

ANÁLISIS DE LAS VELOCIDADES DE LAS INTERFACES (L)/(S+L) Y (S+L)/(S) DURANTE LA TRANSICIÓN DE ESTRUCTURA COLUMAR A EQUIAXIAL EN ALEACIONES PLOMO ESTAÑO.

A.E. Ares** And C.E. Schvezov*

Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Misiones-CONICET
Félix de Azara 1552, (3300) Posadas, Misiones FAX: (0752) 25414 TEL: (0752) 37094
E-MAIL: schvezov @ fceqyn.unam.edu.ar

En aleaciones solidificadas direccionalmente, la transición de estructura columnar a equiaxial ocurre cuando se alcanza un valor de gradiente térmico mínimo y crítico en el líquido adelante de la interfaz que separa la fase líquida de la (sólida + líquida) y una velocidad de interfaz (líquido)/(sólido + líquido) crítica. Las velocidades de las interfaces obtenidas se compararon con las calculadas mediante la ecuación de Lipton y utilizada en el modelo de Wang y Beckermann para crecimiento dendrítico equiaxial.

In directionally solidified alloys the columnar to equiaxed structure transition occurs when is reached a minimal and critical thermal gradient value in the liquid forward of the interface that separates the liquid phase of the (solid + liquid) and (liquid) / (solid + liquid) critical interface speed. The interfaces speeds obtained were compared with the calculated through the Lipton equation and used in the Wang Beckermann model for the dendritic equiaxed growth.

I. INTRODUCCIÓN.

Numerosos trabajos han sido realizados a través de los años para explicar el fenómeno de la transición de estructura columnar a equiaxial. En los trabajos realizados por Chalmers⁽¹⁾ se demostró que la transición de estructura columnar a equiaxial, TCE es dependiente del sobrecalentamiento del líquido, de la composición y de la velocidad de enfriamiento. Mahapatra y Weinberg⁽²⁾ demostraron que la posición de la TCE en probetas cilíndricas solidificadas direccionalmente está relacionada al gradiente de temperatura en el líquido inmediatamente adelante de la isoterma líquida. La transición ocurre cuando se alcanza un gradiente de temperatura de 0.11 °C/mm para Sn -10%Pb y 0.15 °C/mm para Sn - 15%Pb. Observaciones similares realizadas por Ziv y Weinberg⁽³⁾ en aleaciones de Al -3%Cu dan un gradiente de 0.06 °C/mm cuando ocurre la transición.

Los factores que contribuyen a la TCE fueron considerados por Hunt⁽⁴⁾ y las expresiones se han derivado del proceso de nucleación, el crecimiento de los granos columnares y equiaxiales y el sobreenfriamiento constitucional como una función de las condiciones de crecimiento. Utilizando estas expresiones, definen cuándo tiene lugar el crecimiento columnar o el equiaxial y en qué condiciones ocurre la TCE.

En experiencias propias con aleaciones de Pb-Sn solidificadas direccionalmente, se encontró que la transición de estructura columnar a equiaxial ocurre cuando se alcanza un gradiente de temperatura crítico entre -0.8 y 1.2 °C/cm⁽⁵⁾.

En el presente trabajo se investiga la posición y la velocidad de dos frentes ó interfaces durante la solidificación; el primer frente ó interfaz

* Profesor Titular F.C.E.Q.y N. - U.Na.M.

** Becaria de Perfeccionamiento del CONICET

(líquido)/(sólido+líquido), (L)/(S+L) y el segundo frente ó interfaz (sólido+líquido)/(sólido), (S+L)/(S).

Los valores de velocidades de ambas interfaces obtenidos se comparan con los valores de velocidad de la interfaz en la dirección normal al desarrollo dendrítico obtenidos para distintas concentraciones del líquido extradendrítico, propuesta por Lipton y colaboradores⁽⁶⁾ y utilizada en el modelo multiescala / multifaz de la solidificación dendrítica equiaxial en presencia de convección y transporte de fase sólida, desarrollado por Wang y Beckermann^(7,8,9,10) para predecir composición y evolución de la estructura durante la solidificación de una aleación con morfología equiaxial

II. MATERIALES Y MÉTODOS.

Para obtener las probetas con las aleaciones se utilizó un equipo de solidificación direccional que consta básicamente de un equipo para calentamiento o fusión, un sistema de control y regulación de temperatura, un sistema de extracción calórica direccional, un sistema de medición de temperaturas y uno de adquisición de datos experimentales. Este equipo se detalló en un trabajo anterior⁽⁵⁾. Para la preparación de las aleaciones Pb-2%Sn, Pb-4%Sn, Pb-10%Sn, Pb-20%Sn, Pb-30%Sn y Pb-40%Sn se utilizó plomo de 99.9% de pureza y estaño de 99.999%.

Con el sistema de medición y adquisición de datos se midieron las temperaturas durante la solidificación direccional de las aleaciones mediante termocuplas calibradas colocadas en el interior de las probetas cilíndricas a diferentes alturas desde la base y en el centro de las mismas, como se indica en la figura 1.

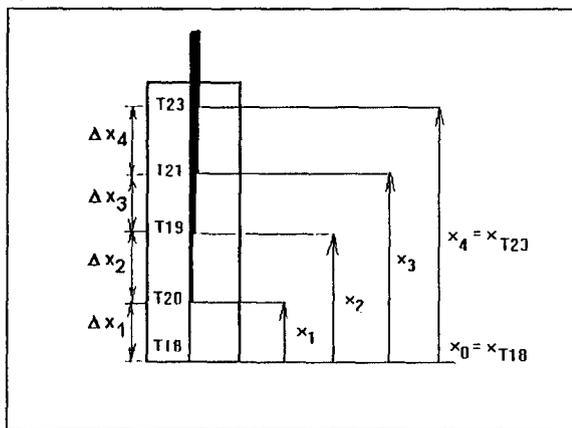


Figura 1. Disposición de las termocuplas utilizada en las experiencias.

Determinación de la posición de las interfaces.

La posición de cada interfaz es detectada en el cambio de pendiente de las curvas de enfriamiento,

tanto para el inicio de la solidificación como para el fin de la solidificación. En el momento en que la pendiente de la curva de enfriamiento tiene su primera inflexión para cada termocupla considerada, el primer frente de solidificación o interfaz (líquido)/(sólido+líquido), (L)/(S+L) atraviesa por la posición de dicha termocupla y en el momento en que la curva de enfriamiento vuelve a cambiar su pendiente a la temperatura de solidus de la aleación para cada termocupla considerada, el segundo frente de solidificación o interfaz (sólido+líquido) / (sólido), (S+L)/(S) atraviesa por la posición de dicha termocupla.

La posición de las interfaces en función del tiempo se representa esquemáticamente en la figura 2. Para interpretar el significado de los valores y cantidades usadas y calculadas en el presente trabajo, en la figura 2, t1 representa el momento en el que el primer frente pasa por la termocupla inferior y t2 el momento en que el segundo frente pasa por la misma termocupla, además, t'1 y t'2 representan los momentos en el que el primer y segundo frentes de solidificación atraviesan por la termocupla siguiente separada de la anterior una distancia Δx. Utilizando estas cantidades definimos las siguientes velocidades:

Velocidades de las interfaces (L)/(S+L) y (S+L)/(S).

La velocidad promedio de la interfaz (líquido)/(sólido+líquido) entre la primer y segunda termocupla puede determinarse mediante la ecuación (1)

$$v_{(L)/(S+L)} = \frac{\Delta x}{t'_1 - t_1} \quad (1)$$

y de igual forma la velocidad promedio de la interfaz (sólido+líquido)/(sólido) entre la primer y segunda termocupla puede determinarse mediante la ecuación (2)

$$v_{(S+L)/(S)} = \frac{\Delta x}{t'_2 - t_2} \quad (2)$$

donde:

$v_{(L)/(S+L)}$ = es la velocidad de la interfaz entre el (líquido) y el (sólido+líquido).

