

## 5.- Resultados y discusión

### 5.1.- INTRODUCCIÓN

En este capítulo del proyecto se expondrán todos los resultados obtenidos en esta investigación. Cumpliendo el objetivo de este proyecto, se procesarán los datos adquiridos mediante el programa Merlin con el fin de conocer la evolución de la deformación verdadera y de la velocidad de deformación con el tiempo. Obtendremos esta evolución partiendo de los parámetros de la termofluencia para los tres tipos de polvo ( $A, n, \alpha, \beta, \Theta_M$ ).

Considerando  $Q$  como dato e introduciendo la porosidad de golpeo como parámetro, se practicarán  $n$  ajustes sobre los ensayos experimentales con las ecuaciones propuestas y el resto de datos obtenidos bibliográficamente para materiales macizos, cumpliendo el modelo de ecuación tipo (1) para describir el comportamiento de un material en polvo sometido a compresión uniaxial en caliente, en función del grado de porosidad relativa (ecuaciones (2), (3) y (4)).

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right) \cdot \Psi \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \Psi(T) \cdot \left( \frac{P_n}{\sigma_y} \cdot \left[ \left( 1 - \frac{\Theta}{\Theta_M} \right)^{-t} - 1 \right] \right)^n \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = A' \cdot \Psi(T) \cdot \left( \frac{\alpha P_n}{\sigma_y} \cdot \left[ \left( 1 - \frac{\Theta}{\Theta_M} \right)^{-t} - 1 \right] \right) \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = A^n \cdot \Psi(T) \cdot \left( \sinh \left( \frac{\beta P_n}{\sigma_y} \left[ \left( 1 - \frac{\Theta}{\Theta_M} \right)^{-t} - 1 \right] \right) \right)^n \quad (4)$$

Se ha comprobado que introduciendo  $Q$  como dato el ajuste matemático de las ecuaciones es mejor, habida cuenta de los resultados obtenidos en proyectos anteriores con  $Q$  como parámetro.

Con:

$$\Psi(T) = \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

$$t = 1 + (1 - \Theta_M)^{0.8}$$

**Nota:** Todas las gráficas, ajustes, y resultados se adjuntan en CD al final del documento proyecto

## 5.2.- OBTENCIÓN DE CURVAS DEFORMACIÓN VERDADERA VS. TIEMPO

En el capítulo 3, describimos el procedimiento experimental necesario para la obtención de dichas curvas, partiendo de la preparación del polvo en la matriz hasta el manejo del programa Merlin necesario para desarrollar los ensayos. También, en este mismo capítulo se puso de manifiesto los ensayos que se iban a desarrollar bajo una serie de condiciones de presión y temperatura recogidas en las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 para el aluminio, el estaño y el plomo. Bajo esas condiciones se han realizado todos los ensayos para cada uno de los polvos utilizando como lubricante el grafito. El motivo de la utilización de este material es que en ensayos anteriores quedó patente que, tras la realización de los ensayos, las curvas obtenidas con grafito tenían un comportamiento más suave (con menor ruido) que utilizando cera. En este apartado describiremos cómo se han obtenido las curvas *deformación verdadera vs. tiempo* a partir de los resultados proporcionados por el programa. Los datos de interés para nuestro proyecto son: tiempo (s), carga (kgf), extensión (mm) y deformación (%). Directamente

dividiendo la deformación entre 100 obtenemos la deformación ingenieril, que el programa ha calculado a partir de:

$$e = \frac{H_0 - H}{H_0} = \frac{H_0 - (H_0 - \text{Extensión})}{H_0} = \frac{\text{Extensión}}{H_0} \quad (5)$$

donde  $H$  es la altura en el instante  $t$  que toma la columna de polvo y  $H_0$  la inicial. La deformación obtenida del programa sale con signo negativo puesto que estamos a compresión, sin embargo, mediante la definición en (5) ignoramos el signo y consideramos en todo momento magnitudes positivas. La ecuación (5) también nos servirá para conocer la altura inicial del polvo en el interior de la matriz, dato de suma importancia para el desarrollo analítico posterior. La representación gráfica de la deformación ingenieril frente al tiempo se muestra en la Figura 5.1, para un ensayo concreto del plomo.

Los datos procedentes del programa Merlin se criban con el objeto de aligerar el número de datos para el tratamiento matemático, con lo que se toma uno de cada diez puntos de la curva, tanto para la representación gráfica como para el suavizado y los ajustes posteriores. Cada experiencia consta finalmente de unos 1500 datos.

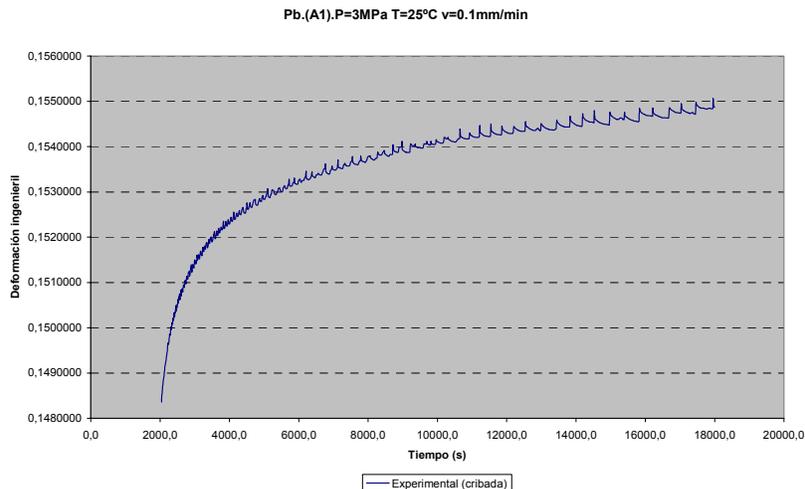
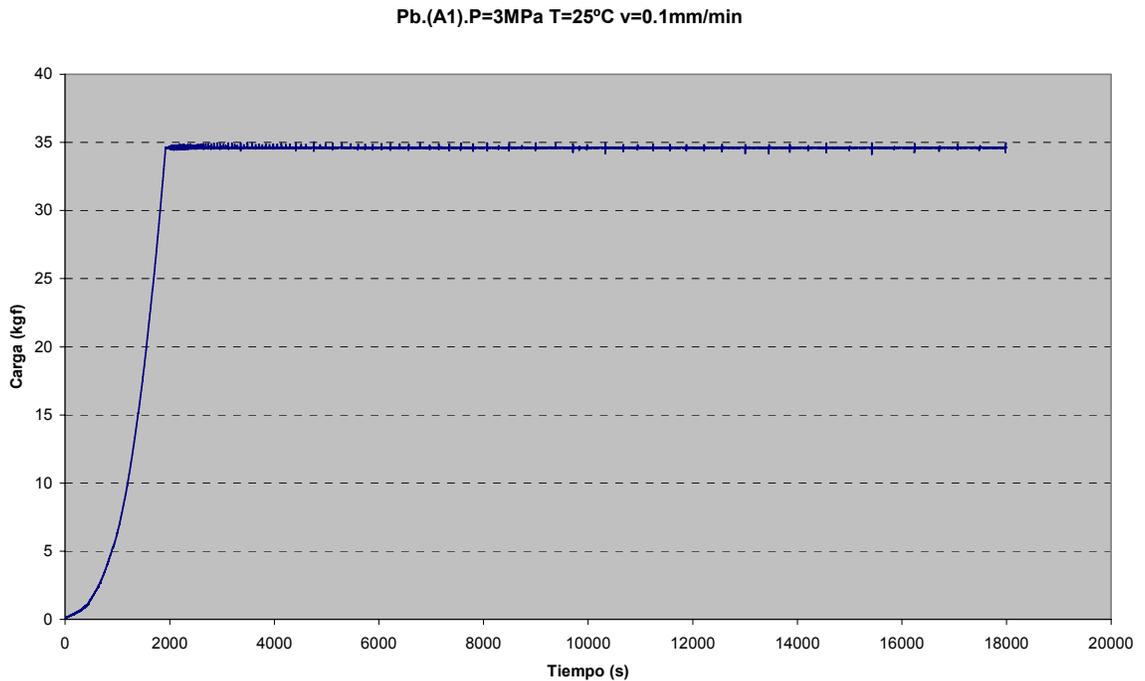


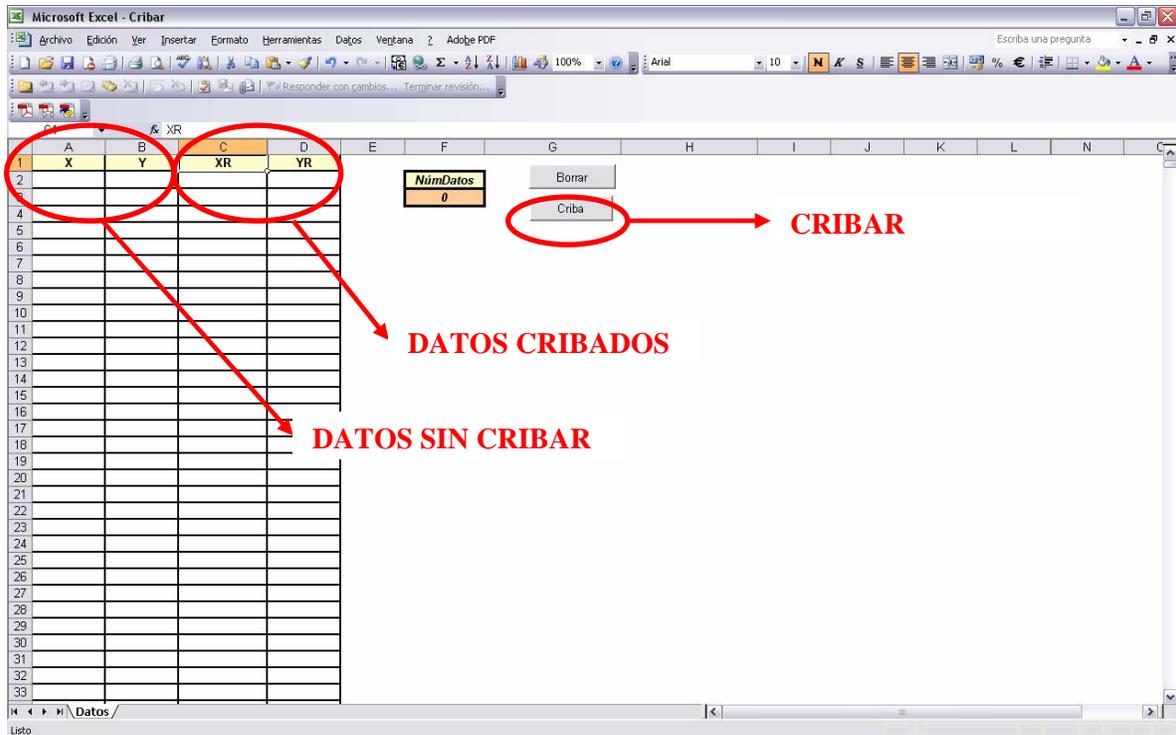
Figura 5.1 Aspecto de una curva de deformación ingenieril vs. tiempo tras el cribado

En la gráfica de la figura 5.2 se representa la carga vs. tiempo y se puede observar cómo transcurridos unos 2000s se alcanza la carga deseada que se mantiene constante. A partir de ese momento podemos considerar que comienza realmente nuestro ensayo de termofluencia. La duración del ensayo es de 5 h y durante este tiempo se puede observar cómo, aún manteniendo la carga constante a una determinada temperatura, existe deformación, pequeña pero válida para considerar que se está produciendo termofluencia.



**Figura 5.2** Representación de carga vs. tiempo para un ensayo

Los datos se criban mediante una función realizada en Excel, en la que se colocan los datos de la deformación y los del tiempo y se ejecuta la macro pulsando el botón “cribar”, como se muestra en la siguiente figura:

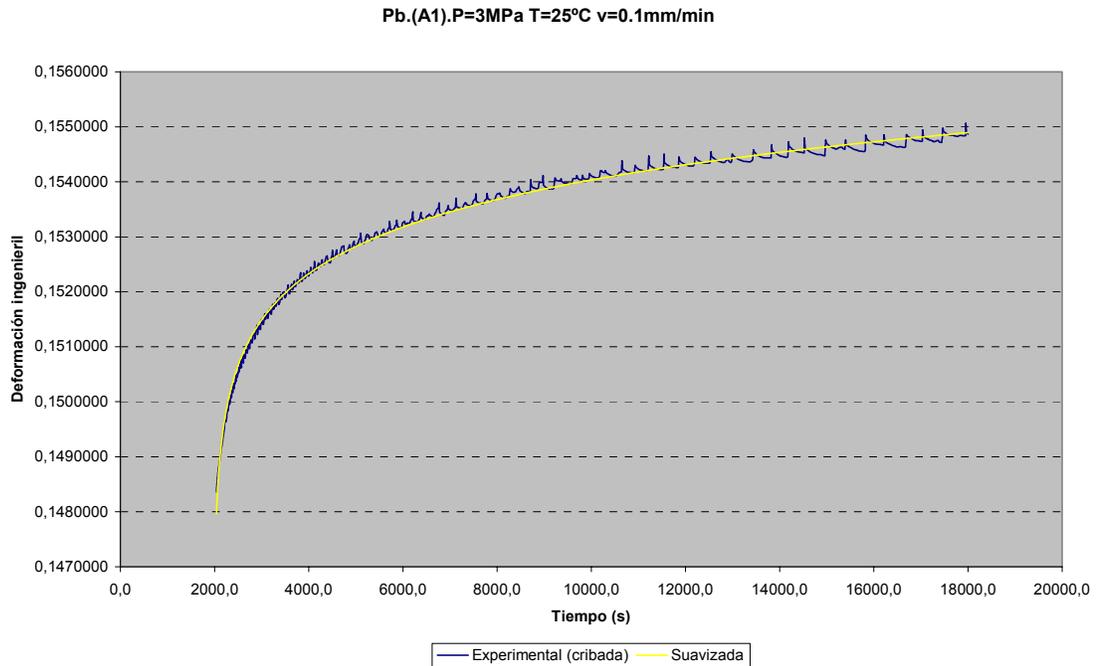


Sin embargo la curva representada, así como la de todos los ensayos restantes, presenta ruido y eso es debido a que la aplicación de la carga no es exacta, sino que oscila dentro de un rango próximo debido a problemas de sensibilidad de la célula de carga de la máquina de ensayo. Dicha sensibilidad en la carga se traduce también en una oscilación pequeña en la deformación, dando ese aspecto de ruido en la gráfica, que necesita ser filtrado mediante un ajuste, añadiendo una curva de suavizado a la zona que nos interesa, denominada zona de trabajo, definiendo una nueva serie de puntos en Excel.

La curva de suavizado se obtiene mediante una función de ajuste que depende de tres parámetros ( $p_1, p_2, p_3$ ):

$$y = 1 - \exp[-p_1 \cdot (t - p_2)^{p_3}] \quad (6)$$

Siendo  $t$  el valor del tiempo de trabajo (desde el instante en el que se empieza a observar que termina la rampa y la curva de la carga comienza a ser constante), y el parámetro  $y$  es el valor de la deformación. En la Figura 5.3, se muestra la zona de trabajo y la curva de suavizado.



