

# “MODELIZACIÓN DE LA CURVA DE FLUENCIA EN CONDICIONES DE DEFORMACION EN CALIENTE DEL ALUMINIO PURO (99.87%)”

Justo Morán Pérez<sup>1</sup>, Julian Peña Estrella <sup>2</sup>, José María Cabrera<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Egresado de la facultad de Ingeniería en Mecánica, área de Metalurgia Física

<sup>2</sup> Director de Tesis, Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Profesor principal, [jpena@espol.edu.ec](mailto:jpena@espol.edu.ec):

<sup>3</sup> Profesor Guía, Doctor en Metalurgia y ciencias de los materiales, Escuela Superior Politécnica de Catalunya (Barcelona – España), Profesor principal, [jose.maria.cabrera@upc.es](mailto:jose.maria.cabrera@upc.es)

## RESUMEN

A lo largo de la historia, la conformación en caliente ha sido utilizada para dar a los metales la forma deseada. Hoy en día, sin embargo, y gracias al avance en conocimiento de materiales, la deformación en caliente no sólo proporciona la geometría deseada sino las características mecánicas. Para ello es indispensable un adecuado diseño del proceso de termoconformado. Desde este punto de vista, la obtención de una ecuación constitutiva basada en modelos existentes para la fluencia en caliente del material y del aluminio en particular con una pureza del 99.87%, se convierte en una tarea primordial y que para nuestro caso en particular hemos hecho uso del Modelo de Strim, Mecking y Bergstrom.

Para este propósito, los ensayos de deformación en caliente (compresión uniaxial) fueron llevados a cabo en un intervalo de velocidades de deformación de  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  y  $10^{-3}$  s<sup>-1</sup> y a una temperatura de 250, 300, 350 y 400°C previo tratamiento térmico de recosido a 400°C durante 20 minutos con el fin de obtener una estructura homogénea (granos equiaxiales). Las curvas de fluencia o de estado estable fueron simuladas en un programa por ordenador que permitieron obtener importantes parámetros involucrados en la deformación en caliente tales como el término de endurecimiento por deformación  $U(\alpha.b)^2$  y el término de ablandamiento por restauración dinámica ( $\Omega$ ).

## SUMARY

Along the history, the conformation in hot has been used to give to the metals the wanted form. Today in day, however, and thanks to the advance is knowledge of materials, the deformation in hot only provides the geometry wanted but only the mechanical characteristics. For it is indispensable an appropriate design of the termoconformado process, from this point of view, the obtaining of a constituent equation based on existent models for the fluency in hot of the material and of the aluminum in particular with a purify from the 99.87%, he becomes a primordial task and that it stops our case in particular we have made use of the Pattern of Strim, Mecking and Bergstrom.

For this purpose, the rehearsals of deformation in hot (compression uniaxial) they were carried out in an interval of deformation of 0.1 and  $0.001 \text{ s}^{-1}$  and to a temperature of 250, 300, 350 and  $400^\circ\text{C}$  previous thermal treatment of having mended at  $400^\circ\text{C}$  during 20 minutes with the purpose of obtaining a homogeneous structure (grains equiaxiales). The fluency curves or of stable state were simulated in an on-line program that they allowed to obtain important parameters involved in the deformation in hot such as the hardening term for deformation  $U(\alpha.b)^2$  and the term of softening for dynamic restoration ( $\Omega$ ).

## INTRODUCCION

En los actuales momentos, el Aluminio ocupa un lugar importante en nuestro medio por su utilidad en los diferentes campos de las industrias (Farmacéutica, Automotriz, Naviera, Aeronáutica, etc) es por ello que necesitamos estudiar el comportamiento del Aluminio (99.87%) cuando es sometido al proceso de termoconformado.

Desde ese punto de vista es necesario un correcto conocimiento cualitativo y cuantitativo de las transformaciones que sufre el metal durante la conformación por deformación plástica en caliente en donde sólo actúa como veremos durante el desarrollo de este tema el fenómeno de ablandamiento por restauración dinámica para conseguir la microestructura deseada.

Es bien sabido que el comportamiento en caliente de los metales en general, dependen de las condiciones de conformado y de su composición química. Ambos aspectos serán analizados en este trabajo si bien el objetivo inicial es la caracterización del citado comportamiento a altas velocidades de deformación, a partir de ensayos de baja velocidad. En efecto, el comportamiento a fluencia en caliente de los materiales se suele caracterizar

a partir de las curvas esfuerzo Vs. deformación obtenidas a velocidad de deformación constante.