$v_{(S+L)/(S)}$ = es la velocidad de la interfaz entre el (sólido+líquido) y el (sólido).

Δx = es la distancia entre termocuplas

$t'_1 - t_1$ = es el intervalo de tiempo en el cual el frente (L)/(S+L) pasa entre dos termocuplas adyacentes.

$t'_2 - t_2$ = es el intervalo de tiempo en el cual el frente (S+L)/(S) pasa entre dos termocuplas adyacentes.

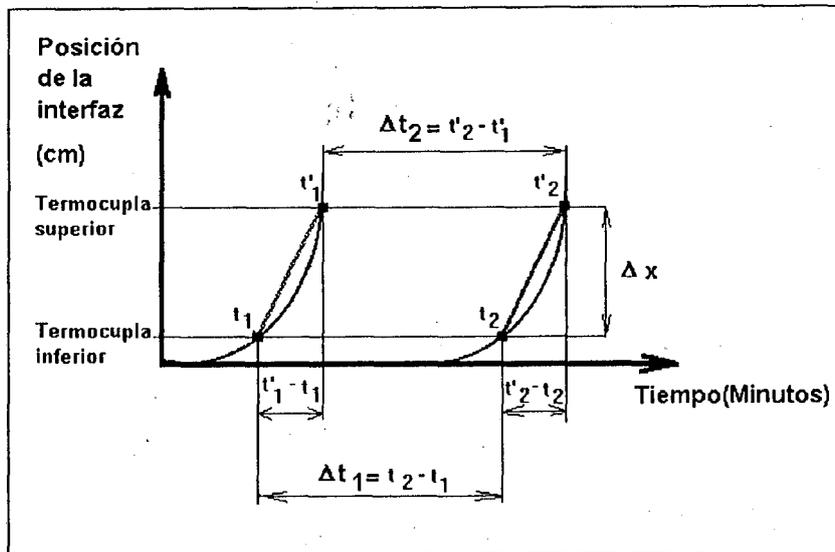


Figura 2. Posición de la interfaz vs. tiempo.

Velocidad de solidificación local.

Una vez que se determinan los distintos instantes de la posición de las interfaces en función del tiempo se puede determinar la velocidad de solidificación local.

De las ecuaciones (1) y (2) despejando los intervalos de tiempo y ordenando se tienen las ecuaciones (3) y (4):

$$t'_1 = \frac{\Delta x}{v_{(L)/(S+L)}} + t_1 \quad (3)$$

$$t'_2 = \frac{\Delta x}{v_{(S+L)/(S)}} + t_2 \quad (4)$$

Restando (4) de (3) se tiene la ecuación :

$$\Delta t_2 = t'_2 - t'_1 = \left(\frac{\Delta x}{v_{(S+L)/(S)}} - \frac{\Delta x}{v_{(L)/(S+L)}} \right) + \Delta t_1 \quad (5)$$

donde:

Δt_1 = es el intervalo de tiempo entre el inicio y el fin de la solidificación en la termocupla inferior.

Δt_2 = es el intervalo de tiempo entre el inicio y el fin de la solidificación en la termocupla superior.

de donde se obtiene la expresión (6) para la velocidad de solidificación local v^* , esto es:

$$\frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\Delta x} = \left(\frac{1}{v_{(S+L)/(S)}} - \frac{1}{v_{(L)/(S+L)}} \right) = \frac{1}{v^*}$$

$$v^* = \frac{v_{(S+L)/(S)} \times v_{(L)/(S+L)}}{v_{(L)/(S+L)} - v_{(S+L)/(S)}} \quad (6)$$

La velocidad de solidificación local expresa la relación entre las velocidades de inicio y fin de la solidificación, o sea la relación entre las velocidades de las interfaces (líquido)/(sólido + líquido) y (sólido + líquido)/(sólido).

Analizando la expresión de la velocidad de solidificación local, v^* se tiene que:

i) Si las velocidades de las dos interfaces son iguales, la velocidad de solidificación local es infinita, esto es, la pendiente de la curva es infinita:

$$\text{si } v_{(L)/(S+L)} = v_{(S+L)/(S)} \Rightarrow v^* \rightarrow \infty$$

ii) Si $v^* > 0 \Rightarrow$ la interfaz del líquido se mueve más rápido que la del sólido.

iii) Si $v^* < 0 \Rightarrow$ la interfaz del sólido se mueve más rápido que la cercana al líquido.

$$\text{iv) Si } v^* = 0 \Rightarrow v_{(L)/(S+L)} = 0 \text{ ó } v_{(S+L)/(S)} = 0$$

III RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN.

Análisis de los perfiles de temperatura durante una secuencia de solidificación completa.

En este punto se analizan los diferentes perfiles de temperatura, a diferentes tiempos (minuto a minuto) durante una secuencia de solidificación completa de una determinada experiencia.

Analizando esa secuencia de perfiles de temperatura desde el inicio de la solidificación se pueden extraer ciertos momentos críticos que

ocurren en las posiciones donde se ubican las termocuplas en el lapso comprendido entre el inicio y el fin de la solidificación de la probeta obtenida.

Para facilitar la interpretación del análisis; el tiempo total que dura la solidificación se dividió en intervalos de 7 minutos cada uno, como se puede apreciar en las gráficas que se describen a continuación.

En la figura 3 se graficó la curva de temperatura vs. posición de las termocuplas en la probeta para el lapso de tiempo de 0 a 7 minutos, graficando cada curva de temperatura vs. posición a intervalos de 1 minuto. Se observa que en la posición que corresponde a la termocupla T18 se superponen las curvas correspondientes a $t = 6$ min. y $t = 7$ min., esto marca el cambio de pendiente ó inicio de la solidificación en dicha posición.

Además en dicha gráfica se marcó con una flecha la posición de la interfaz (L)/(S+L), de tal manera de observar el avance de la interfaz conforme varía el perfil de temperatura con el tiempo.

Entre las termocuplas T18 y T20 se observa una pendiente mayor en las curvas temperatura vs. posición de termocupla que en las posiciones de las termocuplas de más arriba de la probeta, esto es debido al efecto de la extracción de calor desde la base de la probeta (posición de la termocupla T18), produciéndose una velocidad de enfriamiento mayor en dicha zona.

En la figura 4 se graficó la curva de temperatura vs. posición para el lapso comprendido entre $7 < t < 15$ minutos, en este lapso inicia la solidificación en la posición de la termocupla T20, pero es interesante notar que en la posición 3, correspondiente a la posición de la termocupla T19, en el lapso $t = 12$ min. la temperatura en dicho punto es más alta que en las dos posiciones adyacentes 2 y 4. Para $t = 13$ y $t = 14$ minutos la temperatura en 3 vuelve a ser menor que en las dos posiciones adyacentes. Para $t = 15$ min. las temperaturas en las cuatro posiciones 2, 3, 4 y 5 se igualan.

Mediante las flechas se puede seguir el avance de la interfaz (L)/(S+L), se puede ver que entre $t = 7$ min. y $t = 10$ min. avanza más lentamente que en el lapso comprendido entre $t = 10$ min. y $t = 15$ min. Además se aprecia que la interfaz (L)/(S+L) no sigue una línea de temperatura constante.

En la figura 5 se graficó la variación de la temperatura vs. la posición para el lapso comprendido entre $15 < t < 22$ minutos, se observa que en el punto 3 correspondiente a la posición de la termocupla T19, más cercana al punto de TCE

(indicada con una línea) a un tiempo $t = 16$ min. la temperatura medida es mayor que las temperaturas en las posiciones adyacentes correspondientes a las termocuplas T20 y T21, esto está indicando una inversión de las pendientes del perfil de temperaturas que produce gradientes negativos en el líquido adelante de la interfaz, $G(L)$, en el lapso $16 < t < 18$ minutos y gradientes iguales a cero en el lapso $19 < t < 20$ minutos. Esta inversión de las pendientes del perfil de temperatura muestra la existencia de un sobreenfriamiento previo del líquido adelante de la interfaz (L)/(S+L). Esta situación ocurre en un lapso de aproximadamente 5 minutos. En el instante $t = 22$ min. la forma de la curva temperatura vs. posición vuelve a ser la misma que en $t = 1$ min pero con menor pendiente. En la figura 5 además se indica el gradiente adelante de la interfaz (L)/(S+L).