**Figura 5.3** Deformación ingenieril vs. tiempo Pb (A1) y versión suavizada

El parámetro  $R^2$  nos indica la bondad del ajuste. En las hojas de Excel del CD que se entrega junto a este proyecto se incluyen todos los suavizados de cada ensayo y en ellos viene indicado este parámetro. A continuación se muestra una de las hojas de cálculo del suavizado (Figura 5.4):

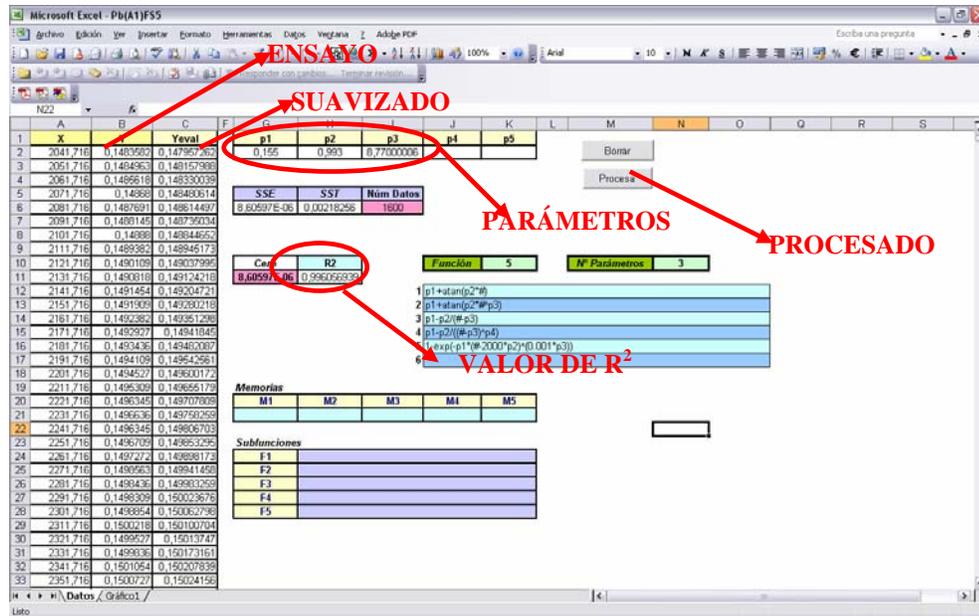
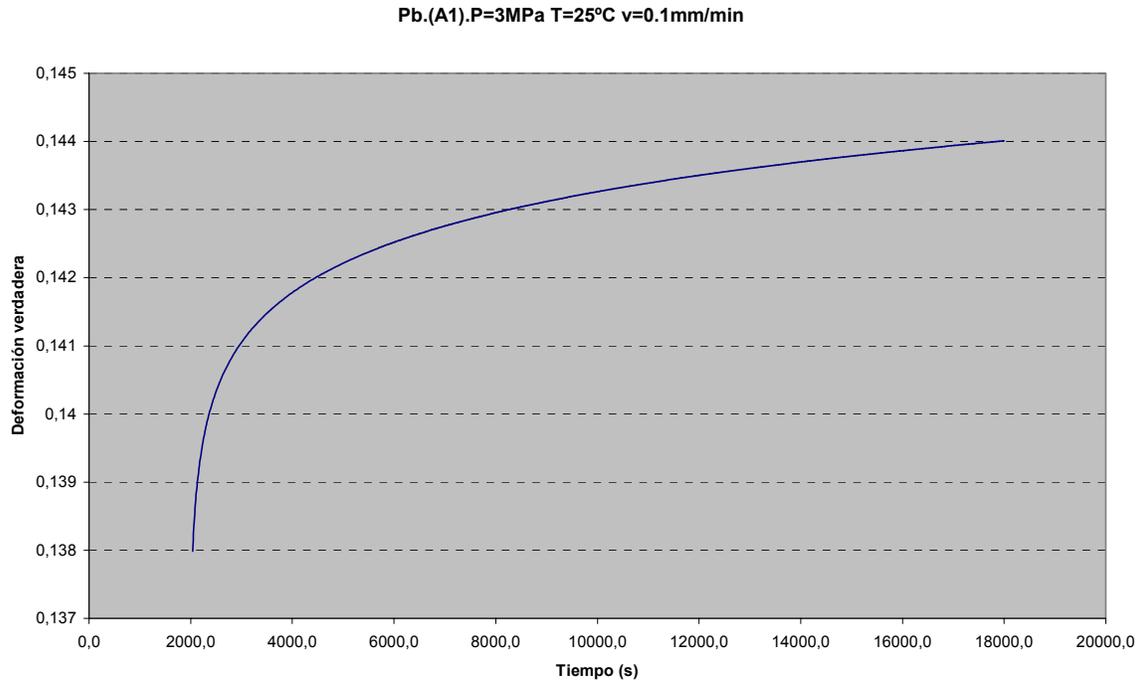


Figura 5.4 Hoja de cálculo para el suavizado de la deformación ingenieril

Conocida la expresión analítica para la deformación ingenieril en función del tiempo en la zona de trabajo, transformamos la deformación en deformación verdadera sabiendo que

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \tag{7}$$

El resultado de esta transformación nos proporciona la curva de *deformación verdadera vs. tiempo*, sin ruido, como se muestra en la Figura 5.5



**Figura 5.5** Deformación verdadera tras el suavizado

### 5.3.- OBTENCIÓN DE LA DERIVADA TEMPORAL ( $\epsilon, t$ )

La velocidad de deformación durante la termofluencia es el parámetro fundamental para poder justificar las expresiones analíticas que modelan el comportamiento del material a termofluencia. Hablar de velocidad de deformación es equivalente a hablar de la derivada temporal de la deformación verdadera, de ahí que para obtenerla haya que calcular la derivada de  $\epsilon$  con el tiempo.

Partiendo de la expresión de la deformación, derivamos con respecto al tiempo:

*Deformación ingenieril:*

$$e = 1 - \exp \left[ -p_1 (t - p_2)^{p_3} \right] \quad (8)$$

Deformación verdadera:

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (9)$$

Velocidad de deformación verdadera:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{p_1 p_3 (t - p_2)^{p_3 - 1}}{2 \exp \left[ p_1 (t - p_2)^{p_3} \right] - 1} \quad (10)$$

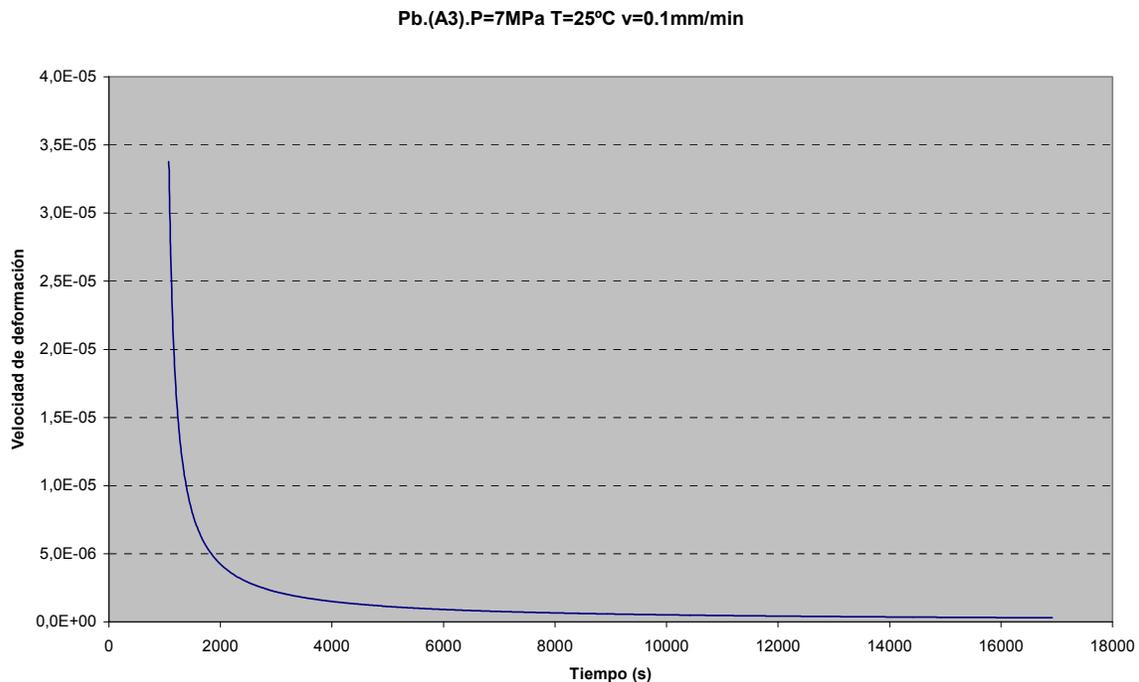
Éstas son las expresiones que más se adecuan a los ensayos reales. También se han estudiado otro tipo de ajustes, que aun mostrándose adecuados en algunos casos, no servían como expresión general para el ajuste de la velocidad de deformación. Mostramos a continuación en la Tabla 5.1 otras ecuaciones que han sido objeto de estudio:

|   | DEFORMACIÓN INGENIERIL                       | VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN   |
|---|--|--|
| 1 | $e = p_1 + \operatorname{atan}(p_2 t)$       | $\dot{\varepsilon} = \frac{p_2}{\left( (p_2 t)^2 + 1 \right) \left( \operatorname{atan}(p_2 t) + p_1 + 1 \right)}$                             |
| 2 | $e = p_1 + \operatorname{atan}(p_2 t^{p_3})$ | $\dot{\varepsilon} = \frac{p_2 p_3 t^{p_3 - 1}}{\left( (p_2 t^{p_3})^2 + 1 \right) \left( \operatorname{atan}(p_2 t^{p_3}) + p_1 + 1 \right)}$ |
| 3 | $e = p_1 - \frac{p_2}{x - p_3}$              | $\dot{\varepsilon} = \frac{p_2}{(x - p_3) \left[ (1 + p_1)(x - p_3) - p_2 \right]}$  |
| 4 | $e = p_1 - \frac{p_2}{(x - p_3)^{p_4}}$      | $\dot{\varepsilon} = \frac{p_2 p_4}{(x - p_3) \left[ (1 + p_1)(x - p_3)^{p_4} - p_2 \right]}$  |

Tabla 5.1 Otras ecuaciones propuestas para la deformación verdadera y la velocidad de deformación verdadera

En ensayos anteriores se había probado con suavizados logarítmicos, puesto que por una parte no se había encontrado una función con un mejor comportamiento en cuanto al ajuste del ensayo real, y por otro porque su derivada para obtener la velocidad de deformación era sencilla de obtener. En el presente estudio (en el CD adjunto se entregan todos los ajustes), se han recalculado todas las velocidades de deformación, y los ajustes que veremos más adelante se han mejorado sensiblemente.

Si representamos la velocidad de deformación verdadera frente al tiempo, se comprueba que disminuye con el tiempo hasta tender a cero (ver Figura 5.6):



**Figura 5.6** Deformación verdadera vs. tiempo. Al. (A3). P=60MPa T=150°C

#### 5.4.- OBTENCIÓN DE LA POROSIDAD

Para cada ensayo, también es necesario conocer la evolución de la porosidad con el tiempo, ya que el objetivo de este proyecto es poder justificar la bondad de las ecuaciones propuestas. La porosidad se deduce de la deformación ingenieril obtenida en cada ensayo de la siguiente forma:

$$\Theta = 1 - \frac{M}{S \cdot H \cdot \gamma_0} \quad (11)$$

donde  $\Theta$  es la porosidad en cada instante,  $M$  la masa de polvo en gramos,  $S$  sección interior de la matriz en  $\text{cm}^2$ ,  $\gamma_0$  densidad absoluta del polvo en  $\text{g/cm}^3$ .

Cabe destacar que en el presente proyecto se ha realizado el estudio de la velocidad de deformación frente a la porosidad, no frente a la porosidad relativa como se había realizado en un anterior estudio. En el presente estudio se hizo así en una primera fase, pero más adelante (como después veremos), se demostró que se conseguían unos ajustes mejores dejando libre la porosidad de golpeo como un parámetro más de ajuste. Este hecho obliga a representar la velocidad de deformación frente a la porosidad, siendo la porosidad relativa:

$$\Theta_R = \frac{\Theta}{\Theta_M} \quad (12)$$

Siendo  $\Theta_M$  la porosidad de golpeo.

Mostramos a continuación la Tabla 5.2 con los parámetros de cálculo para cada material:

|                   | PLOMO   | ALUMINIO | ESTAÑO |
|-------------------|---------|----------|--------|
| SECCIÓN           | 1.13746 |          |        |
| MASA              | 15.62   | 3.7      | 10     |
| DENSIDAD ABSOLUTA | 11.4    | 2.72     | 7.3    |

Tabla 5.4 Parámetros del plomo, aluminio y estaño

Mediante las expresiones (11) se obtiene la porosidad en cada instante. Representándola frente al tiempo, observamos cómo disminuye a medida que transcurre el tiempo hasta tender a cero (ver Figura 5.7).

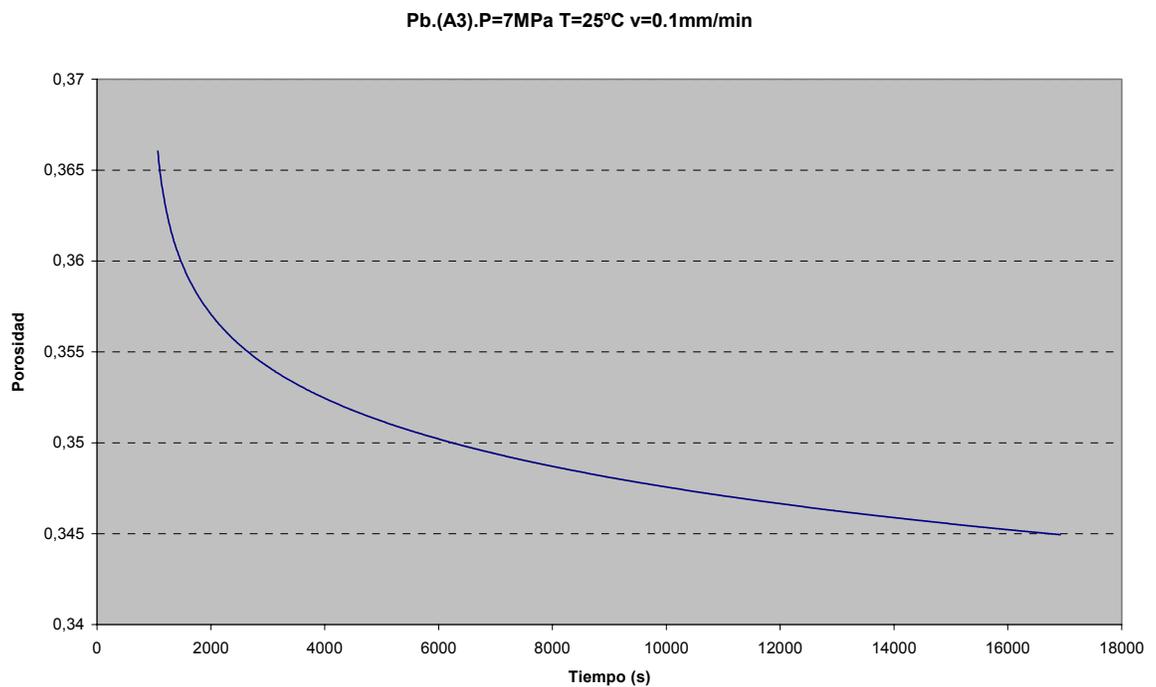
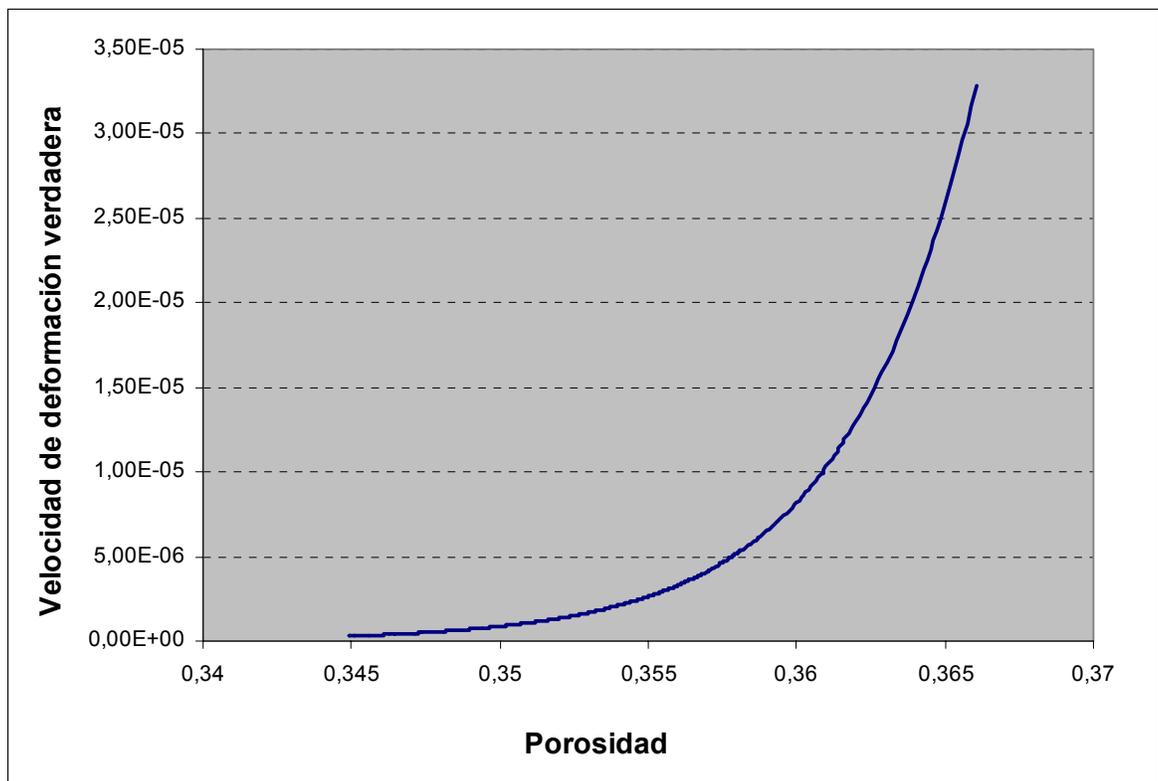


Figura 5.7 Porosidad vs. Tiempo para un ensayo

### 5.5.- VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN VS. POROSIDAD

Obtenida la evolución de la velocidad de deformación verdadera y de la porosidad con el tiempo, lo que nos interesa es eliminar el tiempo y poder expresar  $\dot{\epsilon}$  en función de  $\theta$ , lo que nos permitirá, a posteriori, ajustar las ecuaciones propuestas (2), (3) y (4).