El presente trabajo trata de la “Modelización de la Curva de Fluencia del Aluminio Puro (99.87%)”, enfocado a obtener una ecuación que nos permita predecir el comportamiento del material ensayado durante el proceso de termoconformado, haciendo uso del modelo propuesto por String, Mecking y Bergstrom.

## 1.- MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el presente trabajo se escogió el material de Aluminio de una pureza de 99.87%. La composición química de la misma se indica en la tabla nº1, el Aluminio fue suministrado en barra de 14 mm de altura y 9.3mm de diámetro proporcionado por el departamento de metalurgia y ciencias de los materiales de la UPC (Universidad Politécnica de Catalunya - España). Previo a los ensayos de deformación en caliente el material fue sometido a un tratamiento térmico de recosido para homogeneizar la microestructura y al mismo tiempo fijar un tamaño de grano inicial promedio lo cual resultó ser de 345µm.

**Tabla I**  
**COMPOSICION QUIMICA DEL ALUMINIO (99.87%)**

<i>Elemento</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>Zn</i>	<i>Cu</i>	<i>Cr</i>	<i>Al</i>
<i>%</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>99.87</i>

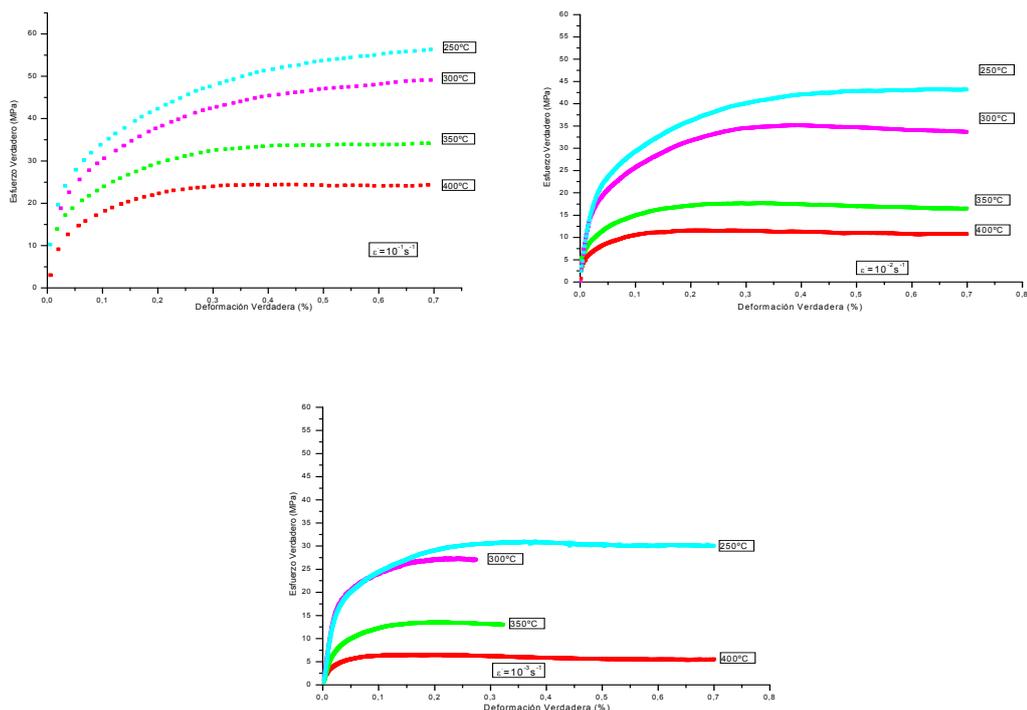
Para la obtención de las curvas de fluencia se realizaron ensayos de deformación en caliente (compresión uniaxial) de las probetas en una máquina electromecánica (INSTRON) con una velocidad de deformación máxima de 0.1 s<sup>-1</sup> hasta una deformación máxima de 0.7. En la tabla nº 2 se presentan los valores de dureza y dimensión en estado de recepción de las muestras a ensayar.

