

Rev.Téc.Ing., Univ.Zulia  
Vol.4, N°s.1 y 2, 1981

ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACION DE  
ALGUNAS ALEACIONES NO FERROSAS

*(Recibido el 4 de Mayo de 1981)*

A.M. Elsheikh  
Departamento de Metalurgia  
Facultad de Ingeniería  
Universidad del Cairo - Egipto

RESUMEN

Mediante este trabajo se investiga el comportamiento de algunas aleaciones no ferrosas como:  $Al-4.5\% Cu$  y  $Pb-18.5\% Sn$ , sometidas a tratamientos térmicos específicos, que hagan posible obtener su endurecimiento al producirse el fenómeno de precipitación. Después las aleaciones son sometidas a ensayos de dureza, tracción e impacto, con el objeto de obtener gráficas que muestran la variación de las propiedades mecánicas mencionadas.

Las curvas de dureza y tracción adquieren una forma típica, cuya característica principal es un máximo que indica cuándo la aleación alcanza sus mejores propiedades mecánicas. Las curvas de impacto, sin embargo, varían aproximadamente en forma contraria a las curvas de dureza.

ABSTRACT

In the present work the behaviour of some non-ferrous alloys such as *Al-4.5 % Cu* and *Pb-18.5 % Sn*, was studied. After specific heat treatments, which induced precipitation hardening. Graphs of hardness, tension and impact for different temperatures versus time are presented.

The graphs of hardness and tension tests show a typical shape with a maximum indicating the optimum values. The impact curves however show a behaviour approximately opposite to that of hardness curves.

## INTRODUCCION

El endurecimiento por precipitación es uno de los métodos más importantes utilizados para mejorar algunas propiedades mecánicas de los metales no ferrosos y de sus aleaciones.

Existen algunas investigaciones sobre aleaciones no ferrosas tratadas térmicamente por precipitación [1 - 5]; sin embargo, cada composición de una aleación determinada, tratada con diferentes temperaturas, arrojaron resultados que pueden o no tener similitud, pero siempre habrá algunas diferencias o algunas variaciones. Para esta investigación se tomó la dureza como base, la cual sirve como patrón de referencia para compararla con otras propiedades mecánicas como lo son la resistencia a la tracción y la resistencia al impacto. Es de hacer notar que no se conocen hasta la fecha, investigaciones que incluyan esta última propiedad en sus publicaciones. Es propósito de este trabajo comparar los resultados arrojados por los ensayos que determinan las tres propiedades antes mencionadas.

Actualmente no ha sido determinada, de manera exacta, la naturaleza cristalográfica de las partículas de precipitado en las aleaciones endurecidas por envejecimiento, debido al tamaño excesivamente pequeño de las partículas desde que se inicia el proceso de precipitación, hasta el punto donde la aleación alcanza su máxima dureza, a partir del cual las partículas comienzan a ser visibles bajo el microscopio. Sólomente se ha podido deducir la naturaleza de las partículas de precipitado mediante evidencias indirectas obtenidas por estudios de la difracción de rayos-X y la teoría de Coherencia Reticular es, hoy en día, la representación más útil del proceso de endurecimiento por precipitación.

## MATERIALES Y PARTE EXPERIMENTAL

### a) Preparación de las aleaciones:

Todas las aleaciones fueron preparadas de sus elementos puros.

Se usaron un horno de fundición a gas, crisoles de arcilla - grafito para la fundición y moldes de grafito para hacer la colada.

b) Tratamientos térmicos:

Previamente a los ensayos de dureza, tracción e impacto, las probetas para tal fin son sometidas primero al tratamiento térmico de disolución, que consiste en calentarlas durante una hora, a una temperatura por encima del punto crítico como se muestra en la tabla I. Seguidamente se hace temple en agua. Inmediatamente se hace el tratamiento térmico de precipitación, calentando las probetas a temperaturas por debajo del punto crítico, durante diferentes intervalos de tiempo, después de los cuales templamos en agua.

TABLA I

<i>Aleación</i>	<i>Temperatura de disolución, °C</i>	<i>Temperatura de envejecimiento, °C</i>
<i>Al-4.5 % Cu</i>	550	<i>Ambiente</i>
	550	200
	550	300
	500	400
<i>Pb-18.5 % Sn</i>	180	<i>Ambiente</i>
	180	80
	180	100
	180	120

c) Ensayo de dureza:

El método utilizado es el Rockwell. Las medidas de dureza se realizaron en la escala *F*.