Eliminando el tiempo, obtenemos en la Figura 5.8 la *velocidad de deformación verdadera vs. porosidad* para un ensayo tipo:



**Figura 5.8** Representación velocidad de deformación verdadera vs. porosidad

La tendencia de la curva queda justificada a partir de la idea de que al disminuir la porosidad (de derecha a izquierda en la gráfica) habrá menos poros, disminuyendo así la velocidad de deformación, o dicho de otra forma, cuanta mayor porosidad haya, mayor será la velocidad de deformación.

Esta tendencia es la misma para los tres materiales, observándose el mismo comportamiento al representar la velocidad de deformación verdadera frente a la porosidad.

## **5.6.- INCIDENCIAS EN EL PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE CURVAS**

### **5.6.1.- Consideración de otras curvas para el ajuste**

Estas son las expresiones que más se adecuan a los ensayos reales. También se han estudiado otro tipo de ajustes, que aun mostrándose adecuados en algunos casos, no servían como expresión general para el ajuste de la velocidad de deformación. En la Tabla 5.1 se muestran las otras ecuaciones que han sido objeto de estudio.

### **5.6.2.- Mejora de los ajustes de ensayos anteriores**

En ensayos anteriores se había probado con ajustes logarítmicos, puesto que por una parte no se había encontrado una función con un mejor comportamiento en cuanto al ajuste del ensayo real, y por otro porque su derivada para obtener la velocidad de deformación era sencilla de obtener. En el presente estudio (en el CD adjunto se entregan todos los ajustes), se han recalculado todas las velocidades de deformación, y los ajustes que veremos más adelante se han mejorado sensiblemente.

Mostramos a continuación un ensayo con aluminio mostrando la dificultad del ajuste logarítmico (figura 5.9) y el ajuste con la ecuación elegida para este proyecto (figura 5.10):

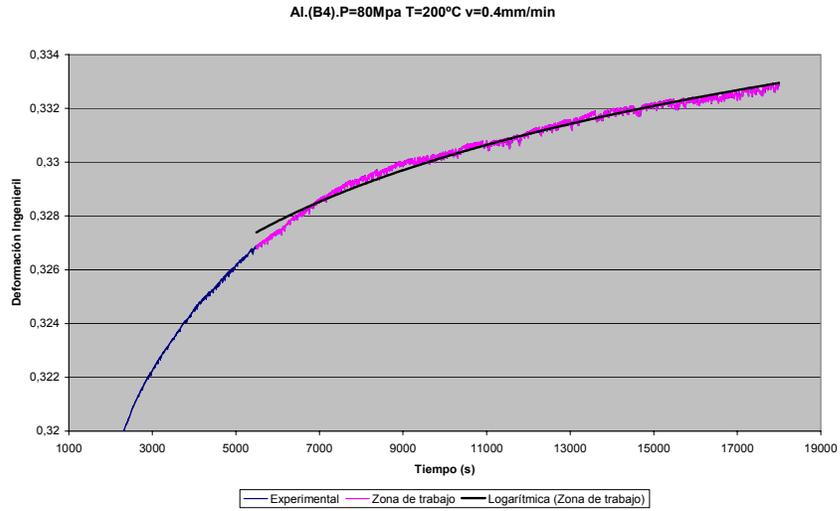


Figura 5.9 Ensayo B4 del aluminio con ajuste logarítmico

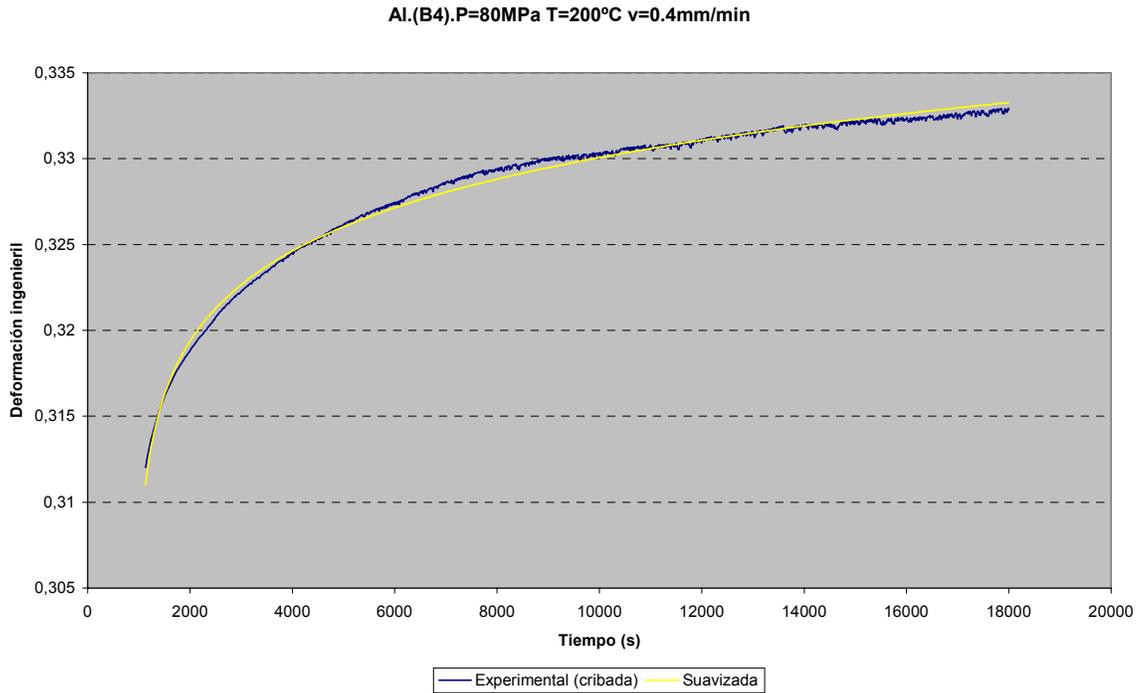


Figura 5.10 Ensayo B4 del aluminio con nuevo ajuste

Observamos, en primer lugar, que el ajuste es más apropiado, tanto por la forma de la curva como por la tendencia que sigue al final del ensayo. En la figura 5.9 se observa que la tendencia que sigue la curva logarítmica no se ajusta al ensayo real, por lo que su extrapolación en el tiempo previsiblemente dará resultados erróneos.

En la figura 5.10 vemos cómo la curva se ajusta en todo su recorrido a la proporcionada por los datos del ensayo.

Por otra parte, observamos que en el caso del ajuste logarítmico, se ha tomado como periodo de termofluencia a partir del segundo 5491, mientras que la carga se ha mantenido aproximadamente desde el segundo 1100. Esto provoca una pérdida de información en cuanto al comportamiento del material, ya que este tipo de curva sólo sirve para la etapa del ensayo en el que la velocidad de deformación es pequeña, puesto que la curvatura de la curva logarítmica no permite seguir el comportamiento al principio de la estabilización de la carga, cuando la velocidad de deformación es mayor.

En el ajuste propuesto en este documento, para este ensayo el ajuste comienza en el segundo 1132, con lo que es posible estudiar el comportamiento del material desde el comienzo de la termofluencia, y posibilita la extrapolación en el tiempo de la velocidad de deformación.

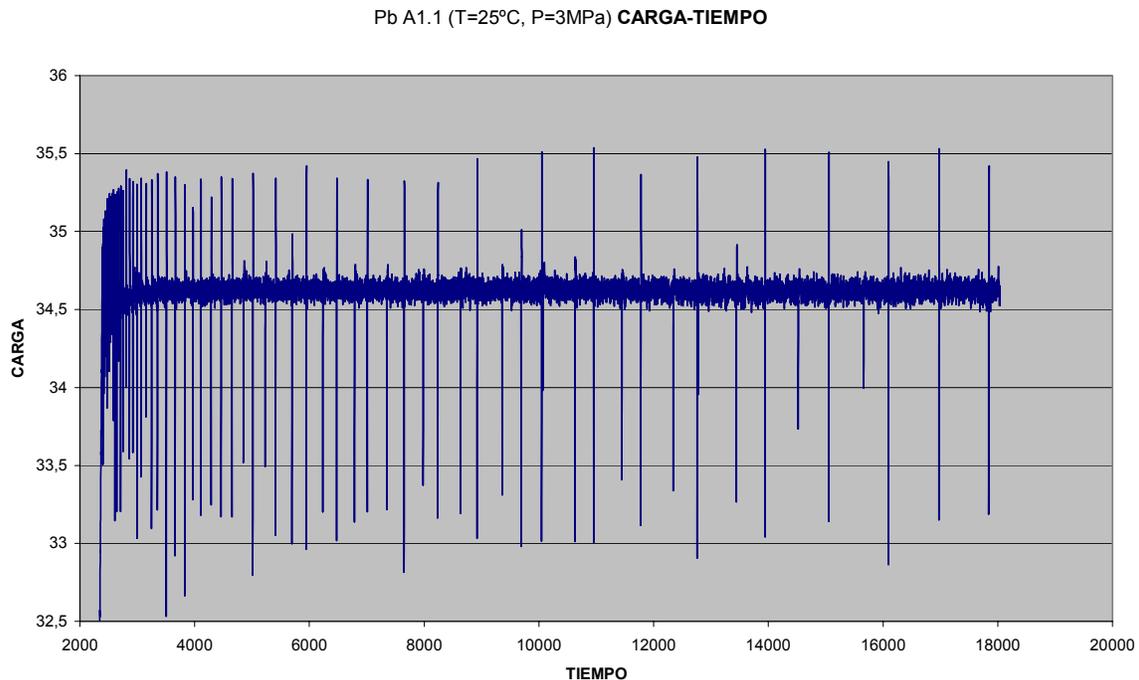
### **5.6.3.- Carga aplicada**

Para los ensayos de aluminio y estaño, se había utilizado una célula de carga de 10000 *kgf*. Sin embargo, para el plomo se observó que, al trabajar con presiones muy pequeñas (3 y 5 *MPa*), en la curva de *Carga vs. Tiempo* se obtenía mucho ruido, lo que hacía que la curva de deformación obtenida estuviera, en muchos casos, distorsionada. Esto afectaba notablemente a los resultados posteriores, por dificultar los ajustes objeto del proyecto. Para los ensayos del estaño se había observado este mismo problema, puesto que se trabajó con las mismas presiones. El problema radicaba en que para el caso del aluminio, la carga máxima deseada era de 80 *MPa*, es decir, de 923,24 *kgf*. Sin embargo, conviene estudiar la sensibilidad de la célula de carga para mantener constante una cierta presión cuando ésta es menor de mil veces la máxima, o más, aportada

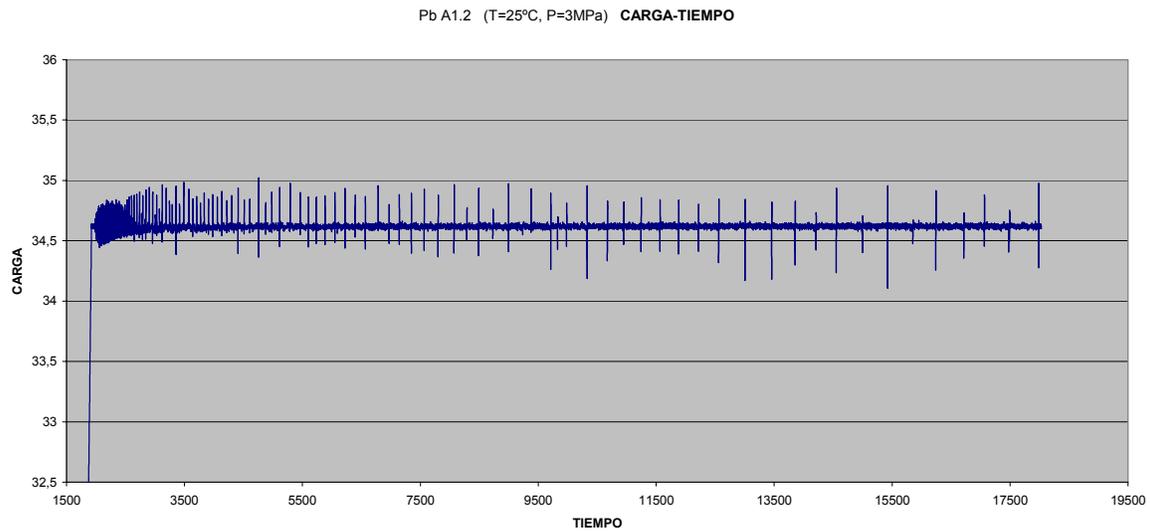
por la célula disponible. Para el caso del estaño y el plomo, la presión máxima aplicada es de 11 MPa, es decir, 126.95 kgf, mucho menor que las del aluminio, por lo que la sensibilidad de la célula para estos casos es menor. Esto se tradujo en una aplicación de la carga deseada, pero manteniendo una oscilación dentro de un rango de variación debido a la poca sensibilidad de la célula para las presiones de trabajo.

Como solución se propuso la utilización de una célula de carga de 3000 kgf para los ensayos A y B del plomo (3 y 5 MPa). Como resultado se pudo comprobar una mejora notable en la calida de las curvas de carga obtenidas.

A continuación se muestran las curvas de carga para un mismo ensayo realizado primero con la célula de carga de 10000 kgf y posteriormente tras haber cambiado la célula por la de 3000 kgf.



**Figura 5.11** Ensayo A1 del plomo con célula de 10000 kgf.



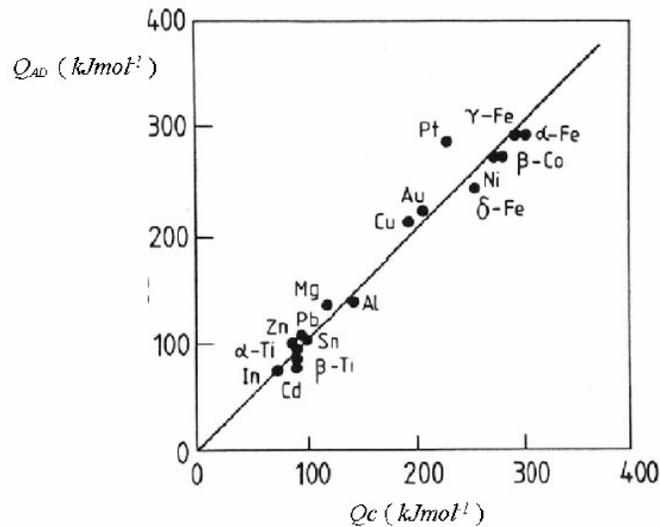
**Figura 5.12** Ensayo A1 del plomo con célula de 3000 kgf.

En la Figura 5.11 se puede observar que, tanto al comienzo de la estabilización de la carga como en el resto del ensayo, la dispersión en los valores de la carga son mucho mayores que en la figura 5.12. Así pues, se tomó la decisión de repetir los ensayos *A* del plomo, y comprobar posteriormente si existía una disminución apreciable del ruido realizando pruebas con los ensayos *B*. Se concluyó que para 5 MPa la disminución del ruido no era tan notable como para 3 MPa, por lo que se prosiguió con los ajustes de los ensayos *B* obtenidos con la célula de 10000 kgf.