**Tabla II**  
**DUREZA DE LAS MUESTRAS EN ESTADO DE RECEPCION**

MATERIAL	DIMENSION DE LA MUESTRA		DUREZA (VICKER) EN LA SECCION		OBSERVACION
	DIAMETRO ( mm )	ALTURA (mm)	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL	
ALUMINIO	9,3	14	26,15	27,38	Tamaño de grano no definido

## 2.- RESULTADOS Y DISCUSION

Las curvas de fluencia o de estado estable obtenidas se muestran en la figura #1. Para todos los ensayos, dichas curvas, son típicas del mecanismo de ablandamiento por restauración dinámica citado en la introducción, en las curvas como era de esperarse los mayores valores de esfuerzo se obtienen a mayores velocidades de deformación y menores temperatura.



**Fig. #1** Curvas de fluencia o de estado estable obtenidas para el Aluminio (99.978%) a diferentes temperaturas y la velocidad de deformación constante.

### 2.1. Modelización de las Curvas de Fluencia

Para poder predecir el comportamiento a fluencia de los materiales sometidos a ensayos de termoconformado bajo el proceso de compresión uniaxial, al menos cuando únicamente operan el endurecimiento por deformación y el ablandamiento por recuperación dinámica, se han establecido una serie de modelos pero el que mayor describe el comportamiento a fluencia cuando únicamente opera el mecanismo de endurecimiento por deformación y el ablandamiento por recuperación dinámica será el modelo de Strim, Mecking y Bergstrom y que será el que utilizemos en este estudio. Además existe una serie de parámetros a calcular previo a la modelización tales como el término de endurecimiento por

deformación  $(U(\alpha \cdot b)^2)$  y el término de ablandamiento por recuperación dinámica ( $\Omega$ ) dichos valores se determinaron mediante ajuste estadístico de los resultados experimentales a las citadas ecuaciones teóricas obteniéndose dichos valores por regresión por mínimos cuadrados.

## 2.2. Término de ablandamiento por recuperación dinámica ( $\Omega$ )

Como la recuperación dinámica es un proceso térmicamente activado, es lógico pensar que el término ( $\Omega$ ) responsable del ablandamiento depende de la velocidad de deformación, habiendo propuesto algunos autores la siguiente expresión:

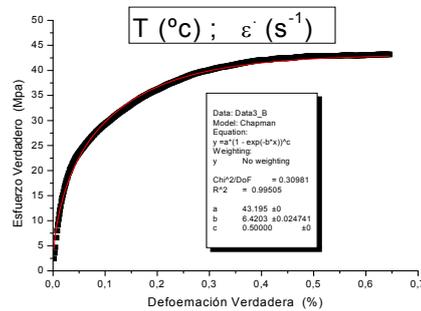
$$\Omega = K_{\Omega} \cdot Z^{m_{\Omega}} \quad (1)$$

Para el cálculo del término de ablandamiento por recuperación dinámica ( $\Omega$ ) experimental es necesario hallar el valor de esfuerzo máximo de cada una de las curvas experimentales obtenidas a diferentes temperaturas y velocidades de deformación constante. Una vez obtenidos los valores de esfuerzos máximos se procederá a graficar los valores de deformación y esfuerzo correspondiente hasta el esfuerzo máximo, para luego proceder a realizar un ajuste a las curvas experimentales, ver figura # 2, mediante el programa ORIGIN 7.0, seleccionando una hoja de trabajo (worksheet) donde se encontraran los valores de esfuerzo con sus respectivos valores de deformación y marcando la columna de esfuerzo que representan los valores de la variable "y", pulsando la opción "Análisis" seguido de "Non Linear Curve Fit" se introduce la ecuación # 2, en caso que no este dentro de la función exponencial, pero en nuestro caso en particular se encuentra con el nombre de CHAPMAN, haciendo clic sobre la misma el programa reconoce automáticamente la ecuación.

$$\sigma = \sigma_{\max} [1 - e^{-\Omega \varepsilon}]^{0.5} \quad (2)$$

$$y = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot x))^c \quad \text{equivalencia de la ec. (2)}$$

Donde  $\sigma$  es "y",  $\Omega$  es "x", a es " $\sigma_{\max}$ ", b es " $\varepsilon$ " y c es "0.5". Para cada ensayo a distintas temperatura y velocidad de deformación existe un valor de  $\sigma_{\max}$ . En el programa **ORIGIN 7.0** se deben hacer 100 iteraciones para obtener valores más exactos, se asignan un valor aproximado a "b" para iniciar las iteraciones, permaneciendo a y c constante, hasta que se muestre la siguiente expresión "chi<sup>2</sup> no se puede reducir más". Una vez que aparece dicha frase se procede a pulsar "Done" y obtendremos los distintos valores del término responsable del ablandamiento experimental ( $\Omega$ ), ver tabla nº IV. Como se muestra en la Figura # 2 a distinta temperatura y velocidad de deformación constante.