Para obtener curvas de dureza contra el tiempo de envejecimiento se da primero el tratamiento térmico de disolución a cierto número de probetas haciendo temple en agua; inmediatamente se da el

tratamiento de envejecimiento. Entonces se retiran del horno a intervalos de tiempo distintos haciendo enfriamiento rápido y se prueba su dureza; los intervalos se aumentan cada vez más, o sea, se comienza con tiempos relativamente cortos hasta intervalos mayores. Por ejemplo, se retiran probetas después de un minuto, 3, 5, 30, 60 minutos, 24 horas, 48, 72 horas, hasta períodos de cinco días.

d) Ensayo de impacto:

Este ensayo consiste en romper de un golpe una probeta de Charpy con una entalladura de  $45^\circ$ .

Con respecto a las probetas se procede de la misma manera que en los ensayos de dureza; solo se reduce el tiempo de envejecimiento llegando hasta las cinco horas, ya que, en la mayoría de los casos alrededor de este tiempo no se observa variación de las lecturas. Las curvas que se obtienen son de resistencia al impacto, en Kg-m, contra tiempo de envejecimiento.

e) Ensayo de tracción:

Se utilizan probetas normalizadas de dimensiones determinadas ( $L = 5.75 \text{ cm.}$  y  $\varnothing = 1.3 \text{ cm.}$ ). Se procede de la forma idéntica a los ensayos anteriores y se obtienen curvas de resistencia a la tracción, en  $\text{Kg/cm}^2$ , contra tiempo de envejecimiento.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Se discuten en este capítulo los resultados de los ensayos de dureza, tracción, impacto y metalográfico. La forma de las curvas, obtenidas por envejecimiento de las aleaciones, está en función de dos variables: la composición de la aleación y la temperatura de envejecimiento, fijando la composición a una cantidad de soluto cercana al límite de solubilidad, que es donde se obtiene la mayor dureza por precipitación.

a) Curvas de Dureza:

Generalmente estas curvas adquieren una forma típica cuya ca-

racterística principal es un máximo que alcanza cada aleación a diferentes temperaturas de envejecimiento. Las figuras (1) y (2), muestran este tipo de curvas; en éstas, la variación de dureza se produce desde un tiempo de envejecimiento de un minuto hasta períodos de cinco días. Es de hacer notar que en realidad se estimaron valores de dureza en tiempos inferiores al minuto (por ejemplo, a los 15 seg. y 30 seg.) obteniendo los mismos valores que se obtuvieron al minuto. Esto se debe a que la precipitación no comienza de inmediato, al ser templada la probeta, sino que se requiere un tiempo determinado " $t_0$ " antes de ser apreciable una variación de dureza; este intervalo de tiempo es llamado "período de incubación" y representa el tiempo necesario para la formación de las primeras partículas de precipitado. El período de incubación puede variar según las aleaciones. Es importante señalar que, según estas consideraciones, inicialmente, las propiedades mecánicas de las aleaciones son casi las mismas que antes de ser tratadas térmicamente. Se observa en las gráficas de dureza que las curvas correspondientes a las diferentes temperaturas de cada aleación parten casi del mismo punto.

Posteriormente, la dureza comienza a aumentar debido al agrupamiento de átomos de soluto (nucleación), formándose las estructuras de transición, las cuales son coherentes con la red matriz. Esta nucleación ocurre tanto homogénea como heterogéneamente; los lugares preferidos para la nucleación heterogénea son los límites de grano y los planos de deslizamiento [5]. Heterogéneo significa que la nucleación se produce más fácilmente, por lo tanto la precipitación tiende a ocurrir con mayor rapidez en estos lugares; existe entonces una estructura de subgrano en la aleación, aunque no son visibles las partículas de precipitado a través del microscopio, por su tamaño excesivamente pequeño.

Las estructuras de transición producen deformaciones en la matriz que se traducen en un aumento de dureza de la aleación por la dificultad que encuentran las dislocaciones para moverse.

Continuando la precipitación, el máximo de dureza se obtiene debido a que las estructuras de transición, en ese período de tiempo, son más numerosas y tienen un tamaño efectivo mayor que impiden

aún más el movimiento de las dislocaciones. A partir del máximo, la dureza comienza a declinar ya que la aleación se ablanda como consecuencia de la aproximación al estado de equilibrio; este efecto se llama sobre-envejecimiento y se produce por la pérdida de coherencia entre la matriz y el precipitado, dando origen a la fase de equilibrio.

