

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

Determinación del rozamiento frente a presión  
y temperatura en una compresión entre  
plataformas plano paralelas para una AA5083



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Miguel Vigara Gabay

Javier León Iriarte

Juan Pablo Fuertes Bonel

Pamplona, Enero 2017





# Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer de manera especial a mis tutores del Grupo de Investigación de Materiales y Fabricación de la Universidad Pública de Navarra, Juan Pablo Fuertes y Javier León, por darme la oportunidad de realizar este trabajo, así como por ofrecerme su ayuda siempre que la he necesitado.

Asimismo, me gustaría también agradecer la ayuda prestada por Daniel Salcedo y todos aquellos profesores que me han echado una mano en la realización de este trabajo.

Por otra parte, mencionar a mis amigos y familia que me han apoyado incondicionalmente durante la carrera en las buenas y en las malas, especialmente cuando las cosas no salían como debían.

Y tampoco puedo olvidarme de todos mis compañeros de grado que han estado dispuestos a ayudarme tanto en la carrera como en este TFG.

Por último, quería dar las gracias a todas aquellas personas que no he mencionado, por todo aquello que me hayan aportado y que simplemente hayan querido prestarme su ayuda.

## Resumen

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) consiste en encontrar una función para el rozamiento frente a la presión para una aleación de aluminio, a distintas temperaturas, con el fin de evitar los errores que supone tomar rozamiento constante en las simulaciones con elementos finitos, y por lo tanto, obtener un mejor ajuste en la simulación con el caso real.

El proceso estudiado trata de una compresión entre plataformas plano-paralelas donde la aleación de aluminio empleada es la AA5083.

Para ello, se parte de ensayos experimentales, a partir de los cuales se va a obtener la curva de tensión-deformación del material para cada temperatura de compresión, a través de un filtrado con Matlab. A continuación, se llevarán a cabo diversas simulaciones mediante elementos finitos con el software Marc Mentat™.

## Palabras clave

- Rozamiento variable
- Elementos finitos
- Deformación plástica

## Abstract

The objective of this End-of-Grade Work is to find a function for the friction against pressure for an aluminum alloy, at different temperatures, in order to avoid the errors that appear by assuming constant friction in finite element simulations, and therefore, to obtain a better fit in the simulation with the real case.

The process studied deals with a compression between flat-parallel platforms where the aluminum alloy used is the AA5083.

To do this, we start from experimental tests, from which the different stress-strain curves of the material are obtained for each compression temperature through a Matlab filtering. Then, various simulations will be carried out using finite elements with the Marc Mentat™ software.

## Keywords

- Variable friction
- Finite elements
- Plastic strain

# Índice

Agradecimientos.....	3
Resumen.....	4
Palabras clave.....	4
Abstract.....	5
Keywords.....	5
Índice.....	6
1.-Planteamiento y objetivos .....	11
2.-Revisión del estado del arte .....	15
2.1-Rozamiento variable en FEM .....	15
2.2-Ring test .....	20
3.-Introducción.....	29
3.1-Aleación de aluminio AA5083.....	29
3.2-Simulación por elementos finitos .....	31
3.2.1-Introducción .....	31
3.2.2-Antecedentes .....	32
4.-Estudio experimental.....	37
4.1-Ensayo de compresión .....	37
4.1.1.- Probetas ensayadas .....	38
4.2-Obtención experimental de las curvas de fluencia de la aleación de aluminio AA5083.....	39
4.3-Desarrollo del modelo FEM .....	40
4.3.1-Geometría .....	40
4.3.2-Contactos.....	41

4.3.3-Tipo de remallado y parámetros .....	41
4.3.4-Resultados simulación .....	42
4.4-Cálculo del coeficiente de rozamiento variable.....	44
4.4.1-Planteamiento inicial .....	44
4.4.2-Elección de la metodología .....	46
4.3.3-Desarrollo del método .....	49
5.-Validación del modelo .....	57
6.-Conclusiones.....	63
6.1-Conclusiones generales .....	63
6.2-Conclusiones particulares.....	64
7.-Referencias .....	67
8.-Anexos .....	73
8.1-Comparación curva carga-carrera simulada para coeficientes de rozamiento 0,2 y 0,01 .....	73
8.2-Variación porcentual entre las curvas carga-carrera simuladas con coeficiente de rozamiento 0,01 y 0,2 .....	76
8.3-Leyes de fluencia modificadas.....	79
8.4-Tablas de coeficiente de rozamiento frente a la presión.....	82
8.5-Comparación curva carga-carrera real y simulada con función de rozamiento variable y errores .....	85



# Capítulo 1

## Planteamiento y objetivos



# 1.-Planteamiento y objetivos

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) tiene como fundamento la obtención de un rozamiento variable con la presión para la AA5083.

Se estudiará el comportamiento de dicha aleación tras someterla a un ensayo de compresión entre plataformas plano-paralelas, siendo el estado inicial de la aleación N0 (Estado inicial de recocido).

El primer paso experimental será dicho ensayo. Para la determinación de los resultados requeridos en este trabajo, se realizaron ensayos experimentales en un rango de temperaturas de ensayo que va desde temperatura ambiente hasta 300°C (25°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C). Para llevar a cabo los ensayos experimentales se empleó una prensa de ensayos universal existente en la Universidad Pública de Navarra.

Posteriormente se llevarán a cabo las simulaciones mediante elementos finitos con el software Marc Mentat™. Las distintas simulaciones se realizarán por zonas para encontrar el rozamiento variable con la para cada temperatura de compresión.

Una vez realizada la simulación se comparará la curva carga-carrera experimental con la obtenida mediante elementos finitos empleando la curva de rozamiento variable frente a la presión, repitiendo el proceso para las diferentes temperaturas elegidas.



# Capítulo 2

Revisión del  
estado del arte



## 2.-Revisión del estado del arte

En el siguiente apartado se revisarán los diversos estudios realizados sobre los temas concernientes a este Trabajo de Fin de Grado.

### 2.1-Rozamiento variable en FEM

El modelado de piezas mediante elementos finitos tiene un gran grado de importancia para los estudios relacionados con el diseño mecánico en la industria. El empleo de elementos finitos suele asociarse con algunos aspectos difíciles de modelizar tales como:

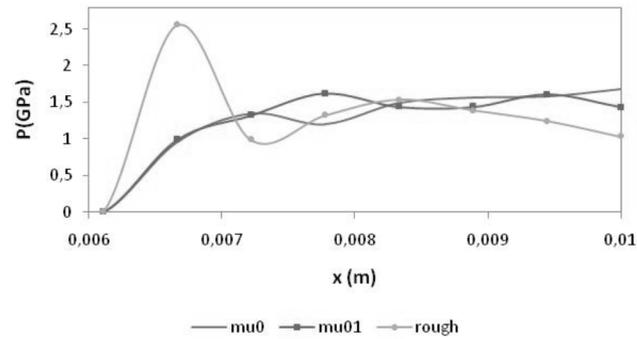
- Lubricación
- Velocidad de deslizamiento
- Rozamiento

En este apartado se revisarán los trabajos realizados con anterioridad sobre el rozamiento variable en FEM.

El modelo de Coulomb convencional asume un coeficiente de rozamiento constante en la simulación de elementos finitos. Este hecho supone la aparición de un error con respecto a los ensayos experimentales, ya que el rozamiento no se mantiene constante si no que aumenta con la presión.

Con anterioridad se ha tratado de subsanar este error tratando de conseguir una ley que determine la evolución del coeficiente de rozamiento frente a la presión en procesos de deformación plástica.

Un estudio referente a este ámbito es el realizado por A.M Camacho et al., 2010 (***A.M Camacho et al., 2010***) en el cual se investiga la influencia del rozamiento en operaciones de forja localizada-incremental mediante simulación por elementos finitos.



**Figura 2.1.** Variación de 3 valores de rozamiento en función de la presión de contacto  
 (A.M Camacho et al., 2010)

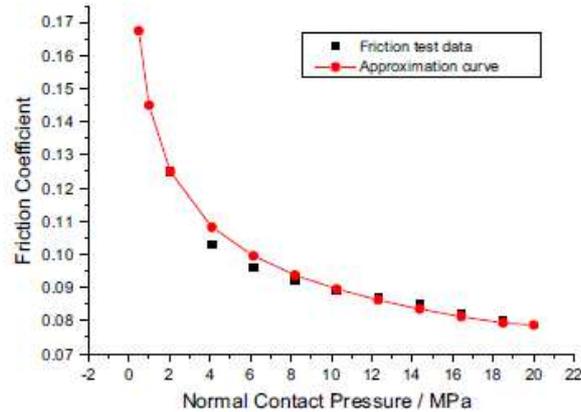
Asimismo, se analiza la influencia del rozamiento tanto en las fuerzas y presiones de contacto como en el estado tensional y de deformación de una pieza de aluminio 2024-T3 sometida a este tipo de operaciones, teniendo en cuenta también el efecto de aspectos geométricos relacionados con la pieza y la herramienta empleadas.

Más adelante se llevaron a cabo diferentes modelos con el objetivo de conseguir el rozamiento variable deseado, como en el caso de Wurong Wang et al. (*Wurong Wang et al., 2015*) donde se crea un modelo de rozamiento variable en chapas metálicas con aceros de alta resistencia.

El estudio se realiza diseñando primero un método experimental para desarrollar un modelo de rozamiento variable dependiente de la presión para la aleación DP780 que se trabaja en frío. El modelo se utiliza a continuación para simular la formación de un resorte en forma de U mediante flexión bajo tensión. Por último se compara de los resultados previstos con:

- Modelo de rozamiento variable dependiente de la presión
- Modelo de rozamiento constante

El resultado de la verificación experimental indica una mejora significativa de la predicción del comportamiento de la aleación estudiada con el modelo propuesto.



**Figura 2.2** Aproximación entre valores experimentales y reales  
 (Wurong Wang et al., 2015)

Otro modelo diferente es el realizado por Rahman Seifi et al. (Rahman Seifi et al., 2015) El autor utiliza datos experimentales de los componentes estructurales para modificar el modelo inicial.

Un uso típico de la actualización de este modelo es para la junta de unión entre un eje y un casquillo. En el modelado de la junta de unión para materiales conocidos, se asume un valor aproximado para el coeficiente de rozamiento de las áreas de contacto.

Basándose en diversos factores es difícil estimar con precisión este coeficiente. En este trabajo, la actualización de modelos se utiliza para estimar y actualizar el coeficiente de rozamiento en la superficie de contacto de las juntas de eje de interferencia y de casquillo.

Se llevaron a cabo experimentos y se modificó el modelo inicial de elementos finitos basado en la fuerza de extracción experimental de las juntas de ajuste.

Finalmente, se extrajeron los valores de los campos de tensión del nuevo modelo con un valor actualizado del coeficiente de rozamiento.

R. Seifi, K. Abbasi / Engineering Failure Analysis 57 (2015) 310–322

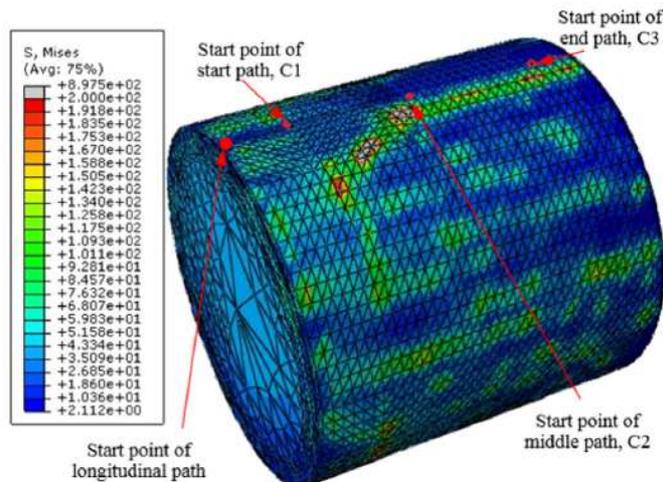


Fig. 12. Illustration of the start points of defined paths.

**Figura 2.3.** Campo de tensiones del nuevo modelo  
 (Rahman Seifi et al., 2015)

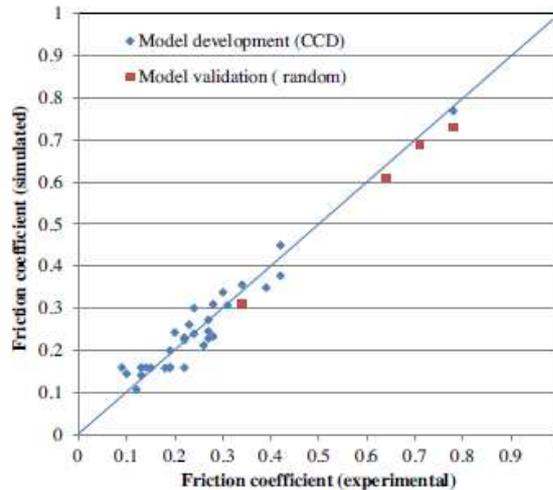
En la actualidad se están realizando estudios sobre la influencia del rozamiento teniendo en cuenta otros factores que influyen en éste como son:

- Velocidad de deslizamiento
- Presión del aire
- Caudal de aceite para lubricación

Es el caso de Nilanjan Banerjee et al. (Nilanjan Banerjee et al., 2016) donde se presenta un estudio experimental y numérico sobre el mecanizado de lubricación de cantidad mínima (MQL Minimum Quantity Lubrication) de la aleación Ti-6Al-4 V en el que se desarrolla un modelo de rozamiento en función de los parámetros MQL y posteriormente se utiliza en el análisis de elementos finitos.

La investigación presenta nuevas observaciones sobre la reducción de la energía de corte específica mediante el control del caudal de volumen de aceite durante el MQL, afectando así a la superficie mecanizada y el desgaste de la herramienta.

Se realiza un estudio para construir un modelo de rozamiento en función de la velocidad de deslizamiento, la presión del aire y el caudal de volumen de aceite en el coeficiente de rozamiento.



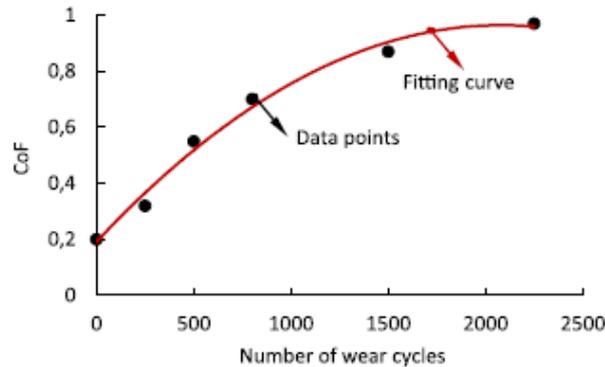
**Figura 2.4.** Comparación entre coeficientes de rozamiento experimental y simulado (Nilanjan Banerjee et al., 2016)

Las fuerzas de corte medidas experimentalmente en una operación de torneado se aproximan con un error menor a las fuerzas obtenidas mediante simulación, se demuestra así la eficacia del modelo propuesto.

El estudio más reciente (Tongyan Yue et al., 2016) se centra en la influencia de la variación del coeficiente de rozamiento en el desgaste por fricción.

En la mayoría de las simulaciones FEM de desgaste por fricción, se supone que el coeficiente de rozamiento es constante para simplificar los modelos.

Sin embargo, como se mide experimentalmente, la evolución del coeficiente de rozamiento tiene relación con el número de desgaste de ciclos, especialmente durante la etapa de rodaje.



**Figura 2.5** Variación del coeficiente de rozamiento en función del número de ciclos (Tongyan Yue et al., 2016)

En esta investigación, los efectos del coeficiente de rozamiento variable se consideran tanto en el deslizamiento total como en el deslizamiento parcial del desgaste por fricción. Se calcula el desgaste y el volumen de desgaste predicho por modelos FEM para casos de coeficientes de rozamiento constantes y variables.

Los resultados indican que, en condiciones de deslizamiento bruto, el hecho de usar o no un coeficiente de rozamiento variable tiene poco efecto sobre el volumen de desgaste al final de la etapa de estado estacionario de los ciclos de desgaste de fricción. Sin embargo, al considerar el deslizamiento parcial o la fase de rodaje de las condiciones de deslizamiento bruto, los modelos de elementos finitos con coeficientes de rozamiento variable logran predicciones que están más cerca de los resultados experimentales.

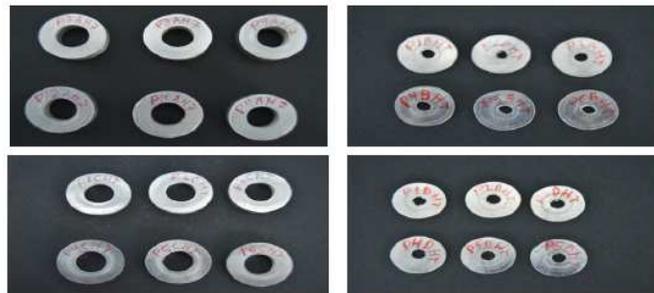
## 2.2-Ring test

Como resultado a la dificultad de obtener el valor de coeficiente de rozamiento durante un proceso de compresión surge la prueba de compresión de anillo (RCT Ring Compression Test).

Dicha prueba consiste en evaluar cuantitativamente el coeficiente de rozamiento en deformaciones plásticas midiendo las variaciones del diámetro interior del anillo en la deformación del material.

La dificultad de esta prueba reside en la correcta medición de estas variaciones, debido a que existen muchas posibilidades para medir las variaciones de diámetro interno por la deformación no uniforme del agujero interno durante la prueba.