En la figura 6 se representó gradientes vs. intervalo entre termocuplas para el lapso $15 < t < 22$ minutos de la solidificación. Se indican los lapsos en que ocurren los gradientes negativos ó iguales a cero y los lapsos en que ocurren los gradientes positivos.

En la figura 7 se observa la misma gráfica de la figura 5 pero para el intervalo de tiempo $22 < t < 29$ minutos en el cual ya terminó de pasar la interfaz (L)/(S+L). Con flechas se indica la posición de la interfaz (S+L)/(S) conforme pasa el tiempo. Se puede observar que entre las termocuplas T18 y T20 la interfaz (S+L)/(S) sigue una línea de temperatura constante.

En la figura 8 se graficaron las curvas de temperatura vs. posición de las termocuplas durante el intervalo $29 < t < 36$ minutos que corresponde al fin de la solidificación. Se puede observar que el perfil de temperaturas vuelve a ser el mismo que en los primeros lapsos de la solidificación.

Se observa en la figura 8 que conforme transcurren los minutos la interfaz (S+L)/(S) no sigue una línea de temperatura constante y aumenta su velocidad y este aumento es mucho mayor hacia el final de la solidificación.

De acuerdo a las posiciones de la interfaz (L)/(S+L) de la figura 5 conforme transcurre el tiempo, se puede apreciar que cuando la interfaz encuentra un líquido sobreenfriado aumenta más su velocidad. Graficando los datos de posición de la interfaz vs. tiempo, se determinó que los valores experimentales se ajustan mediante una función potencial:

$$x = 5.10^{-9} * t^{7.4598} \quad (7)$$

$$R^2 = 0.9986$$

como puede observarse en la figura 9.

A partir de estos datos se determinó que el incremento de velocidad es en forma potencial como puede apreciarse en la figura 10 donde se graficó velocidad de la interfaz (L)/(S+L) vs. tiempo. La dependencia con el tiempo sigue la ecuación (8):

$$v = 4.10^{-8} \cdot t^{6.4598} \quad (8)$$

$$R^2 = 1$$

De acuerdo con el análisis hecho se puede ver que cuando se produce la inversión de la pendiente de las líneas de temperatura ocurren gradientes negativos ó iguales a cero; la interfaz que venía avanzando con velocidades bajas en las posiciones de las primeras termocuplas aumenta su velocidad.

Esta nueva situación que dura aproximadamente 5 minutos en que se produce inversión de la pendiente de las líneas de

temperatura, gradientes negativos ó iguales a cero y además velocidades de interfaz elevadas dan las condiciones para la nucleación y el crecimiento de granos equiaxiales, frenándose el crecimiento columnar.

Este mismo resultado se observa en otras experiencias como se puede apreciar en la figura 11 para una aleación Pb-2%Sn. En dicha figura cada curva corresponde a un tiempo constante a intervalos de 1 minuto (el tiempo aumenta desde arriba hacia abajo). En la figura se representan las curvas de $t = cte.$ que corresponden a crecimiento columnar, las curvas de $t = cte.$ que corresponden a crecimiento equiaxial posteriores a la TCE y las curvas que corresponden a los lapsos en que se produce la transición de estructura columnar a equiaxial.

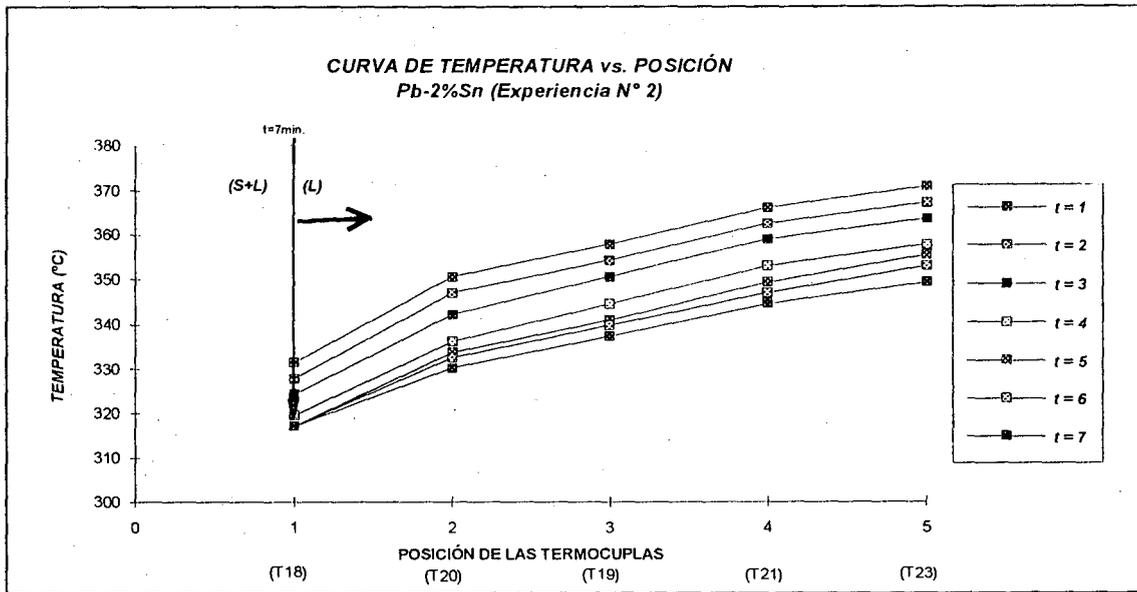


Figura 3. Curva de temperatura vs. posición de cada termocupla durante los primeros 7 minutos de la solidificación. Experiencia N° 2. Pb-2%Sn.

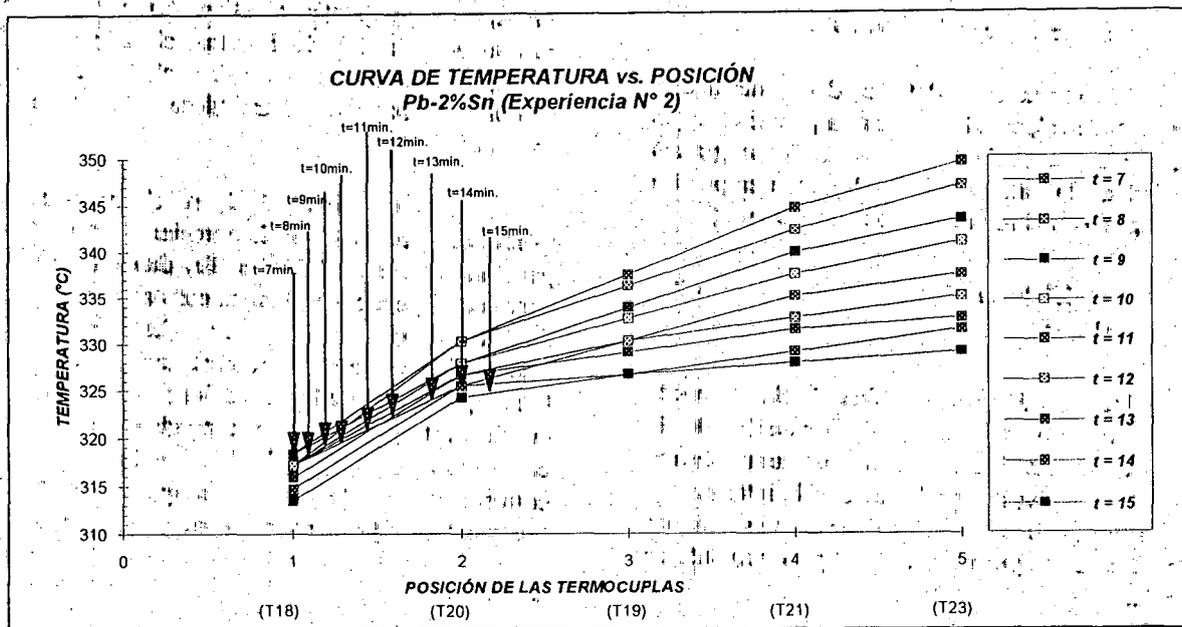


Figura 4. Curva de temperatura vs. posición de cada termocupla durante el intervalo $7 < t < 15$ minutos de la solidificación. Experiencia N°2. Pb-2%Sn.