En cualquier aleación, sometida a endurecimiento por precipitación, la estructura siempre varía de acuerdo a la secuencia general: solución sólida sobresaturada - estructura de transición - fase de equilibrio.

Puede darse el caso donde se obtienen dos máximos de dureza antes de alcanzar la fase de equilibrio, como ocurrió en las aleaciones de Al-4.5% Cu. Aquí, se forman las llamadas zonas de GP-1 y GP-2 que son dos tipos de estructuras de transición y son las responsables del primer y segundo máximo de dureza respectivamente. Las zonas GP-1 tienen formas de plaquitas o varillas y son coherentes con la matriz, produciendo deformaciones en ella [6].

Las zonas GP-2 tienen forma de disco, son más numerosas y producen mayor deformación en la matriz, por lo tanto son más efectivas en aumento de la dureza [5].

Las curvas correspondientes a la temperatura ambiente no muestran una variación tan pronunciada, ya que en realidad, estas probetas no fueron envejecidas artificialmente, por lo cual envejecen a temperatura ambiental, o sea, envejecen en forma natural y así la precipitación tiene lugar a través de mucho más tiempo.

Generalmente se observa que a la mayor temperatura usada para cada aleación, la precipitación ocurre más pronto, o sea, se alcanza un máximo de dureza con menos tiempo de envejecimiento que a las menores temperaturas usadas. Sin embargo los máximos obtenidos a temperaturas menores, alcanzan un valor de dureza mayor que los que se formaron primero. Estos resultados están de acuerdo con los resultados de Nicholson y Natting [3]. Estos fenómenos ocurren debido a que la temperatura es un factor determinante en la velocidad de precipitación. A temperaturas relativamente bajas se requieren tiempos más largos para completar la precipitación debido a que el movimiento

atómico que se produce es más lento que a temperaturas relativamente altas. Cabe mencionar que dentro del rango de temperaturas de envejecimiento de una aleación específica, las que son extremadamente bajas (temperatura ambiente o cercana a ella) y extremadamente altas (temperaturas justamente por debajo de la línea de Solvus) producen precipitación lenta y poco apreciable. El endurecimiento apreciable y óptimo se logra a temperaturas intermedias entre los dos extremos.

Los valores mayores de dureza correspondieron a las aleaciones de  $Al-4.5\% Cu$ ; la máxima dureza obtenida fue a temperatura de  $200^{\circ}C$ , figura (1). Como puede verse, en este caso se obtuvieron dos máximos de dureza y las zonas de  $GP-1$  y  $GP-2$  son las responsables del primer y segundo máximo respectivamente, como se explicó con anterioridad.

Las curvas de dureza sirven como patrón para compararlas con las curvas de tracción e impacto en las discusiones posteriores.

#### b) Curvas de Tracción:

Estas curvas también adquieren una forma típica cuya característica principal es un máximo, al igual que las curvas de dureza. Las figuras (3) y (4) son gráficas de resistencia a la tracción contra el tiempo de envejecimiento.

Puede establecerse una comparación de estas curvas con las curvas de dureza en lo que respecta a la forma adquirida a través de un envejecimiento a temperaturas similares.

La comparación se establece por la consideración lógica de que a medida que un material endurece debe presentar mayor resistencia a la tracción. Efectivamente, esto ocurre en las aleaciones estudiadas, con cierto margen de diferencia en los tiempos a los cuales se presentan las zonas de máximo, en ambos tipos de curvas; esto, probablemente, es debido a que la rata de deformación de las probetas varía según el ensayo.

Por otra parte, en algunos casos las temperaturas usadas en ambos tipos de ensayos son distintas (pero cercanas).

Las aleaciones más resistentes fueron la de  $Al-4.5\% Cu$  registrando una tensión máxima de casi  $2500\text{ Kg/cm}^2$ . Debe recordarse que los máximos valores de dureza se obtuvieron en esta misma aleación,

con lo cual se corrobora en parte la consideración de que a mayor dureza, mayor resistencia a la tracción.

Las aleaciones de  $Pb-18.5\%Sn$  resultaron ser las más dúctiles con una resistencia a la tracción en el orden de los 400 y 500 Kg/cm<sup>2</sup>.

### c) Curvas de Impacto:

Las gráficas (5) y (6) presentan curvas de resistencia al impacto contra el tiempo de envejecimiento. La resistencia al impacto representa la energía necesaria para romper la probeta tipo Charpy de un solo golpe.