Specimen	Do Inic. (mm)	Di Inic. (mm)	h Inic. (mm)	Do Final (mm)	Di Final (mm)	h Final (mm)	% Decrease Di	% Decrease h
P1AHT	24.07	11.99	7.91	25.75	11.58	6.59	3.42	16.69
P2AHT	24.04	11.47	7.84	25.37	11.05	6.72	3.66	14.28
P3AHT	24.08	11.48	7.79	25.34	10.95	6.79	4.61	12.84
P7AH7	24.05	12.13	7.86	24.2	12.11	7.7	0.16	2.03
P8AH7	24.05	11.5	7.89	24.2	11.41	7.72	0.78	2.15
P9AH7	24.05	11.47	7.87	24.22	11.45	7.68	0.17	2.41
P1BHT	12.07	6.01	3.98	16.62	3.47	1.61	42.26	59.55
P2BHT	12.11	6.02	3.98	16.32	2.78	1.6	53.82	59.80
P3BHT	12.14	6.09	4.01	16.53	3.48	1.62	42.85	59.60
P7BH2	12.05	6.00	3.91	13.91	5.12	2.57	14.67	34.27
P8BH2	12.06	6.01	3.92	13.92	5.01	2.58	16.64	34.18
P9BH2	12.02	5.98	3.91	13.83	5.2	2.58	13.04	34.01
P1FHT	18.21	9.02	5.88	21.55	7.66	3.71	15.07	36.90
P2FHT	18.17	8.99	5.9	21.27	7.47	3.68	16.90	37.63
P3FHT	18.16	9.16	5.92	21.33	7.55	3.72	17.57	37.16



**Figura 2.6. Resultados ensayo RCT (F. Martín et al., 2015)**

Un ejemplo de la utilización de este método es el llevado a cabo por el autor F. Martín et al. (F. Martín et al., 2015) donde se describe la prueba del anillo de compresión como un método perfectamente válido por el cual se determina de forma simple y fiable el coeficiente de rozamiento en un proceso de deformación plástica.

Su metodología se basa en la aplicación de cambios geométricos tanto como la reducción de espesor como la disminución en el diámetro interno del ánima en el propio anillo tensado.

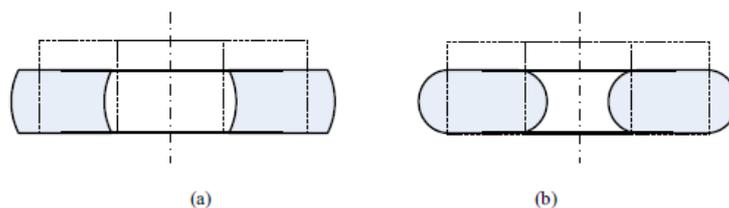
En este trabajo, la realización de esa prueba es la base para establecer el coeficiente de rozamiento en un proceso de forja de tal manera que, dada su aplicación al Teorema del Límite Superior (UBT) por el modelo de las Zonas Rígidas Triangulares (TRZ), permiten establecer una comparación Con fuerza empírica, alcanzando una cuasi-validación de este teorema en un cierto rango.

El autor Chengliang Hu et al. (**Chengliang Hu et al., 2015**) centró su estudio en las muchas posibilidades existentes para medir las variaciones de diámetro interno en RCT debido a la deformación no uniforme del agujero interno durante la prueba.

Dicha deformación no uniforme del orificio interno provoca dificultades en la medición precisa del diámetro interior y, por lo tanto, de la precisión del coeficiente de fricción derivado.

Para evitar la desventaja en la medición de dimensiones del RCT convencional, se propone un método alternativo para evaluar las condiciones de fricción en el forjado en frío denominado anillo con ensayo de compresión de protuberancias (RCT-B). Por la introducción del concepto RCT-B, se obtuvieron resultados de simulación de elementos finitos bajo diferentes condiciones de fricción.

Los resultados mostraron que la forma del saliente exterior permanece estable durante la deformación por compresión y permite medir el diámetro del saliente exterior con mayor facilidad y precisión.



**Figura 2.7.** RCT a) fricción baja, b) fricción alta  
 (Chengliang Hu et al., 2015)

Uno de los primeros artículos sobre este tema lo realizó Hasan Sofuoglu et al. (**Hasan Sofuoglu et al., 1999**) el objetivo principal de su investigación fue averiguar si las curvas de calibración de rozamiento generalizada, como se

recomienda en la literatura para su uso con pruebas de compresión de anillos, son aplicables a todos los tipos de materiales y condiciones de prueba.

Específicamente, se investigaron los efectos de las propiedades del material, la sensibilidad a la velocidad de deformación y el "abarrilamiento" sobre el comportamiento de las curvas de calibración de rozamiento.

Para ello, se realizaron una serie de ensayos de compresión de anillo para determinar la magnitud del coeficiente de rozamiento  $\mu$ , así como las correspondientes curvas de calibración para dos tipos de materiales de modelado, Plasticine blanco y negro.

Los experimentos se realizaron por primera vez utilizando la Técnica de Modelado Físico (PMT) y luego se simularon a través de un código de elementos finitos de plástico elástico (ABAQUS).

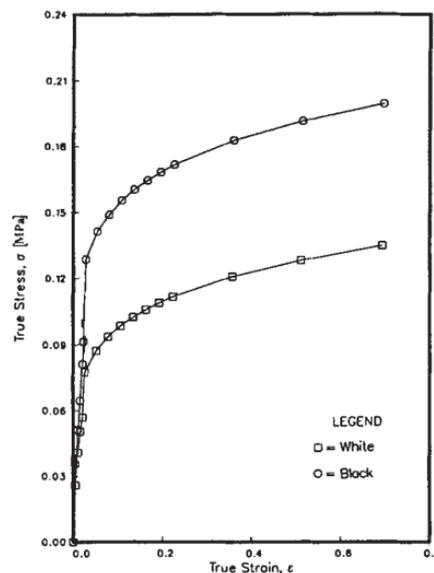


Fig. 3. Flow curves for black and white Plasticine.

**Figura 2.8.** Curvas de fluencia de plasticine blanca y negra (Hasan Sofuoglu et al., 1999)

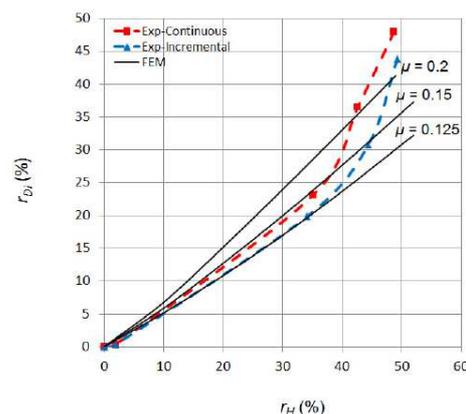
En contraste con los resultados disponibles en la literatura, donde se recomiendan las mismas curvas de calibración de rozamiento para todos los tipos de materiales y condiciones de ensayo, los resultados de esta investigación mostraron que las curvas de calibración de rozamiento se ven afectadas por las propiedades del material y las condiciones de ensayo.

Posteriormente se introdujo en estos ensayos el empleo de los elementos finitos, con el objetivo de llevar a cabo trabajos que tuvieran en cuenta los diferentes aspectos que influyen en el ensayo de compresión del anillo.

Es el caso de estudio del autor J. Valero et al. (**J. Valero et al., 2015**), el objetivo principal de este trabajo es determinar las diferencias encontradas en los mapas de calibración de rozamiento al aplicar diferentes metodologías de aplicación de carga-lubricante durante la implementación de pruebas de compresión de anillos.

Para lograr este objetivo, se obtuvieron mapas de calibración de rozamiento realizando ensayos de compresión de anillos a anillos planos de aleación de aluminio Al-7075 bajo lubricación. Las pruebas de compresión se realizaron utilizando dos metodologías diferentes, incrementales y continuas.

Simultáneamente, para determinar los valores particulares del coeficiente de rozamiento de Coulomb, se simuló el mismo problema utilizando el código de elementos finitos ABAQUS. Las curvas de calibración de los experimentos y la simulación se hacen para comparar los coeficientes de rozamiento obtenidos para cada metodología de carga.



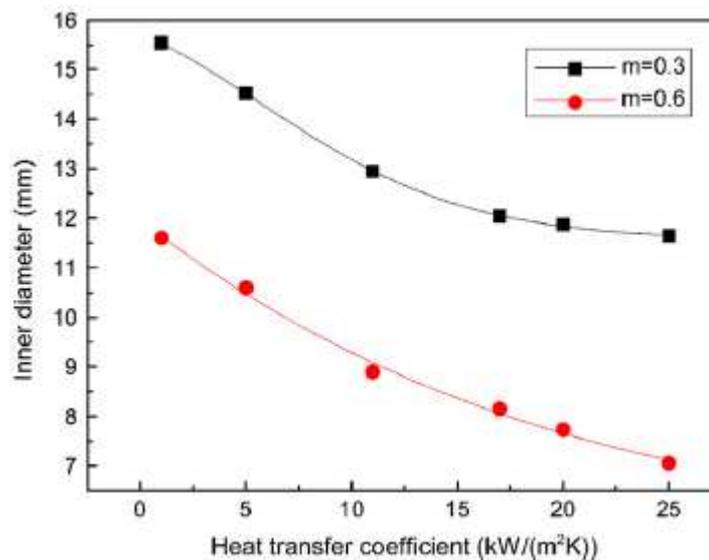
**Figura 2.9.** Gráfica comparativa entre curvas de calibración experimental y simulada (**J. Valero et al., 2015**)

Este estudio permite cuantificar las diferencias encontradas al utilizar ambos tipos de metodología de carga en la determinación de coeficientes de

rozamiento mediante la prueba de compresión de anillos, dando algunas pautas sobre el uso de estos mapas dependiendo de las condiciones reales del proceso.

En estudios posteriores se tuvo en cuenta los efectos del coeficiente de transferencia de calor (HT Heat transfer) sobre el flujo de metal y las curvas de calibración, y por consiguiente en el coeficiente de rozamiento.

El mejor ejemplo de este caso es el que describe el autor Yanchun Zhu et al. (Yanchun Zhu et al., 2011) donde se estudia el coeficiente de rozamiento de la aleación de titanio Ti-6Al-4V en condiciones de forja en caliente, determinado mediante el método combinado de las pruebas de compresión de anillo y de elementos finitos (FE).



**Figura 2.10.** Efecto del coeficiente de transmisión de calor en el diámetro de la aleación (Yanchun Zhu et al., 2011)

Se observa en particular que el coeficiente de transferencia de calor (HT) tiene efectos significativos sobre el flujo de metal y las curvas de calibración, afectando así la medición del coeficiente de rozamiento.

Además, los coeficientes HT son diferentes para el lubricante de vidrio y las condiciones de fricción en seco. Por lo tanto, se deben emplear diferentes coeficientes HT para generar las curvas de calibración cuando se aplicaron las

dos condiciones de lubricación para determinar los coeficientes de rozamiento en la compresión en anillo caliente de la aleación de titanio Ti-6Al-4V.

# Capítulo 3

Introducción



## 3.-Introducción

En este apartado se dará una explicación y se desarrollarán las técnicas utilizadas, procesos y ensayos realizados en nuestro estudio.

### 3.1-Aleación de aluminio AA5083

Las aleaciones de aluminio destacan por su resistencia a la corrosión y ligereza, así como por su elevada conductividad térmica y eléctrica. La incorporación de aleantes (Mg, Si, Mo) al aluminio puro genera la posibilidad de mejorar sus características iniciales.

Los aluminios tienen mejor su resistencia y rigidez específica (en relación a su densidad) para determinadas aplicaciones (aeronáutica, vehículos, piezas a grandes aceleraciones) (**C.Aparicio et al., 2001**).

Debido a sus propiedades ya citadas y junto con la gran aptitud que presentan para el conformado (deformación en frío, forja, moldeo, extrusión, mecanizado), los aluminios se han convertido en el segundo grupo de materiales más empleados hoy en día.

En este Trabajo Fin de Grado, se va a estudiar la aleación de aluminio AA5083.

Se trata de una aleación de aluminio-magnesio perteneciente a la serie 5XXX. Gracias al magnesio aleado, se consigue incrementar la resistencia mecánica y el endurecimiento del aluminio, tras deformar el material, por lo que, en esta aleación se obtiene una resistencia mecánica elevada.

Además, se consigue una gran resistencia a la corrosión lo que favorece su empleo en ambientes navales, equipos químicos, superestructuras soldadas y depósitos a presión.

En la tabla 3.1 se muestra la composición química de esta aleación:

**Tabla 3.1.** Composición química de la AA5083

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Al
<b>Mínimo</b>				0,4	4	0,05			Zi + Total	
<b>Máximo</b>	0,4	0,4	0,1	1	4,9	0,25	0,25	0,15	Ti 0,15	El resto

A continuación, en la tabla 3.2 se observan las propiedades mecánicas típicas de esta aleación a temperatura ambiente (20°C):

**Tabla 3.2.** Propiedades mecánicas de la AA5083 a temperatura ambiente (20°C)

Estado	Características a la tracción					Dureza
	Carga de rotura Rm (N/mm <sup>2</sup> )	Límite elástico Rp 0,2 (N/mm <sup>2</sup> )	Alargamiento A 5,65%	Límite a la fatiga (N/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a la cizalladura	Brinell (HB)
					(N/mm <sup>2</sup> )	
0/H111	300	145	23	250	175	70
HX2	330	240	17	280	185	90
HX4	360	275	16	280	200	100
HX6	380	305	10		210	105
HX8	400	335	9		220	110
HX9	420	370	5		230	115

Asimismo, también se presentan las propiedades físicas típicas de esta aleación a temperatura ambiente (20°C) en la Tabla 3.3:

**Tabla 3.3.** Propiedades físicas de la AA5083 a temperatura ambiente (20°C)

Módulo elástico (MPa)	Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	Intervalo de fusión (°C)	Coefficiente de dilatación lineal	Conductividad térmica (W/mK)	Resistividad eléctrica a 20°C	Conductividad eléctrica (% IACS)	Potencial de disolución (V)
			(1/10 <sup>6</sup> K)		(μΩcm)		
71.000	2,66	580-640	23,8	117	6	28,5	-0,86

## 3.2-Simulación por elementos finitos

### 3.2.1-Introducción

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés), es un método muy utilizado para la resolución de problemas en ingeniería. Se trata de un método numérico general, que se basa en la aproximación de soluciones de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales.

El MEF es un método numérico que resuelve ecuaciones diferenciales mediante la discretización de la estructura en elementos de diversas formas (volúmenes, superficies...) conectados entre sí por nodos. En estos nodos se obtienen unos resultados que se aproximan a una función que es la solución.

Existen dos tipos de geometrías para crear un modelo: en 2D y en 3D. Los modelos en 2D destacan por su simplicidad y velocidad en el cálculo mientras que los modelos en 3D necesitan equipos más potentes y un mayor tiempo de cálculo.

En cada uno de estos modelos se puede decidir cómo se quiere que se comporte el sistema, si de manera lineal o no lineal. Los sistemas no lineales tienen en cuenta los contactos y las deformaciones plásticas mientras que los sistemas lineales son menos complejos y no tienen en cuenta deformaciones plásticas.

Es por esto que se ha decidido utilizar el programa MSC Marc Mentat 2014TM dado que en el proceso de ECAE se ha de resolver un problema no lineal y el material está sometido a altas deformaciones. También hay que tener en cuenta parámetros como: rozamiento, contactos y ley de endurecimiento del material, entre otros.

Como norma general todo método de elementos finitos se divide en tres fases:

- **Preprocesado**: se debe conseguir especificar nuestro modelo de elementos finitos y las condiciones de contorno que le rodean.

Primeramente, se construye el modelo de la estructura o proceso que se va a simular. Este modelo se crea como una réplica del modelo real, por lo tanto debe ser lo más realista posible y tener en cuenta los parámetros y características más importantes de éste. A continuación, tras haber definido la geometría, se dividirá el modelo en elementos más pequeños, unidos todos ellos mediante nodos.

- **Cálculo del problema**: consiste en la resolución del modelo de elementos finitos. Todos los cálculos son realizados sobre la malla formada por el conjunto de nodos. A partir de las propiedades de los elementos, se relacionan un conjunto de variables incógnitas, definidas en cada nodo, a las que se denominan grados de libertad. El programa escribe en forma de sistema de ecuaciones el conjunto de relaciones entre los valores de las distintas variables y los distintos nodos. Para aproximar la solución se utilizan diversos criterios de convergencia que se consiguen implementar mediante herramientas matemáticas.
- **Postprocesado de resultados**: consiste en el estudio y análisis de los resultados obtenidos en la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales. Para obtener los resultados requeridos (esfuerzos, deformaciones, daño,...) se cuenta con numerosas herramientas numéricas y gráficas.

### 3.2.2-Antecedentes

El desarrollador del método de elementos finitos fue Richard Courant en 1943. Empleó el método por primera vez para obtener soluciones aproximadas en un sistema de vibración mediante el método de Ritz de análisis numérico.

El cálculo matricial de estructuras se inició con la llegada de los primeros ordenadores. Esto hizo que se requiriera a los ordenadores menores tiempos

de cálculo y mayores memorias. A su vez se desarrollaron algoritmos más eficientes para contribuir al ahorro de tiempo en el cálculo (**G. Pelosi et al., 2007**)

En los años 60 y 70 el método de elementos finitos se populariza en la industria gracias a la llegada de los centros de cálculo y los primeros programas comerciales. También se genera un gran crecimiento de la bibliografía relacionada con el MEF y se amplía el campo del método a otro tipo de problemas como los no lineales. Asimismo, se asientan en las universidades las bases matemáticas del método, ya que su aparición fue como técnica de ingeniería y luego se desarrolló como método numérico matemático.

Con la bajada del precio de los ordenadores personales en los años 80 se extiende el uso de los programas comerciales de MEF que comienzan a especializarse en los distintos campos de la ingeniería. En esta década se sientan las bases del método que se conoce en la actualidad como son el uso de pre y post-procesadores gráficos para realizar el mallado y la representación gráfica de la solución. Además, se sigue avanzando en el desarrollo del método y se comienza a aplicar en nuevos modelos de comportamiento (plasticidad, fractura, daño, etc.) y en el análisis de los errores (**C. J. Luis-Pérez et al., 2004**)

Actualmente el MEF se emplea generalmente para el análisis de elementos continuos. Asimismo, mediante el MEF se consigue una gran precisión. Esto es debido al incremento de la potencia de cálculo de los ordenadores.

A día de hoy, cualquier empresa u organismo es capaz de verificar un diseño propuesto y de ajustarse a las especificaciones del cliente antes de la fabricación o construcción del mismo gracias al MEF. Su auge es debido, a que se trata de un método que puede ser utilizado para predecir el comportamiento de un diseño ahorrando costes y tiempo de ensayo de prototipos (**J. W. Signorelli et al., 2006**).