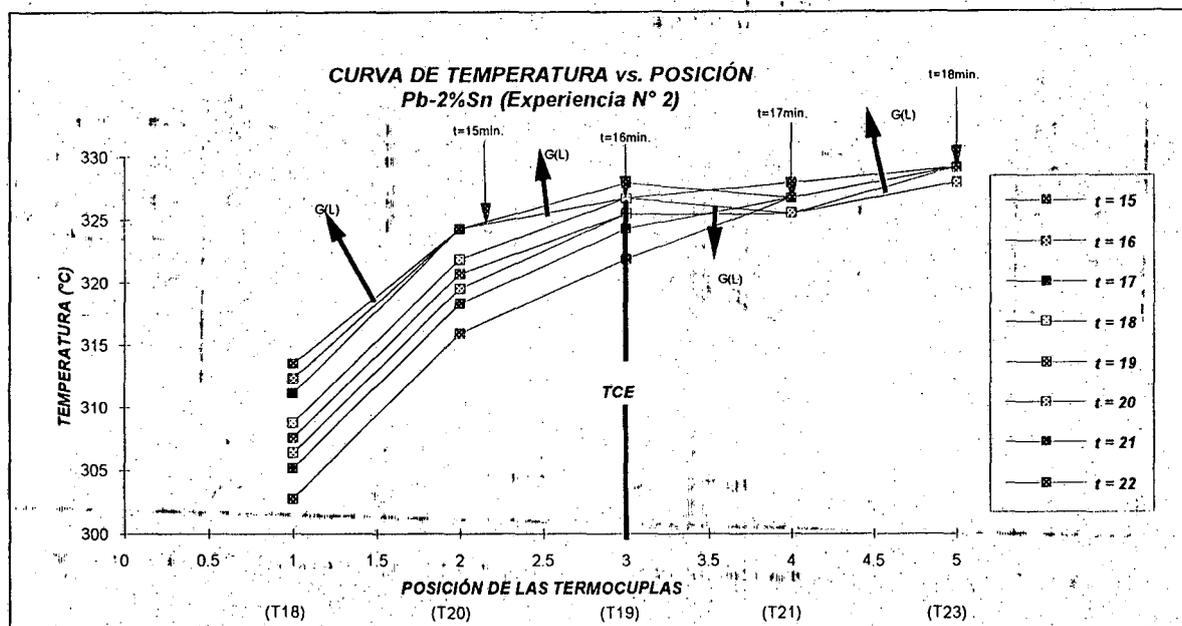


Figura 5. Curva de temperatura vs. posición de cada termocupla durante el intervalo $15 < t < 22$ minutos de la solidificación. Experiencia N°2. Pb-2%Sn.

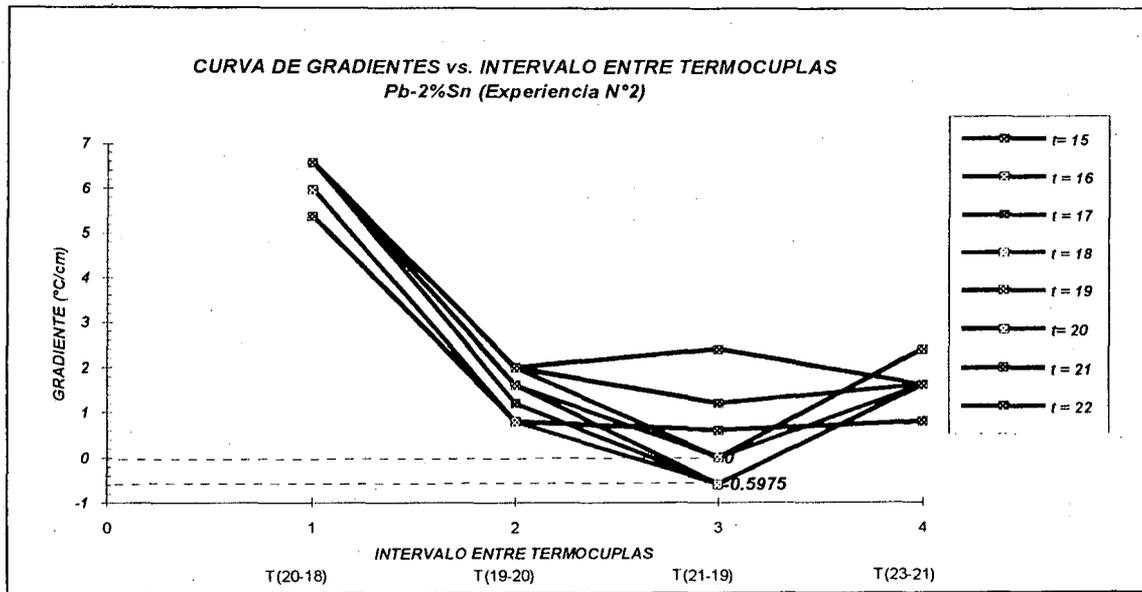


Figura 6. Curva de gradiente vs. intervalo entre termocuplas durante el intervalo $15 < t < 22$ minutos de la solidificación. Experiencia N°2. Pb-2%Sn.

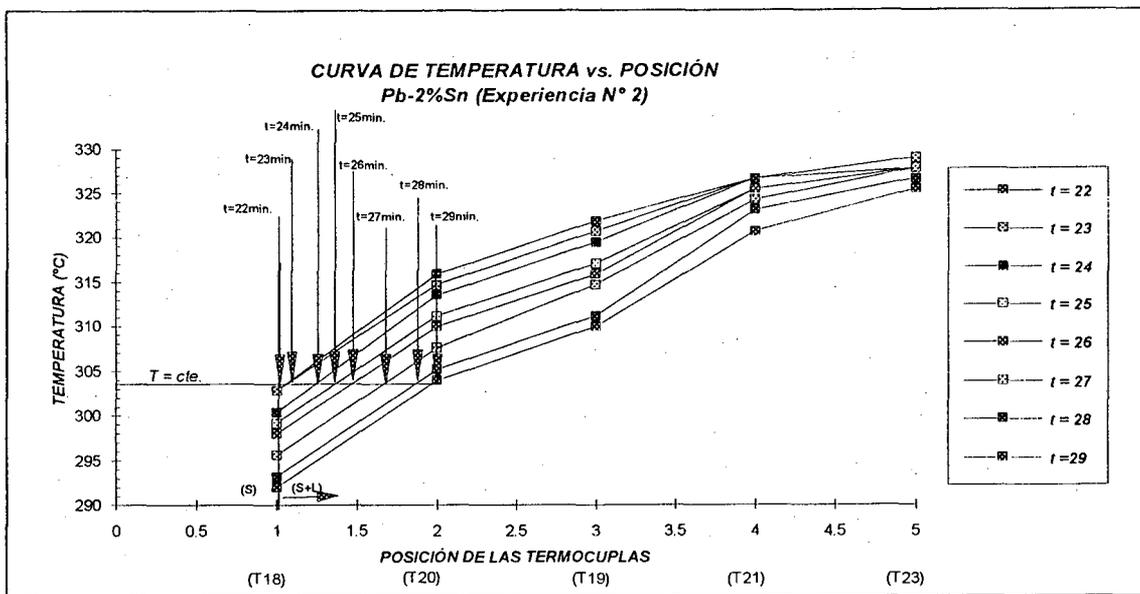


Figura 7. Curva de temperatura vs. posición de cada termocupla durante el intervalo $22 < t < 29$ minutos de la solidificación. Experiencia N°2. Pb-2%Sn.