## 5.7.- BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA DE PARÁMETROS DE TERMOFLUENCIA

No sólo para comenzar los preajustes de cada uno de los ensayos es necesario conocer los valores característicos de los parámetros de la termofluencia para cada tipo de material, sino también para poder justificar la bondad de las tres expresiones ya conocidas, que son objeto de ajustes posteriores.

A través de documentación obtenida mediante información bibliográfica, se puede conocer el valor del parámetro de la energía de activación de la termofluencia a partir de la energía de autodifusión. En realidad, cuando las propiedades de termofluencia de metales puros se estudian a temperaturas superiores a  $0.4 T_f$ , se observa frecuentemente que  $Q_C \cong Q_{AD}$ , según se comentó en el capítulo 2. Por el contrario, a temperaturas cercanas a  $0.4 T_f$ , y justo por encima, los valores de  $Q_C$  son aproximadamente la mitad de los valores de la energía de activación para la difusión. En la Figura 5.13 se representa la relación existente entre  $Q_C$  y  $Q_{AD}$ .



**Figura 5.13** Relación entre la energía de activación de la termofluencia  $Q_C$  y la de autodifusión  $Q_{AD}$

A partir de la figura anterior, podríamos estimar los valores de  $Q_C$  para el estaño y el aluminio, sin embargo, en el *Smithells Metals* (pág. 13-9) podemos encontrar la energía de autodifusión para el aluminio y el estaño, con lo cual ya conocemos directamente la energía de activación de la termofluencia. Por otro lado, como se vio en el capítulo 2, el parámetro  $n$  oscilaba entre 4 y 6 para metales puros sometidos a tensiones que facilitan la medida de la velocidad de

termofluencia, y en ensayos de termofluencia que duran desde unas horas hasta varias semanas.

En cuanto a  $\alpha$  y a  $\beta$ , sólo podemos conocer el rango de  $\alpha\sigma$  para las ecuaciones cinéticas de conformado en caliente, ecuaciones (2), (3), y (4). Sobre los parámetros  $A$ ,  $A'$  y  $A''$  podemos presentar unos valores típicos que nos podrán servir como indicativos de la bondad de los ajustes obtenidos. En la Tabla 5.5 se recogen los valores característicos para cada material.

|            | PLOMO   | ALUMINIO | ESTAÑO |
|------------|---------|----------|--------|
| $A$        | 4.66e15 | 1.39e12  | 5.5e14 |
| $n$        | 5.5     | 4.9      | 6.6    |
| $Q_c$      | 106     | 135      | 94     |
| $\alpha$   | 5.5     | 4.9      | 6.6    |
| $\beta$    | 1       | 1        | 1      |
| $\sigma_y$ | 18.5e6  | 40.0e6   | 21.8e6 |

**Tabla 5.5** Valores teóricos de los parámetros, donde  $Q_c$  está expresado en  $\text{kJ/mol}$ , y  $\sigma_y$  en

$$\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

## 5.8.- AJUSTES DE LAS CURVAS DE VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

Utilizaremos una macro de Excel para ajustar las ecuaciones mediante la aplicación Solver. Con esta macro hallaremos los parámetros  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  y  $p_4$  de las ecuaciones propuestas (2), (3) y (4).

Mostramos a continuación la hoja Excel que se ha utilizado:

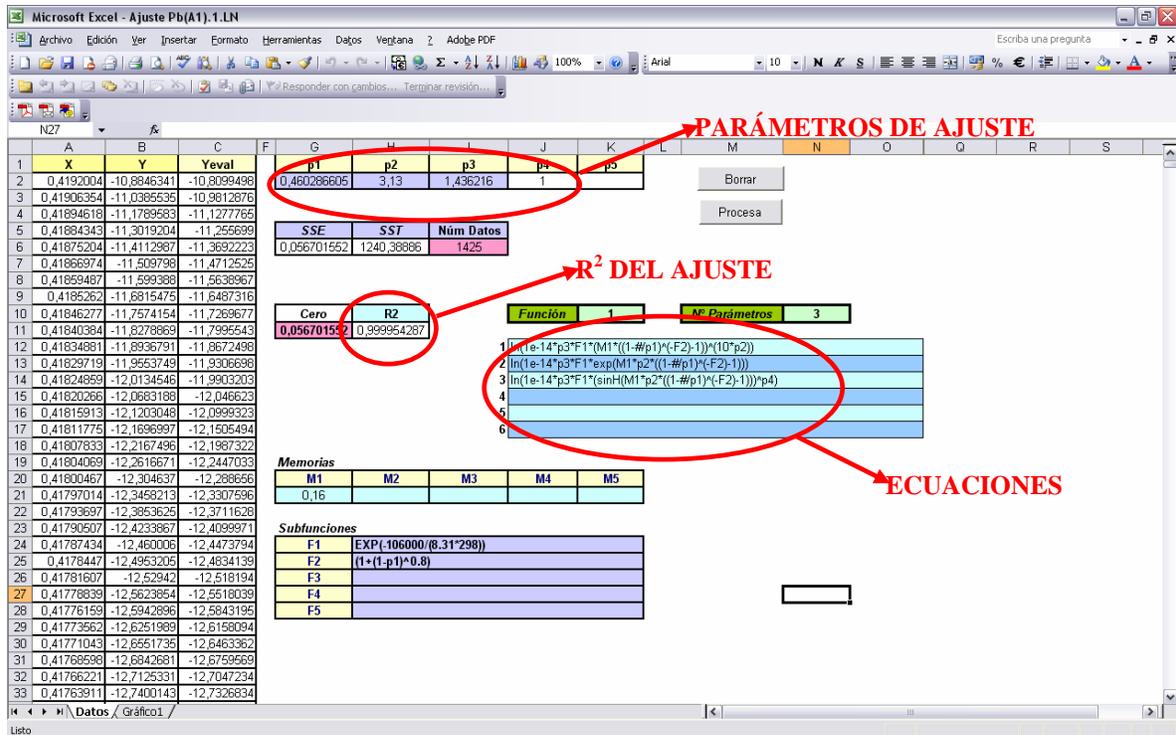
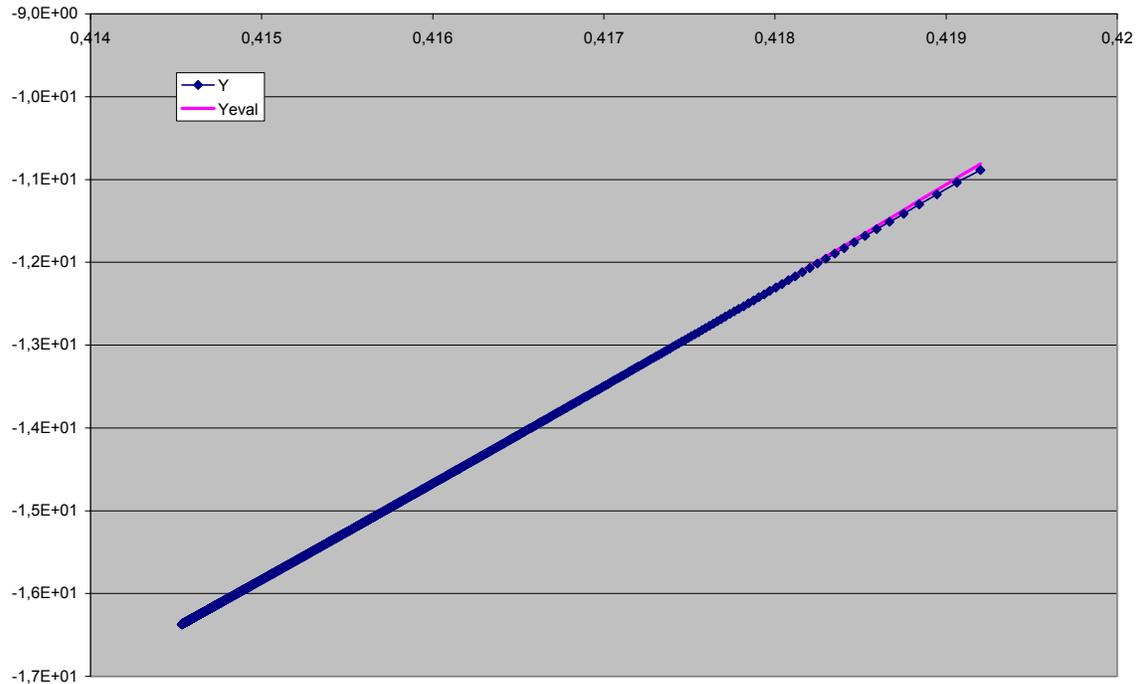


Figura 5.14 Hoja Excel para el ajuste de las ecuaciones

Para realizar los ajustes seleccionamos en primer lugar la función de ajuste (1, 2 ó 3) en la casilla “Función”, para las dos primeras marcamos un 3 en la casilla “Nº de Parámetros”. Para la función 3 seleccionaremos 4 parámetros de ajuste.

Debemos hacer notar que, con el fin de facilitar los cálculos, se realiza el proceso de ajuste tomando los logaritmos de los valores de la velocidad de deformación. Estos logaritmos se toman directamente al cribar los valores con la macro de Excel mostrada anteriormente. De esta forma se consigue una curvatura menor (prácticamente una recta), y el ajuste se realiza con mayor precisión. Así, en la columna “X” se ponen los valores cribados de la porosidad, mientras que en la columna “Y” figuran los logaritmos de los valores cribados de la velocidad de deformación verdadera. La columna “Yeval” muestra los resultados del ajuste. Podemos comprobar a simple vista si el ajuste es bueno revisando el valor de  $R^2$ , que debe ser próximo a 1.

También en la misma hoja Excel se ha realizado una representación gráfica del ajuste, de modo que se pueden comparar los valores logarítmicos del ensayo junto con los del ajuste (figura 5.15):

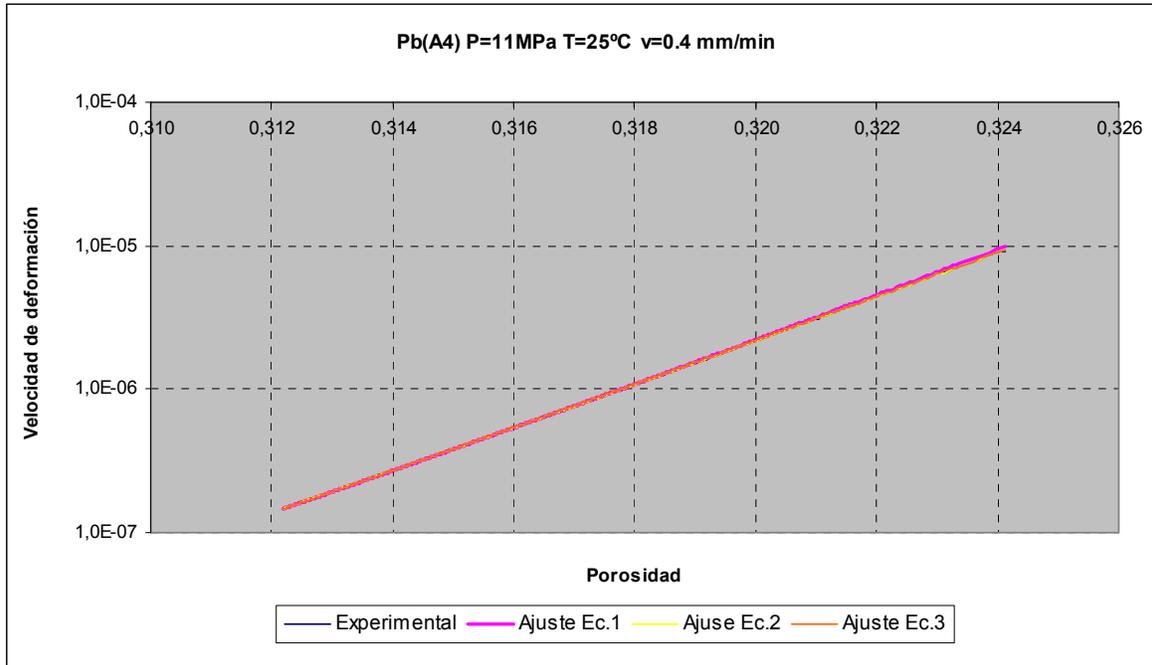


**Figura 5.15** Representación gráfica del logaritmo del ajuste junto con el del ensayo

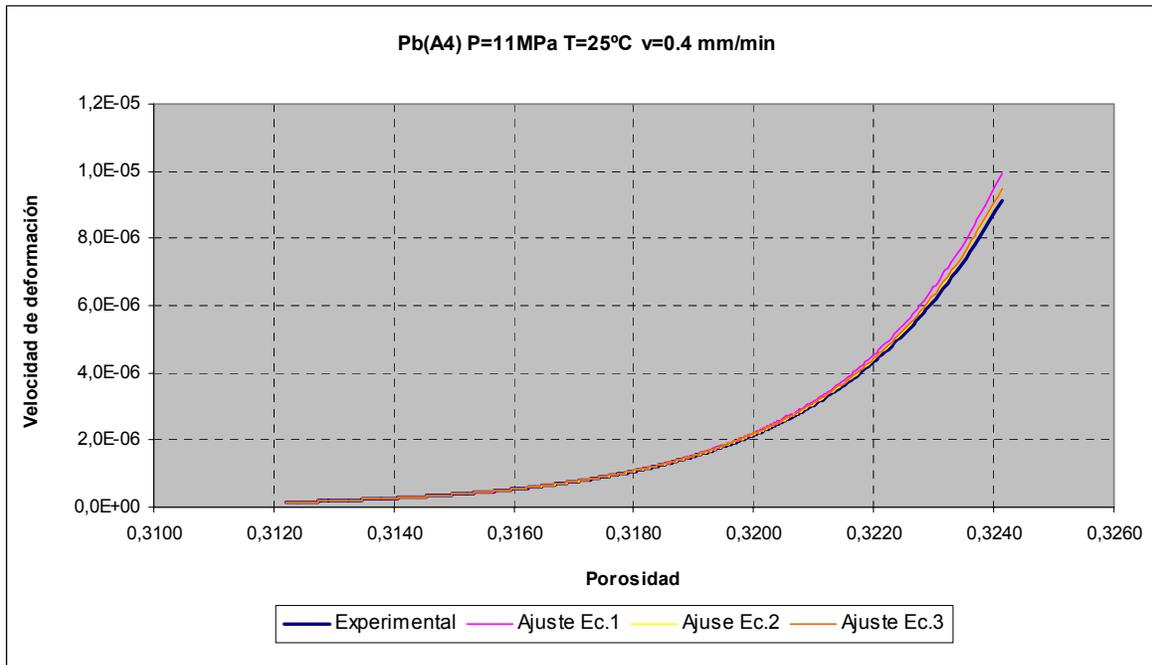
Dado que los parámetros de ajuste tienen valores de magnitud muy dispar, en algunos casos ha sido necesario multiplicarlos por unos escalares de manera que las magnitudes no resultaran un problema a la hora de realizar el cálculo matemático (se producían problemas de cancelación, lo que ocasionaba que las iteraciones no convergieran a un resultado coherente).

Tras el ajuste con la hoja de cálculo mostrada para cada una de las ecuaciones propuestas, se representa para cada ensayo los tres ajustes comparándolos con los datos reales. En la figura 5.15 se muestra un ejemplo de representación de las cuatro curvas en su forma logarítmica (la obtenida mediante

la hoja de cálculo), y en la figura 5.16 se representan las curvas con sus valores reales:



**Figura 5.15** Representación logarítmica de los ajustes frente al ensayo experimental



**Figura 5.16** Representación en valor real de los ajustes frente al ensayo experimental

### 5.9.- RESULTADOS DE LOS AJUSTES

A continuación se muestran las tablas correspondientes a los valores obtenidos para los parámetros de las tres ecuaciones de ajuste propuestas (ecuaciones (2), (3) y (4)).