# Capítulo 4

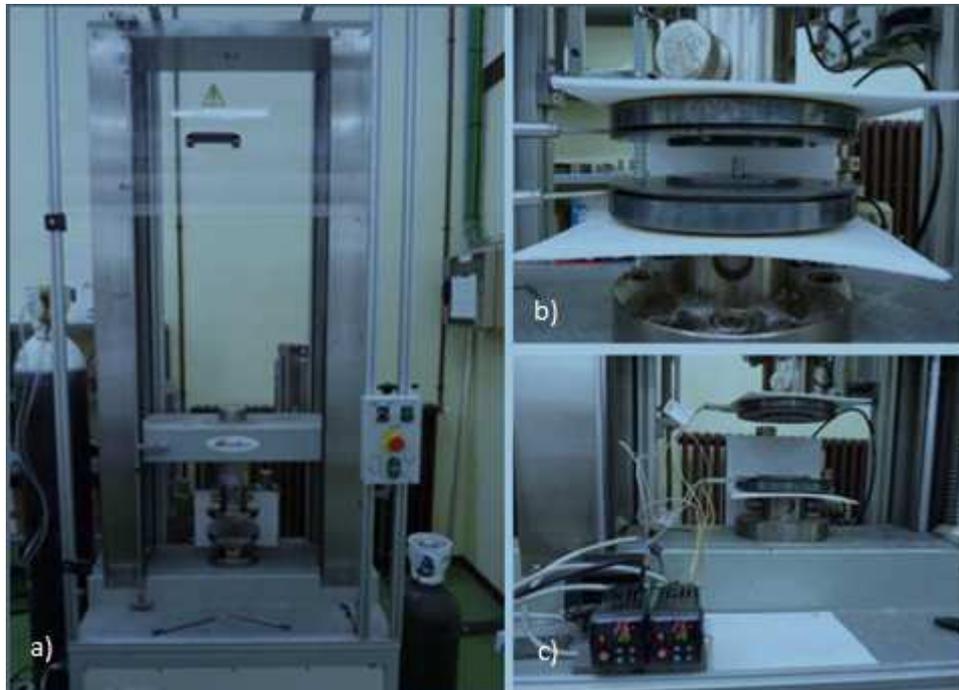
Estudio  
experimental



## 4.-Estudio experimental

### 4.1-Ensayo de compresión

Para llevar a cabo el ensayo de compresión de las probetas (**J. León et al., 2016**), previamente fue necesario el diseño y fabricación de las plataformas plano-paralelas que se muestran en la siguiente figura.



**Figura 4.1.** a) Máquina de ensayos universal, b) Diseño de las plataformas plano-paralelas, c) Acoplamiento del sistema de resistencias para la realización de ensayos de compresión (J. León et al., 2016)

Finalmente, se introdujeron resistencias térmicas para poder así realizar los ensayos de compresión isotérmicamente. Con el objetivo de aumentar la conductividad del calor hacia el interior de las matrices, y en concreto hasta la zona de contacto con la probeta de ensayo, se colocó en la parte exterior de las resistencias una chapa de acero, tal y como se observa en la Figura 4.1(c).

De esta manera, se consiguen hacer ensayos a temperaturas más altas, debido a que la evacuación del calor por convección al exterior es menor. La temperatura de las resistencias se controla mediante un termopar, que llevan incluidas cada una de las plataformas, y que a su vez, es modificable desde los controladores digitales PDI, que se muestran en la Figura 4.1(c).

Una vez programadas las temperaturas de ensayo de las dos resistencias, mediante un termopar digital externo se controla la temperatura de las probetas hasta que alcanzan un valor estacionario igual al deseado para cada ensayo.

Seguidamente, se coloca la probeta y se mantiene entre las plataformas plano-paralelas, como se muestra en la Figura 4.1(b), hasta alcanzar la misma temperatura que éstas, para poder realizar así una compresión isoterma, de esta manera se tiene un mayor control de la temperatura de ensayo durante el proceso de deformación.

La compresión de las probetas ensayadas realiza una carrera de unos 14 mm empleando para ello en torno a 14 segundos.

#### 4.1.1.- Probetas ensayadas

Para este estudio experimental se emplearon probetas cilíndricas de 8 mm de diámetro y 16 mm de longitud aproximadamente. Se muestran a continuación las diferentes probetas empleadas en los ensayos en la tabla 4.1:

**Tabla 4.1.** Valores característicos de las probetas ensayadas

	AA	Estado	T (°C)	Vel (mm/minn)	Probeta	D ini. (mm)	h ini. (mm)	A (mm2)
AA5083 N0 T25 V60 P1	5083	0	25	60	1	7,95	15,95	49,64
AA5083 N0 T100 V60 P1	5083	0	100	60	1	7,98	16,05	50,01
AA5083 N0 T150 V60 P1	5083	0	150	60	1	8,03	15,93	50,64
AA5083 N0 T200 V60 P1	5083	0	200	60	1	7,95	15,99	49,64
AA5083 N0 T250 V60 P1	5083	0	250	60	1	7,99	15,97	50,14
AA5083 N0 T300 V60 P1	5083	0	300	60	1	8,00	15,97	50,27

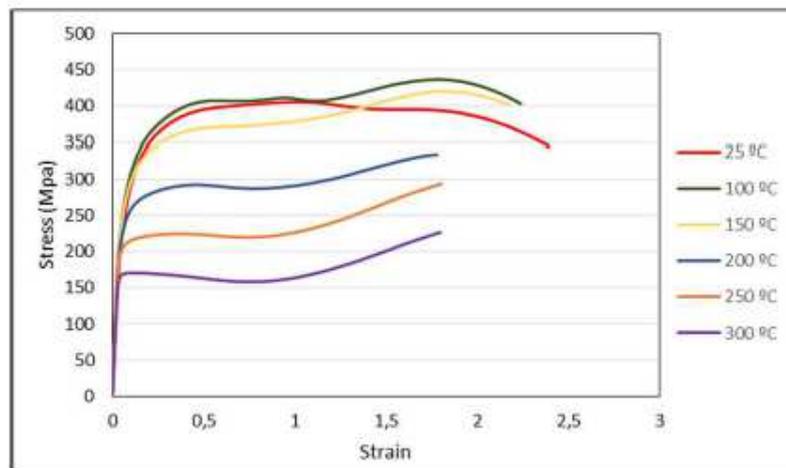
## 4.2-Obtención experimental de las curvas de fluencia de la aleación de aluminio AA5083.

Para obtener las leyes de fluencia de todas las aleaciones, se estudiaron 6 temperaturas diferentes de ensayo (25°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C y 300°C) a una velocidad de compresión de 60 mm/min. (J. León et al., 2016)

Las probetas se colocan sobre la plataforma inferior y se lubrica todo el conjunto con teflón. En los ensayos a temperaturas superiores a 25°C, se mantiene la probeta sobre la plataforma inferior un tiempo de 5 minutos, para que alcance la misma temperatura que las placas y por lo tanto la compresión sea isotérmica.

Una vez se han realizado las compresiones de las distintas aleaciones a las temperaturas seleccionadas, se transforma la curva carga-carrera obtenida para cada una de ellas, en una curva tensión-deformación.

Estas leyes de fluencia obtenidas serán las que se empleen posteriormente en la simulación de elementos finitos.



**Figura 4.2.** Leyes de fluencia para la AA5083 N0 en función de la temperatura (J. León et al., 2016)

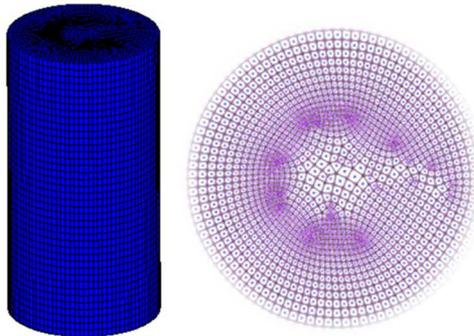
## 4.3-Desarrollo del modelo FEM

En este apartado se describe el modelizado de las probetas ensayadas con el software de elementos finitos Marc Mentat™. Se realizan ensayos de compresión a las diferentes temperaturas requeridas empleando 560 pasos para cada ensayo.

### 4.3.1-Geometría

#### 4.3.1.1-Probeta

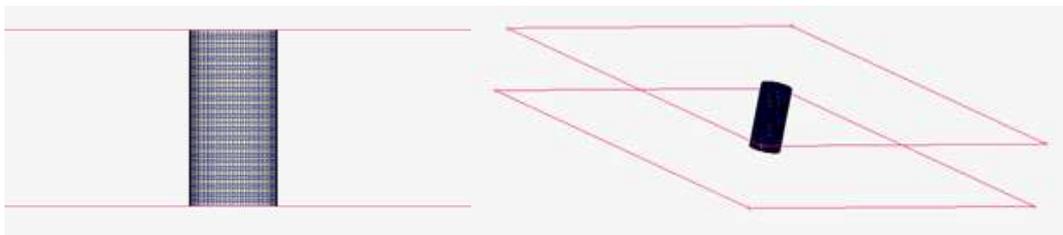
Las probetas objeto de estudio tienen un diámetro de 8 mm y una longitud de 16 mm aproximadamente.



**Figura 4.3.** a) Modelizado de una probeta en Marc Mentat™, b) Mallado de la cara superior

#### 4.3.1.2-Plataformas plano-paralelas

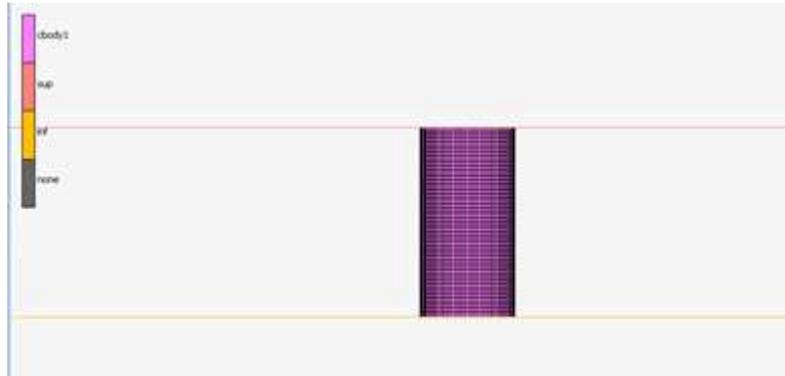
Se crean dos sólidos rígidos que simularán las plataformas plano-paralelas rectangulares en contacto con las caras superiores de la probeta. La plataforma superior se desplaza hacia la inferior a una velocidad de 60 mm/min provocando la compresión de la probeta.



**Figura 4.4.** Plataformas plano-paralelas

### 4.3.2-Contactos

El siguiente punto a definir son los contactos. Para ello es necesario establecer el coeficiente de rozamiento existente entre la probeta y las plataformas plano-parallelas. El contacto simulado es un rígido-deformable.



**Figura 4.5.** Contactos en la simulación

El objetivo de nuestro estudio es la determinación de un coeficiente de rozamiento variable, como ya se ha tratado en el capítulo 4.

Asimismo, es importante definir tablas de contacto. En este caso de ensayo de compresión los contactos se definen en la tabla 5.1:

**Tabla 4.2.** Relaciones de contacto.

	Nombre	Tipo	1	2	3
1	Probeta	Deformable		X	X
2	Plataforma sup.	Rígido	X		
3	Plataforma inf.	Rígido	X		

### 4.3.3-Tipo de remallado y parámetros

El remallado se elige con un tamaño de elemento fino (0,5) y de forma tetraédrica. Se crea un único tipo de remallado que se aplicará únicamente al cilindro.

Se remallará cada 50 pasos, habitualmente los procesos de forja requieren un remallado con una frecuencia mayor pero en este caso al emplear 560 pasos se considera suficiente.

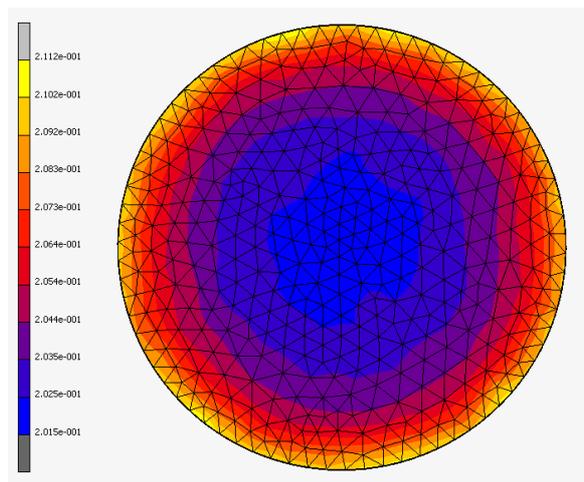
### 4.3.4-Resultados simulación

En este apartado se detallan los resultados obtenidos tras someter las probetas al ensayo de compresión, se muestran los datos en la tabla 5.2:

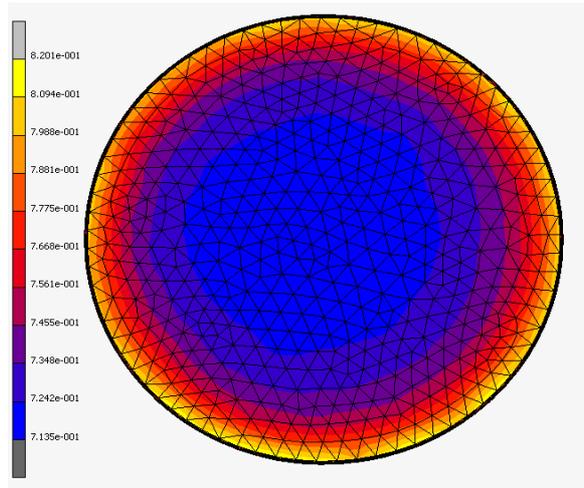
**Tabla 4.3.** Dimensiones de las probetas antes y después del ensayo.

	AA	D ini. (mm)	h ini. (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	D fin. (mm)	h fin. (mm)
AA5083 N0 T25 V60 P1	5083	7,95	15,95	49,64	18,95	2,94
AA5083 N0 T100 V60 P1	5083	7,98	16,05	50,01	18,95	3,07
AA5083 N0 T150 V60 P1	5083	8,03	15,93	50,64	19,10	3,03
AA5083 N0 T200 V60 P1	5083	7,95	15,99	49,64	17,40	3,59
AA5083 N0 T250 V60 P1	5083	7,99	15,97	50,14	18,20	3,27
AA5083 N0 T300 V60 P1	5083	8,00	15,97	50,27	18,60	3,07

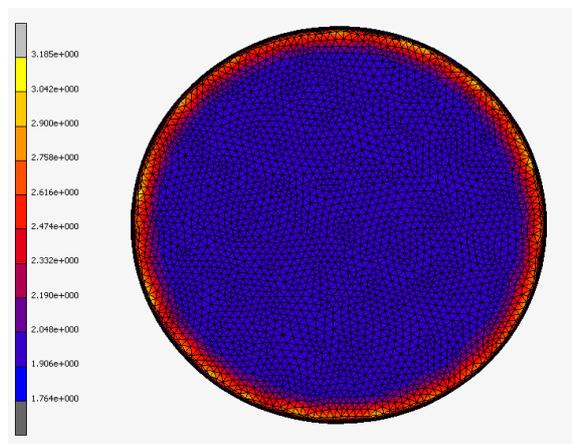
A continuación, se exponen la representación gráfica de la deformación plástica total equivalente alcanzada en diferentes puntos de la compresión para la temperatura de 25°C.



a) Deformación plástica total equivalente en la probeta a los 3 mm de compresión.



b) Deformación plástica total equivalente en la probeta a los 8 mm de compresión.



c) Deformación plástica total equivalente en la probeta al final de la compresión.

**Figura 4.6.** Representación gráfica de la deformación plástica total equivalente alcanzada en diferentes puntos de la compresión para la temperatura de 25 °C

## 4.4-Cálculo del coeficiente de rozamiento variable

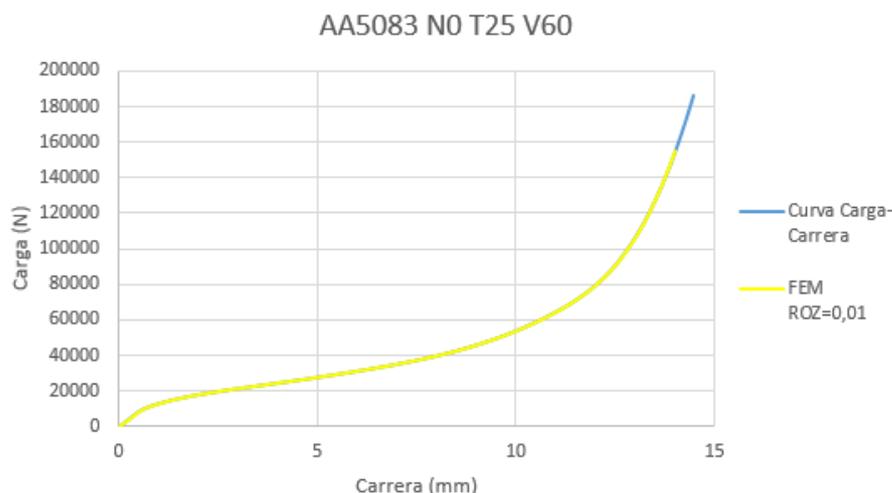
En el siguiente apartado se detalla el proceso realizado para la obtención de una ley de rozamiento variable en función de la presión.

### 4.4.1-Planteamiento inicial

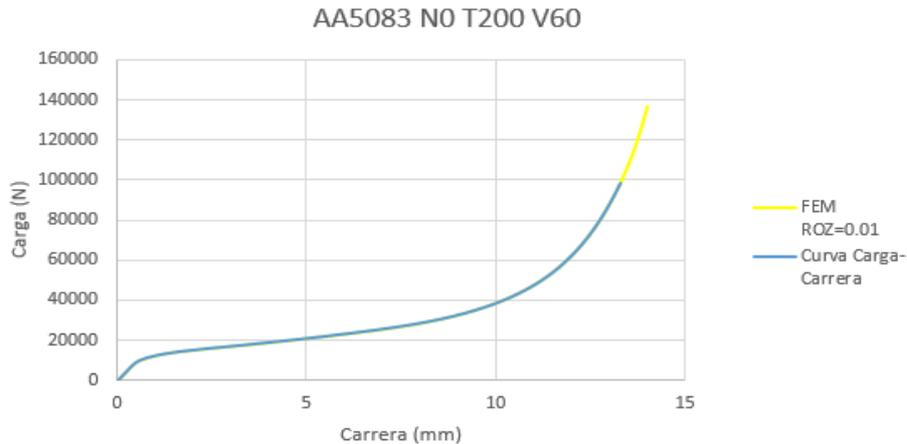
Se llevan a cabo las simulaciones mediante elementos finitos con el software Marc Mentat™. Las distintas simulaciones se realizarán por zonas para encontrar rozamiento variable con la presión manteniendo la temperatura constante.