Considerando ahora que cuando un material endurece se reduce la ductilidad del mismo, ésto nos hace pensar que la forma de estas curvas debe variar en forma contraria a las curvas de dureza. Realmente se observa una aproximación en este sentido, o sea, a un máximo en una curva de dureza debe corresponder un mínimo en las curvas de impacto para los mismos tiempos de envejecimiento; ésto no ocurre de manera exacta y la razón probable de ello es la diferencia en la rata de deformación de cada ensayo al igual que las temperaturas de envejecimiento usadas.

Las curvas de impacto no adquieren un comportamiento típico como en los casos anteriores.

Las aleaciones más dúctiles son las de  $Pb-18.5\%Sn$  para las cuales se requiere una energía hasta de 4 Kg-m para producir la rotura. Las más frágiles fueron las aleaciones de  $Al-4.5\%Cu$  y en la mayoría de los casos se necesitó una energía muy baja para la fractura de la probeta. Por ejemplo observe en la figura (5) que la menor energía fue de 0.4 Kg-m y la mayor de 1.4 Kg-m.

### CONCLUSIONES

1. Las curvas de dureza obtenidas, siempre experimentan inicialmente cambios de dureza en forma creciente hasta llegar a un máximo. Hasta aquí se denomina a las curvas, zonas de envejecimiento.

2. Las curvas de dureza a temperatura ambiente, no mostraron la variación típica descrita anteriormente.

3. Se observa que a la mayor temperatura usada para cada aleación, la precipitación ocurre más pronto, es decir, se alcanza un máximo de dureza con menos tiempo de envejecimiento que a las menores temperaturas usadas. Sin embargo, los máximos alcanzados a temperaturas menores, son superiores a los que se formaron primero.

4. Las curvas de tracción varían en forma parecida a las curvas de dureza, de tal forma que a un máximo de dureza le corresponde (aproximadamente) un máximo de resistencia a la tracción en el mismo período de tiempo de envejecimiento.

5. La forma de las curvas de resistencia al impacto varían en forma contraria a las curvas de dureza. Realmente se observa una aproximación en este sentido, lo que quiere decir que a un máximo en una curva de dureza corresponde un mínimo en las curvas de impacto, para los mismos tiempos de envejecimiento. Esto no ocurre con exactitud.