Mostramos los parámetros de ajuste en la tabla 5.6:

|              | $p_1$        | $p_2$    | $p_3$ | $p_4$ |
|--------------|--------------|----------|-------|-------|
| Ecuación (2) | $\theta_M$   | $n$      | $A$   |       |
| Ecuación (3) | $\theta_M'$  | $\alpha$ | $A'$  |       |
| Ecuación (4) | $\theta_M''$ | $\beta$  | $A''$ | $n''$ |

**Tabla 5.6** Parámetros de ajuste de las ecuaciones propuestas

**5.9.1.- PLOMO** ( $T_f = 327.5 \text{ °C}$  ;  $0.4 T_f \text{ (K)} = -32.8 \text{ °C}$ )

| $\Theta_M$ | T=25       | T=40       | T=55       | T=70       | T=85       | T=100      |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P=3        | 0,46028661 | 0,48887359 | 0,46728985 | 0,45459393 | 0,4542835  | 0,47390044 |
| P=5        | 0,4726483  | 0,47307609 | 0,45257342 | 0,42738096 | 0,43828065 | 0,45827496 |
| P=7        | 0,4608688  | 0,46493343 | 0,47069588 | 0,52899004 | 0,45211016 | 0,45173382 |
| P=11       | 0,42       | 0,49664584 | 0,45321369 | 0,48210427 | 0,44793381 | 0,42       |

| $\Theta_M'$ | T=25       | T=40       | T=55       | T=70       | T=85       | T=100      |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P=3         | 0,50086687 | 0,53462344 | 0,56373774 | 0,55055443 | 0,60614205 | 0,57580441 |
| P=5         | 0,42539457 | 0,58522731 | 0,59071196 | 0,54123955 | 0,6032884  | 0,58854289 |
| P=7         | 0,99996499 | 0,58297229 | 0,61546708 | 0,69017924 | 0,64505562 | 0,65998666 |
| P=11        | 0,74122148 | 0,69651395 | 0,93139505 | 0,9370322  | 0,95039733 | 0,73684053 |

| $\Theta_M''$ | T=25       | T=40       | T=55       | T=70       | T=85       | T=100      |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P=3          | 0,50083605 | 0,53527616 | 0,56830406 | 0,55135112 | 0,6070155  | 0,57607101 |
| P=5          | 0,42231659 | 0,59183789 | 0,58684049 | 0,54137578 | 0,5999246  | 0,58726767 |
| P=7          | 0,99476523 | 0,58896859 | 0,61452734 | 0,68713075 | 0,67491552 | 0,6623973  |
| P=11         | 0,81831148 | 0,74488683 | 0,95687118 | 0,96672626 | 0,99340518 | 0,88572512 |

| A    | T=25     | T=40     | T=55     | T=70     | T=85     | T=100    |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| P=3  | 1,44E-14 | 1,25E-11 | 1,46E-04 | 1,46E-05 | 1,46E+00 | 1,46E-04 |
| P=5  | 6,94E-18 | 2,57E-05 | 1,46E-05 | 1,46E-05 | 1,46E-05 | 1,46E-04 |
| P=7  | 2,99E+05 | 1,66E-09 | 1,46E-03 | 1,46E-02 | 1,46E-05 | 1,46E-04 |
| P=11 | 1,00E-02 | 1,56E-03 | 1,00E+03 | 1,46E+02 | 1,46E+00 | 1,00E+07 |

| <b>A'</b>   | <b>T=25</b> | <b>T=40</b> | <b>T=55</b> | <b>T=70</b> | <b>T=85</b> | <b>T=100</b> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>P=3</b>  | 1,87E-14    | 4,99E-14    | 1,25E-13    | 5,04E-14    | 7,37E-14    | 7,96E-14     |
| <b>P=5</b>  | 6,31E-15    | 1,03E-13    | 4,79E-14    | 3,86E-14    | 8,88E-17    | 6,31E-14     |
| <b>P=7</b>  | 1,35E-11    | 6,40E-14    | 8,29E-14    | 9,78E-14    | 2,22E-14    | 1,01E-13     |
| <b>P=11</b> | 2,56E-13    | 2,59E-13    | 8,87E-13    | 8,53E-13    | 2,99E-13    | 5,03E+00     |

| <b>A''</b>  | <b>T=25</b> | <b>T=40</b> | <b>T=55</b> | <b>T=70</b> | <b>T=85</b> | <b>T=100</b> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>P=3</b>  | 1,91E-14    | 2,89E-14    | 1,03E-13    | 9,23E-14    | 3,20E-13    | 1,79E-13     |
| <b>P=5</b>  | 4,15E-14    | 6,63E-14    | 2,89E-13    | 1,28E-13    | 1,26E-15    | 1,74E-13     |
| <b>P=7</b>  | 5,16E-09    | 5,01E-14    | 3,01E-13    | 3,83E-13    | 1,83E-15    | 1,87E-13     |
| <b>P=11</b> | 5,62E-15    | 1,56E-14    | 2,21E-12    | 1,19E-12    | 4,61E-13    | 6,48E+13     |

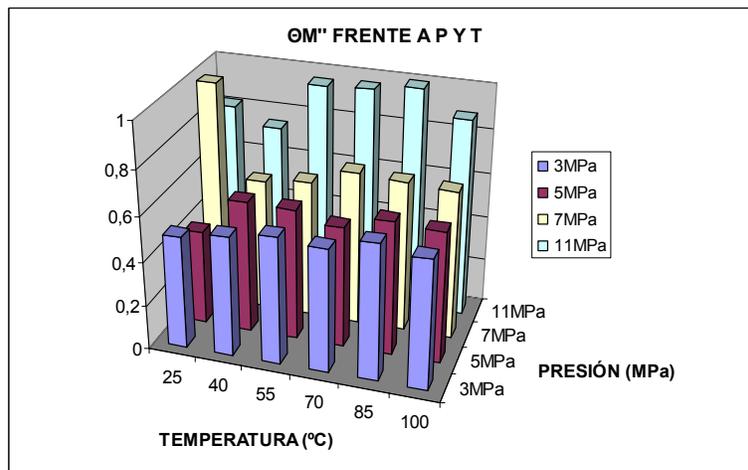
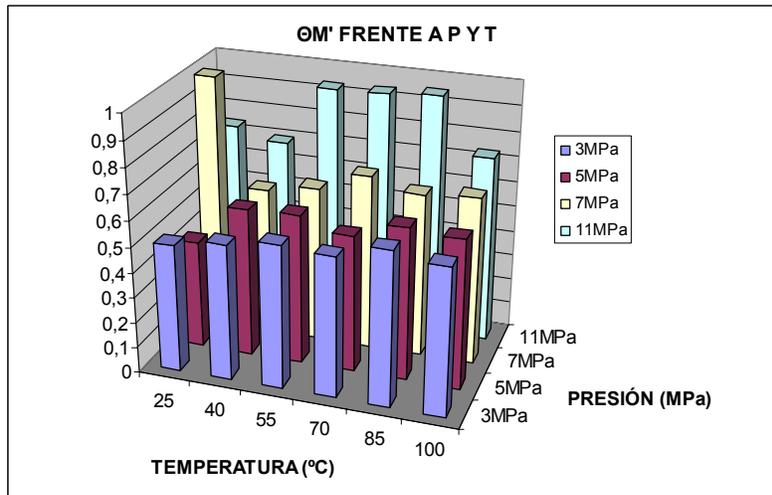
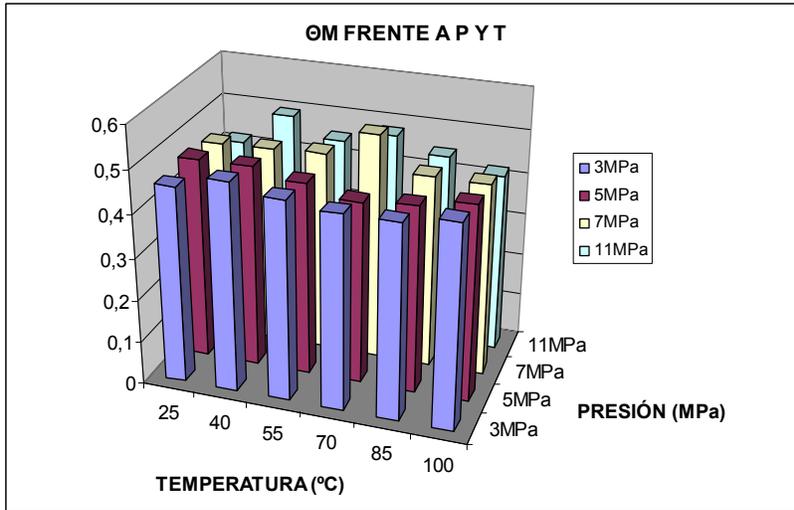
| <b>n</b>    | <b>T=25</b> | <b>T=40</b> | <b>T=55</b> | <b>T=70</b> | <b>T=85</b> | <b>T=100</b> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>P=3</b>  | 31,33587    | 32,2988922  | 21,0940136  | 13,6255179  | 17,4158139  | 18,2496953   |
| <b>P=5</b>  | 93,72325    | 24,68216    | 15,91312    | 10,47516    | 12,96208    | 18,37339     |
| <b>P=7</b>  | 13,37409    | 24,35785    | 27,75188    | 27,72083    | 18,12594    | 18,02341     |
| <b>P=11</b> | 19,70223    | 28,92570    | 23,04694    | 22,28028    | 17,71910    | 12,80340     |

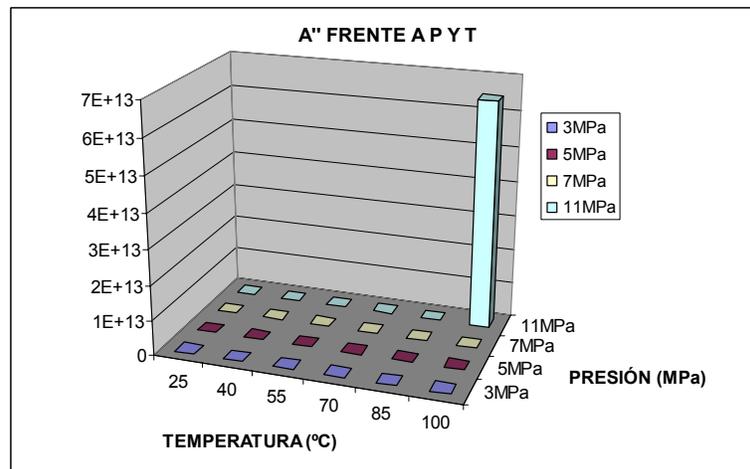
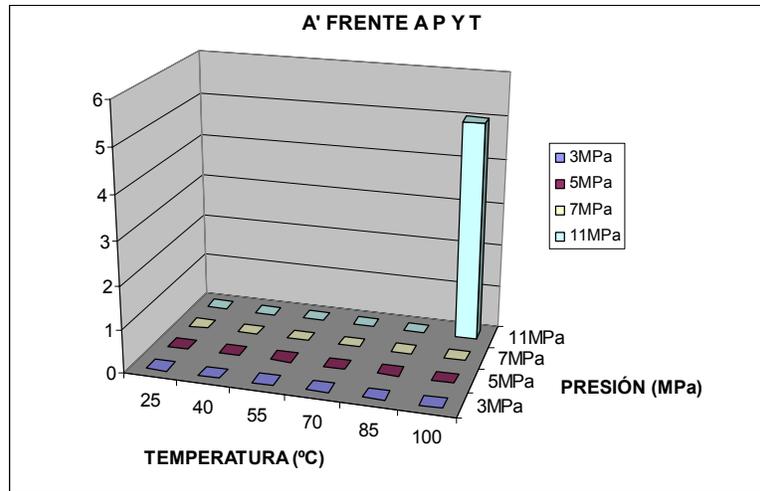
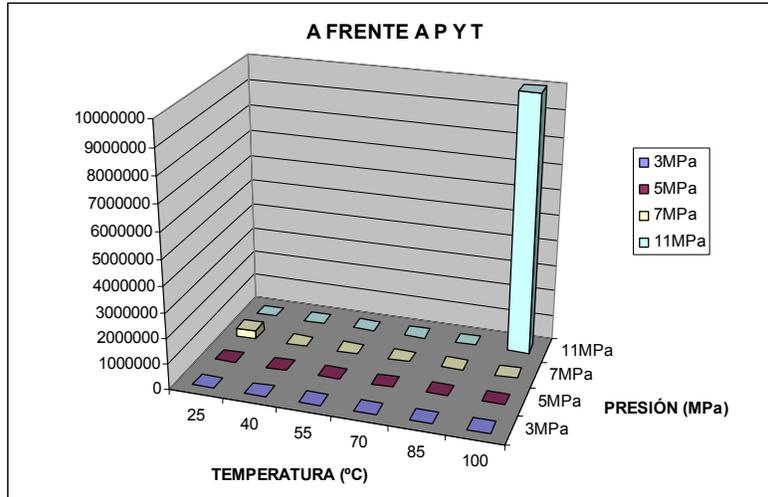
| <b>n''</b>  | <b>T=25</b> | <b>T=40</b> | <b>T=55</b> | <b>T=70</b> | <b>T=85</b> | <b>T=100</b> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>P=3</b>  | 1,01150314  | 1,1559982   | 1,82713964  | 1,26103823  | 2,58101628  | 1,36126229   |
| <b>P=5</b>  | 0,56901174  | 1,78851014  | 1,40658326  | 0,76646576  | 2,56078641  | 1,20197727   |
| <b>P=7</b>  | 2,84340554  | 1,2829187   | 1,76923285  | 1,489352    | 3,22709948  | 1,47819271   |
| <b>P=11</b> | 3,18356288  | 2,0441864   | 3,36299384  | 2,66120041  | 3,29355354  | 0,10081983   |

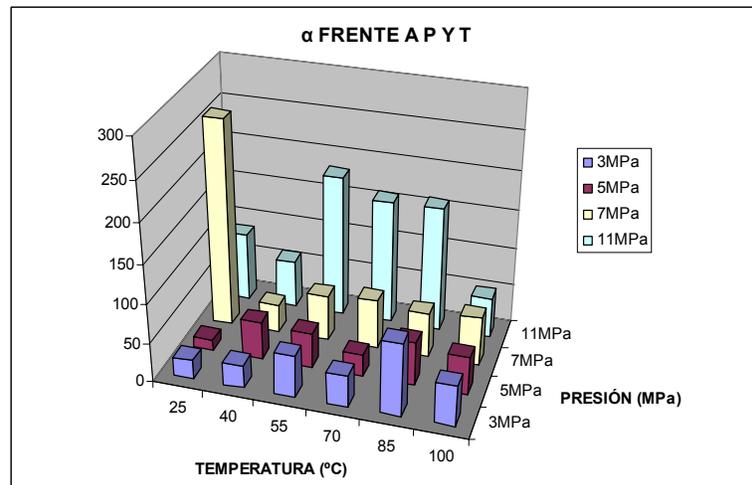
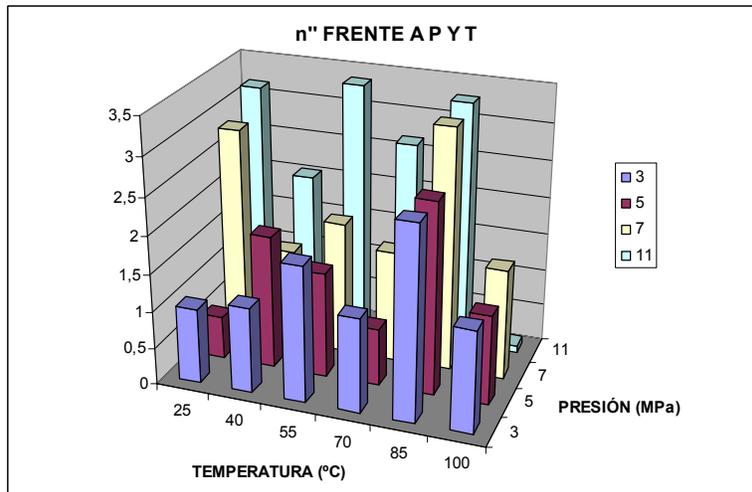
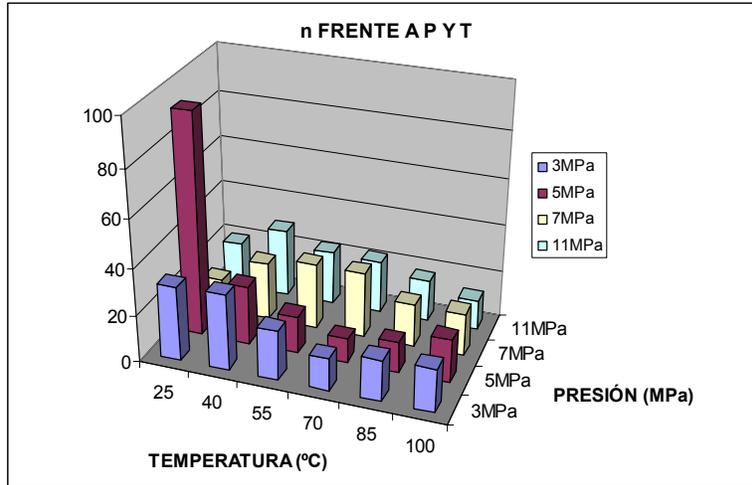
| $\alpha$ | T=25       | T=40       | T=55       | T=70       | T=85       | T=100      |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P=3      | 24,3435945 | 29,4474211 | 53,293564  | 39,7790242 | 92,6839617 | 51,6631003 |
| P=5      | 14,0437539 | 48,1390034 | 45,2634471 | 28,6325038 | 55,8497171 | 48,7125045 |
| P=7      | 264,77249  | 35,34722   | 58,50564   | 63,36473   | 56,72415   | 62,21585   |
| P=11     | 87,2774586 | 60,5512404 | 181,851348 | 158,593006 | 159,625719 | 52,3189542 |