Una vez realizada la simulación se comparará la curva carga-carrera experimental con la obtenida mediante elementos finitos obteniendo así la curva rozamiento-presión para una temperatura, repitiendo el proceso para las diferentes temperaturas elegidas.

En el primer tramo se plantean valores de coeficiente de rozamiento casi nulos ( $\mu=0,01$ ). Al lanzar las primeras simulaciones se obtiene que las curvas carga-carrera experimentales son prácticamente iguales a las simuladas para rozamiento  $\mu=0,01$  a todas las temperaturas ensayadas (se mostrarán únicamente los resultados de las temperaturas de 25 y 200°C).



**Figura 4.7.** Comparación curva carga-carrera experimental y simulada para la temperatura de 25°C.



**Figura 4.8.** Comparación curva carga-carrera experimental y simulada para la temperatura de 200°C.

Dado que los coeficientes de rozamiento en una forja axisimétrica entre acero y aluminio toman valores cercanos a  $\mu=0,2$  (Nilanjan Banerjee et al., 2016) la curva carga-carrera simulada con rozamiento  $\mu=0,01$  debería ser siempre inferior a la curva experimental.

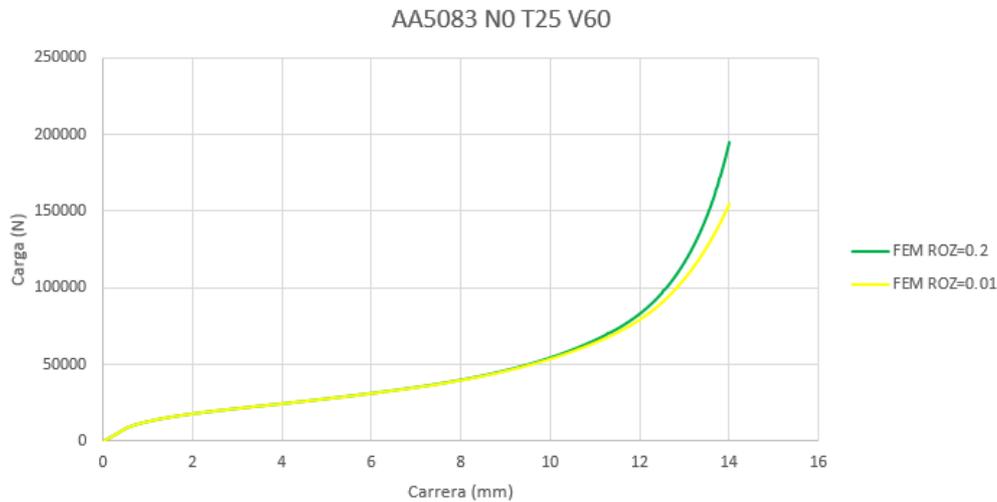
La explicación de este suceso se encuentra en las leyes de material empleadas en la simulación. Dichas leyes de material son obtenidas experimentalmente durante el ensayo de compresión entre plataformas plano-paralelas, por lo tanto, parte de la fuerza que influye a la hora de determinar las leyes es debida al rozamiento existente entre la probeta y las plataformas plano-paralelas.

Para obtener la ley de fluencia sin esa influencia previa de rozamiento, lo ideal sería realizar un ring compression test (RCT), con el objetivo de determinar el rozamiento existente en el ensayo y poder así obtener las leyes de material reales sin la influencia del rozamiento.

Dado que es inviable realizar un RCT para este estudio, se parte de un valor de rozamiento ( $\mu=0,2$ ) basándose en los artículos sobre ring test anteriormente nombrados.

A continuación, se lanzan simulaciones con coeficientes de rozamiento de 0,2 y 0,01 con el objetivo de obtener la variación porcentual entre las distintas curvas carga-carrera.

El objetivo de estas simulaciones es obtener qué porcentaje de carga es debido al rozamiento en el ensayo.



**Figura 4.9.** Comparación curva carga-carrera simulada para coeficientes de rozamiento 0,2 y 0,01 para la temperatura de 25°C.

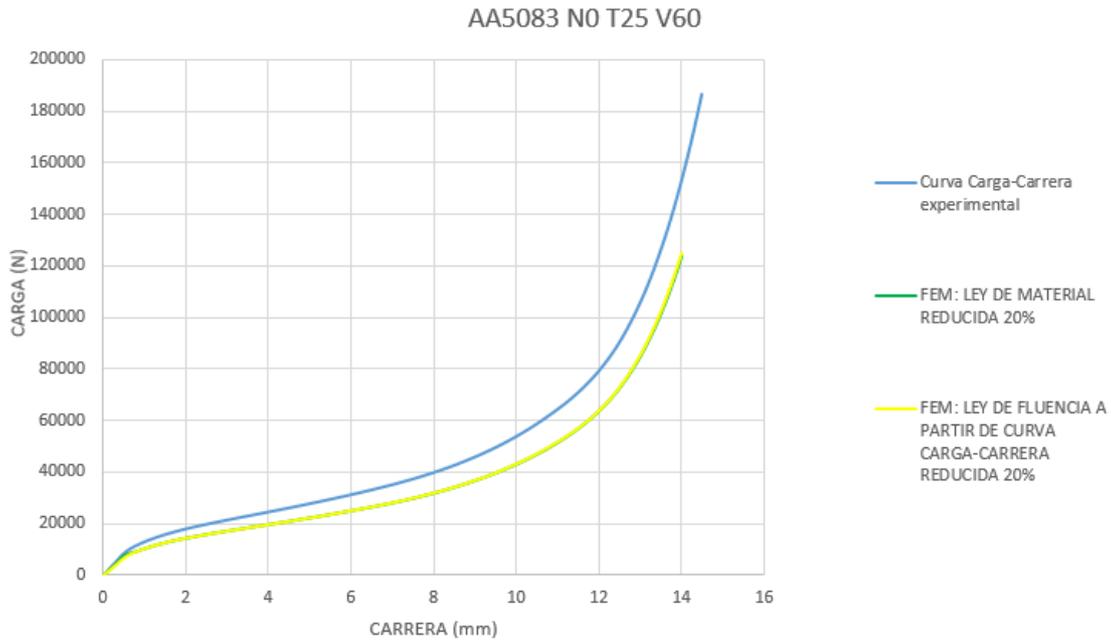
Repitiendo el proceso para las distintas temperaturas se obtiene la variación porcentual para todos los casos.

#### 4.4.2-Elección de la metodología

Se aprecia una variación porcentual máxima en torno al 20% en las simulaciones. Se plantean dos alternativas para la reducción de la ley de material:

- Aplicación de la variación porcentual a la ley de material
- Aplicación de la variación porcentual a la curva carga-carrera experimental y obtener a partir de esta una nueva ley de fluencia

Se lanzan simulaciones con rozamiento  $\mu = 0,01$  reduciendo un 20% la ley de fluencia por un lado, y por otro lado obteniendo una nueva ley de fluencia a partir de la curva carga-carrera experimental reducida un 20%.



**Figura 4.10.** Comparación curva carga-carrera simulada para cada método con coeficiente de rozamiento 0,01 para la temperatura de 25°C.

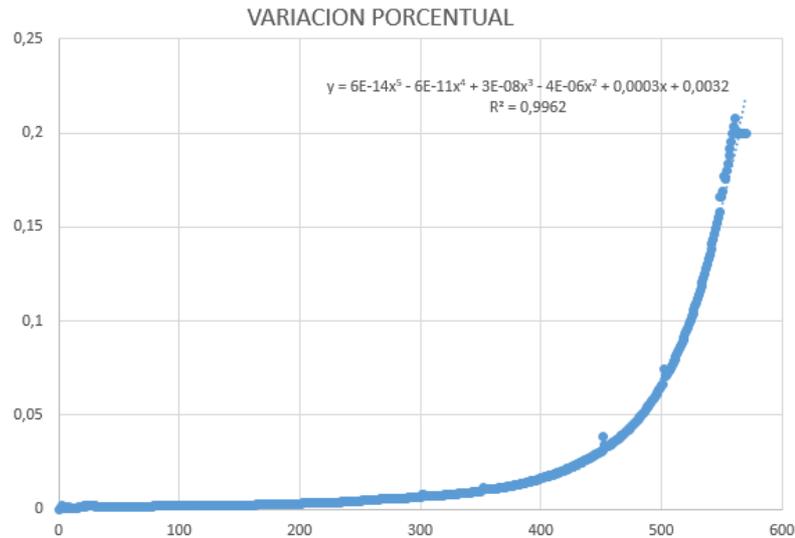
Como se puede comprobar gráficamente los resultados obtenidos para ambos métodos son muy similares, por lo tanto, se escoge por simplicidad:

- Aplicación de la variación porcentual a la ley de material

El siguiente punto a discusión es la forma de aplicación de la variación porcentual a la ley de fluencia.

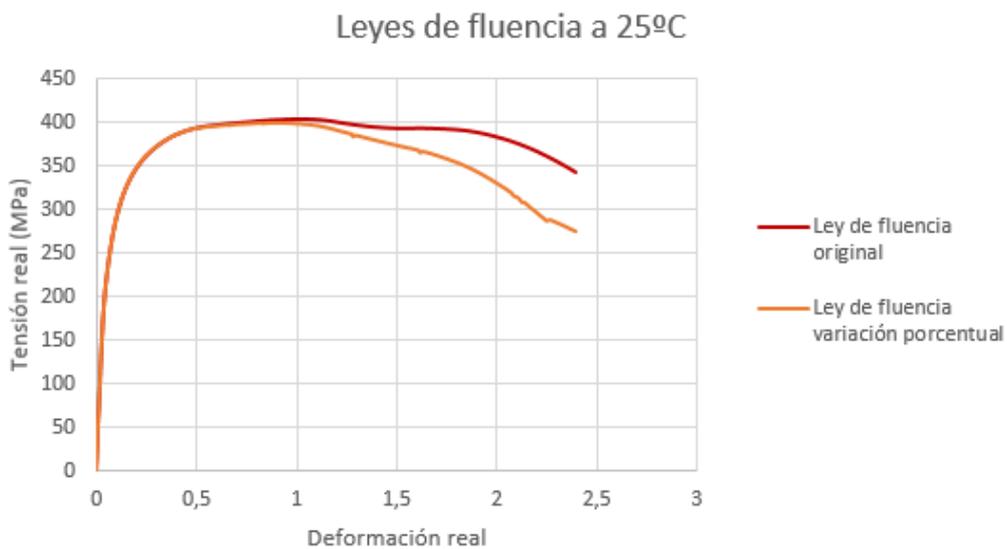
Como se observa en la figura 4.6 la diferencia entre las curvas carga-carrera experimental y simulada tras la aplicación de una reducción del 20% es excesiva. Además, no representa fielmente la variación que supone la influencia del rozamiento.

Se decide adaptar la variación porcentual para aplicarla directamente a la ley de fluencia experimental.



**Figura 4.11.** Variación porcentual entre las curvas carga-carrera simulada con coeficiente de rozamiento 0,01 y 0,2 para la temperatura de 25°C.

Tras adaptar la variación porcentual al número de valores de la ley de fluencia experimental se obtiene la nueva ley de fluencia.

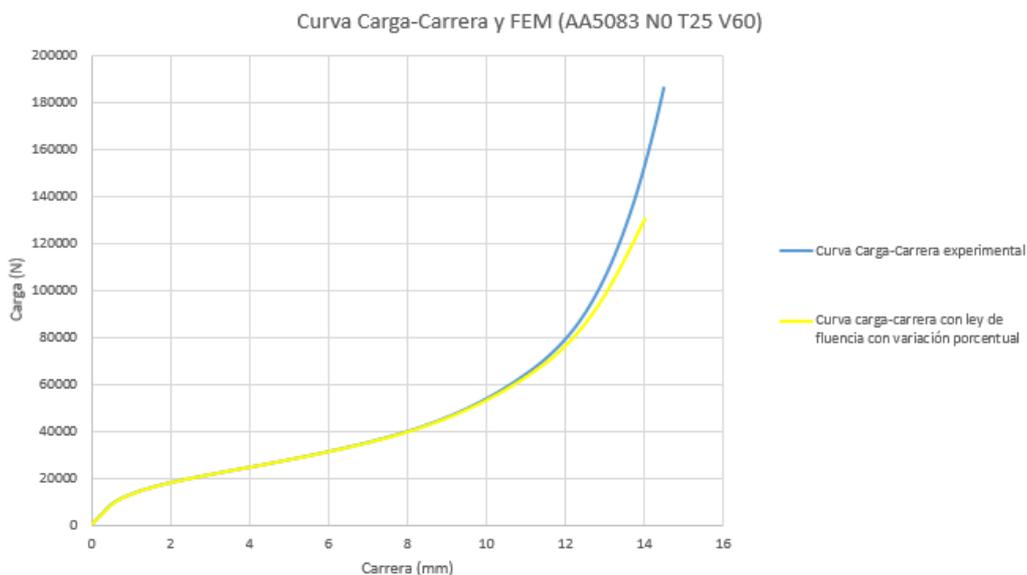


**Figura 4.12.** Leyes de fluencia para la temperatura de 25°C.

A partir de este punto se trabajará con las nuevas leyes de fluencia para cada temperatura.

### 4.3.3-Desarrollo del método

Una vez conseguida la ley de fluencia adecuada para cada temperatura se procede a lanzar las simulaciones y evaluarlas por tramos. En la siguiente figura se muestra la curva carga-carrera simulada de la cual partimos para aplicar la metodología escogida.



**Figura 4.13.** Curva carga-carrera experimental y simulada para rozamiento 0,01 a la temperatura de 25°C.

La curva carga-carrera de partida presenta unos errores en torno al 5% respecto a la curva experimental.

Se divide la curva escogiendo un tramo por cada milímetro de carrera de compresión (en el caso expuesto de 25°C se obtienen 14 tramos).

El siguiente paso es la obtención de un coeficiente de rozamiento variable con la presión sufrida por la probeta en la compresión.

Se evalúa la curva carga-carrera simulada respecto a la experimental en cada tramo partiendo desde el primer incremento, dicha evaluación se realiza con Matlab. El programa muestra el error cuadrático medio así como el mayor y menor porcentaje de error.

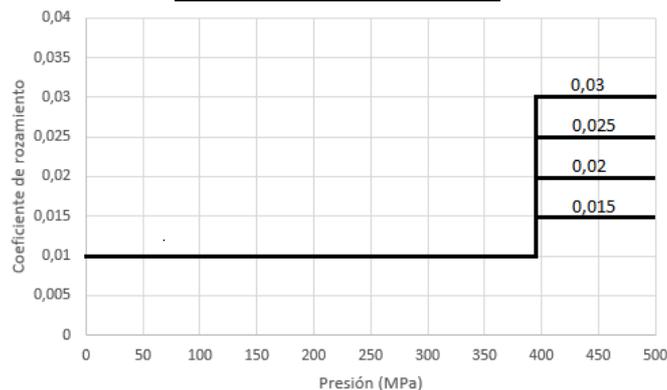
Se decide tomar como aceptable un error menor del 1%, dentro de cada tramo cuando el error supera ese 1% se obtiene la presión para ese incremento de la simulación. Una vez obtenido el valor de presión a partir del cual el coeficiente de rozamiento planteado no es satisfactorio se plantea la tabla de rozamiento variable con la presión, se lanzan 4 simulaciones con un valor de rozamiento mayor al inicial.

Se procede a explicar brevemente la aplicación de este método a la temperatura de 25°C.

En dicho caso se detecta un error mayor que el 1% cuando la presión alcanza el valor de 388,3 MPa, por lo tanto se plantean 4 tablas de rozamiento variable con la presión:

**Tabla 4.4.** Tabla de coeficiente de rozamiento frente a presión que engloba las 4 tablas planteadas.

TABLA Rozamiento var	
PRESION (MPa)	Cof
0,01	0,01
388,3	0,01
389	0,015
	0,02
	0,025
	0,03



**Figura 4.14.** Primer tramo de la función de rozamiento variable frente a la presión para la temperatura de 25°C.

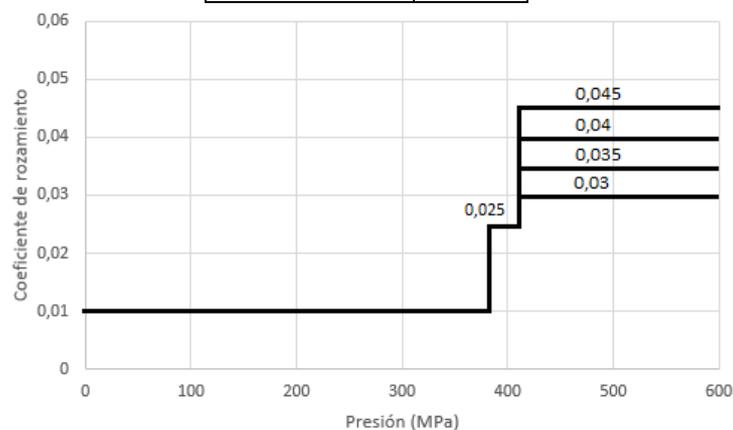
A continuación se vuelve a evaluar cada una de las curvas carga-carrera simuladas frente a la experimental escogiendo la curva que tenga un menor

porcentaje de error, siendo en este caso la curva que toma un coeficiente de rozamiento de 0,025.

Se vuelve a detectar un error mayor que el 1% cuando la presión toma un valor de 408,9 MPa, análogamente al caso anterior se vuelve a plantear 4 tablas con un aumento de rozamiento:

**Tabla 4.5.** Tabla de coeficiente de rozamiento frente a presión que engloba las 4 tablas planteadas en el siguiente tramo.

