velocidades de deformación diferentes.

Como se viene haciendo, se obtiene la media de los parámetros característicos de nuestra curva y posteriormente los normalizamos, tal y como se muestra en las Tablas 4.28 y 4.29.

Tabla 4.28. Valores de la curva de tracción de la fundición gris en los ensayos a diferentes velocidades de deformación.

Vel[mm/s]	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
0,0035	0,0016	0,0000	0,0094	0,0094	120,7	120,7	245,4	245,3	0,7798	98,0638	2,8026	195,2722	6,3175
0,0125	0,0016	0,0000	0,0093	0,0093	109,2	109,2	233,4	233,4	0,8430	168,0596	2,5110	166,9339	6,3507
0,100	0,0016	0,0000	0,0090	0,0090	108,2	108,2	210,8	210,8	0,7240	92,0529	2,6996	192,5823	6,3507
0,335	0,0016	0,0000	0,0085	0,0085	125,7	125,7	247,6	247,6	0,7009	56,0819	2,6191	194,9281	6,3507

Tabla 4.29. Valores normalizados de la curva de tracción de la fundición gris en los ensayos a diferentes velocidades de deformación.

vn	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
0,3	1,00	-	1,0143	1,0164	1,1059	1,1059	1,0516	1,0513	0,9251	0,5835	1,1161	1,1698	0,9948
1,0	1,00	-	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
8,0	1,00	-	0,9700	0,9700	0,9913	0,9913	0,9035	0,9035	0,8589	0,5477	1,0751	1,1536	1,0000
26,8	1,00	-	0,9139	0,9139	1,1513	1,1513	1,0607	1,0607	0,8314	0,3337	1,0431	1,1677	1,0000

Con esta última tabla obtenemos las tendencias de los parámetros de nuestros ensayos, en los que podemos ver en la Fig. 4.65 donde el gráfico del intervalo de fluencia no es representativo, al ser este siempre cero y que la deformación a la que se alcanza el límite elástico no está influida por la velocidad de deformación a la que se realiza el ensayo.

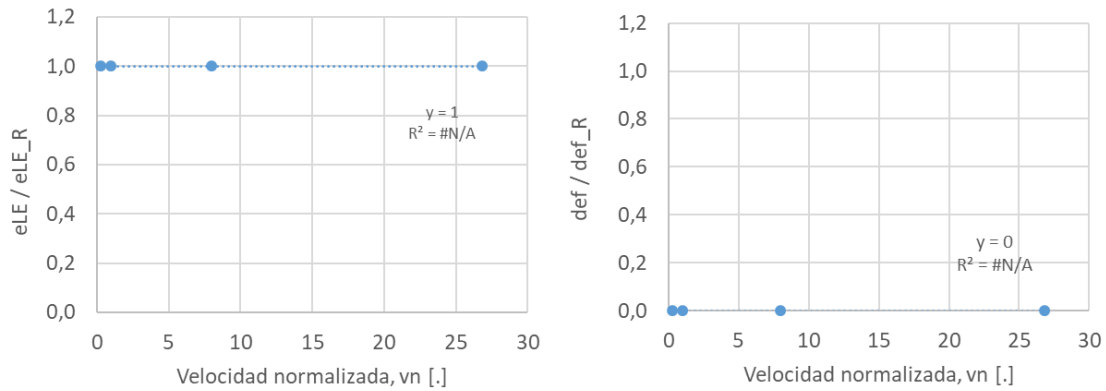


Figura 4.65. Representación normalizada de la deformación del límite elástico a la izquierda y a la derecha el intervalo de la zona de fluencia frente a la velocidad de deformación normalizada de la fundición gris.

En la Fig. 4.66, se muestra como las deformaciones máximas y de fractura disminuyen de manera lineal a medida que aumentamos nuestra velocidad de ensayo y con una tendencia muy fiable, debido a que su R^2 es de un valor bastante elevado. Este comportamiento está totalmente de acuerdo con la teoría de la ciencia de los materiales.