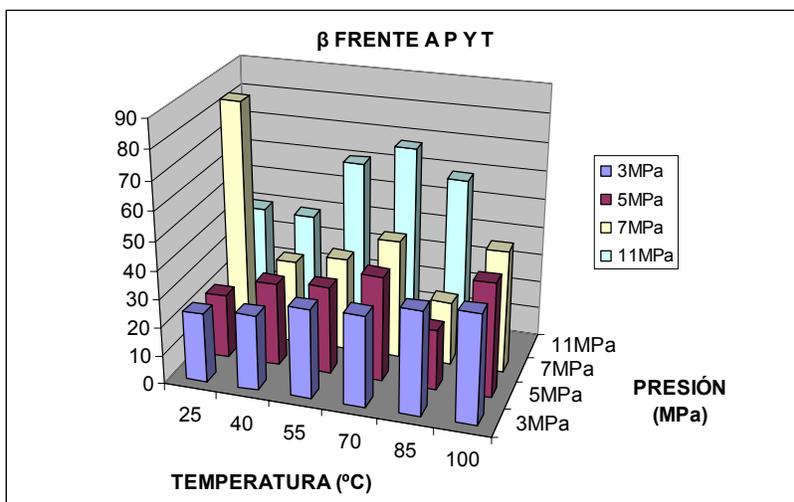
| $\beta$ | T=25       | T=40       | T=55       | T=70       | T=85       | T=100      |
|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P=3     | 24,3296448 | 26,3406758 | 31,3245025 | 32,0042483 | 36,3481189 | 38,1493146 |
| P=5     | 22,572233  | 29,15952   | 30,7292826 | 36,9406606 | 20,9618264 | 40,0076197 |
| P=7     | 84,0091543 | 29,4138752 | 32,8565285 | 41,6266111 | 22,3976998 | 42,9574507 |
| P=11    | 39,5825244 | 38,7972915 | 60,0893518 | 67,5203479 | 58,3090693 | 882,572369 |

**PLOMO: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS PARÁMETROS FRENTE A P Y T**









**5.9.2.- ALUMINIO** ( $T_f = 660.4 \text{ }^\circ\text{C}$  ;  $0.4 T_f (\text{K}) = 100.36 \text{ }^\circ\text{C}$ )

*Nota:* Las casillas marcadas en rojo corresponden a los ensayos C.3 y C.4, que han sido obviados en el presente proyecto por presentar incoherencias en los datos de porosidad obtenidos a partir de los datos procedentes de la máquina de ensayos.

| $\Theta$ | T=150      | T=200      | T=250      | T=300      |
|----------|------------|------------|------------|------------|
| P=20     | 0,46028661 | 0,44214555 | 0,52495501 | 0,42273086 |
| P=40     | 0,60858964 | 0,53214366 | 0,48868472 | 0,49531374 |
| P=60     | 0,39       | 0,39246624 | 0          | 0,43333968 |
| P=80     | 0,60858964 | 0,45639084 | 0          | 0,39       |

| $\Theta'$ | T=150      | T=200      | T=250      | T=300      |
|-----------|------------|------------|------------|------------|
| P=20      | 0,53063294 | 0,72294197 | 0,64965007 | 0,59582438 |
| P=40      | 0,45316846 | 0,72866095 | 0,64231773 | 1          |
| P=60      | 0,87840727 | 1          | 0          | 1          |
| P=80      | 0,45316846 | 0,50890748 | 0          | 0,52059132 |

| $\Theta''$ | T=150      | T=200      | T=250      | T=300      |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| P=20       | 0,53190746 | 0,76129254 | 0,6620632  | 0,62743615 |
| P=40       | 0,45047915 | 0,99999884 | 0,95389446 | 0,99999899 |
| P=60       | 0,87663126 | 0,9251385  | 0          | 0,73888507 |
| P=80       | 0,39118621 | 0,99999899 | 0          | 0,89610174 |

| A    | T=150    | T=200    | T=250    | T=300    |
|------|----------|----------|----------|----------|
| P=20 | 1,28E-12 | 7,05E-03 | 7,05E-03 | 7,05E-03 |
| P=40 | 9,99E-12 | 7,05E+05 | 7,05E+00 | 7,05E+00 |
| P=60 | 1,03E-05 | 7,05E+00 | 0,00E+00 | 7,05E+04 |
| P=80 | 9,99E-12 | 7,05E+01 | 0,00E+00 | 7,77E+05 |

| <b>A'</b>   | <b>T=150</b> | <b>T=200</b> | <b>T=250</b> | <b>T=300</b> |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>P=20</b> | 4,37E-12     | 2,30E-11     | 1,19E-11     | 3,11E-11     |
| <b>P=40</b> | 2,10E-12     | 2,99E+02     | 6,17E-03     | 1,66E-06     |
| <b>P=60</b> | 9,64E-12     | 8,04E-04     | 0,00E+00     | 7,84E+01     |
| <b>P=80</b> | 2,10E-12     | 2,62E+01     | 0,00E+00     | 6,83E+04     |

| <b>A''</b>  | <b>T=150</b> | <b>T=200</b> | <b>T=250</b> | <b>T=300</b> |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>P=20</b> | 6,07E-12     | 1,90E-11     | 2,49E-11     | 3,43E-11     |
| <b>P=40</b> | 6,61E-12     | 4,27E+00     | 3,20E+06     | 2,84E-06     |
| <b>P=60</b> | 6,02E-11     | 7,70E-03     | 0,00E+00     | 2,84E+02     |
| <b>P=80</b> | 2,11E+07     | 8,52E-03     | 0,00E+00     | 3,10E+04     |

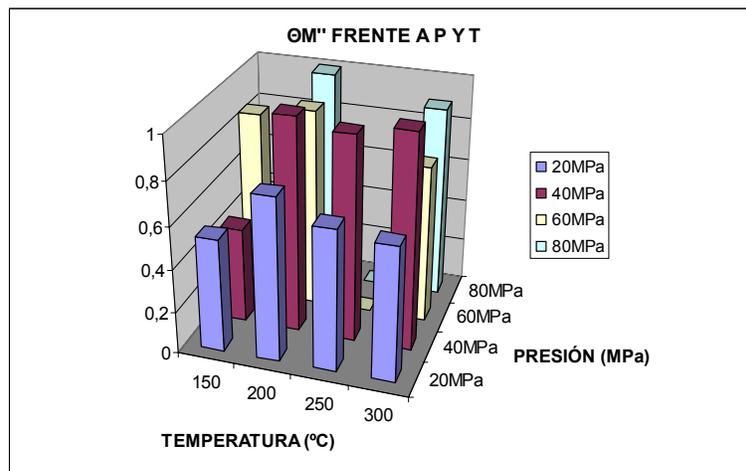
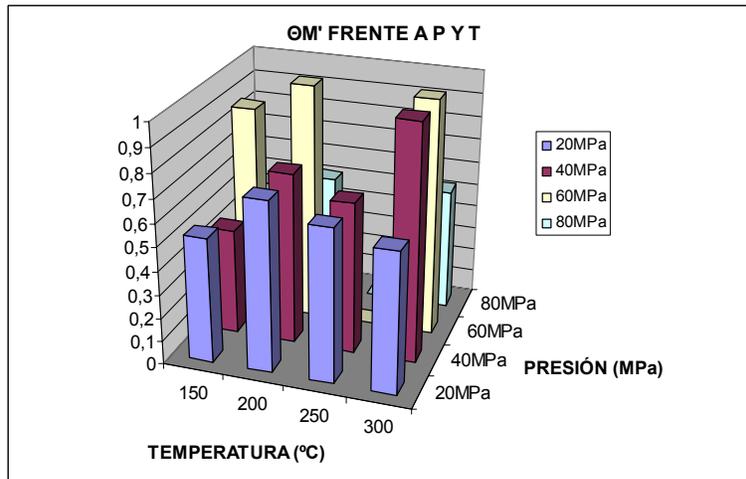
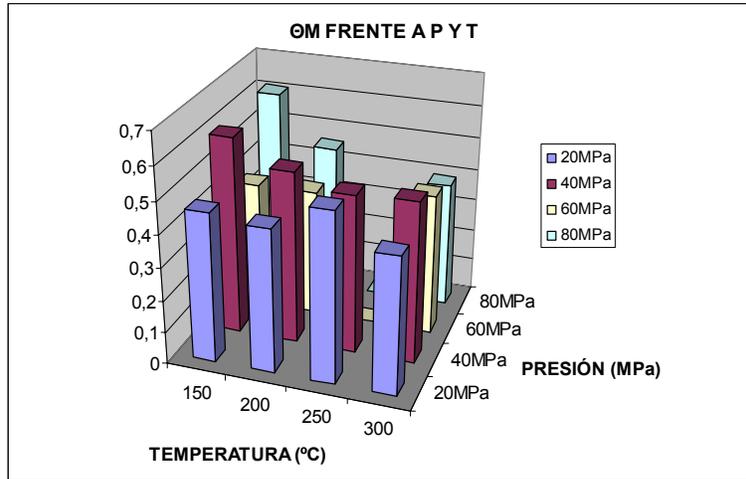
| <b>n</b>    | <b>T=150</b> | <b>T=200</b> | <b>T=250</b> | <b>T=300</b> |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>P=20</b> | 23,5681736   | 14,3593099   | 27,8516237   | 21,3829229   |
| <b>P=40</b> | 85,84407     | 10,94878     | 15,94410     | 14,78566     |
| <b>P=60</b> | 22,22893     | 11,72726     | 0,00000      | 7,10656      |
| <b>P=80</b> | 85,84407     | 15,76176     | 0,00000      | 3,85144      |

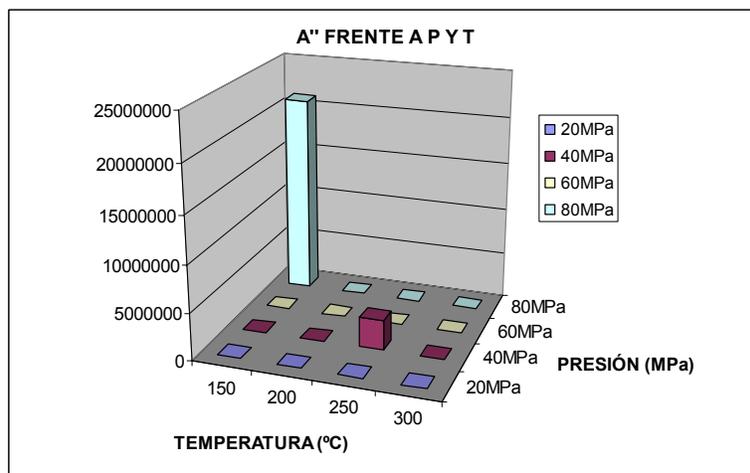
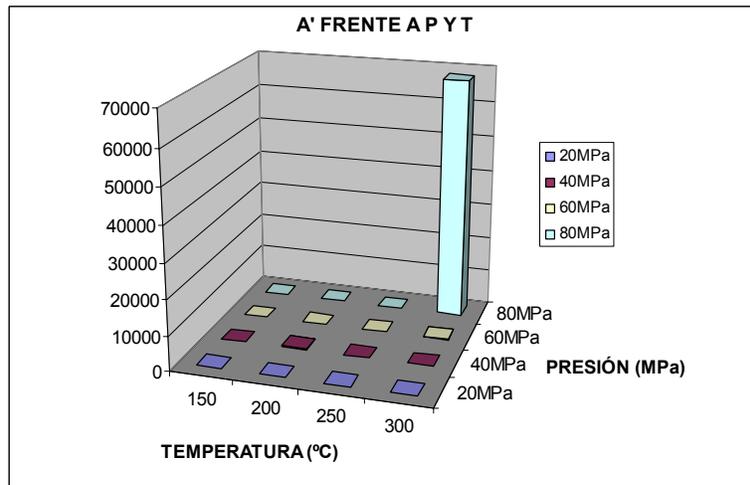
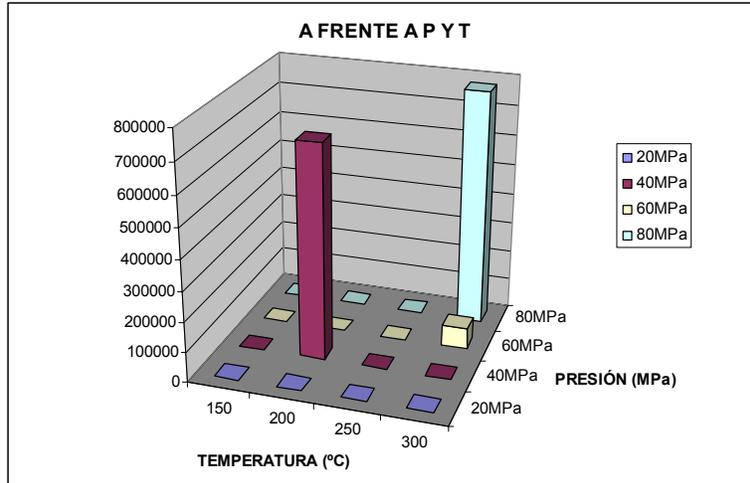
| <b>n''</b>  | <b>T=150</b> | <b>T=200</b> | <b>T=250</b> | <b>T=300</b> |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>P=20</b> | 1,33011757   | 3,38532767   | 2,70953561   | 3,25845031   |
| <b>P=40</b> | 0,69427272   | 0,16203702   | 1,26013657   | 1,2275817    |
| <b>P=60</b> | 1,21878587   | 1,32495407   | 0            | 0,0344198    |
| <b>P=80</b> | 1,0837628    | 1,53761619   | 0            | 0,1833987    |

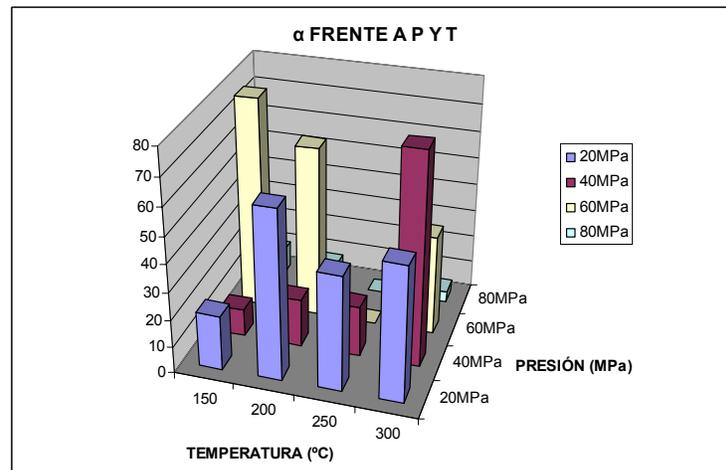
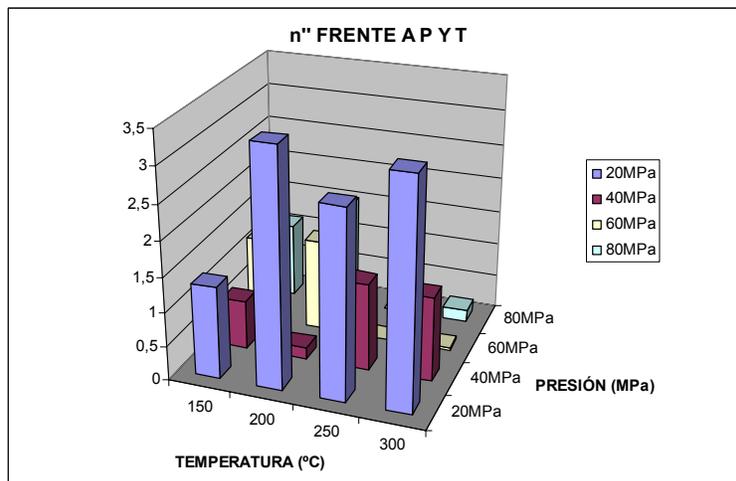
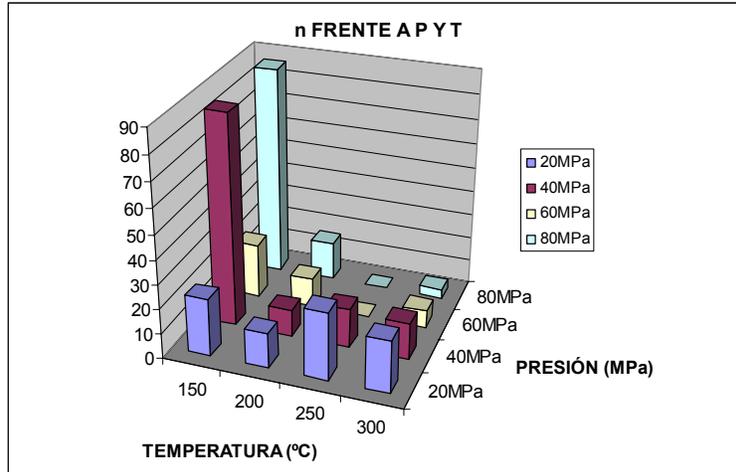
| <b>α</b>    | <b>T=150</b> | <b>T=200</b> | <b>T=250</b> | <b>T=300</b> |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>P=20</b> | 20,1351668   | 61,8614093   | 42,1653351   | 49,3884765   |
| <b>P=40</b> | 10,0569275   | 17,5429687   | 18,5531597   | 77,3608068   |
| <b>P=60</b> | 77,58587     | 62,67621     | 0,00000      | 36,74183     |
| <b>P=80</b> | 10,0569275   | 7,88569706   | 0            | 4,37193348   |