**FIGURA # 2.** DETERMINACION DEL TERMINO RESPONSABLE DEL ABLANDAMIENTO POR RESTAURACION DINAMICA ( $\Omega$ ) EXPERIMENTAL MEDIANTE AJUSTE ESTADISTICO A LAS CURVAS EXPERIMENTALES ESFUERZO Vs. DEFORMACION A DIFERENTES TEMPERATURAS Y VELOCIDADES DE DEFORMACION.

Estos valores del término responsable del ablandamiento por restauración dinámica ( $\Omega$ ) obtenidos son solamente valores experimentales más adelante se calcularán los valores de omega teóricos.

### 2.3. Cálculo del parámetro de Zener-Hollomon

Para hallar los valores del parámetro de Zener–Hollomon ( $Z$ ) de los ensayos de termoconformado a velocidad de deformación constante solo se tienen que sustituir los valores de las variables que están dentro de la siguiente ecuación.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

$\dot{\epsilon}$ : Velocidad de deformación durante el ensayo ( $s^{-1}$ ).

$Q$ : Energía de activación igual a 142000 J/mol para el caso del aluminio

$R$ : Constante de los gases e igual a 8.314 J/K·mol.

$T$ : Temperatura a la cual se realiza el ensayo ( $^{\circ}K$ ).

Como todas las variables son conocidas en la tabla IV pueden observarse los valores del parámetro de Zener – Hollomon ( $Z$ ) para los distintos ensayos.

### 2.4. Cálculo del término de endurecimiento por deformación ( $U(\alpha \cdot b)^2$ ) experimental

De acuerdo al modelo teórico de strin, Mecking y Bergstrom, el parámetro responsable del endurecimiento por deformación ( $U$ ) se supone independiente de la deformación, lo cual es asumible si el camino libre medio de las dislocaciones se puede considerar constante, lo que es posible cuando éste se encuentra limitado geoméricamente por factores microestructurales (límites de granos, dislocaciones y precipitados), habiendo propuesto algunos autores la siguiente expresión:

$$(U(\alpha \cdot b)^2) = K_U \cdot Z^m \cdot m_U \quad (4)$$

donde se observa una dependencia del término  $U$  con las condiciones de deformación.

Para calcular los valores de  $(U(\alpha \cdot b)^2)$  experimentales aplicamos la siguiente ecuación:

$$U(\alpha \cdot b)^2 = \frac{\Omega \cdot \sigma_p^2}{\left( \mu_0 \cdot \left( 1 - \left[ \left( \frac{T - 300}{T_M} \right) \cdot \left( \frac{T_M \cdot d\mu}{\mu_0 \cdot dT} \right) \right] \right) \right)^2} \quad (5)$$

Donde:

$(\Omega)$  : Valor de omega experimental calculado anteriormente varía de acuerdo a cada ensayo. Ver tabla IV

$\sigma_p$  : Valor de la tensión máxima experimental varía de acuerdo a cada ensayo. Ver tabla IV.

$\mu_0$  : Módulo de cizalladura a 300°k igual a  $2.54 \cdot 10^4$  (MN/m<sup>2</sup>) para el aluminio.

$T$  : Temperatura a la cual se realiza el ensayo en °K.

$T_M$  : Temperatura de fusión del material igual a 933°K.

$\left( \frac{T_M \cdot d\mu}{\mu_0 \cdot dT} \right)$  : Dependencia en la temperatura del modulo igual a  $-0.5$

Una vez conocidas todas la variables de la ecuación # 5 se procedió al cálculo del parámetro  $(U(\alpha \cdot b)^2)$  los cuales se pueden observar en la tabla IV.