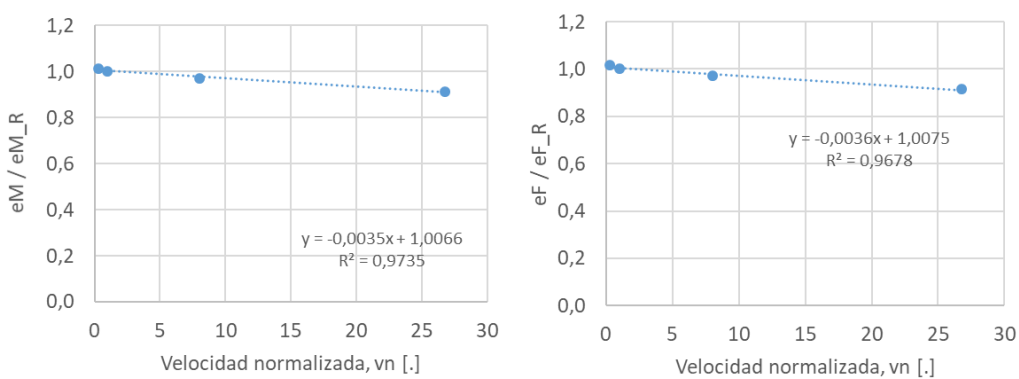


Figura 4.66. Representación normalizada de la deformación máxima a la izquierda y a la derecha la de fractura frente a la velocidad de deformación normalizada de la fundición gris.

Posteriormente, el comportamiento de los esfuerzos, representados en las Fig. 4.67 y Fig. 4.68, en todos los casos tiende a ser creciente a medida que aumenta la velocidad de deformación lo cual concuerda con los fundamentos teóricos, sin embargo, con una R^2 algo pequeña, por lo que habría que ampliar la población de ensayos para asegurar esta tendencia.

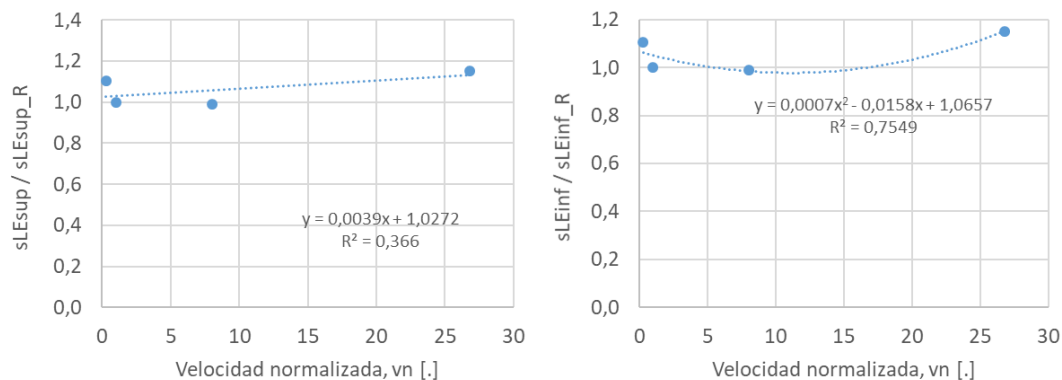


Figura 4.67. Representación normalizada del límite elástico superior a la izquierda y a la derecha el superior frente a la velocidad de deformación normalizada de la fundición gris.

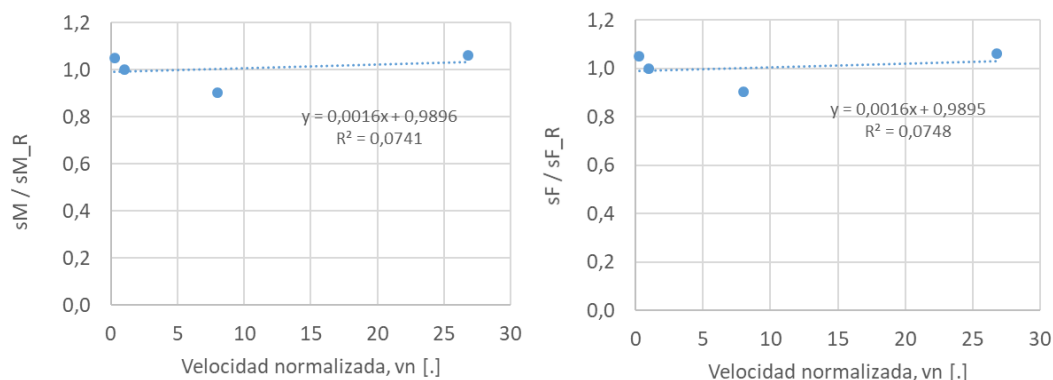


Figura 4.68. Representación normalizada de la resistencia máxima a la izquierda y a la derecha la resistencia a fractura frente a la velocidad de deformación normalizada de la fundición gris.