TABLA Rozamiento var	
PRESION (MPa)	Cof
0,01	0,01
388,3	0,01
389	0,025
408,9	0,025
410	0,03
	0,035
	0,04
	0,045

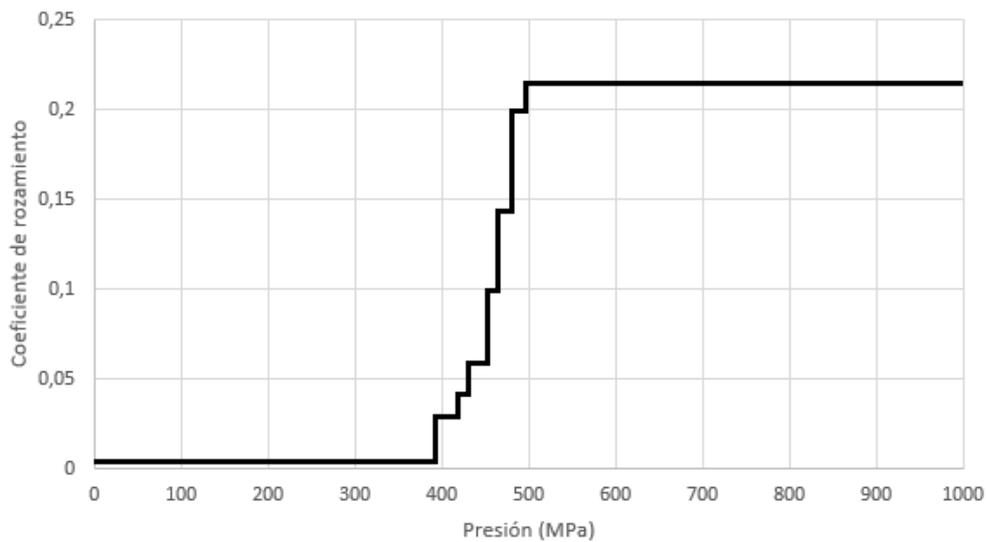


**Figura 4.15.** Segundo tramo de la función de rozamiento variable frente a la presión para la temperatura de 25°C.

En este caso el coeficiente de rozamiento que proporciona un error menor es el de 0,04. Mediante el empleo de esta metodología en los sucesivos tramos se logra obtener una curva carga-carrera ajustada a la experimental y cuyo coeficiente de rozamiento varía frente a la presión de la siguiente manera:

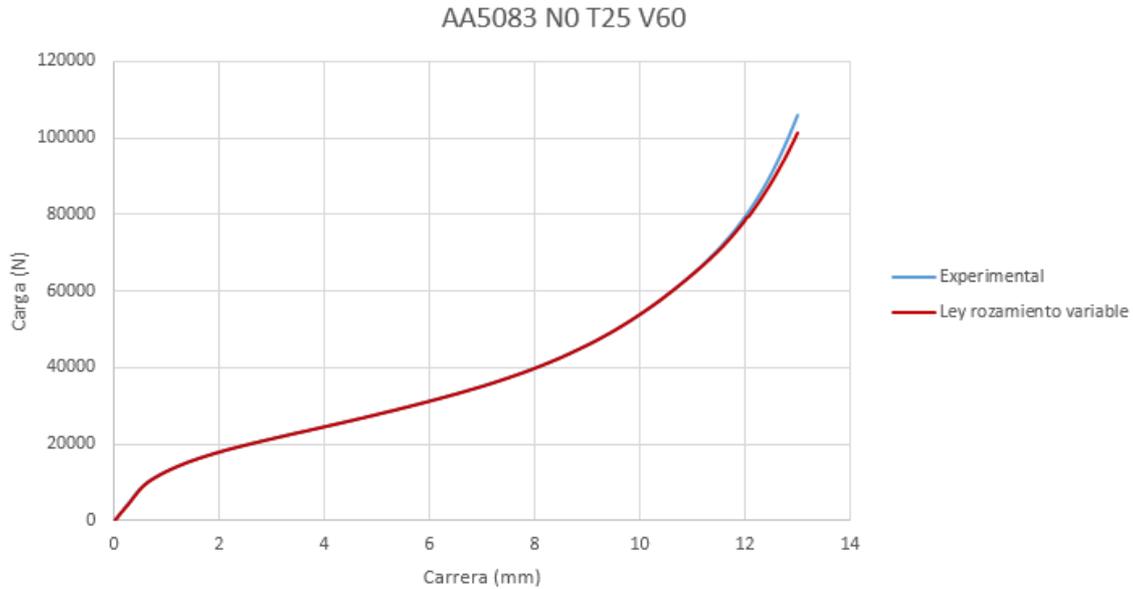
**Tabla 4.6.** Tabla de coeficiente de rozamiento frente a presión para el ensayo a temperatura de 25°C.

TABLA Rozamiento variable	
PRESION (Mpa)	Cof
0,01	0,01
388,3	0,01
389	0,025
408,9	0,025
410	0,04
421,9	0,04
422	0,06
442	0,06
443	0,1
450	0,1
451	0,14
470	0,14
480	0,2
490	0,22
1000	0,22



**Figura 4.16.** Función de rozamiento variable frente a la presión para la temperatura de 25°C.

Aplicando esta ley de rozamiento variable en la simulación se obtiene la siguiente curva carga-carrera:



**Figura 4.17.** Curva carga-carrera experimental y simulada para rozamiento variable a la temperatura de 25°C.

En la tabla 4.4 se muestran tanto el error cuadrático medio como los porcentajes de error mínimo y máximo de la curva carga-carrera simulada frente a la experimental.

**Tabla 4.7.** Tabla de errores filtrados mediante Matlab para la temperatura de 25°C.

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Error cuad. med.	22370,91	1484,80	1478,56	1003,21	1259,00	2181,59	4052,62
Max % error	-0,66	-0,15	-0,15	-0,09	-0,12	-0,14	-0,15
Min % error	-6,19	-0,43	-0,25	-0,15	-0,17	-0,18	-0,23

	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13
Error cuad. med.	5130,14	4557,20	3481,51	5342,25	32554,57	756836,12
Max % error	-0,15	-0,13	-0,03	0,02	-0,24	-0,99
Min % error	-0,23	-0,18	-0,22	-0,24	-0,89	-3,39

Como se puede apreciar existen errores considerables en el primer mm de compresión, esto se puede deber a dos factores:

- Asentamiento tanto de las matrices como de la probeta.
- Parte elástica lineal tomada por el programa Marc Mentat™

Asimismo en los dos últimos tramos de compresión los errores en este caso superan el 3%, dicho error es debido a los siguientes factores:

- Abarrilamiento de la probeta
- La ley de material empleada no contempla deformaciones de la magnitud aparecidas en el final de la compresión

Se emplea la misma metodología para las temperaturas de 100, 150 y 200 °C obteniendo resultados muy similares.

Sin embargo en las simulaciones de 250 y 300°C surgen complicaciones que evitan una correcta obtención de la ley de rozamiento variable. Al tratarse de una deformación en caliente a partir de cierta temperatura tiene lugar la recristalización dinámica, se produce la nucleación y creación de nuevos granos que da lugar a variaciones en la ley de material que para el caso de la AA5083 aparece en torno a 240°C.

Este fenómeno provoca una variación en las propiedades mecánicas finales del material, dando lugar a un descenso de la carga en algunos tramos de la curva carga-carrera (**K. Tafzi et al., 2001**), por lo tanto es imposible conseguir resultados claros sin obtener una nueva variación de la ley de material por esta recristalización dinámica.

# Capítulo 5

## Validación del modelo



## 5.-Validación del modelo

Se toma como válido un error menor al 1% respecto a las curvas carga-carrera experimental y simulada. Estos errores se evalúan exceptuando tanto el primer tramo de la compresión como el último. A continuación se describen los resultados obtenidos para las diferentes temperaturas:

- AA5083 N0 T25 V60

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Error cuad. med.	22370,91	1484,80	1478,56	1003,21	1259,00	2181,59	4052,62
Max % error	-0,66	-0,15	-0,15	-0,09	-0,12	-0,14	-0,15
Min % error	-6,19	-0,43	-0,25	-0,15	-0,17	-0,18	-0,23

	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13
Error cuad. med.	5130,14	4557,20	3481,51	5342,25	32554,57	756836,12
Max % error	-0,15	-0,13	-0,03	0,02	-0,24	-0,99
Min % error	-0,23	-0,18	-0,22	-0,24	-0,89	-3,39

Se aprecia un error mínimo de -0,03% en el tramo 10 y un error máximo de -0,89% en el tramo 12.

- AA5083 N0 T100 V60

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Error cuad. med.	24974,03	5972,17	8838,23	7577,04	10977,42	12189,05	9402
Max % error	-0,18	-0,08	-0,36	-0,33	-0,37	-0,32	-0,21
Min % error	-5,69	-0,84	-0,53	-0,42	-0,42	-0,40	-0,33

	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13
Error cuad. med.	7476,54	14532,37	19360,90	7378,14	31139,85	1699064,78
Max % error	-0,06	-0,18	-0,21	0,01	-0,07	-0,01
Min % error	-0,28	-0,31	-0,31	-0,39	-0,39	-2,09

El valor mínimo de error es igual a -0,06% obtenido en el tramo 8 de la compresión mientras que el valor máximo se alcanza en el segundo tramo con un valor de -0,84%.

- AA5083 N0 T150 V60

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Error cuad. med.	19826,11	4685,65	7548,42	6764,38	8862,18	9911,41	11921,56
Max % error	4,24	-0,19	-0,36	-0,33	-0,35	-0,33	-0,30
Min % error	-7,44	-0,83	-0,49	-0,38	-0,38	-0,40	-0,41

	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13
Error cuad. med.	6488,29	3684,28	9117,95	19142,80	22326,34	1024004,73
Max % error	-0,10	-0,02	-0,14	-0,17	-0,09	-0,11
Min % error	-0,29	-0,18	-0,24	-0,28	-0,26	-1,84

El menor porcentaje de error se obtiene en el tramo 9 (0,02%) y el máximo valor en el tramo 2 (-0,83%).

- AA5083 N0 T200 V60

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Error cuad. med.	16486,34	5166,40	4497,58	4872,18	5565,81	6212,04	12371,87
Max % error	-0,36	-0,43	-0,37	-0,36	-0,35	-0,34	-0,34
Min % error	-5,73	-0,81	-0,46	-0,41	-0,39	-0,43	-0,53

	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12
Error cuad. med.	15165,56	3692,87	6354,49	18017,64	1065527,23
Max % error	-0,29	0,01	-0,15	-0,19	-0,41
Min % error	-0,58	-0,29	-0,27	-0,42	-3,38

Error mínimo presente en el tramo 10 con un valor de -0,15% y error máximo en el tramo 2 con valor -0,81%.

- AA5083 N0 T250 V60

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Error cuad. med.	18572,93	3536,68	4061,43	6461,61	8939,45	23547,18	90344,86
Max % error	-0,16	-0,42	-0,43	-0,53	-0,57	-0,65	-1,29
Min % error	-5,92	-0,71	-0,56	-0,67	-0,69	-1,29	-1,67

	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12
Error cuad. med.	56175	2509,15	21554,56	110948,18	1214457,04
Max % error	-0,55	0,02	-0,03	-0,64	-0,79
Min % error	-1,53	-0,55	-0,78	-1,14	-3,83

El valor mínimo de error es igual a -0,03% obtenido en el tramo 10 de la compresión, mientras que el valor máximo se alcanza en el séptimo tramo con un valor de -1,67%.

- AA5083 N0 T300 V60

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Error cuad. med.	23658,93	6219,68	9687,43	3258,61	3654,45	235447,18	154698,86
Max % error	-0,4	0,92	0,6	0,46	0,57	-0,6	0,25
Min % error	-5,3	0,34	0,46	0,23	-0,8	-0,9	-1,3

	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12
Error cuad. med.	996547	66578,15	26598,56	167832,18	3214457,04
Max % error	1,53	1,26	1,56	0,98	-0,79
Min % error	-0,06	0,55	-0,78	-0,64	-0,83

Se aprecia un error mínimo de -0,06% en el tramo 8 y un error máximo de +1,56% en el tramo 10.

En el caso de las temperaturas de 25, 100, 150 y 200°C el modelo empleado es válido ya que cumple con la especificación requerida. Por otro lado las temperaturas de 250 y 300°C no cumplen con la especificación debido al fenómeno de recristalización dinámica.



# Capítulo 6

## Conclusiones



## 6.-Conclusiones

### 6.1-Conclusiones generales

En este TFG se ha obtenido una función para el rozamiento frente a la presión para una AA5083 mediante compresión a diferentes temperaturas.

Se ha estudiado el comportamiento de dicha aleación tras ser sometida a un ensayo de compresión entre plataformas plano paralelas, partiendo siempre de un estado recocido.

Una vez realizado el ensayo experimental, se han lanzado simulaciones de elementos finitos para cada temperatura con el fin de evaluar estos resultados con los experimentales. Se ha observado que las leyes de fluencia de partida no representaban de manera correcta el ensayo de compresión realizado. Esto es debido a que se han obtenido a partir de los ensayos experimentales y estos ya se encuentran influenciados por el rozamiento real existente.

Se ha procedido a la búsqueda de una nueva ley de fluencia que no estuviera influenciada por el rozamiento. Para ello se ha asumido un coeficiente de rozamiento de 0,2 en el ensayo experimental. A continuación se ha valorado la variación porcentual existente entre las curvas carga-carrera simuladas con coeficientes de rozamiento 0,2 y 0,01. Dicha variación representa la influencia del rozamiento en la ley de material, por lo tanto se ha reducido la ley de fluencia original aplicando esta variación.

Seguidamente, se han obtenido las diferentes curvas carga-carrera ya corregidas. Se ha partido de estas curvas para ir aproximando a la curva real mediante el planteamiento de una función de rozamiento variable con la presión. Dicha función se ha obtenido evaluando la curva carga-carrera simulada y la experimental mediante Matlab en cada tramo de la compresión.

## 6.2-Conclusiones particulares

Se han obtenido resultados satisfactorios para las temperaturas de 25, 100, 150 y 200°C.

En el caso de la compresión a temperatura de 25°C se parte de un error máximo de -0,43% en el segundo tramo de la compresión hasta alcanzar un error de -3,39% en el tramo 12. El error aumenta de forma considerable en el tramo 13 como en todos los demás casos debido a los aspectos anteriormente comentados: el abarrilamiento y la posibilidad de que la ley de material no contemple deformaciones de tal magnitud.

Para la compresión a 100°C se obtiene un error máximo igual a -0,84% el error disminuye hasta la mitad de la compresión a -0,28% para volver a aumentar hasta un valor de -2,09% en el último tramo estudiado.

Los casos de 150 y 200°C dan lugar a resultados muy similares, partiendo de un error máximo de -0,83 y -0,81% respectivamente. Los errores obtenidos en los tramos intermedios son similares. Sin embargo en el último tramo el caso de 200°C presenta un error de -3,38% frente a -1,84% del caso de 150°C.

Por otra parte, en la compresión a 250°C los errores aumentan de manera significativa hasta llegar a no cumplir las especificaciones del modelo. Se parte de un error máximo de -0,71%, el error incumple las especificaciones en los tramos 6, 7, 8, 11 y 12 con valores por encima del 1%. Estos valores se deben a la recristalización dinámica como se ha comentado anteriormente.

Finalmente, en el caso de 300°C la curva carga-carrera simulada oscila situándose por encima de la experimental en numerosas ocasiones. Por ello se obtienen errores tanto positivos como negativos. La explicación de estos valores es análoga al caso de 250°C pero a mayor temperatura la recristalización dinámica tiene aún mayor efecto sobre las propiedades mecánicas del material.

# Capítulo 7

Referencias



## 7.-Referencias

- [1] A.M. Camacho, M.M. Marín, M.A. Sebastián. Dpto. Ingeniería de Construcción y Fabricación. “Estudio sobre la influencia del rozamiento en operaciones de forja localizada-incremental mediante simulación por elementos finitos”. Universidad Nacional de Educación a Distancia. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica (2010)
- [2] Wurong Wang (a), Yuzhang Zhao (a), Zimin Wang (a), Meng Hua (b), Xicheng Wei (a). “A study on variable friction model in sheet metal forming with advanced high strength steels”.
- a) School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai, China.
- b) MBE Department, City University of Hong Kong, Hong Kong, China.
- [3] Rahman Seifi, Kaveh Abbasi. “Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating”. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. August 2015.
- [4] Nilanjan Banerjee, Abhay Sharma. “Development of a friction model and its application in finite element analysis of minimum quantity lubrication machining of Ti-6Al-4V”. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology Hyderabad, Kandi, Sangareddy, Telangana, 502285, India. July 2016.
- [5] Tongyan Yue (a), Magd Abdel Wahab (b,c,d). “Finite element analysis of fretting wear under variable coefficient of friction and different contact regimes”.
- a) Department of Electrical Energy, Systems and Automation, Faculty of Engineering and Architecture, Ghent University, Belgium.

- b) Division of Computational Mechanics, Ton Duc Thang University, Ho Chi Minh City, Vietnam.
  - c) Faculty of Civil Engineering, Ton Duc Thang University, Ho Chi Minh City, Vietnam.
  - d) Soete Laboratory, Faculty of Engineering and Architecture, Ghent University, Technologiepark Zwijnaarde, Belgium.
- [6] F. Martín (a), M.J. Martín (a), L. Sevilla (a), M.A. Sebastián (b).
- a) Department of Manufacturing Engineering, University of Malaga.
  - b) Department of Manufacturing Engineering, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).
- [7] Chengliang Hu (a), Hengan Ou (b), Zhen Zhao (a).
- a) Institute of Forming Technology & Equipment, Shanghai Jiaotong University.
  - b) Department of Mechanical, Materials and Manufacture Engineering, University of Nottingham.
- [8] Hasan Sofuoglu (a), Jahan Rasty (b)
- a) Department of Mechanical Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.
  - b) Department of Mechanical Engineering, Texas Tech University, Lubbock.
- [9] J. Valero, M.M. Marín, A.M. Camacho. "Influence of Load Application Methodology in the Performance of Ring Compression Tests". Department of Manufacturing Engineering, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)
- [10] Yanchun Zhu (a), Weidong Zeng (a), Xiong Maa, Qingan Tai (b), Zhihua Li (b), Xiaoguang Li (b)." Determination of the friction factor of Ti-6Al-4V

titanium alloy in hot forging by means of ring-compression test using FEM”

a) State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi’an PRChina.

b) Shenyang LimingAero-engine (Group) Corporation Limited, Shenyang, PRChina.