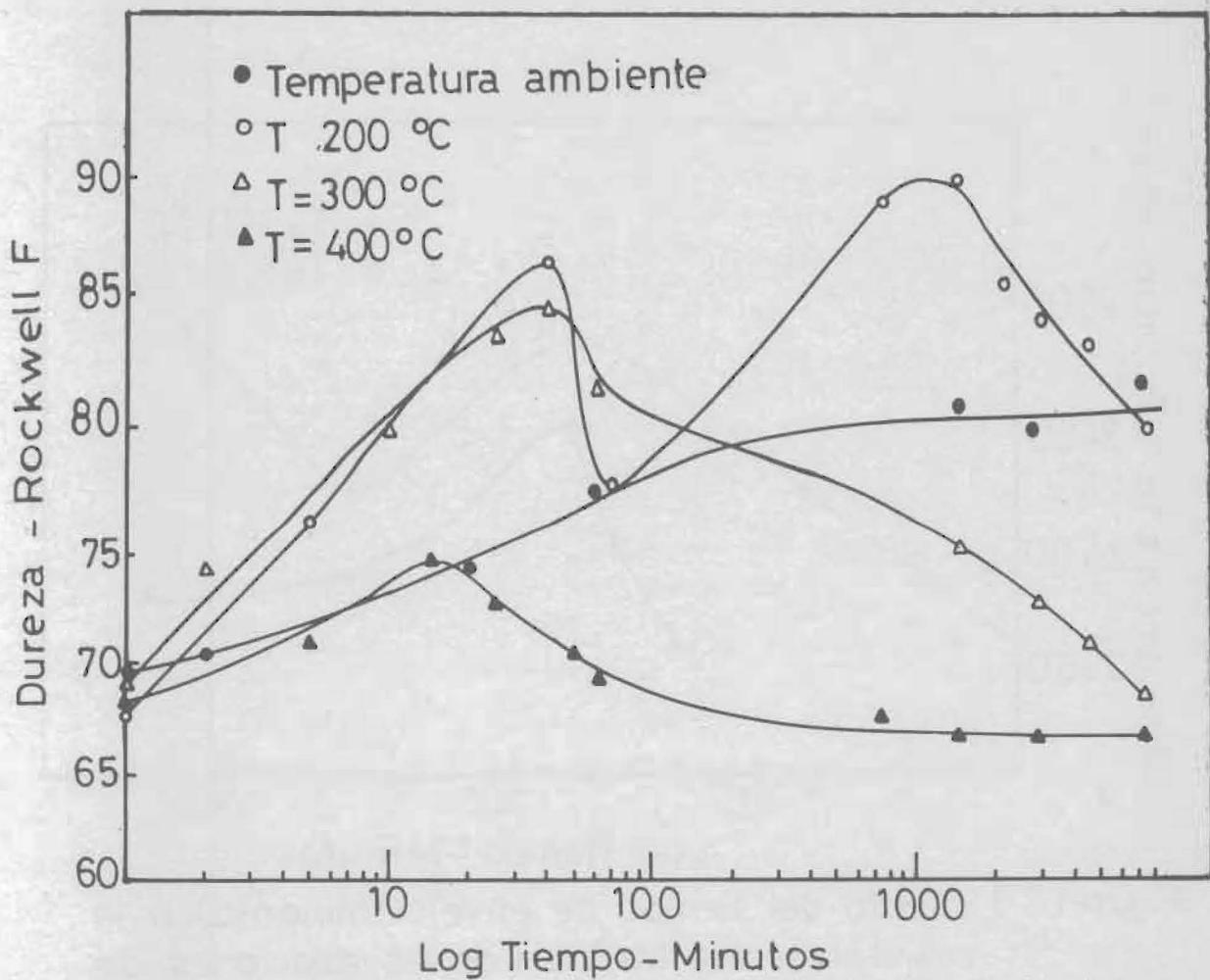


Figura (1) Efecto del tiempo de envejecimiento en la dureza de las aleaciones de Al-4.5% Cu.