A continuación, los gráficos de todos los parámetros se representan en las Fig. 4.69, Fig. 4.70 y Fig. 4.71, donde salvo el n y \tilde{n} , los cuales tienen un valor de R^2 muy pequeño, todos parece que siguen una tendencia clara, el k y p de manera lineal y m de manera parabólica.

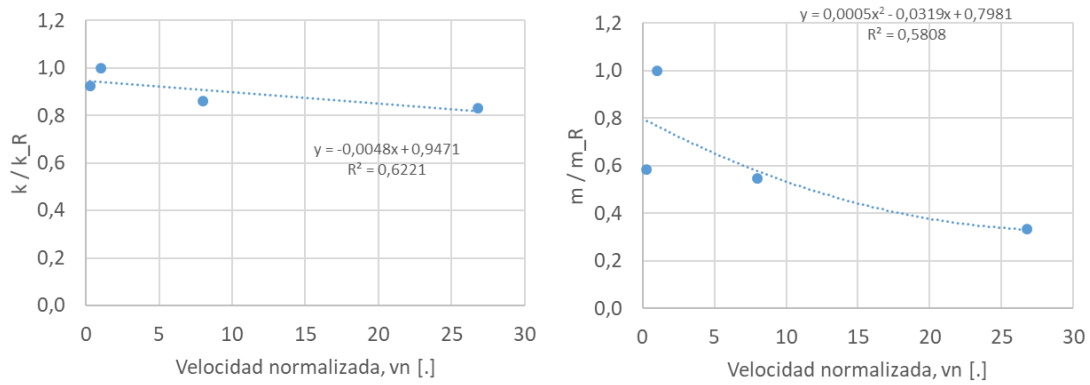


Figura 4.69. Representación normalizada del parámetro k a la izquierda y a la derecha el m frente a la velocidad de deformación normalizada de la fundición gris.

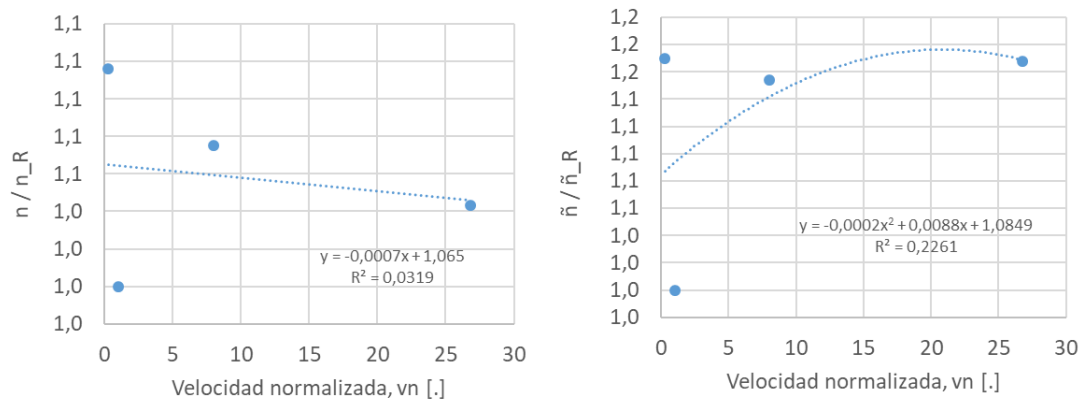


Figura 4.70. Representación normalizada del parámetro n a la izquierda y a la derecha el \tilde{n} frente a la velocidad de deformación normalizada de la fundición gris.