#### Tabla IV

**VALORES EXPERIMENTALES DEL TERMINO RESPONSABLE DEL ABLANDAMIENTO DEBIDO A LA RECUPERACION DINAMICA ( $\Omega$ ), TERMINO DE ENDURECIMIENTO POR DEFORMACION ( $U(\alpha \cdot b)^2$ ) Y EL ESFUERZO MAXIMO ( $\sigma_{max}$ ) DE CADA ENSAYO A DIFERENTES TEMPERATURA Y VELOCIDADES DE DEFORMACION.**

Temperatura (°K)	$\dot{\epsilon}$ (s-1)	Z(s-1)	$\Omega$	$\sigma_p$ (MPa)	$(U(\alpha \cdot b)^2)$
523,15	0,1	1,51E+13	4,53405	56,3407	2,88E-05
523,15	0,01	1,51E+12	6,42028	43,1947	2,40E-05
523,15	1,00E-03	1,51E+11	10,06286	31,0545	1,94E-05
573,15	0,1	8,74E+11	4,79543	49,1198	2,46E-05
573,15	0,01	8,74E+10	8,36975	35,1513	2,20E-05
573,15	1,00E-03	8,74E+09	15,34239	27,3797	2,45E-05
623,15	0,1	8,00E+10	7,1496	34,1666	1,89E-05
623,15	0,01	8,00E+09	13,56308	17,6703	9,60E-06
623,15	1,00E-03	8,00E+08	15,97929	13,5097	6,61E-06
673,15	0,1	1,04E+10	8,39974	24,4376	1,21E-05
673,15	0,01	1,04E+09	18,04776	11,5529	5,83E-06
673,15	1,00E-03	1,04E+08	26,01143	6,45956	2,63E-06

### 2.5. Cálculo de los términos responsables del endurecimiento por deformación ( $U(\alpha \cdot b)^2$ ) y el término del ablandamiento por recuperación dinámica ( $\Omega$ ) Teóricos

Una vez encontrado los valores de los términos responsables del ablandamiento por recuperación o restauración dinámica ( $\Omega$ ) y el término responsable del endurecimiento por deformación ( $U(\alpha \cdot b)^2$ ) experimentales se procede a graficar cada uno de dichos valores vs. el parámetro de Zener-Hollomon ( $Z$ ) en escala logarítmica para hallar los coeficientes  $m_\Omega$  y  $m_u$  y los valores de  $K_\Omega$  y  $K_u$ . Ver Figura # 3 y 4.

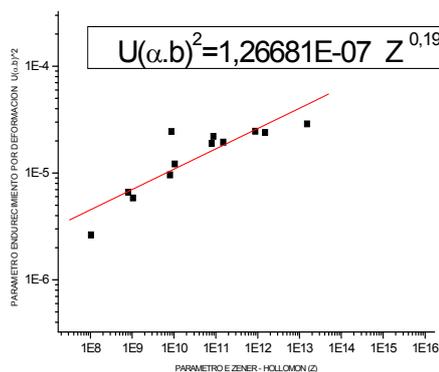


Fig. #3 Gráfico de  $\Omega$  Vs.  $Z$

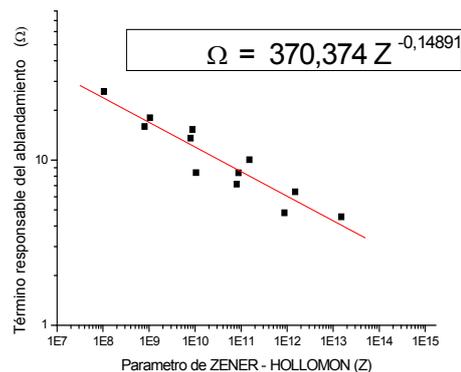


Fig. #4 Gráfico de  $(U(\alpha \cdot b)^2)$  Vs.  $Z$

Encontrados los valores de  $m_\Omega$  y  $m_U$  y los valores de  $K_\Omega$  y  $K_U$  y aplicando la relación  $(U(\alpha \cdot b)^2) = K_\Omega \cdot Z^{m_\Omega}$  y  $(U(\alpha \cdot b)^2) = K_U \cdot Z^{m_U}$  podemos calcular los valores teóricos para ambos parámetros. Ver tabla V

## 2.6. Cálculo del esfuerzo máximo teórico ( $\sigma_p$ )

Algunos investigadores han propuesto que la desviación de la energía de activación de autodifusión ( $Q$ ) y la desviación del exponente de *creep* ( $n$ ), de los valores teóricamente deducidos u observados, pueden explicarse teniendo en cuenta la variación del módulo de Young con la temperatura. Según esta formulación, la tensión debería normalizarse por el módulo de Young y es descrito según la ecuación #6.