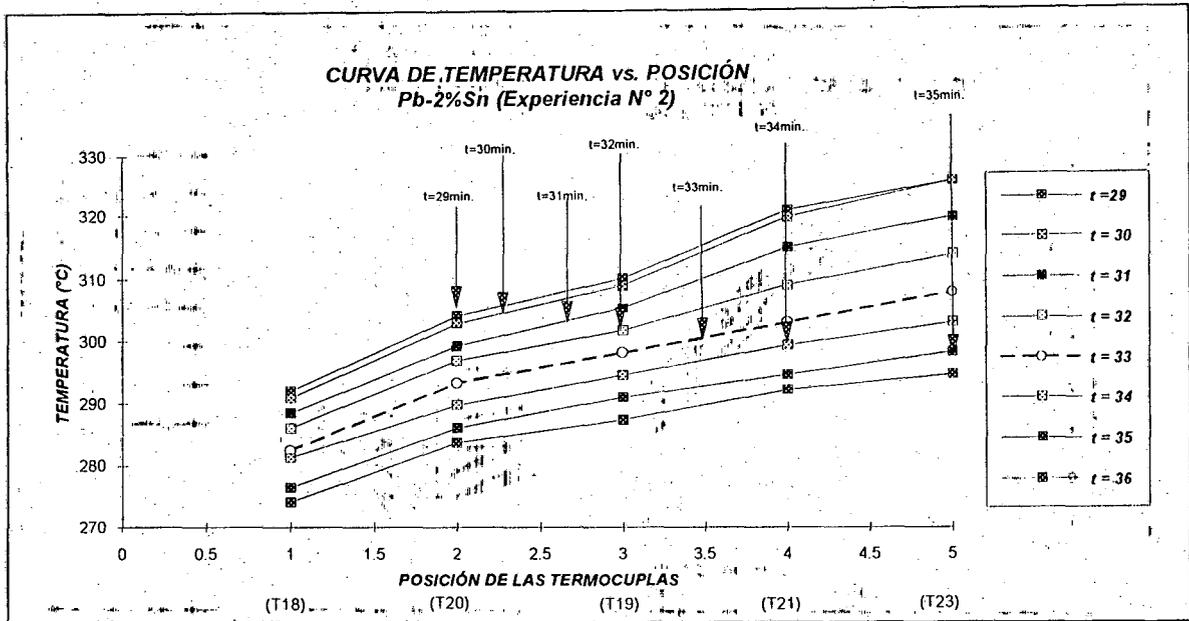


Figura 8. Curva de temperatura vs. posición de cada termocupla durante el intervalo 29 t <math>< 36</math> minutos de la solidificación. Experiencia N° 2. Pb-2%Sn.

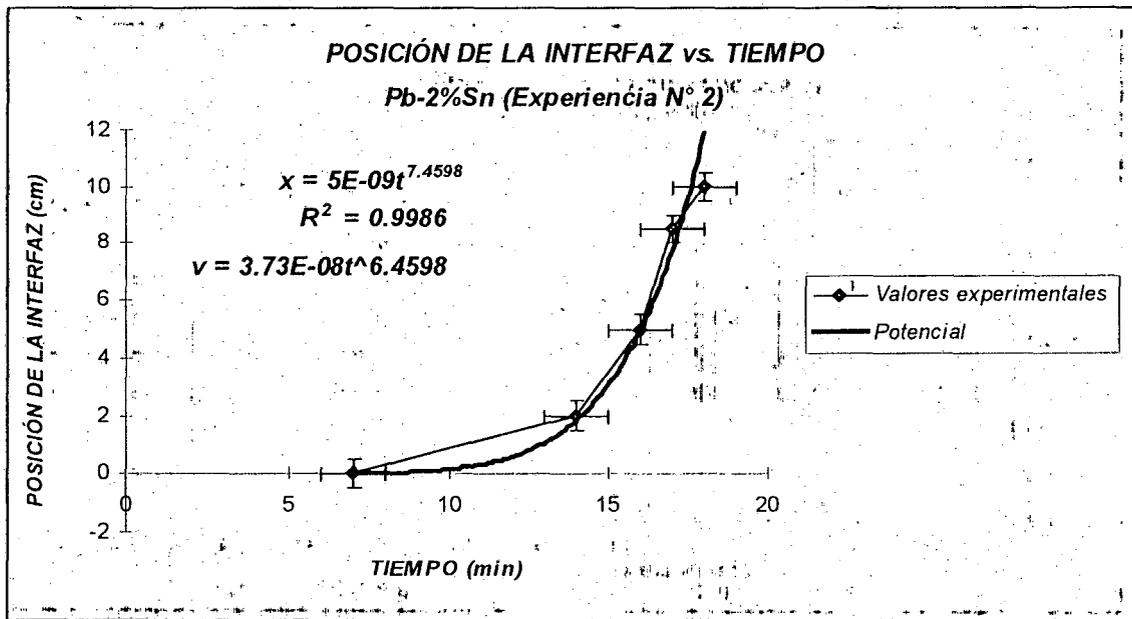


Figura 9. Curva de posición de la interfaz vs. tiempo. Experiencia N° 2. Pb-2%Sn.

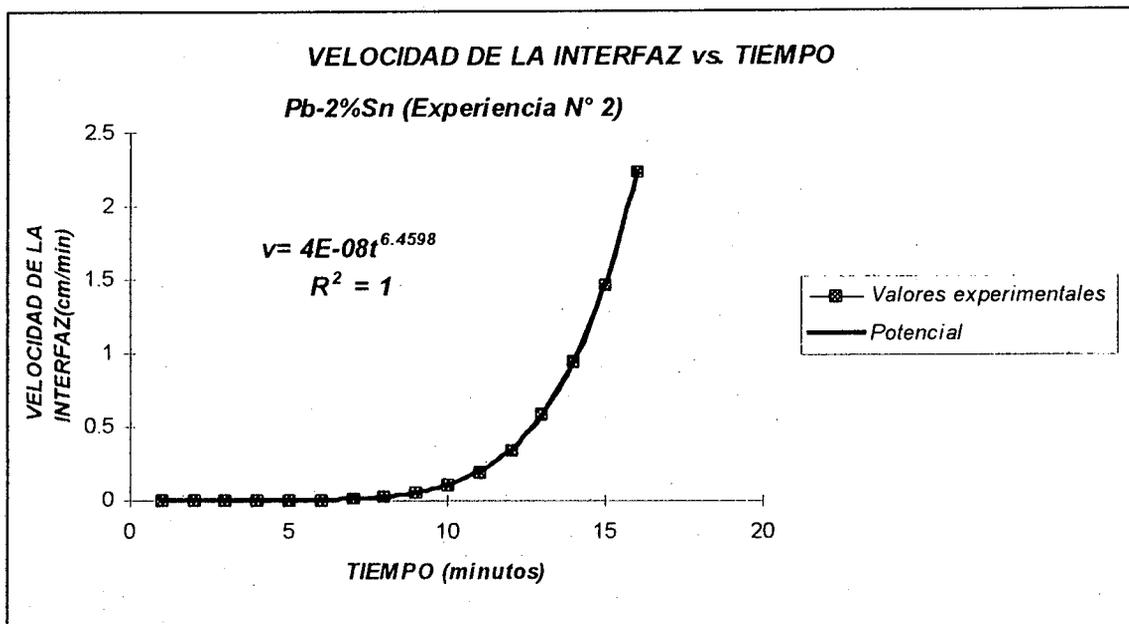


Figura 10. Curva de velocidad de la interfaz vs. tiempo. Experiencia N°2. Pb-2%Sn