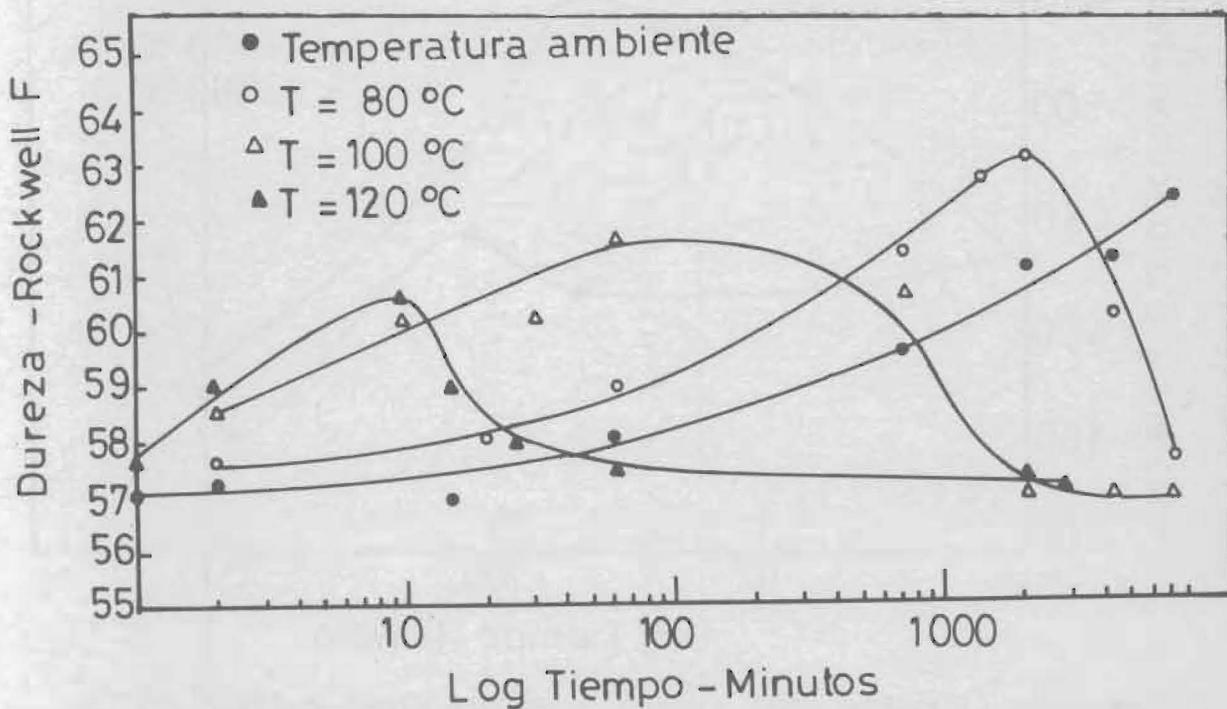
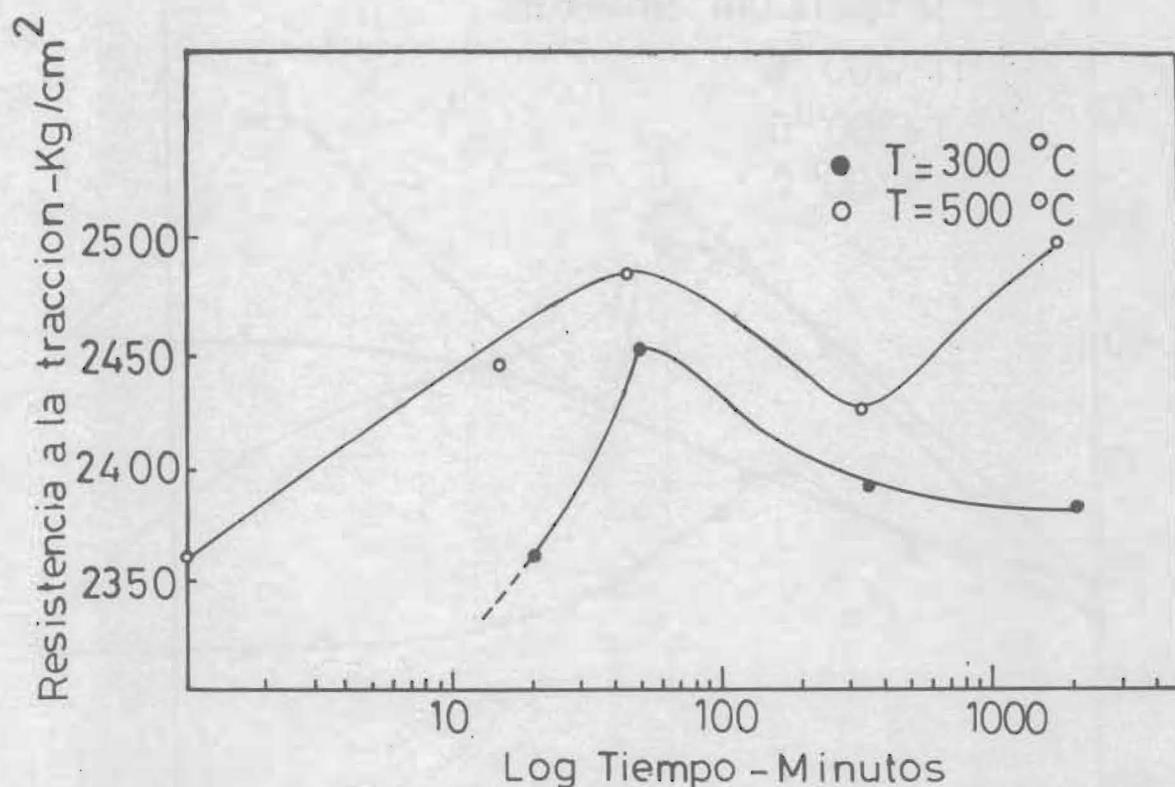
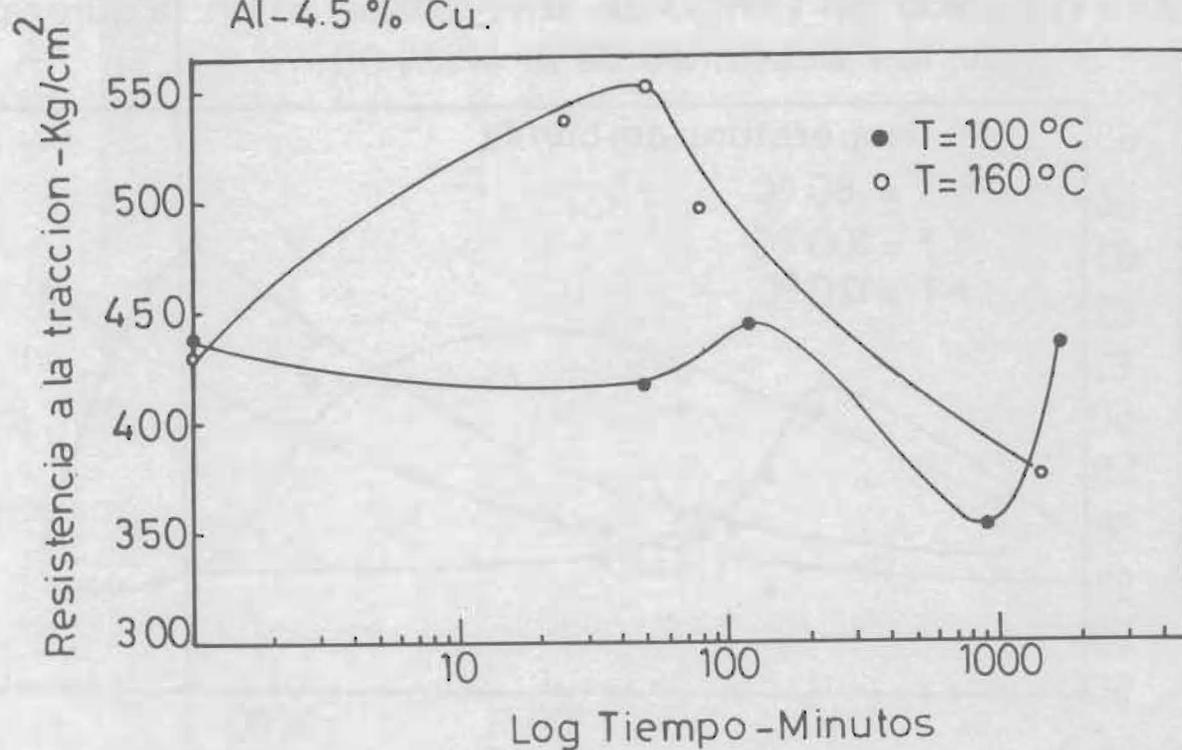