$$\frac{\dot{\epsilon}}{D(T)} = A'' \left( \sinh \alpha \frac{\sigma_p}{E(T)} \right)^n \quad (6)$$

Donde  $E(T)$  es el módulo de Young y  $D(T)$  puede considerarse como el coeficiente de autodifusión del Aluminio que a su vez se puede expresar como:

$$D(T) = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (7)$$

Donde  $Q$  es la energía de activación de autodifusión (142 kJ/mol). Para este trabajo los valores de  $D(T)$  y  $E(T)$  se calcularon según la ecuación # 7 y la #8.

$$E(T) = 2.66 \cdot \mu_0 \left[ 1 + \left( \frac{T - 300}{T_M} \right) \cdot \left( \frac{T_M \cdot d\mu}{\mu_0 \cdot dT} \right) \right] \quad (8)$$

Para el cálculo de los parámetros  $A''$  y  $\alpha$  una vez obtenidos los valores  $D(T)$  y  $E(T)$  se realizara un ajuste con ayuda del programa ORIGIN 7.0, seleccionando una hoja de trabajo (worksheet) donde se encontraran los valores de  $(\dot{\epsilon}/D(T))^{1/5}$ , que representara la variable "y",  $\sigma_p / E(T)$  que representara la variable "x", el exponente  $n$  se a estimado en estudios anteriores que su valor es 5. Marcando la columna de  $(\dot{\epsilon}/D(T))^{1/5}$  pulsando la opción "Análisis" seguido de "Non Linear Curve Fit", se introduce la ecuación #6 o su equivalente dada de la forma siguiente:

$$Y = A'' \sinh(\alpha x) \quad (9)$$

Donde:

y es " $\dot{\epsilon}/D(T)^{1/5}$ "  
x es " $\sigma_p/E(T)$ ".

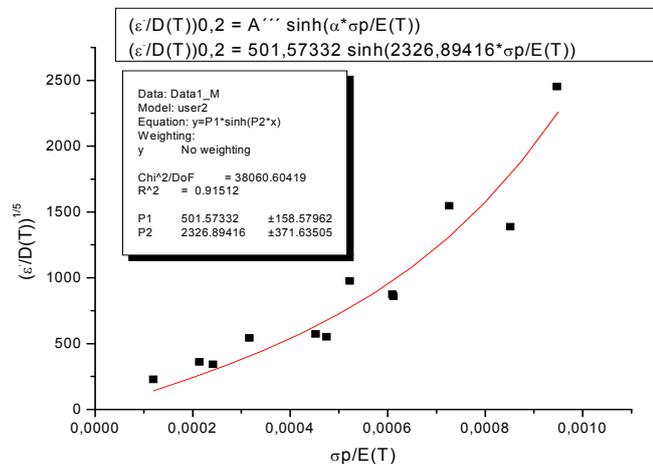
Para cada ensayo a distintas temperatura y velocidades de deformación existe un valor de esfuerzo máximo ( $\sigma_p$ ). Se deben hacer 100 iteraciones para obtener valores más exactos, se asignan valores aproximado a  $A'''$  y  $\alpha$  para iniciar las iteraciones, hasta que se muestre la siguiente expresión "chi^2 no se puede reducir más". Una vez aparecida dicha frase se procede a pulsar "Done" y obtendremos los valores de  $A'''$  y  $\alpha$ . Ver Figura #5.

Sustituyendo en la ecuación #6 nos queda:

$$\dot{\epsilon}/D(T)^{1/5} = 501.492 * \sinh(2326.82 * \sigma_p/E(T)) \quad (10)$$

Después de encontrar estas ecuaciones podemos determinar los  $\sigma_p$  teóricos mediante la siguiente expresión para las diferentes temperaturas y velocidades de deformación.

$$\sigma_p = (E(T) * \operatorname{arcsinh}(\dot{\epsilon}/D(T)^{1/5} / 501.49) / 2326.82 \quad (11)$$



**Fig. # 5** Ajuste realizado para calcular los valores de  $A'''$  y  $\alpha$ .

Además aplicando la ecuación #12 podemos simular las curvas de fluencia teóricas y demostrar que el modelo propuesto puede ser utilizado para predecir el comportamiento de los materiales sometidos a velocidades de deformación constante.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{ss}^{*2} + (\sigma_0^2 - \sigma_{ss}^{*2})e^{-\Omega\epsilon}} \quad (12)$$

Con estos valores obtenidos se predecirá el comportamiento teórico de las curvas de fluencia y comprobaremos si estas simulan el comportamiento experimental obtenido para cada uno de los ensayos.