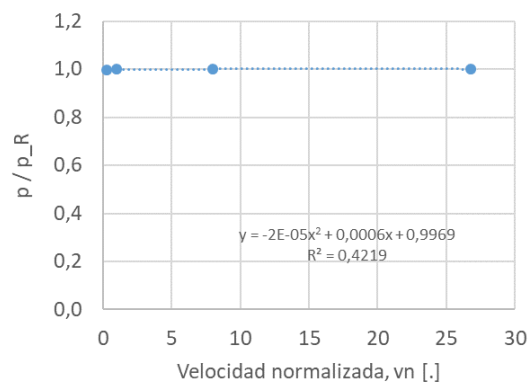


Figura 4.71. Representación normalizada del parámetro p frente a la velocidad de deformación normalizada de la fundición gris.

Finalmente, se muestra la comparativa de las tendencias que siguen las deformaciones y esfuerzos promedios de los materiales ensayados y del modelo de sensibilidades, el cual permite conseguir una tendencia muy similar a la de la realidad para este material, como se puede observar en la Fig. 4.72, donde en el de la deformación hay una ligera diferencia de pendiente entre las dos y en el de esfuerzo se consigue representar esa tendencia casi a la perfección. Este es el material al que mejor se le ha ajustado el modelo de sensibilidades

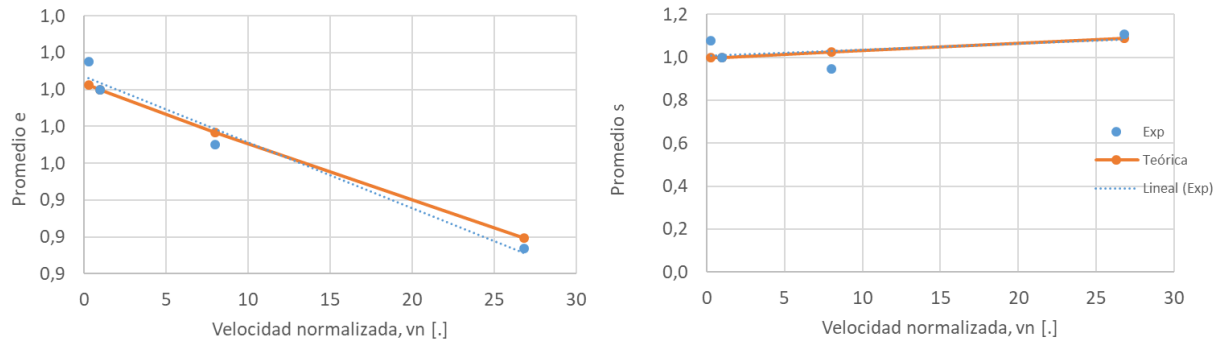


Figura 4.72. Comparación entre las tendencias de la deformación promedio a la izquierda y del esfuerzo promedio a la derecha, con la tendencia del modelo teórico de sensibilidades de la fundición gris.

5 CONCLUSIÓN

Tras analizar todas las curvas simuladas y su correspondencia con las curvas experimentales, se puede decir que el modelo de curva de tracción utilizado es de gran calidad, consiguiendo unos resultados que se asemejan mucho al ensayo realizado tanto en la zona elástica como en la plástica. Sin embargo, cabe destacar que, en la zona de unión de estas dos zonas, ya sea cuando existe una zona de fluencia como en el caso del acero C45, como cuando no se produce, la calidad del ajuste se resiente. En el primer caso, debido a las irregularidades que presenta esa zona y, el segundo caso, debido al cambio rápido de pendiente que dificultaba al ajuste adaptarse a esa curva. Por otro lado, se puede decir que el modelo de sensibilidades funciona razonablemente bien, logrando unos resultados en la mayoría de los casos coherentes con la realidad, aunque solo ha sido utilizado en el caso de variar la velocidad de deformación, teniendo la incógnita de si funcionará con la implicación de temperatura.

Unos de los objetivos principales era asegurar que estos nuevos modelos lograsen un mejor resultado que el usado para un trabajo similar realizado el año anterior a la publicación de este, lo cual se ha logrado con éxito. En lo concerniente al modelo y simulador se ha logrado una mejora muy notable sobre todo en la zona plástica, pero también en todas las demás, zona elástica, elástica no uniforme, e incluso la zona de fluencia. Por ejemplo, en algunos casos del modelo anterior se alcanzaba un esfuerzo máximo con la simulación mayor que el real, lo cual con este no ocurre al introducir el valor al que se obtiene este punto y limitar ese valor. Otro gran problema que sucedía con mucha frecuencia era que la curva no se ajustaba a la pendiente real con suficiente rapidez, sobre todo en la zona plástica, lo cual se ha solucionado con la introducción de un mayor número de parámetros.