Figura (2) Efecto del tiempo de envejecimiento en la dureza de las aleaciones de Pb-18.5 % Sn.



Figura(3) Efecto del tiempo de envejecimiento en la resistencia a la traccion de las aleaciones de Al-4.5 % Cu.



Figura(4) Efecto del tiempo de envejecimiento en la resistencia a la traccion de las aleaciones de Pb-18.5 Sn.

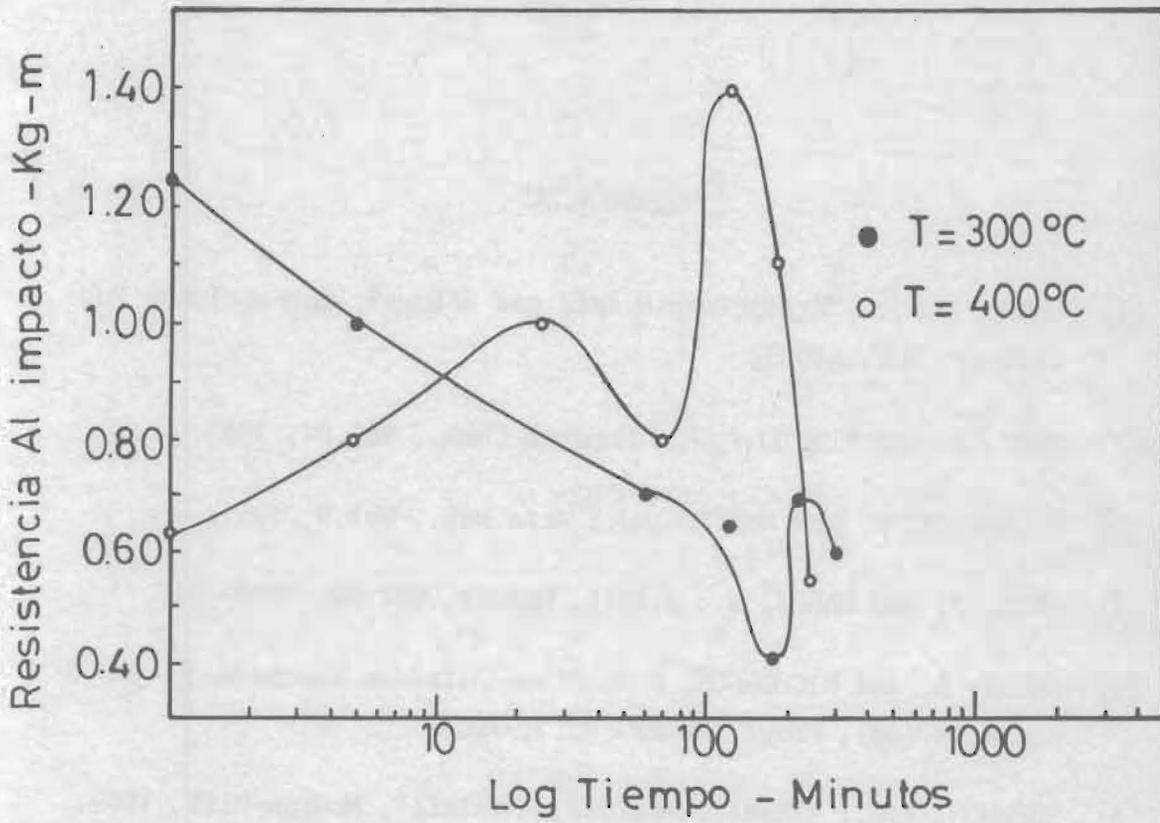


Figura (5) Efecto del tiempo de envejecimiento en la resistencia al impacto de las aleaciones de Al-4.5 % Cu.