Con las relaciones anteriores se obtuvo la siguiente tabla donde se muestran los valores teóricos de las variables más importantes:

**Tabla V**

**VALORES TEORICOS DEL TERMINO RESPONSABLE DEL ABLANDAMIENTO ( $\Omega$ ), EL TERMINO RESPONSABLE DEL ENDURECIMIENTO POR DEFORMACION ( $U(\alpha \cdot b)^2$ ) Y EL ESFUERZO MAXIMO ( $\sigma_p$ )**

Temperaturas (°K)	Z (s <sup>-1</sup> )	$\Omega$	$(U(\alpha \cdot b)^2)$	$\sigma_p$
523,15	6.8E11	4,03832	0,0000408	58,55772
523,15	1.6E11	5,68997	0,0000263	47,16801
523,15	4.3E10	8,01716	0,000017	36,28923
573,15	1.3E10	6,17147	0,0000237	43,17466
573,15	6.8E10	8,69558	0,0000153	32,80858
573,15	1.6E10	12,25205	0,00000988	23,5777
623,15	4.3E09	8,81088	0,0000151	31,41133
623,15	1.3E09	12,4145	0,00000972	22,5247
623,15	6.8E09	17,49199	0,00000627	15,32804
673,15	1.6E09	11,93105	0,0000102	22,71619
673,15	4.3E08	16,81081	0,0000066	15,54299
673,15	1.3E08	23,68638	0,00000426	10,22214

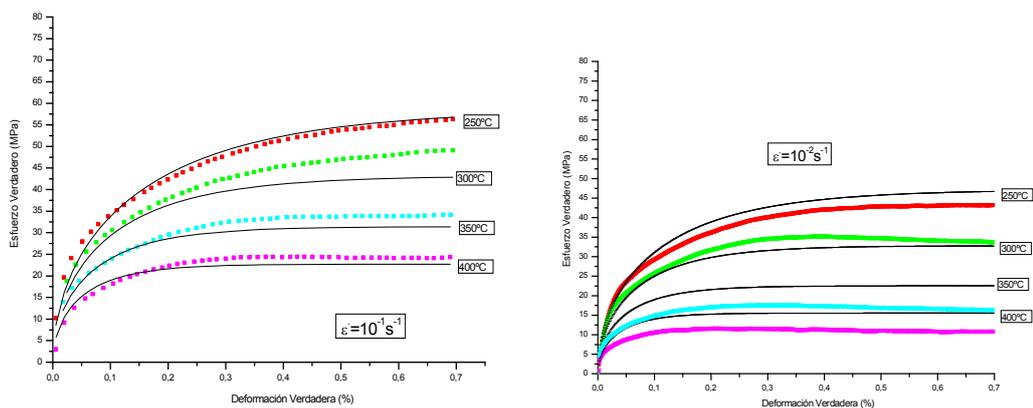
Determinada las variables teóricas usadas en el modelo empleado para la modelización de las curvas experimentales cuando el material es sometido a velocidades de deformación constante se procedió a verificar que dichos ensayos pueden ser simulados por el modelo propuesto de *Estrin, Mecking, y Bergström* ecuación #11, obteniéndose los siguientes resultados (ver Fig. # 6, 7).

Para estas curvas teóricas el valor de  $\sigma_0$  es cero debido a que este depende de la densidad de dislocaciones iniciales y por considerarse un material casi

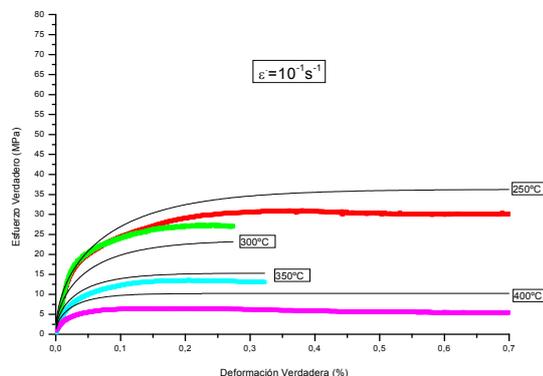
puro no se considera su efecto sobre los valores de esfuerzo ( $\sigma_p$ ) teóricos calculados.