[11] G. Pelosi, “The Finite-Element Method, Part I: R. L. Courant”, Antennas and Propagation Magazine IEEE: Volume 49, Issue 2, April 2007, Pages 180-182.

[12] J. León, C.J. Luis, J.P. Fuertes, I. Puertas, R. Luri, D. Salcedo. “A proposal of a constitutive description for aluminium alloys in both cold and hot working”. Mechanical, Energetics and Materials Engineering Department, Public University of Navarre.

[13] K. Tafzi, J.M. Cabrera, J.M. Prado. “La recristalización dinámica durante la deformación en caliente de un acero calidad armco” Rev. Metal. Madrid 37 (2001) 184-189.



# Capítulo 8

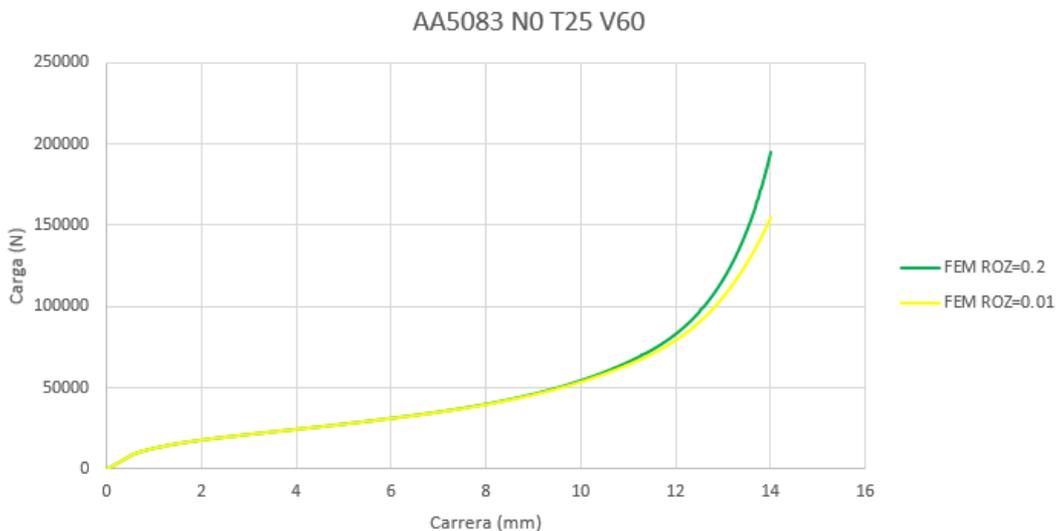
Anexos



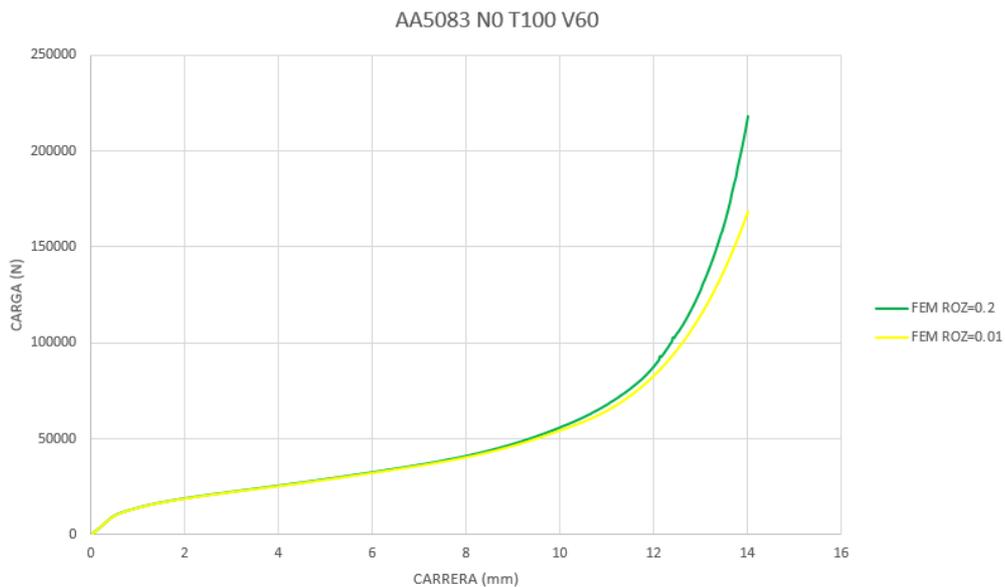
## 8.-Anexos

### 8.1-Comparación curva carga-carrera simulada para coeficientes de rozamiento 0,2 y 0,01

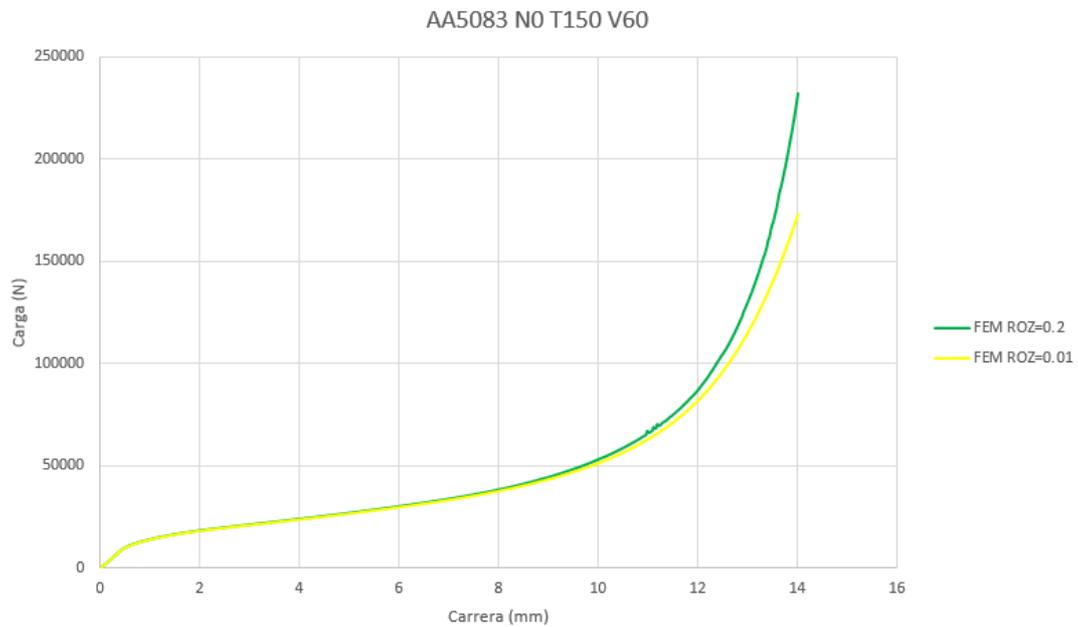
a) AA5083 N0 T25 V60



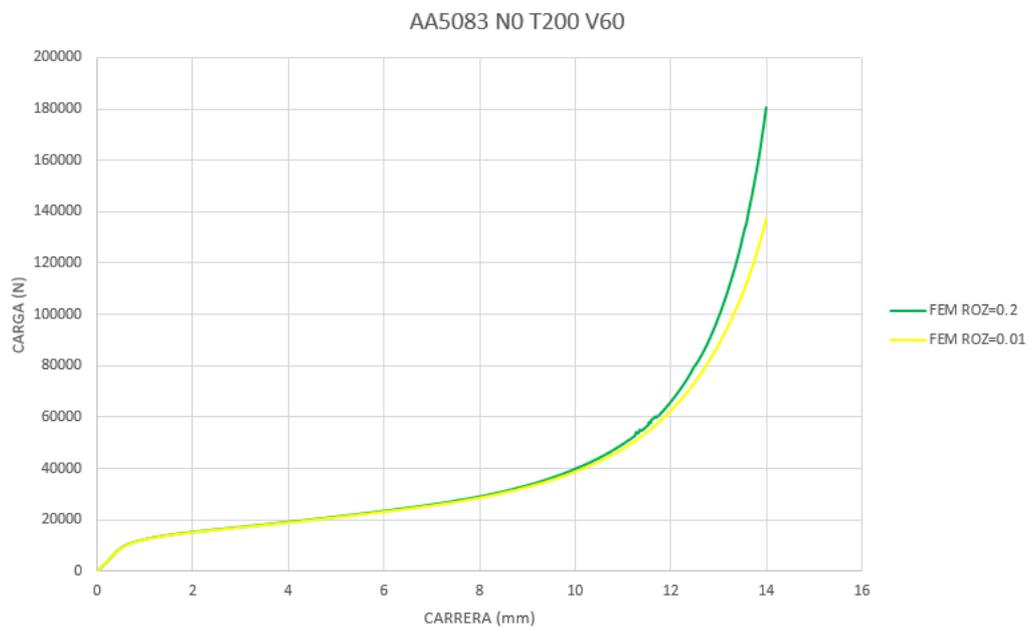
b) AA5083 N0 T100 V60



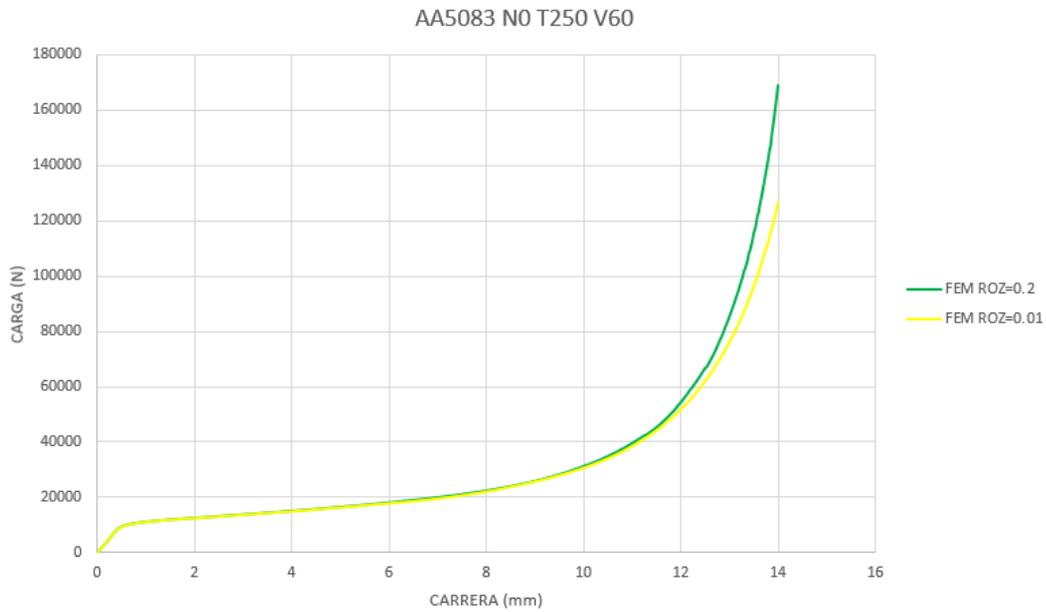
c) AA5083 N0 T150 V60



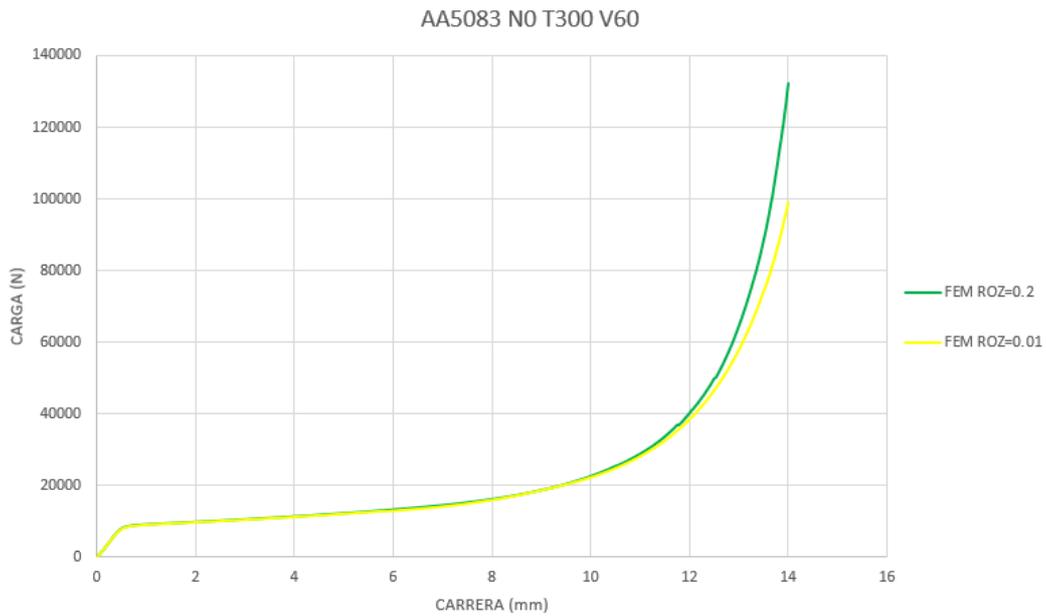
d) AA5083 N0 T200 V60



e) AA5083 N0 T250 V60

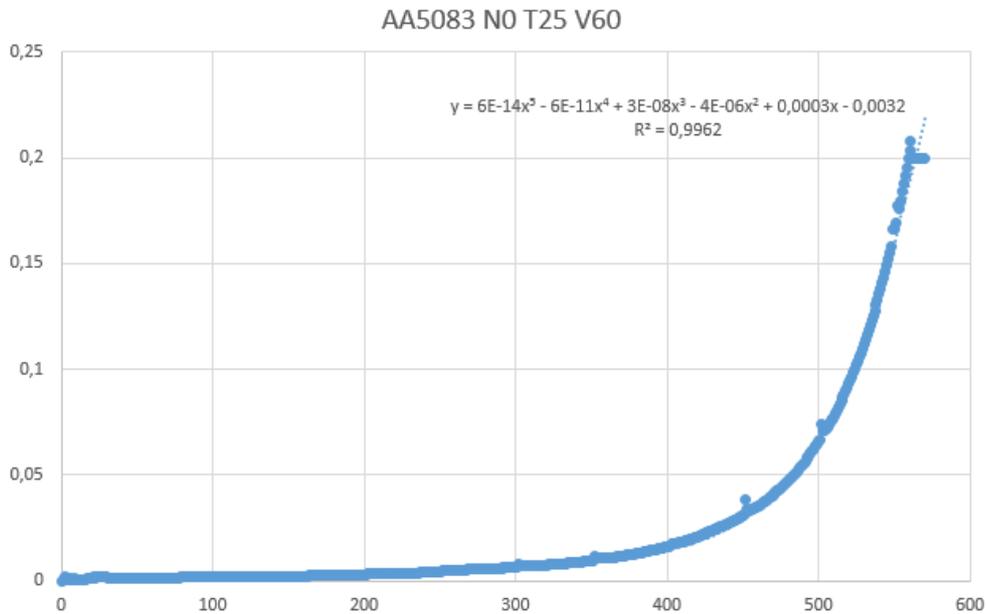


f) AA5083 N0 T300 V60

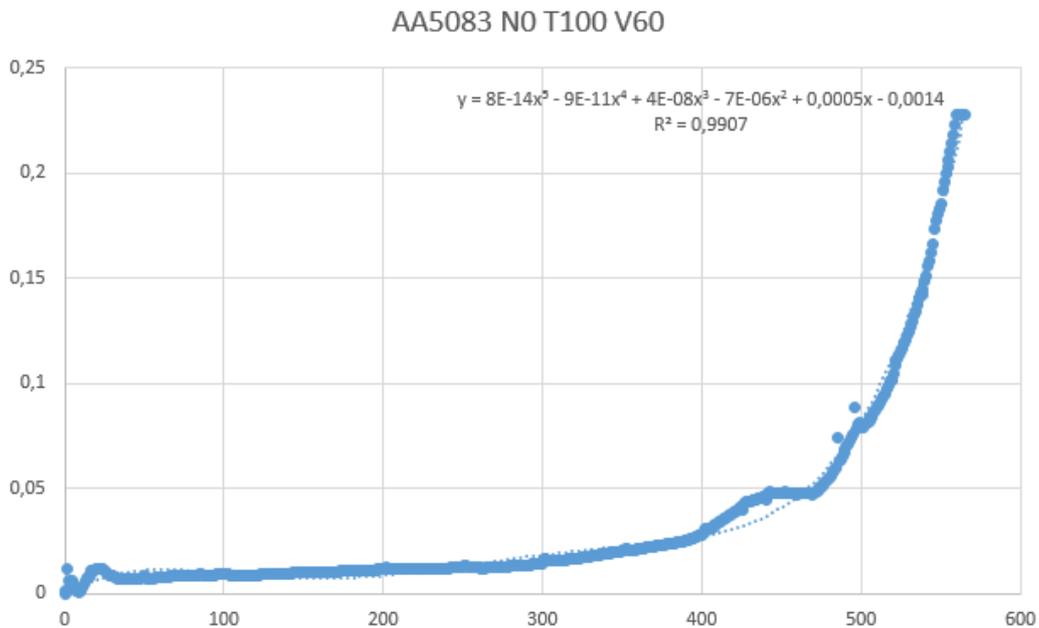


## 8.2-Variación porcentual entre las curvas carga-carrera simuladas con coeficiente de rozamiento 0,01 y 0,2

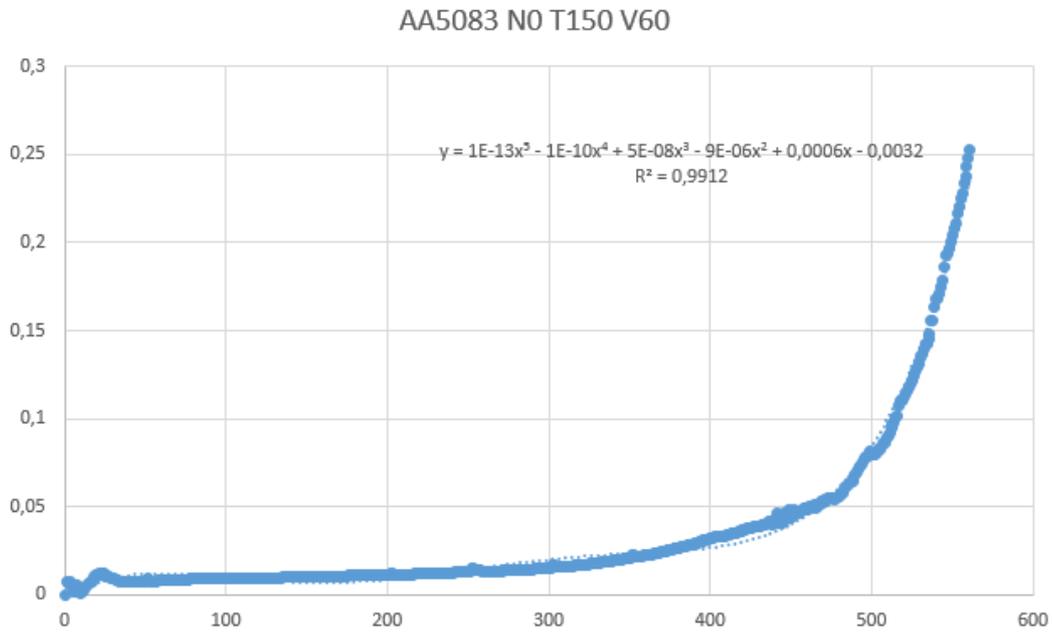
a) AA5083 N0 T25 V60



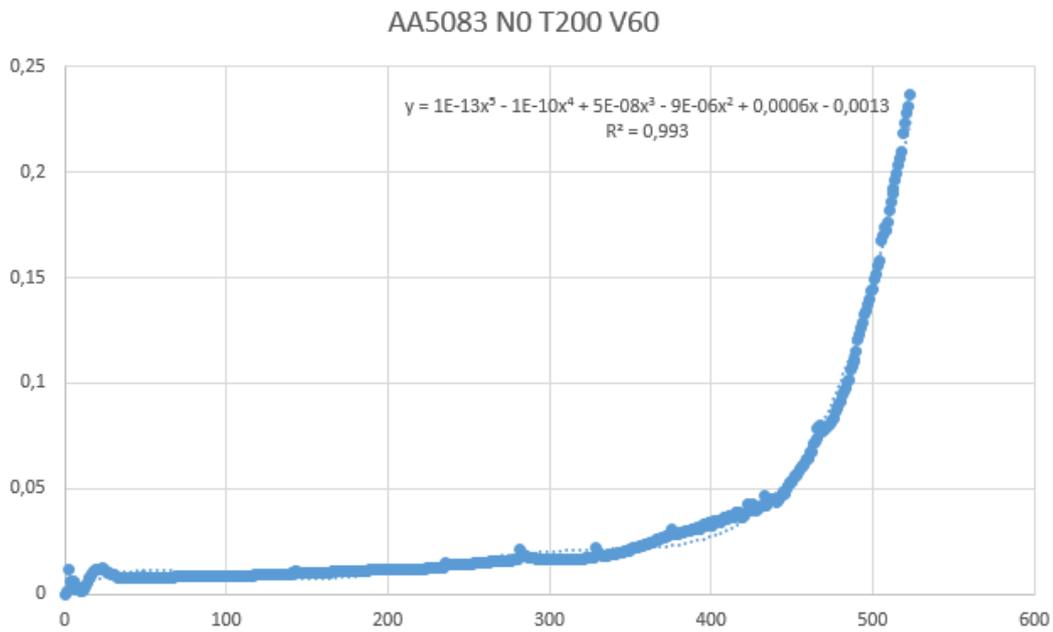
b) AA5083 N0 T100 V60



c) AA5083 N0 T150 V60



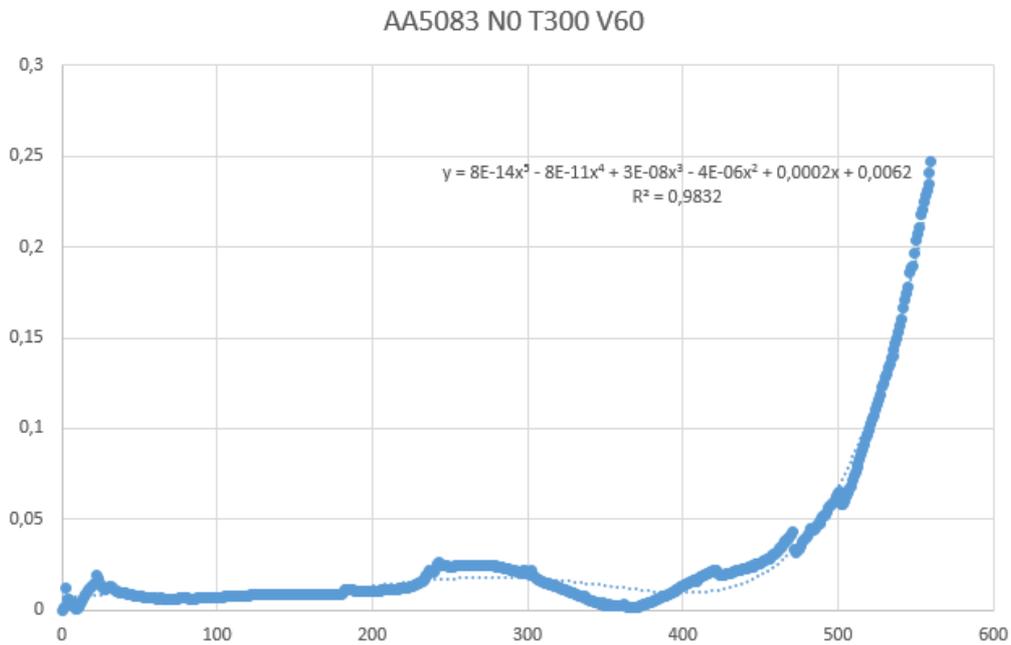