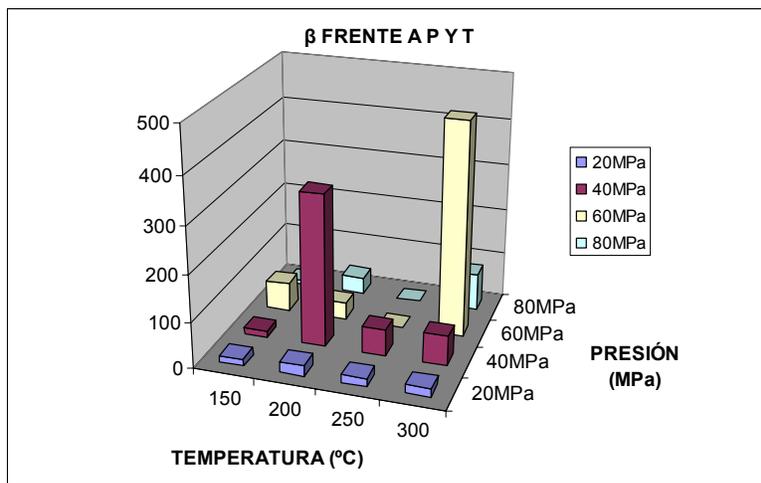
| $\beta$ | T=150      | T=200      | T=250      | T=300      |
|---------|------------|------------|------------|------------|
| P=20    | 15,4923223 | 22,4783956 | 16,9773433 | 18,4030969 |
| P=40    | 13,9155645 | 327,610028 | 55,7627031 | 63,7263883 |
| P=60    | 62,0378472 | 35,4381697 | 0          | 461,478149 |
| P=80    | 10,1440862 | 36,2346196 | 0          | 80,068064  |

ALUMINIO: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS PARÁMETROS FRENTE A P Y T









**5.9.3.- ESTAÑO** ( $T_f = 232\text{ °C}$  ;  $0.4 T_f\text{ (K)} = -71\text{ °C}$ )

| $\Theta$ | T=25       | T=50       | T=75       | T=100      |
|----------|------------|------------|------------|------------|
| P=3      | 0,46028661 | 0,51084285 | 0,54381871 | 0,5440224  |
| P=5      | 0,43000074 | 0,52384388 | 0,56050494 | 0,50863441 |
| P=7      | 0,44699629 | 0,52621966 | 0,5793745  | 0,5812954  |
| P=11     | 0,43000169 | 0,56848328 | 0,50382836 | 0,57869552 |

| $\Theta'$ | T=25       | T=50       | T=75       | T=100      |
|-----------|------------|------------|------------|------------|
| P=3       | 0,48354398 | 0,45401448 | 0,44658139 | 0,45418496 |
| P=5       | 0,48547309 | 0,48167357 | 0,4545736  | 0,5001393  |
| P=7       | 0,52800778 | 0,49037231 | 0,4417487  | 0,43000117 |
| P=11      | 0,50194198 | 0,47464529 | 0,47769226 | 0,43444934 |

| $\Theta''$ | T=25       | T=50       | T=75       | T=100      |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| P=3        | 0,4852289  | 0,45303455 | 0,44484903 | 0,45179343 |
| P=5        | 0,48698016 | 0,48403654 | 0,45642319 | 0,49333786 |
| P=7        | 0,53347256 | 0,49087796 | 0,44345132 | 0,43263927 |
| P=11       | 0,49516374 | 0,47250781 | 0,48702539 | 0,44017916 |

| A    | T=25     | T=50     | T=75     | T=100    |
|------|----------|----------|----------|----------|
| P=3  | 4,00E-01 | 1,00E+02 | 7,79E+01 | 8,43E+01 |
| P=5  | 1,09E+00 | 1,42E+02 | 9,03E+01 | 2,19E+02 |
| P=7  | 6,72E+01 | 1,55E+02 | 9,32E+01 | 2,01E+02 |
| P=11 | 1,58E-01 | 1,56E+02 | 1,63E+02 | 2,06E+02 |

| A'   | T=25     | T=50     | T=75     | T=100    |
|------|----------|----------|----------|----------|
| P=3  | 3,17E+00 | 2,30E+00 | 1,30E+00 | 1,18E+00 |
| P=5  | 2,29E+00 | 5,15E+00 | 2,80E+00 | 1,27E+00 |
| P=7  | 3,44E+00 | 4,08E+00 | 2,55E+00 | 2,39E+00 |
| P=11 | 1,73E+00 | 3,27E+00 | 2,79E+00 | 2,48E+00 |

| <b>A"</b>   | <b>T=25</b> | <b>T=50</b> | <b>T=75</b> | <b>T=100</b> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>P=3</b>  | 3,40E+00    | 4,95E+00    | 4,81E+00    | 4,51E+00     |
| <b>P=5</b>  | 3,23E+00    | 4,38E+00    | 2,31E+00    | 4,44E+00     |
| <b>P=7</b>  | 5,13E+00    | 7,32E+00    | 2,28E+00    | 1,16E+00     |
| <b>P=11</b> | 8,97E+00    | 7,62E+00    | 2,20E+00    | 1,13E+00     |

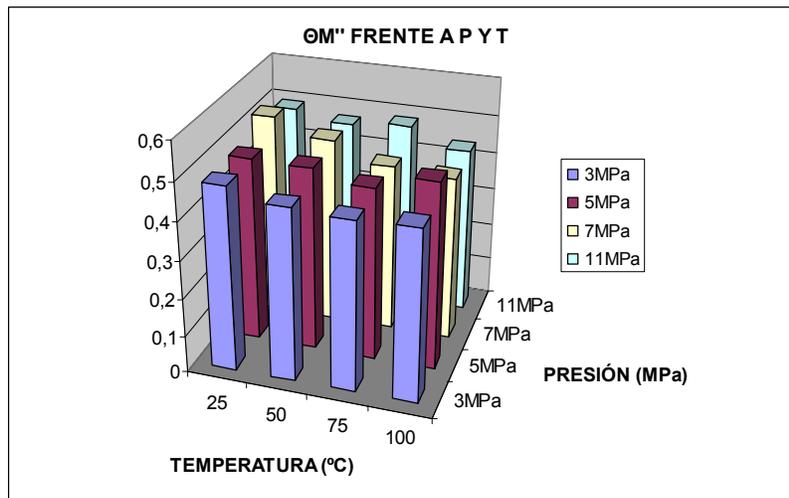
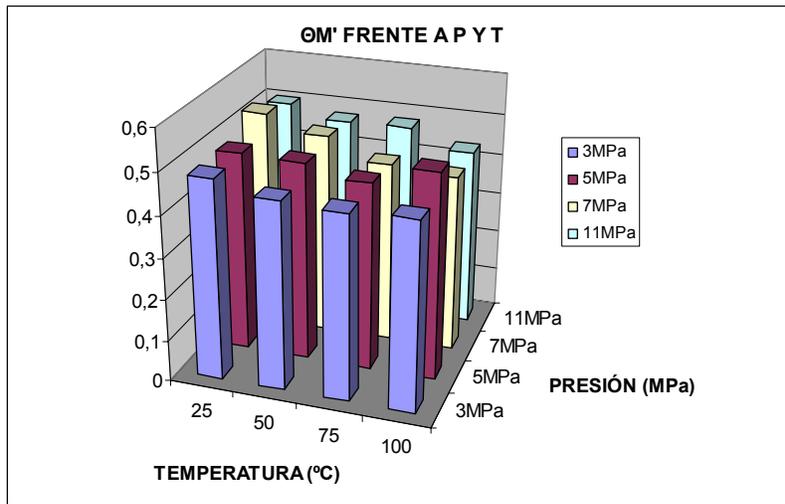
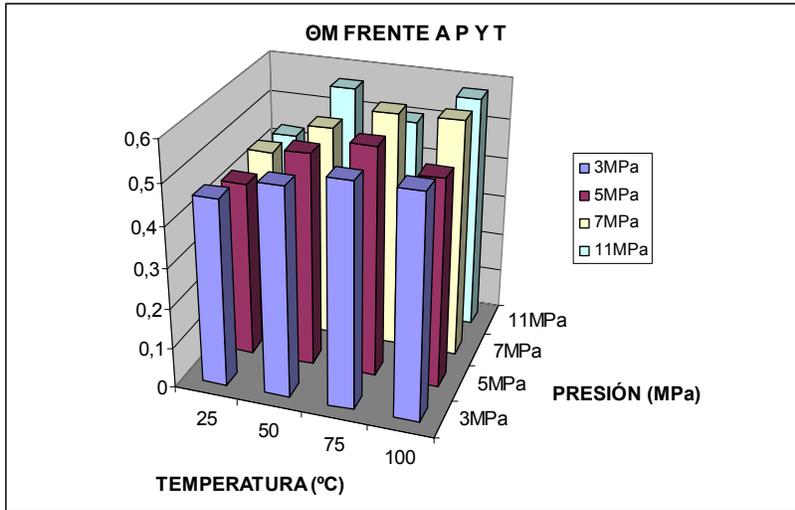
| <b>n</b>    | <b>T=25</b> | <b>T=50</b> | <b>T=75</b> | <b>T=100</b> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>P=3</b>  | 10,0699875  | 42,2947691  | 76,8962862  | 55,3290513   |
| <b>P=5</b>  | 9,91839     | 28,15289    | 48,97639    | 17,85806     |
| <b>P=7</b>  | 11,89851    | 25,68776    | 53,24126    | 55,03655     |
| <b>P=11</b> | 13,48644    | 32,82835    | 20,56714    | 34,86960     |

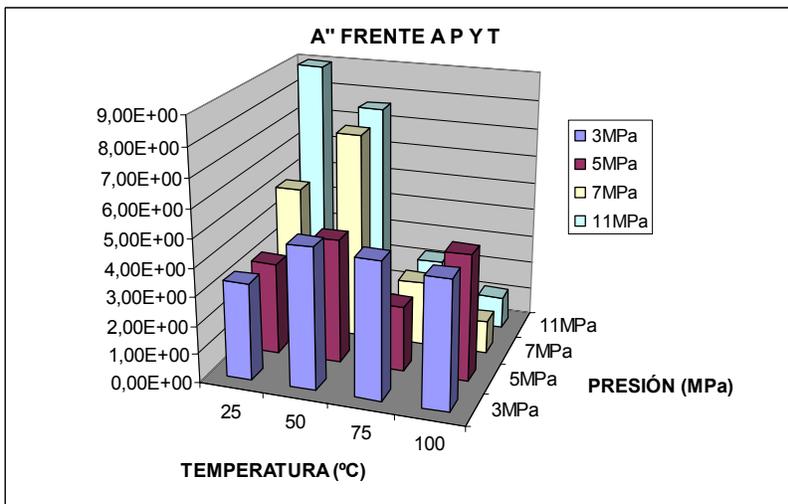
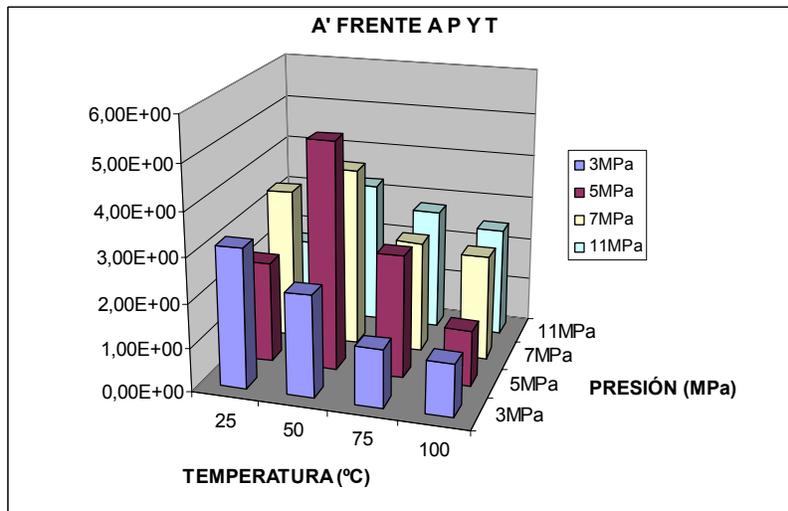
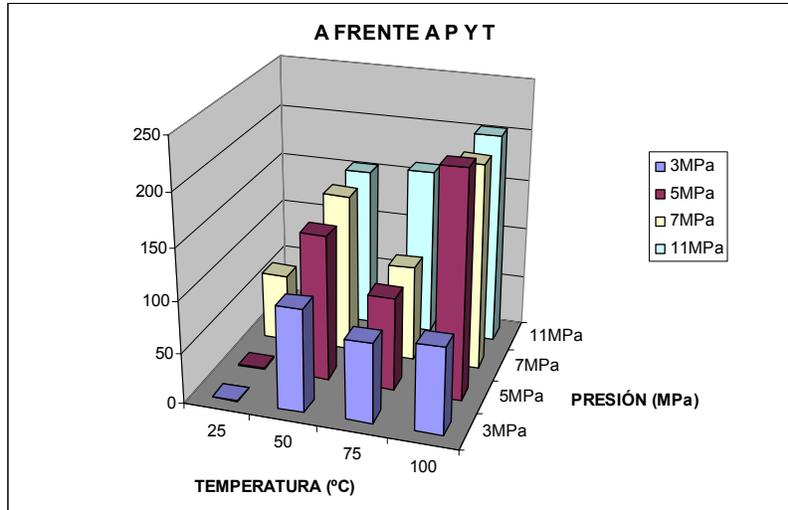
| <b>n"</b>   | <b>T=25</b> | <b>T=50</b> | <b>T=75</b> | <b>T=100</b> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>P=3</b>  | 1,03685304  | 0,60874799  | 0,34983056  | 0,35402402   |
| <b>P=5</b>  | 1,12281343  | 0,61379135  | 0,5788902   | 0,50928065   |
| <b>P=7</b>  | 1,66797577  | 0,96721812  | 0,50701944  | 0,12468463   |
| <b>P=11</b> | 1,04160172  | 0,73712714  | 1,00667089  | 0,19142757   |