Si bien es cierto que existen una diversidad de procesos de conformado en caliente, también es cierto que estos no ocurren a velocidades de deformación constante y que este caso no ha sido más que un formalismo aplicado para estudiar a escalas en laboratorio los distintos procesos y comportamiento del aluminio (99.87%) cuando es deformado a temperatura controlada.

Cabe la pena preguntarse si el modelo establecido para la simulación de la curva de fluencia del aluminio con una pureza del 99.87% pueda aplicarse a situaciones más reales, al campo industrial o simplemente a simular en laboratorios procesos donde no se controlen las variables y se pueda aportar nuevo avances a los estudios que se han desarrollado en el campo de las propiedades de los materiales en nuestros días.



**Fig. #6** Comparación entre curva experimental y teórica para  $\dot{\epsilon} = 10^{-1}$ ;  $\dot{\epsilon} = 10^{-2}$



**Fig. #7** Comparación entre curva experimental y teórica para  $\dot{\epsilon} = 10^{-3}$

### 3. CONCLUSIONES

Se concluye lo siguiente:

1. En todas las curvas tanto teóricas como experimentales se alcanza un estado estable de saturación que es propio del aluminio con una pureza del 99.87% deformado en caliente y a velocidad de deformación constante.
2. El modelo utilizado cumple satisfactoriamente con la situación de estado estable.
3. Además todos los ensayos presentan un comportamiento único de restauración dinámica.
4. La sensibilidad de la velocidad de endurecimiento por deformación disminuye a medida que aumenta la temperatura.
5. A bajas temperaturas y altas velocidades de deformación se alcanza un mayor valor de esfuerzo máximo.
6. Existe cierta dispersión en algunos ensayos que es generadas por la sensibilidad del equipo y a las bajas velocidades de deformación.
7. El material utilizado es de gran aplicabilidad para el estudio

### REFERENCIAS

- 1.- Justo P. Morán, Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Julio, (2005)
- 2.- J. M. Cabrera, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Octubre, (1995)
- 3.- J. M. Cabrera, J. J. Jonas y J. M. Prado, Mat. Science and Technology, vol. 12, pp 579-585, July(1996)
- 4.- J. M. Cabrera y J. M. Prado "Modelización por Ordenador de Procesos de Conformado"  
Departamento de Ciencias de Materiales e Ingeniería Metalúrgica, ETSEIB – Universidad Politécnica de Cataluña, Av. Diagonal 647, 08028 - Barcelona
- 5.- J Gil Sevillano "Flow Stress and Work Hardening" en "Materials Science and Technology" Vol. 6
- 6.- W. Roberts "Dynamic Changes that occur during hot working and their significance regarding microstructural development and hot workability" en "Deformation, processing and structure" Cap. 4, PP 109-184, Ed G Krauss, ASM(1982)
- 7.- JJ Jonas, CM Sellans, W.J. McG Tegart "Streight and structure under hot-working conditions" and "Metallurgical Reviews", Vol. 14, pp 1-12, (1969)

- 8.- Y. Bergstrom "A dislocation model for the stress - strain behaviour of polycrystalline  $\alpha$ -Fe with special emphasis on the variation of the densities of mobile and immobile dislocations", Materials Science and Engineering, Vol. 5. PP 193-200, (1969-1970)
- 9.- F King " El Aluminio y sus Propiedades" 1992, Editorial Limusa, S.A. de C. V. Grupo Noriega Editores, PP 205-207
- 10.- M Lajtin "Metalografía y Tratamiento Térmico de los Metales" Capítulo XXIII , Aluminio y sus Aleaciones, PP 397-410
- 11.- F. Kocks, Engineering Materials and Technology, Trans. ASME, 98, pp 76-85, (1976)
- 12.- J. Frost y M. F. Ashby en " Deformación – mechanism maps, cap. 1 – 5, Ed. Pergamon Press, Oxford, (1982)
- 13.- W. Blum. "High Temperature deformation and CREEP OF Crystalline Solids" en Materials Science And Technology, vol 6, cap. 8, pp 363-405(1991).