d) AA5083 N0 T200 V60



e) AA5083 N0 T250 V60

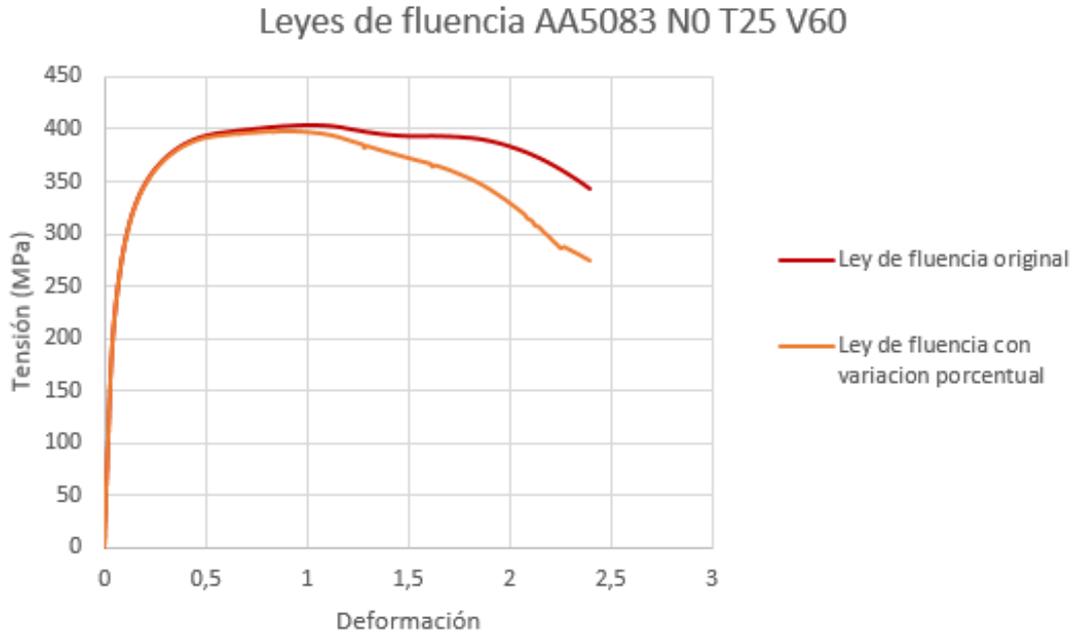


f) AA5083 N0 T300 V60



## 8.3-Leyes de fluencia modificadas

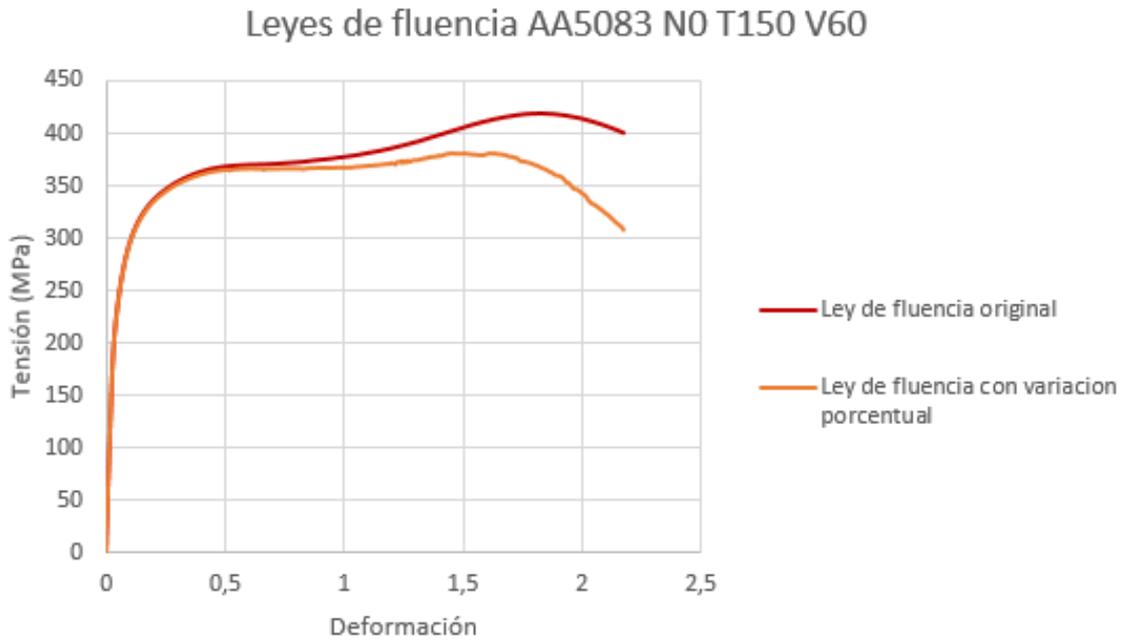
a) AA5083 N0 T25 V60



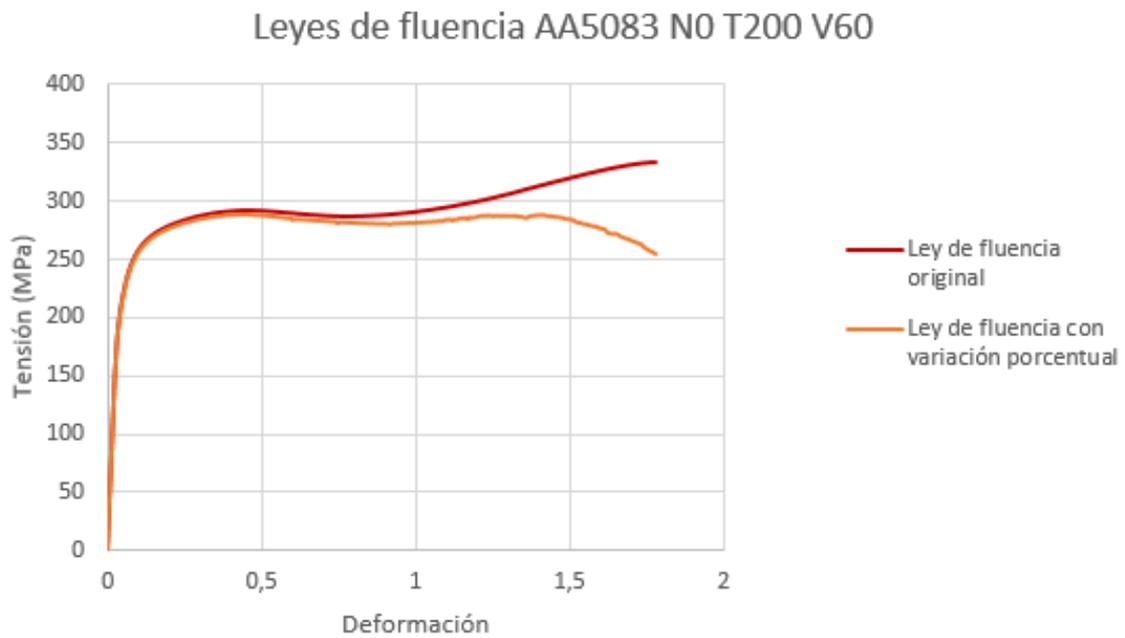
b) AA5083 N0 T100 V60



c) AA5083 N0 T150 V60



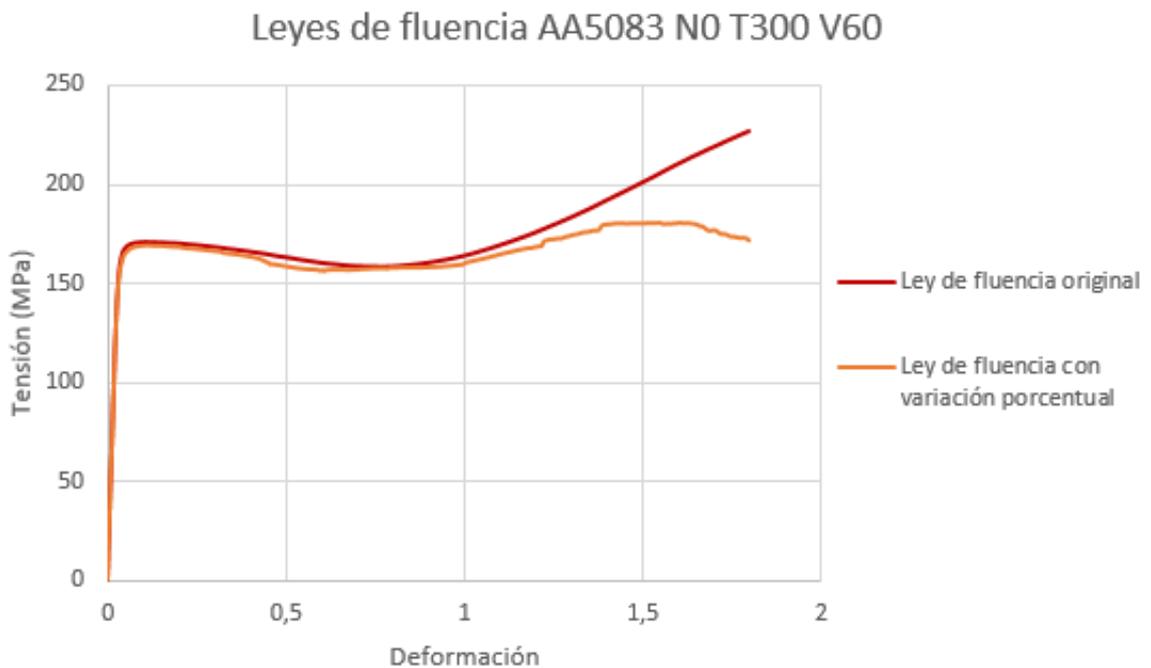
d) AA5083 N0 T200 V60



e) AA5083 N0 T250 V60



f) AA5083 N0 T300 V60



## 8.4-Tablas de coeficiente de rozamiento frente a la presión

a) AA5083 N0 T25 V60

TABLA Rozamiento variable	
PRESION (Mpa)	Cof
0,01	0,01
388,3	0,01
388,3	0,025
408,9	0,025
410	0,04
421,9	0,04
422	0,06
442	0,06
443	0,1
450	0,1
451	0,14
470	0,14
480	0,2
490	0,22

b) AA5083 N0 T100 V60

TABLA Rozamiento variable	
PRESIÓN (Mpa)	COF
0,01	0,01
266	0,03
270	0,05
290	0,07
300	0,1
497	0,1
500	0,14
510	0,2
630	0,2
632	0,22

c) AA5083 N0 T150 V60

TABLA Rozamiento variable	
PRESIÓN (Mpa)	COF
0,01	0,01
260	0,03
270	0,05
290	0,07
300	0,1
424	0,1
430	0,14
507	0,14
510	0,16
580	0,18
590	0,21

d) AA5083 N0 T200 V60

TABLA Rozamiento variable	
PRESION (Mpa)	COF
0,01	0,01
236	0,03
246	0,05
270	0,07
300	0,1
330	0,11
340	0,15
345	0,17
370	0,18
371	0,22
390	0,22
400	0,24
405	0,29

e) AA5083 N0 T250 V60

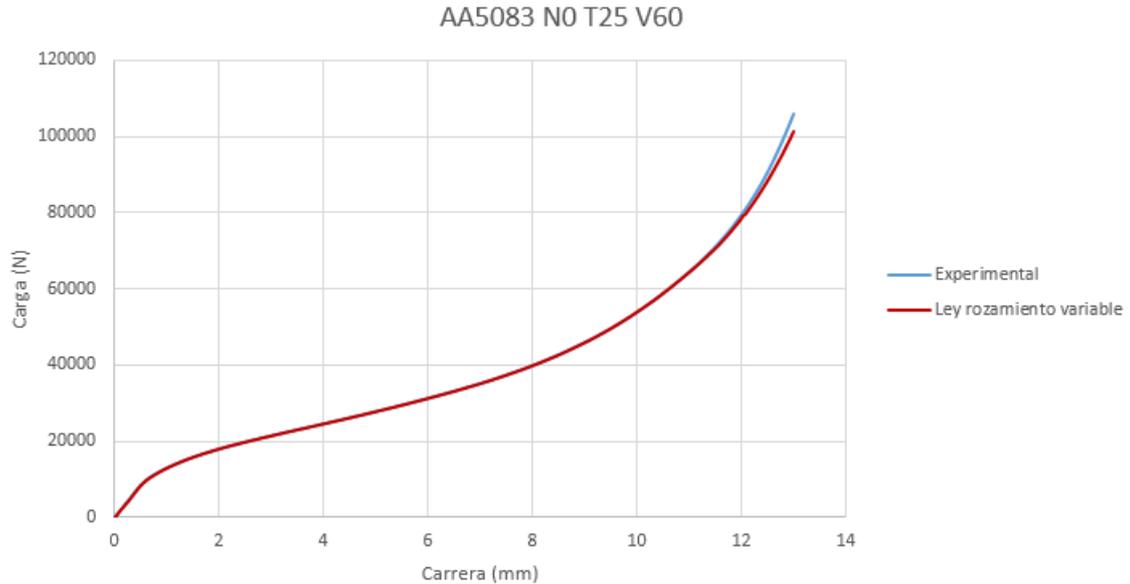
TABLA Rozamiento variable	
PRESIÓN (Mpa)	COF
0,01	0,01
208	0,03
220	0,05
250	0,07
280	0,09
300	0,11
315	0,16

f) AA5083 N0 T300 V60

TABLA Rozamiento variable	
PRESIÓN (Mpa)	COF
0,01	0,01
215	0,025
235	0,05
280	0,065
300	0,09
315	0,12
340	0,15