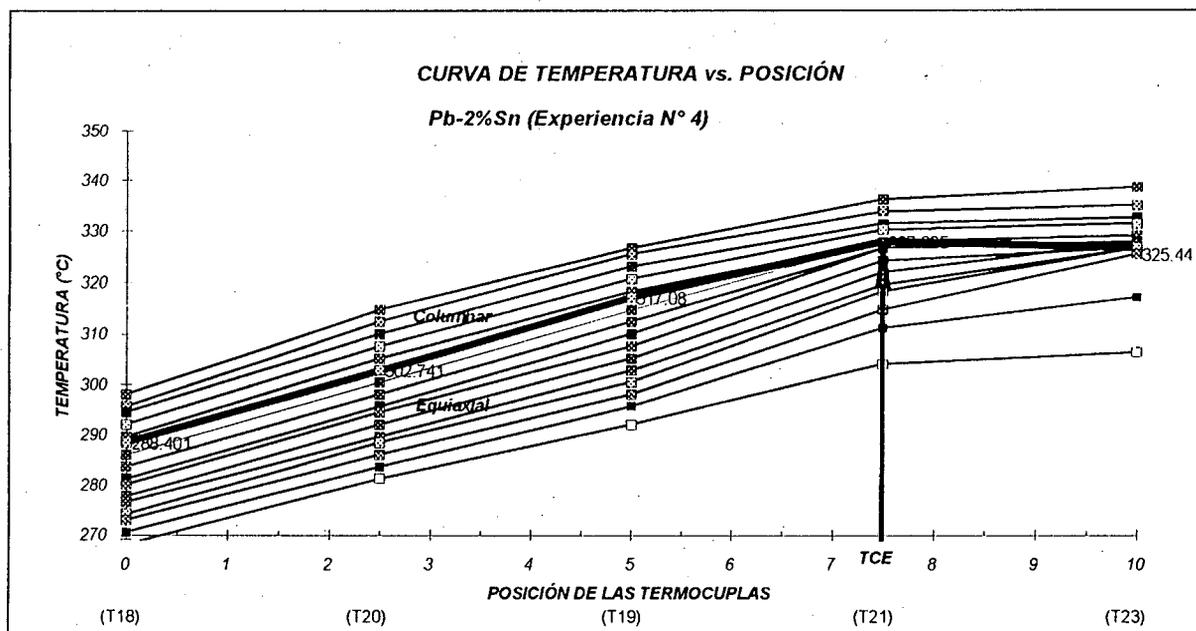


Figura 11. Curva de temperatura vs. posición de cada termocupla. Experiencia N°4. Pb-2%Sn.

Gradientes de temperatura en el líquido adelante de la interfaz (L)/(S+L) vs. velocidad de la interfaz (L)/(S+L).

Se determinaron los gradientes de temperatura en el líquido adelante de la interfaz como se detalló en un trabajo anterior⁽⁵⁾ en las experiencias realizadas con distintas aleaciones Pb-Sn y las velocidades de las interfaces. Se graficó gradiente de temperatura en el líquido adelante de la interfaz (L)/(S+L) vs. velocidad de la interfaz (L)/(S+L), obteniéndose los siguientes resultados:

i) Con altos gradientes de temperatura en el líquido adelante de la interfaz (L)/(S+L) y bajas velocidades

de la interfaz (L)/(S+L) los granos crecen columnares.

ii) Con bajos gradientes de temperatura en el líquido adelante de la interfaz (L)/(S+L) y altas velocidades de la interfaz (L)/(S+L) los granos crecen equiaxiales.

iii) Pero con bajos gradientes de temperatura en el líquido adelante de la interfaz (L)/(S+L) y bajas velocidades de la interfaz (L)/(S+L) los granos crecen columnares.

En la figura 12 se muestra la variación del gradiente de temperatura con la velocidad de la interfaz de todas las experiencias realizadas.

En dicha figura se obtuvieron puntos que corresponden a las determinaciones de gradiente de temperatura en el líquido adelante de la interfaz $(L)/(S+L)$ y de velocidad de la interfaz $(L)/(S+L)$ en la zona columnar y puntos que corresponden a las determinaciones en la zona equiaxial. Los puntos circulares corresponden a probetas de Pb-2%Sn, los símbolos X corresponden a probetas de Pb-10%Sn, los rombos a la probeta de Pb-20%Sn, los triángulos a la probeta de Pb-30%Sn y los cuadrados a la probeta de Pb-40%Sn.

Las ecuaciones de las rectas que separan las zonas completamente columnar y la zona completamente equiaxial son:

$$G_L = 333 \cdot v - 1 \quad (^\circ\text{C}/\text{cm}) \quad (9)$$

$$G_L = 333 \cdot v - 2.5 \quad (^\circ\text{C}/\text{cm}) \quad (10)$$

La primera ecuación delimita la región completamente columnar y la segunda ecuación delimita la región completamente equiaxial, en la banda comprendida entre las dos rectas paralelas pueden crecer tanto estructuras columnares como estructuras equiaxiales.

En la figura 12 se puede apreciar que la velocidad de la interfaz $(L)/(S+L)$ que separa el crecimiento columnar del equiaxial en todos los casos analizados es aproximadamente constante e igual a :

$$v = 0.01 \pm 0.005 \quad (\text{cm} / \text{s}) \quad (11)$$

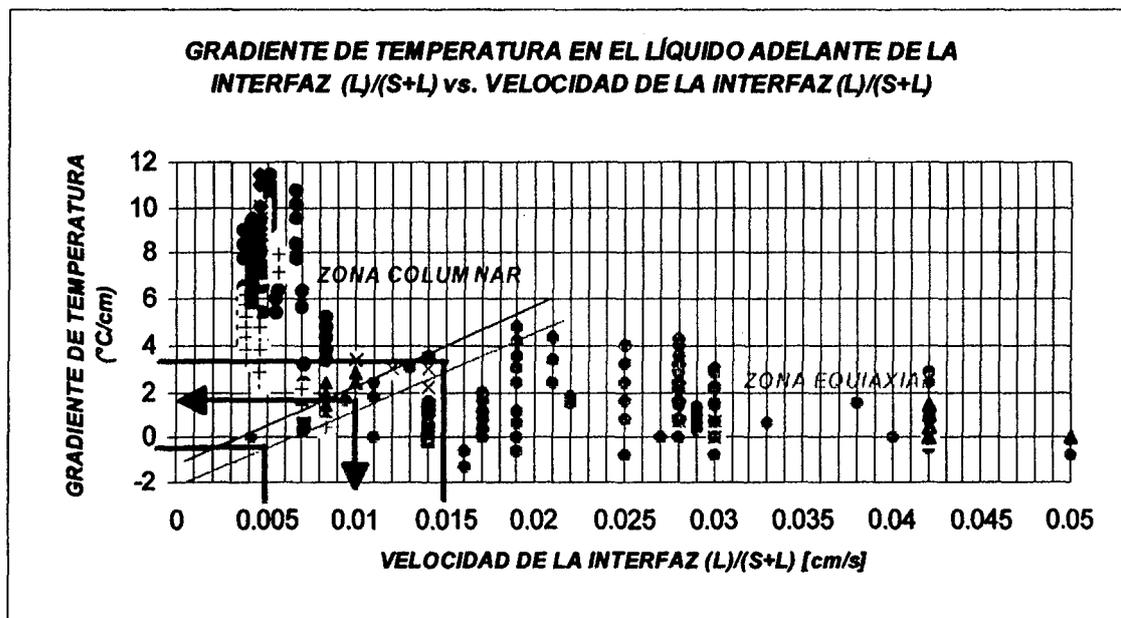


Figura 12. Gradiente de temperatura en el líquido adelante de la interfaz $(L)/(S+L)$ vs. velocidad de la interfaz $(L)/(S+L)$. Experiencias N°1 a 20.

Comparación de las velocidades de las interfaces $(L)/(S+L)$ Y $(S+L)/(S)$ con la velocidad de la interfaz en la dirección normal al desarrollo dendrítico utilizada en el modelo de Wang y Beckermann.