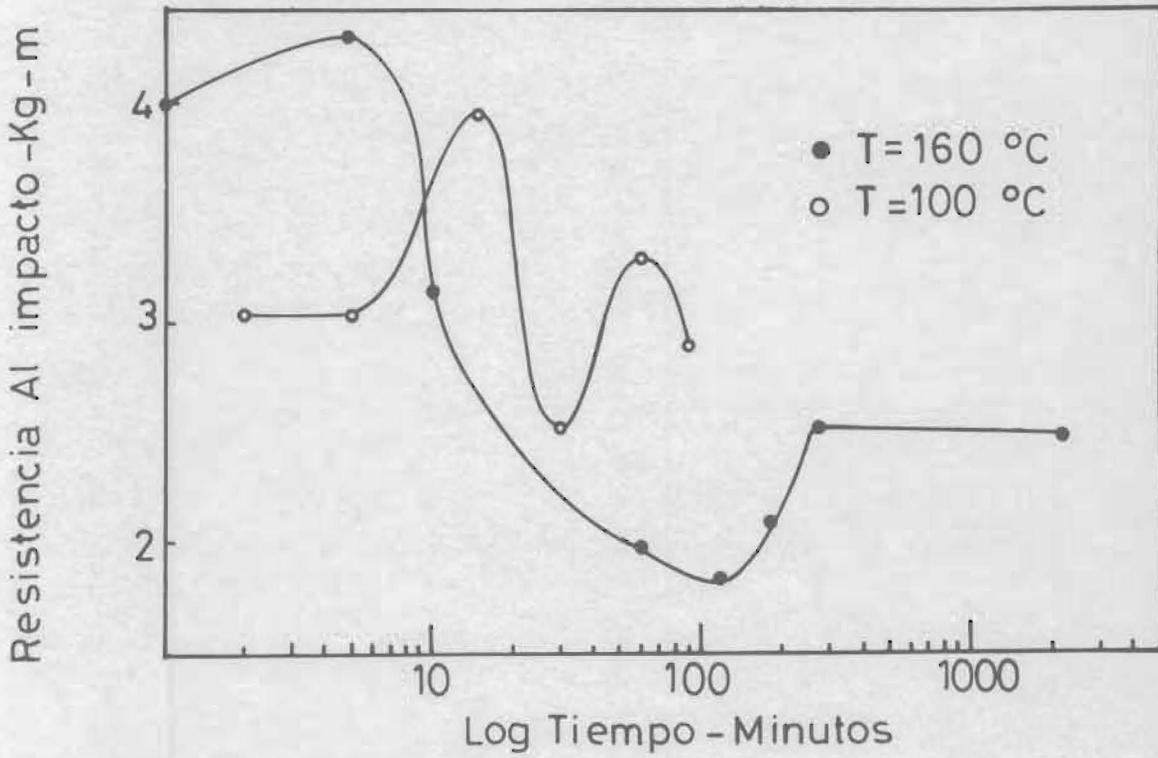


Figura.( 6 ) Efecto del tiempo de envejecimiento en la resistencia al impacto de las aleaciones de Pb-18.5 % Sn.

REFERENCIAS

- [1] CHANG, W.H.: *"Refractory Metals and Alloys"*, Interscience Publishers, N.Y., 1961.
- [2] RUDY, E. and NEWOTONY, H.: *Monatsh Chem.*, Vol.94, 1963.
- [3] NICHOLSON, R. and NUTTING, J.: *Acta Met.*, Vol.9, 1961.
- [4] HEAL, T. and HARDY, H.: *J.Inst. Metals*, Vol.82, 1953 - 54.
- [5] KELLY, A. and NICHOLSON, R.: *"Precipitation Hardening"*, in B Chalmers (ed), *Progr. Mater. Sci.*, 1963.
- [6] SHEWMON, P.G.: *"Transformations in Metals"*, McGraw-Hill, 1969.