Para mostrar una mejora de este modelo respecto al anterior de forma cuantitativa, en la Tabla 4.8 del Capítulo anterior, se mostraba una comparativa de los valores de R^2 para el caso del acero C45 normalizado a diferentes velocidades, donde se conseguían unos valores más cercanos a la unidad con este nuevo modelo, señal de que la bondad de estos ajustes se ha mejorado notablemente. Para el resto de los materiales, se obtenían un resultado muy similar al mostrado en la Tabla 4.8, por lo que se puede concluir que este nuevo simulador consigue un mejor ajuste que el anterior en todos los casos.

Para líneas futuras, será difícil hacer un mejor ajuste de la zona de fluencia, por lo que se ha comentado anteriormente de la irregularidad y ser una zona que no se puede llegar a predecir totalmente cómo va a evolucionar el material, por lo que se puede considerar que es un buen resultado. Un punto de interés que se podría mejorar es la adaptabilidad de la curva cuando ocurre el cambio de pendiente comentado anteriormente, quizás con la introducción de algún parámetro más. Además, falta la comprobación de cómo se ajusta el modelo de sensibilidades cuando se varía la temperatura del ensayo y cuando se combina esto

con una variación de velocidad, que será la situación más crítica. También sería interesante lograr una mayor población de ensayos, ya que como se ha podido observar durante el capítulo 4, no se lograban en algunas ocasiones la tendencia clara de algunos parámetros y en casos donde la R^2 que se obtenía era cercana a la unidad, no se puede asegurar que esa tendencia fuera correcta.

Se ha podido ver a lo largo de este trabajo que lo esperado teóricamente, explicado en la introducción, no siempre se ajusta a la realidad, ya que hay muchas variables difíciles de controlar, como pueden ser el apriete correcto de las mordazas en el material y que no se produzca ningún deslizamiento, la buena calibración de los equipos, modificaciones en el material no previstas que influyen en su comportamiento o cualquier otro error de tipo humano. Para el futuro se debería intentar cuidar aún más estos problemas y así evitar posibles errores en la obtención de los resultados finales.

Por supuesto, si es posible en el futuro continuar esta línea de trabajo, lo más interesante será aplicar el modelo final y posiblemente mejorado, a todos los materiales posibles para lograr una biblioteca cada vez más amplia y que en el futuro permita poder consultarse cualquier material sin problemas, logrando una herramienta didáctica y de consulta de gran potencia que facilitaría algunas labores de la ingeniería.

6 PLANOS

A continuación, se muestra la geometría utilizada en cada material para realizar la probeta metálica destinada al ensayo de tracción.