En el modelo multiescala / multifaz de la solidificación dendrítica equiaxial en presencia de convección y transporte de fase sólida, desarrollado por Wang y Beckermann^(7,8,9,10) para predecir composición y evolución de la estructura durante la solidificación de una aleación con morfología equiaxial, se calcula la velocidad de la interfaz mediante la siguiente expresión propuesta por Lipton y colaboradores⁽⁶⁾:

$$W_{ne} = \frac{4 \cdot \sigma^* \cdot D_1 \cdot m \cdot (k-1) \cdot \bar{C}_e \cdot P_e^2}{\Gamma} \quad (12)$$

donde:

\bar{W}_{ne} = es la velocidad de la interfaz en la dirección normal al desarrollo dendrítico.

σ^* = es una constante de estabilidad $\approx 1/4\pi^2$ en el límite de la difusión pura.

D_1 = es la difusividad térmica en el líquido extradendrítico en m^2/s .

m = es la pendiente de la línea liquidus en $\text{K} / \%$ peso.

\bar{C}_e = es la concentración de las especies químicas en $\%$ en peso de la capa dendrítica, haciendo la suposición de que existe equilibrio termodinámico interfacial se calcula como:

$$\bar{C}_e = \frac{T - T_m}{m_1} \quad (13)$$

$G =$ es la velocidad interfacial de cambio de fase en Kg/m³.s ó coeficiente de Gibbs-Thomson en m.K. Para la mayoría de los metales es del orden de 10⁻⁷ m.K.

$P_{e1} =$ es el número de Peclet solutal de la punta de la dendrita está relacionado al parámetro adimensional de sobreenfriamiento, Ω :

$$W = \frac{\bar{C}_e - C_1}{\bar{C}_e \cdot (1 - k)} \quad (14)$$

que soluciona el problema del transporte de soluto cercano a la punta de la dendrita.

Uniendo la ecuación (14) a la ecuación (12) se alcanza un modelo de crecimiento que relaciona \bar{W}_{ne} directamente con el sobreenfriamiento solutal W . En la ecuación (14) se relacionan los efectos de la forma de la punta de la dendrita y las condiciones de flujo alrededor de la punta incorporados en la constante de estabilidad σ^* con la relación entre el número de Peclet de la punta, P_{e1} y el sobreenfriamiento, W . Wang y Beckermann^(7,8,9,10) consideran de forma separada los casos de difusión y convección dominante. Para el caso de crecimiento dominado únicamente por difusión, la función de Ivantsov está dada por:

$$P_{e1} = I v^{-1}(\Omega) = a \left(\frac{\Omega}{1 - \Omega} \right)^b \quad (15)$$

donde las constantes a y b que dan el mejor ajuste son:

$$a = 0.4547$$

$$b = 1.195$$

La velocidad de la interfaz en la dirección normal al desarrollo dendrítico se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\bar{W}_{ne} = \frac{4 \cdot \sigma^* \cdot D_1 \cdot m \cdot (k - 1) \cdot \bar{C}_e}{\Gamma} \cdot \left[a \cdot \left(\frac{\Omega}{1 - \Omega} \right)^b \right]^2 \quad (16)$$

La dependencia de la velocidad de la interfaz en la dirección normal al desarrollo dendrítico con la temperatura se observa en la figura 13.

En la figura 13 se observa que si la temperatura aumenta, la velocidad de la interfaz en la dirección normal al desarrollo dendrítico disminuye hasta hacerse cero para el valor del punto de fusión. Además al aumentar la concentración las curvas se desplazan hacia valores de temperaturas más bajas. Las velocidades de crecimiento equiaxial experimentalmente determinadas se contrastaron con

los valores de velocidad W_{ne} obtenidos mediante la ecuación (16) asumiendo que no hay difusión en el sólido. En la figura 14 se muestra un esquema de las velocidades consideradas para la comparación.

Debe notarse que las interfaces se encuentran siempre a la temperatura de inicio y fin de la solidificación determinadas a partir de las curvas temperatura vs. tiempo durante la solidificación, mientras que la envoltura dendrítica de los granos equiaxiales se encuentra a una temperatura distinta en cada punto ya que existe un gradiente de temperatura entre las dos interfaces.

En la figura 15 se muestra la comparación de los valores experimentales de las velocidades de ambas interfaces con los valores de velocidad W_{ne} obtenidos mediante la ecuación (16) para distintas concentraciones del líquido extradendrítico.

La curva de velocidad vs. temperatura propuesta por Lipton y colaboradores⁽⁶⁾ y utilizada por Wang-Beckermann^(7,8,9,10) se encuentra en todos los casos próxima a los valores experimentales de velocidades de la interfaz pero la dispersión de los valores experimentales con respecto a la curva es grande. La curva separa por lo general los valores de velocidad de la interfaz líquida y sólida, ya que éstas tienen algunas veces velocidades iguales y se encuentran a temperaturas diferentes.

La dispersión en los valores fundamentalmente se debe a que se comparan velocidades distintas pero la tendencia de los valores es a agruparse alrededor de las curvas. La dispersión además puede deberse a que la suposición de que el crecimiento es dominado sólo por difusión no es del todo válida sino que también influye la convección. El coeficiente de difusión del estaño es más bajo que el del plomo, esto quiere decir que al aumentar la concentración de estaño habría menos efecto de difusión y un mayor efecto de la convección.

Analizando las curvas, es de suponer, que si las velocidades de la interfaz (L)/(S+L) son menores a los valores de la velocidad de la interfaz en la dirección normal al desarrollo dendrítico, W_{ne} el grano no crece ó crece hacia los costados más rápido que hacia arriba. Por el contrario si las velocidades de la interfaz (L)/(S+L) son mucho mayores que los valores de W_{ne} crecen muchos granos equiaxiales pequeños.

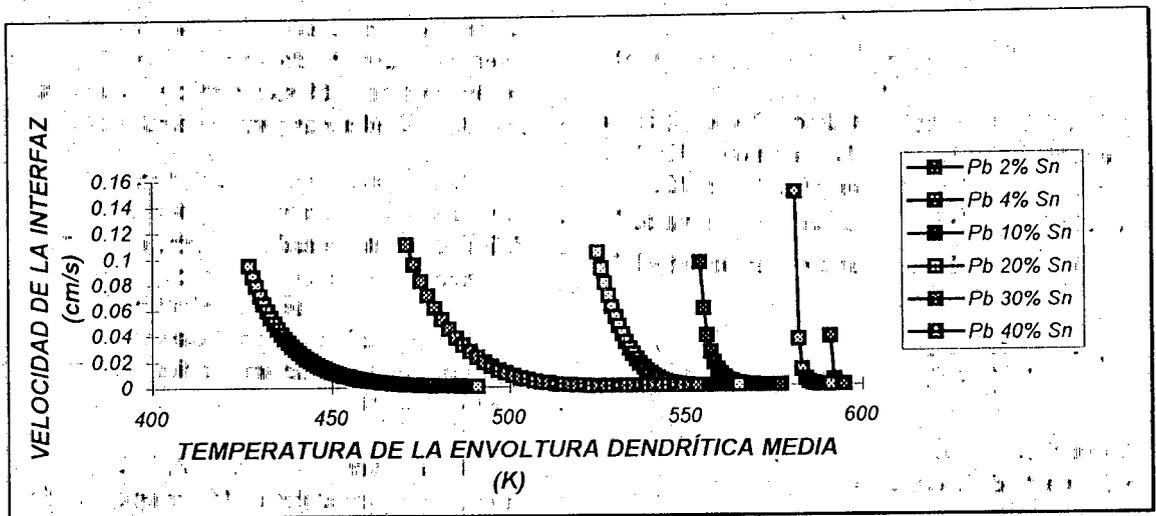


Figura 13. Velocidad de la interfaz vs. temperatura para distintas concentraciones de líquido extradendrítico de acuerdo al modelo de Wang-Beckermann.