## 8.5-Comparación curva carga-carrera real y simulada con función de rozamiento variable y errores

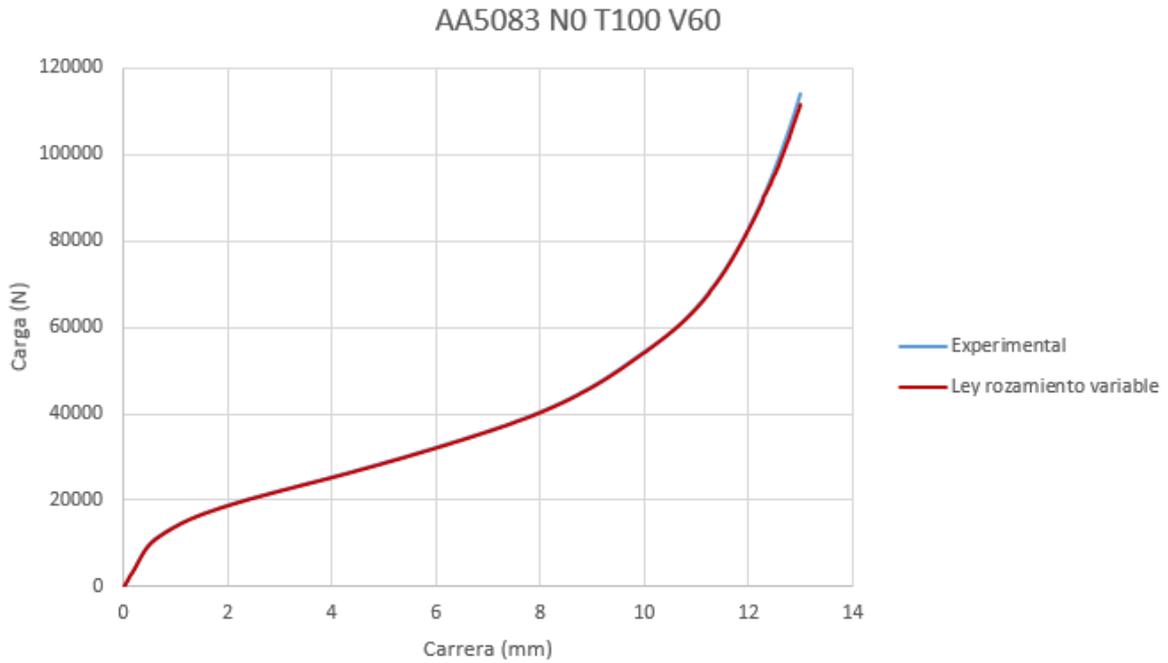
a) AA5083 N0 T25 V60



	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Error cuad. med.	22370,91	1484,80	1478,56	1003,21	1259,00	2181,59	4052,62
Max % error	-0,66	-0,15	-0,15	-0,09	-0,12	-0,14	-0,15
Min % error	-6,19	-0,43	-0,25	-0,15	-0,17	-0,18	-0,23

	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13
Error cuad. med.	5130,14	4557,20	3481,51	5342,25	32554,57	756836,12
Max % error	-0,15	-0,13	-0,03	0,02	-0,24	-0,99
Min % error	-0,23	-0,18	-0,22	-0,24	-0,89	-3,39

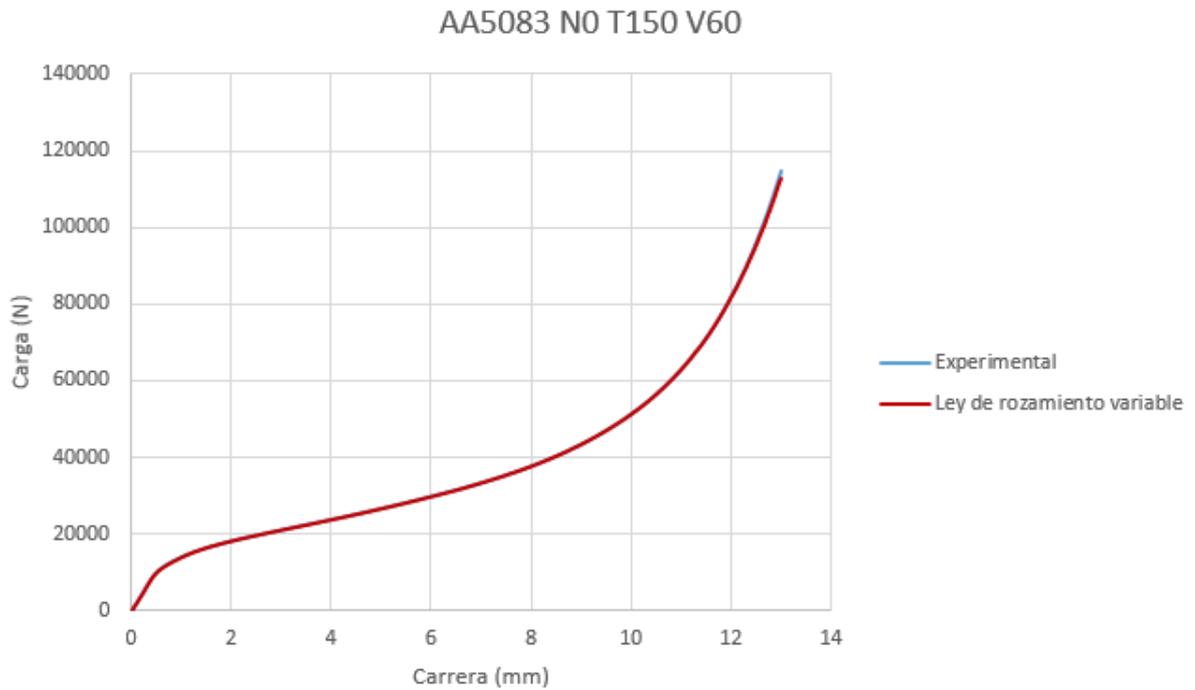
b) AA5083 N0 T100 V60



	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Error cuad. med.	24974,03	5972,17	8838,23	7577,04	10977,42	12189,05	9402
Max % error	-0,18	-0,08	-0,36	-0,33	-0,37	-0,32	-0,21
Min % error	-5,69	-0,84	-0,53	-0,42	-0,42	-0,40	-0,33

	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13
Error cuad. med.	7476,54	14532,37	19360,90	7378,14	31139,85	1699064,78
Max % error	-0,06	-0,18	-0,21	0,01	-0,07	-0,01
Min % error	-0,28	-0,31	-0,31	-0,39	-0,39	-2,09

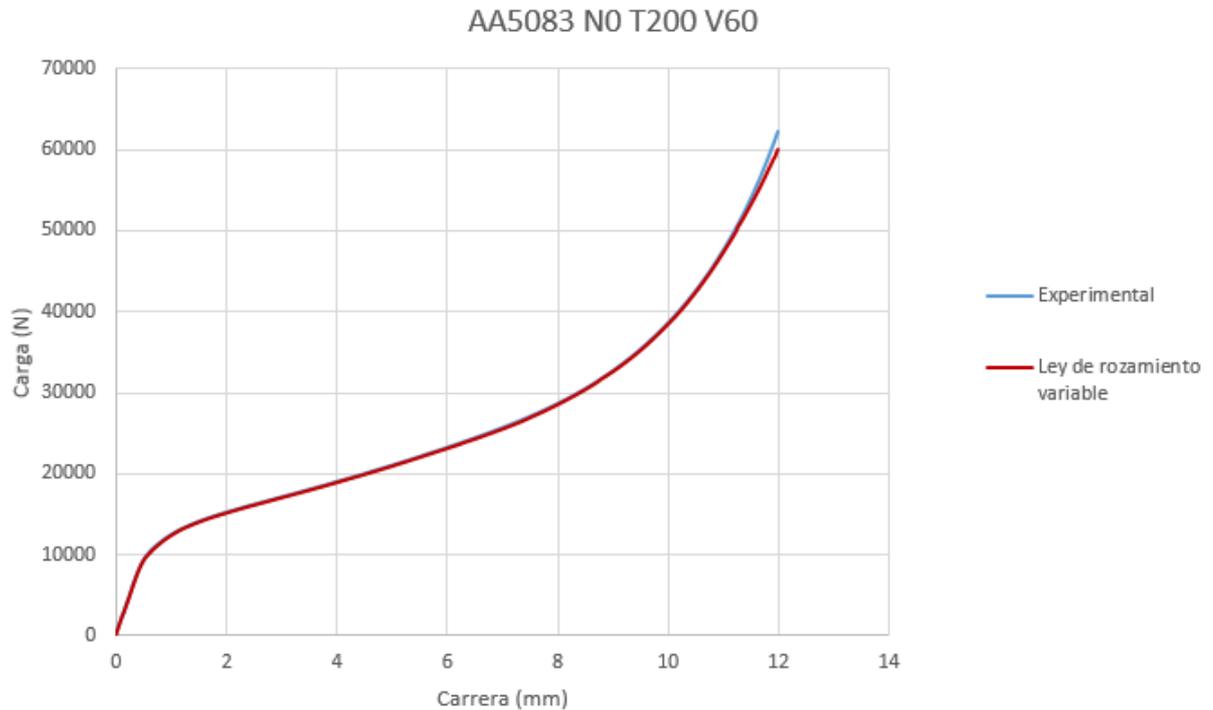
c) AA5083 N0 T150 V60



	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Error cuad. med.	19826,11	4685,65	7548,42	6764,38	8862,18	9911,41	11921,56
Max % error	4,24	-0,19	-0,36	-0,33	-0,35	-0,33	-0,30
Min % error	-7,44	-0,83	-0,49	-0,38	-0,38	-0,40	-0,41

	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13
Error cuad. med.	6488,29	3684,28	9117,95	19142,80	22326,34	1024004,73
Max % error	-0,10	-0,02	-0,14	-0,17	-0,09	-0,11
Min % error	-0,29	-0,18	-0,24	-0,28	-0,26	-1,84

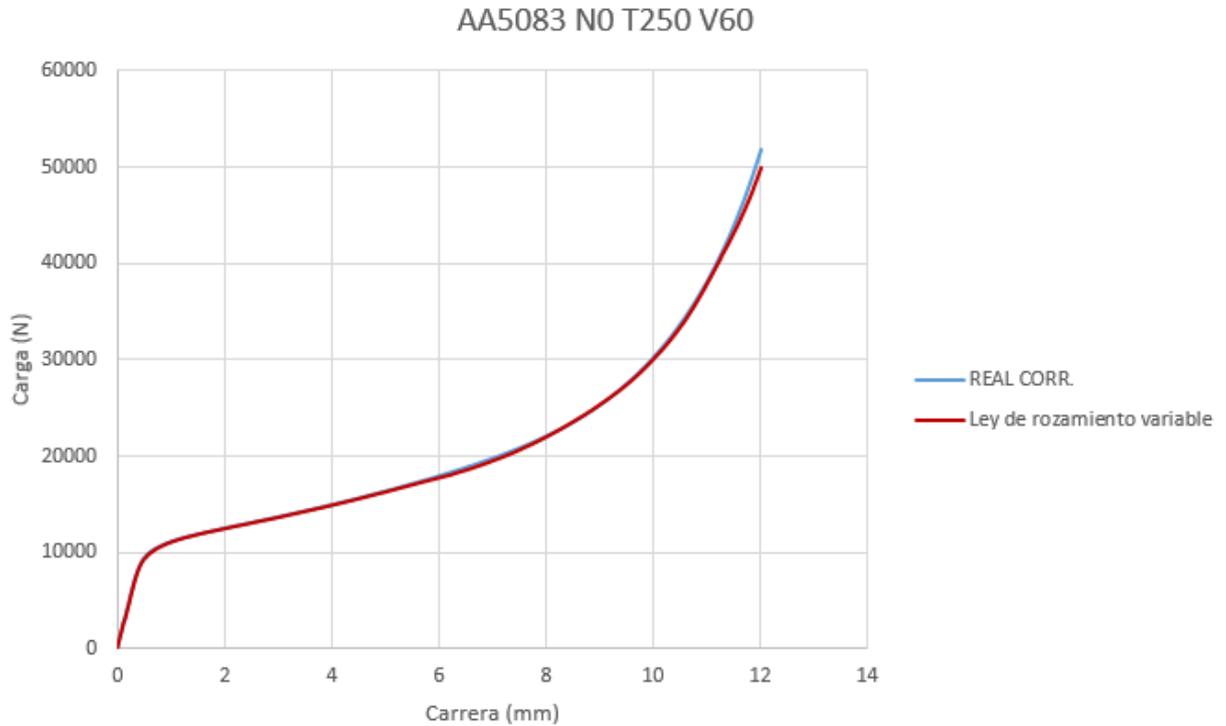
d) AA5083 N0 T200 V60



	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Error cuad. med.	16486,34	5166,40	4497,58	4872,18	5565,81	6212,04	12371,87
Max % error	-0,36	-0,43	-0,37	-0,36	-0,35	-0,34	-0,34
Min % error	-5,73	-0,81	-0,46	-0,41	-0,39	-0,43	-0,53

	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12
Error cuad. med.	15165,56	3692,87	6354,49	18017,64	1065527,23
Max % error	-0,29	0,01	-0,15	-0,19	-0,41
Min % error	-0,58	-0,29	-0,27	-0,42	-3,38

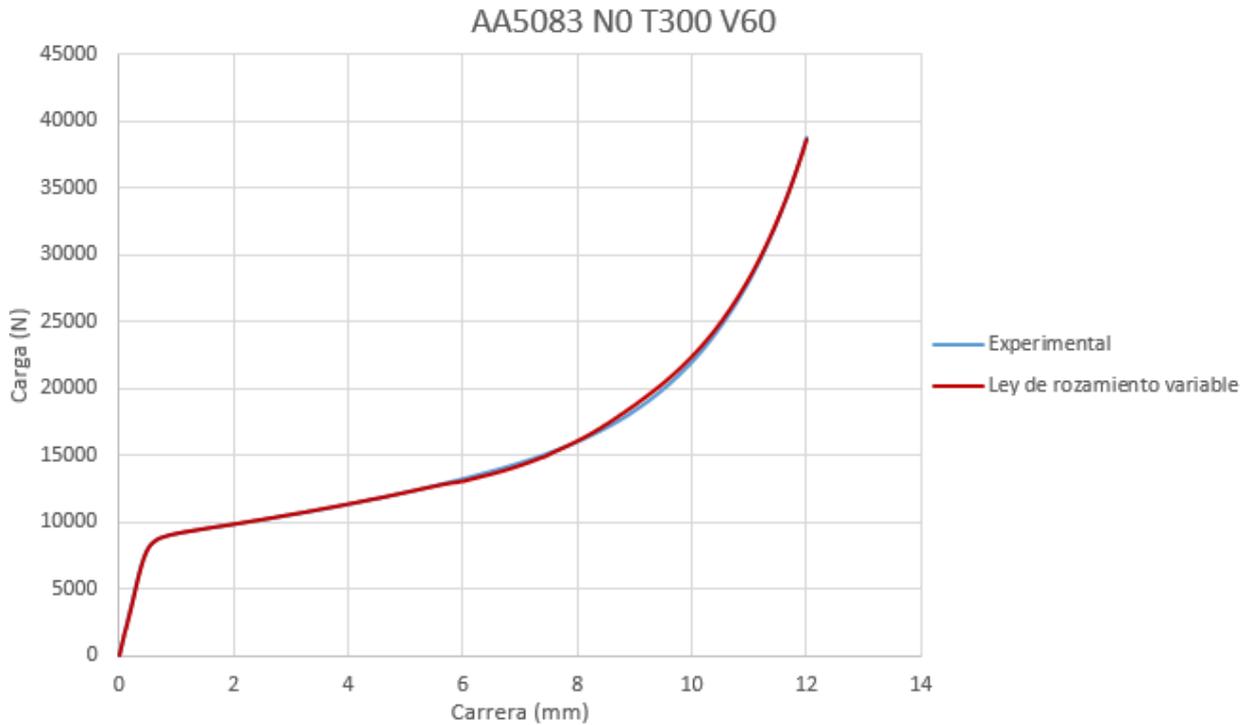
e) AA5083 N0 T250 V60



	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Error cuad. med.	18572,93	3536,68	4061,43	6461,61	8939,45	23547,18	90344,86
Max % error	-0,16	-0,42	-0,43	-0,53	-0,57	-0,65	-1,29
Min % error	-5,92	-0,71	-0,56	-0,67	-0,69	-1,29	-1,67

	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12
Error cuad. med.	56175	2509,15	21554,56	110948,18	1214457,04
Max % error	-0,55	0,02	-0,03	-0,64	-0,79
Min % error	-1,53	-0,55	-0,78	-1,14	-3,83

f) AA5083 N0 T300 V60



	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Error cuad. med.	23658,93	6219,68	9687,43	3258,61	3654,45	235447,18	154698,86
Max % error	-0,4	0,92	0,6	0,46	0,57	-0,6	0,25
Min % error	-5,3	0,34	0,46	0,23	-0,8	-0,9	-1,3

	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12
Error cuad. med.	996547	66578,15	26598,56	167832,18	3214457,04
Max % error	1,53	1,26	1,56	0,98	-0,79
Min % error	-0,06	0,55	-0,78	-0,64	-0,83