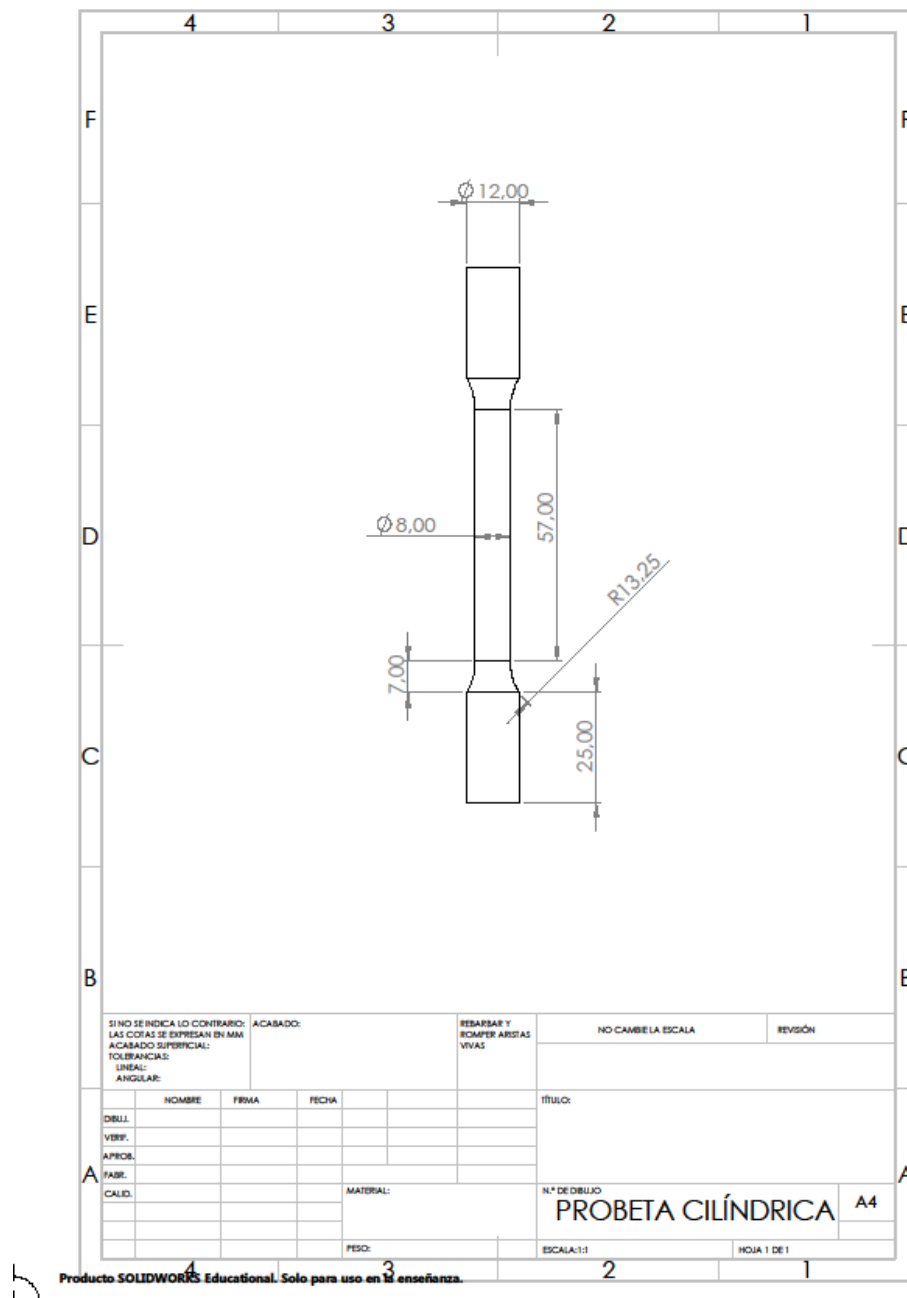


Figura 6.1. Probeta cilíndrica usada para los ensayos a tracción.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Norma UNE-EN ISO 6892. Materiales Metálicos. Ensayo de Tracción. Vol. 1: Método de ensayo a temperatura ambiente. AENOR: España; 2010.
- [2] Montes J.M., Cuevas F.G., Cintas J. Ciencia e Ingeniería de los Materiales; S.A. Ediciones Paraninfo; España; 2014.
- [3] *ASM Handbooks*. ASM International, Ohio (2017).
- [4] H. J. Frost and M. F. Ashby. Deformation-mechanism maps: the plasticity and creep of metals and ceramics. Pergamon Press; Reino Unido; 1982; Disponible en: <http://engineering.dartmouth.edu/defmech/>.
- [5] ASTM Standards. ASTM International, West Conshohocken.
- [6] Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products. MPIF, Metal Powder Industries Federation, Princeton
- [7] Principles of heat treatment of steel. G. Krauss. ASM International, Ohio (1980).
- [8] Steel Heat Treatment Handbook. G.E. Totten (editor). CRC Press, Boca Raton (2007).
- [9] Light Alloys (4ª ed.). I.J. Polmear. Butterworth Heinemann, Oxford (2006)
- [10] Powder Metallurgy: Science, Technology, and Materials. A. Upadhyaya, G.S. Upadhyaya. Universities Press, Hyderabad (2011).
- [11] Tratamientos térmicos de los aceros (10ª ed.). J. Apraiz Barreiro. Editorial Dossat, Madrid (2002).