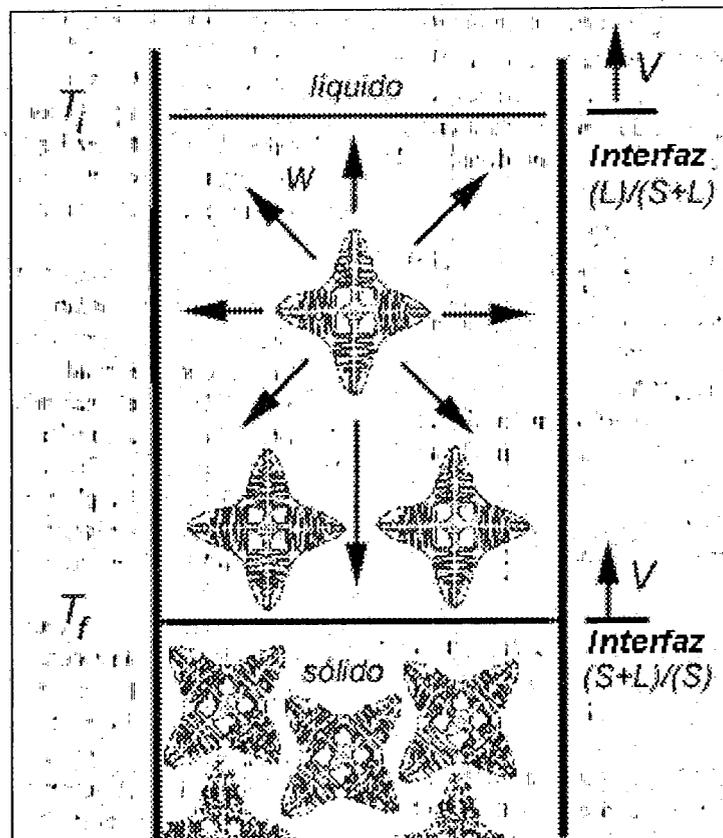


Figura 14. Esquema de las velocidades consideradas para la comparación.

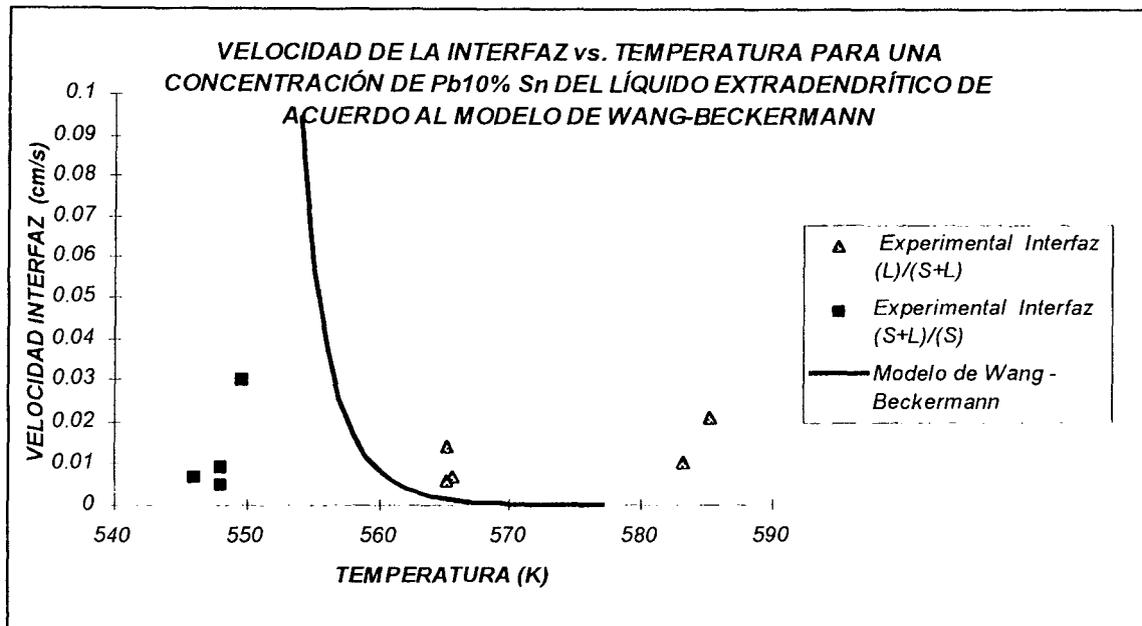


Figura 15. Velocidad de la interfaz vs. temperatura para una concentración Pb-10%Sn del líquido extradendrítico. Modelo de Wang-Beckermann.

CONCLUSIONES.

- 1) Cuando en las curvas de temperatura vs. posición de las termocuplas se produce inversión de la pendiente de las líneas de temperatura, gradientes negativos ó iguales a cero y además velocidades de interfaz elevadas, se dan las condiciones para la nucleación y el crecimiento de granos equiaxiales, frenándose el crecimiento columnar.
- 2) Con altos gradientes de temperatura en el líquido adelante de la interfaz (L)/(S+L) y bajas velocidades de la interfaz (L)/(S+L) los granos crecen columnares.
- 3) Con bajos gradientes de temperatura en el líquido adelante de la interfaz (L)/(S+L) y altas velocidades de la interfaz (L)/(S+L) los granos crecen equiaxiales.
- 4) Con bajos gradientes de temperatura en el líquido adelante de la interfaz (L)/(S+L) y bajas velocidades de la interfaz (L)/(S+L) los granos crecen columnares.
- 5) Las zonas de crecimiento columnar y equiaxial quedan delimitadas por una zona de transición entre dos rectas en un diagrama G_L vs. velocidad de la interfaz (L)/(S+L), siguiendo la relación:

$$\frac{G_L}{v_{(L)/(S+L)}} = cte.$$

- 6) La velocidad de la interfaz (L)/(S+L) que separa el crecimiento columnar del equiaxial en todos los casos analizados es aproximadamente constante e igual a:

$$v = 0.01 \pm 0.005 \quad (cm / s)$$

- 7) La ecuación de Lipton utilizada en el modelo de Wang y Beckermann predice velocidades de crecimiento en la dirección normal al desarrollo dendrítico con valores intermedios entre las velocidades de las interfaces (L)/(S+L) y (S+L)/(S).

AGRADECIMIENTOS.

Un agradecimiento especial merece el Ing. Sergio F. Gueijman por toda la colaboración prestada.

REFERENCIAS.

- 1- B. Chalmers, "Principles of Solidification", Wiley, New York, NY, 1964, p. 255.
- 2- R. B. Mahapatra and F. Weinberg, "Metall. Trans" B, 1987, Vol. 8B, p.p. 425-32.
- 3- I. Ziv and F. Weinberg, "Metall. Trans" B, 1989, Vol. 20B, p.p. 731-34.
- 4- J.D. Hunt, "Mat. Sci. Eng.", 1984, Vol. 65, p.p. 75-83
- 5- A. E. Ares; C. E. Schvezov, "Anales AFA" Vol. 8. Tandil -Argentina (1996). Aceptado para publicación.
- 6- J. LIPTON, M.E. GLICKSMAN, W. KURZ, (1984) "Materials Science and Engineering". Vol. 65. p.p. 57-63. Mencionado por WANG, C.Y. and BECKERMANN, C. " Metallurgical and Materials Transactions." (1996) p. 2760.
- 7- C.Y. WANG, C. BECKERMANN, "Metallurgical and Materials Transactions". Vol 27a-Nº9. p.p. 2754-2764. (1996)
- 8- C.Y. WANG, C. BECKERMANN, "Metallurgical and Materials Transactions". Vol 7a-Nº9. p.p. 2765-2783. (1996).
- 9- C.Y. WANG, C. BECKERMANN, "Metallurgical and Materials Transactions". Vol 7a-Nº9. p.p. 2784-2795. (1996)
- 10- C.Y. WANG, C. BECKERMANN "The Minerals, Metals and Materials Society", Vol. 49, Nº 3, p.p. 13-17. (1997).