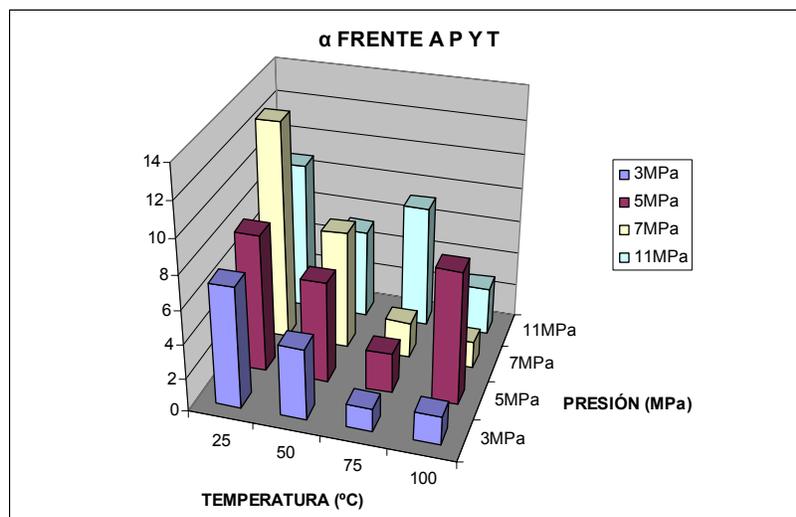
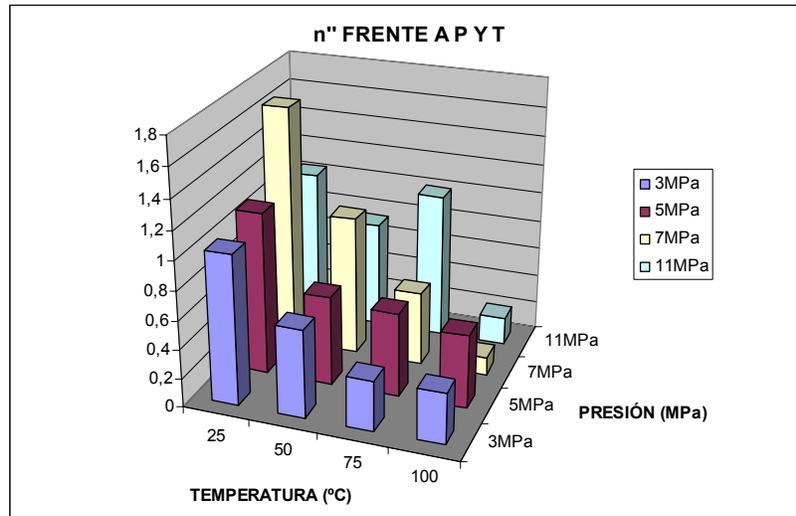
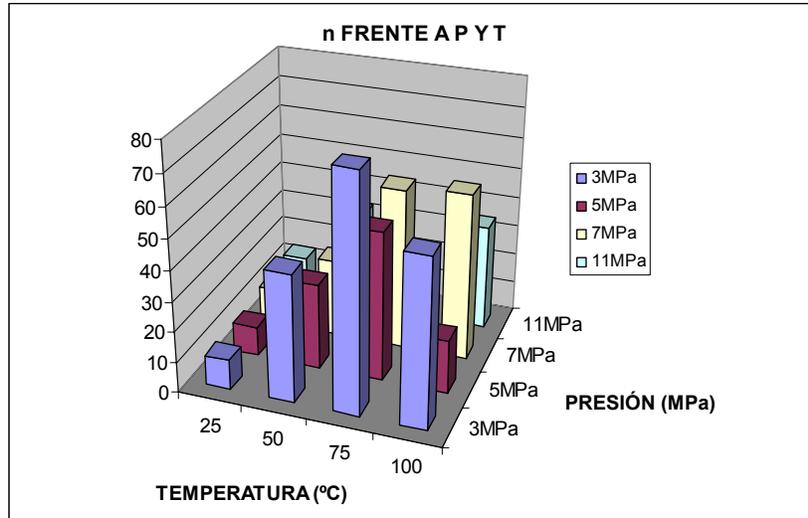
| <b>α</b>    | <b>T=25</b> | <b>T=50</b> | <b>T=75</b> | <b>T=100</b> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>P=3</b>  | 7,17369552  | 4,21384307  | 1,41117779  | 1,65097774   |
| <b>P=5</b>  | 8,20010774  | 6,02079338  | 2,41566482  | 7,82958537   |
| <b>P=7</b>  | 12,92954    | 7,02667     | 2,14405     | 1,57280      |
| <b>P=11</b> | 8,83689103  | 5,27048305  | 7,26398829  | 2,85169929   |

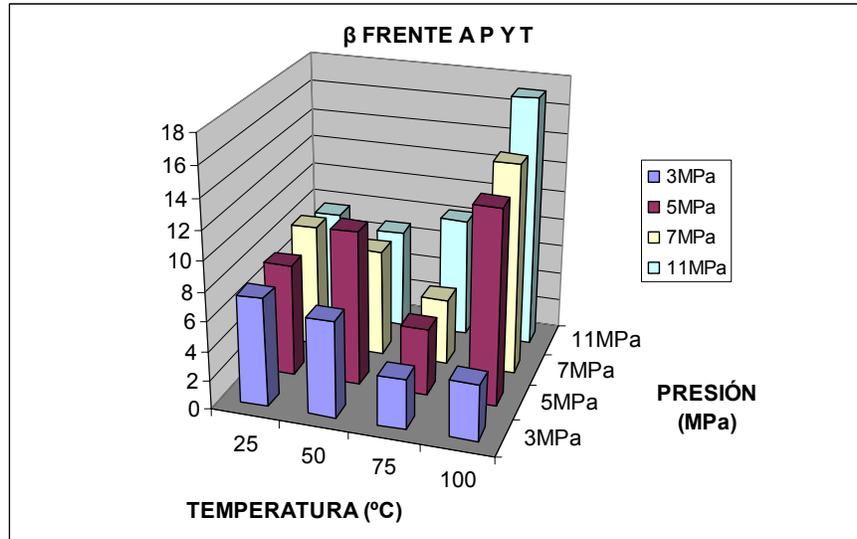
| <b>β</b>    | <b>T=25</b> | <b>T=50</b> | <b>T=75</b> | <b>T=100</b> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>P=3</b>  | 7,40096389  | 6,59509905  | 3,41740385  | 3,8459203    |
| <b>P=5</b>  | 7,62154828  | 10,5286856  | 4,55613093  | 13,2450271   |
| <b>P=7</b>  | 8,42743547  | 7,34500812  | 4,53949869  | 14,3602696   |
| <b>P=11</b> | 7,62514384  | 6,84721868  | 8,27317236  | 17,2502728   |

ESTAÑO: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS PARÁMETROS FRENTE A P Y T









## **5.10.- DISCUSIÓN**

De acuerdo con los resultados obtenidos y teniendo presentes las incidencias que han sucedido en la preparación experimental de los ensayos, se pueden realizar una serie de discusiones sobre el procedimiento experimental y resultados.

### **5.10.1.- Obtención y suavizado de la curva de deformación**

Los ensayos de termofluencia que se han realizado, no son los ensayos de tracción convencionales en los que se pueden distinguir las tres etapas de la termofluencia. Nuestros ensayos han sido de compresión uniaxial y, además, no se ha trabajado con materiales macizos, sino con materiales en polvo. Por lo tanto, es evidente que nunca llegaremos a la fractura del material, puesto que, en cada ensayo, el polvo se encuentra alojado en el interior de una matriz cilíndrica de acero, manteniendo en todo momento una forma cilíndrica. En nuestro caso, la porosidad irá disminuyendo a medida que la carga aumenta. Cuando se alcance la carga de consigna, será el fenómeno de termofluencia el responsable de que la deformación vaya aumentando, conforme transcurra el tiempo. Por otro lado, no podemos hacer una clara distinción de si estamos trabajando a bajas o altas tensiones. Inicialmente la zona de contacto entre partículas es muy pequeña, debido a que el grado de porosidad es alto, por lo que la tensión transmitida será muy elevada. A medida que transcurre el tiempo, la porosidad disminuye, la zona de contacto es mayor y, en consecuencia, la tensión disminuye. De ahí que no se pueda dejar claro en qué régimen de tensiones se trabaja.

El cambio de la célula de carga (10000 kgf por 3000 kgf) para los ensayos del plomo a 3 MPa ha supuesto una mejora en la calidad de los datos obtenidos, propiciando un mejor tratamiento de los mismos. Este cambio de la célula de carga ya se sugirió en los ensayos que se realizaron con anterioridad para el

estaño (también a presiones de 3 MPa). También conviene decir que a partir de 5 MPa no se aprecian diferencias significativas entre la célula de 3000 y 10000 kgf, por lo que no fue necesario repetir los ensayos realizados a esa presión.

En cuanto a los parámetros de ensayo, requieren una atención especial la temperatura, la presión, la velocidad de subida de la rampa para alcanzar la carga deseada, y el tiempo de duración del ensayo. En la introducción del capítulo 3, se justificaron el uso de las temperaturas y las presiones para cada uno de los polvos. La temperatura de los ensayos se fijó en base a aquella en la que el fenómeno de la termofluencia se hacía presente ( $0.4 T_f$ ); y las presiones en función de la resistencia del material.

El parámetro que controla la máquina de ensayo es la extensión, por lo que para alcanzar la carga deseada es necesario fijar un valor para la velocidad de subida del bastidor inferior, de forma que la rampa sea lo más vertical posible. Esto supone un valor alto del parámetro, pudiendo así excedernos de la carga deseada, ocasionando, al inicio del régimen de trabajo, saltos y fluctuaciones considerables en la deformación ingenieril. Teniendo en cuenta esto, y sabiendo que cuanto mayor es la presión, mayor es la extensión (en compresión), se decidió aplicar una velocidad de subida de 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 mm/min para cada una de las presiones de trabajo, de menor a mayor, respectivamente. De esta forma se conseguía fijar el tiempo de transición entre 2000 y 3000 segundos (en algunos casos menor).

Por otro lado, el tiempo de cada ensayo se fijó en 5 horas, y teniendo en cuenta el tiempo de transición, el ensayo de termofluencia se ajustaba a unas 4 horas aproximadamente de duración. Sabiendo que para que el fenómeno de termofluencia se manifieste con claridad, es necesario, no sólo horas, sino incluso días, meses y años y, conociendo el número de horas máximas que según el fabricante (6-7 horas) puede trabajar la máquina durante un ensayo, el objetivo de este proyecto se vio bastante limitado.

En relación al procesamiento de datos, la elección de la curva de suavizado (filtrado del ruido), ha permitido mejorar el realizado mediante curvas logarítmicas, extendiendo además el rango de ajuste hasta el instante en el que la carga comienza a ser constante. De este modo se extiende el estudio de la termofluencia desde el momento en el que sabemos que la deformación no está siendo provocada por un aumento de la carga. Esto supone también una mejora con respecto a ensayos realizados con anterioridad, en los que sólo había sido posible el estudio de la termofluencia cuando la curva de deformación tenía poca curvatura (para poder realizar un ajuste logarítmico).

Una vez procesados todos los datos, se representó la velocidad de deformación en función de la porosidad relativa. Se observó que los valores de las velocidades eran muy pequeños, del orden de  $10^{-6}$ , de manera que la sensibilidad del ajuste se convertía en un factor importante a tener en cuenta. Dicha velocidad era del mismo orden en el estaño y el plomo que en el aluminio, diferenciándose en cambio bastante las porosidades, dado que las presiones y los materiales son diferentes. Las curvas del estaño y el plomo presentaban más curvatura que las del aluminio, lo que suponía que la disminución de la velocidad de deformación con respecto a la porosidad era más rápida en el estaño y en el plomo que en el aluminio.

### **5.10.2.- Resultados de Ajustes Definitivos**

A la vista de los diagramas de barras representados en 3D para los materiales objeto del estudio, podemos discutir la influencia de la presión y la temperatura sobre los parámetros de ajuste:

5.10.2.1.- **Para el plomo**, los valores obtenidos para el parámetro  $\theta_M$  son bastante estables, queriendo decir con esto que el valor no oscila mucho, lo cual

es coherente con el hecho de que estamos dejando libre para el ajuste la porosidad de golpeo, pero en teoría este es un valor fijo.

Para el parámetro  $A$  no se aprecia una evolución clara con la presión y la temperatura, con lo que no podemos concluir nada sobre la influencia de éstas sobre  $A$ . De hecho, hemos obtenido unos valores muy dispares y de orden de magnitud muy diferente.

Para  $n$  sí podemos decir que su evolución es ascendente con la temperatura, y los resultados no son claros en cuanto a la presión.

Para  $n''$  los resultados marcan una tendencia bastante clara de descenso conforme aumenta la temperatura y de aumento con la presión bastante uniforme hasta 7 MPa, y menor a 11 MPa, aunque la tendencia con la temperatura sigue siendo de descenso.

Lo mismo ocurre con la evolución de  $\alpha$ , que es claramente de descenso con la temperatura, mientras que su evolución con la presión no es clara.

Para  $\beta$ , sin embargo, sí encontramos (obviando algún ensayo que se sale de la tendencia) una evolución ascendente con la presión, pero su evolución con la temperatura no parece que siga ningún patrón.

En resumen, exceptuando  $\beta$ , la evolución de los parámetros es clara con la temperatura y no podemos afirmar nada con respecto a la presión. Esto puede ser consecuencia de estar realizando los ensayos a presiones bajas.

5.10.2.2.- **Para el aluminio**, la tendencia de  $\Theta_M$  es también de estabilidad, pero presentando unas oscilaciones de los valores mayores que en el caso del plomo. Esto puede deberse a que los ensayos presentaban, por una parte mayor ruido, y por otra una mayor dificultad matemática en el ajuste.

Para  $A$  ocurre lo mismo que para el plomo. A pesar de que los ajustes han sido matemáticamente correctos, los valores que se han obtenido no son físicamente coherentes, dado que para un mismo material las diferencias del orden de magnitud son muy grandes.

La evolución de  $n$  tampoco parece indicar una evolución marcada frente a la presión y temperatura. No obstante, los valores obtenidos sí son del mismo orden de magnitud (obviando los ensayos que se eliminaron por obtener datos incoherentes). Lo mismo ocurre con  $n''$ .

$\alpha$  y  $\beta$  tampoco presentan una tendencia clara frente a la presión y la temperatura.

En consecuencia, podemos decir que para el aluminio no hemos obtenido unos resultados claros que permitan obtener conclusiones sólidas acerca de la evolución de los parámetros de ajuste de la velocidad de deformación frente a la porosidad con la presión y la temperatura. Cabe destacar la dificultad del ajuste matemático de las curvas de los ensayos del aluminio, que aun resultando formalmente satisfactorios, han revelado una gran disparidad de valores de ajuste.

5.10.2.3.- **Para el estaño**, el comportamiento de los parámetros sigue una evolución muy parecida a los del plomo. Esto puede deberse a que ambos materiales se han ensayado bajo las mismas condiciones de presión y unas condiciones de temperatura muy parecidas, entendiendo que dichas condiciones no se refieren al valor estricto de la temperatura, sino a su valor relativo a la temperatura de fusión.

Para poder discutir este último hecho con mayor exactitud, mostramos en la tabla 6.1 los valores de los ensayos para los tres materiales referidos a sus temperaturas de fusión:

|                  |            |            |            |            |            |            |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>ALUMINIO</b>  | <b>150</b> | <b>200</b> | <b>250</b> | <b>300</b> |            |            |
| <b>Tf=660.4K</b> | 0,64 $T_f$ | 0,72 $T_f$ | 0,79 $T_f$ | 0,87 $T_f$ |            |            |
| <b>ESTAÑO</b>    | <b>25</b>  | <b>50</b>  | <b>75</b>  | <b>100</b> |            |            |
| <b>Tf=232K</b>   | 1,28 $T_f$ | 1,39 $T_f$ | 1,50 $T_f$ | 1,61 $T_f$ |            |            |
| <b>PLOMO</b>     | <b>25</b>  | <b>40</b>  | <b>55</b>  | <b>70</b>  | <b>85</b>  | <b>100</b> |
| <b>Tf=327K</b>   | 0,91 $T_f$ | 0,96 $T_f$ | 1,00 $T_f$ | 1,05 $T_f$ | 1,09 $T_f$ | 1,14 $T_f$ |

**Tabla 6.1** Valores de las temperaturas de los ensayos referidos a su punto de fusión

Como se aprecia, para el estaño y el plomo los valores de temperatura relativos a  $T_f$  son similares, mientras que para aluminio son sensiblemente menores. Esto sugiere que quizá deberían hacerse ensayos con el aluminio a mayores temperaturas para obtener resultados concluyentes. En principio, éste era uno de los objetivos de este proyecto. Sin embargo, las dificultades encontradas en la realización de los ensayos a bajas cargas, que ya han sido comentadas en este capítulo, hicieron repetir algunos ensayos y se decidió no aumentar el número de experiencias para no causar un retraso excesivo en la obtención de los resultados.