



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

***ESTUDIO DEL TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN DE UNA
GOTA DE ESTAÑO EN FUNCIÓN DE SU EXTENSIÓN***

Carlos Alfonso Gayán Belmonte

48656063T

Director: Juan Francisco Sánchez Pérez

Codirectora: Noelia González Morales

Grado Ingeniería en Tecnologías Industriales

E.T.S.I.I.

Curso 2017-18





ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 OBJETIVOS	6
1.2 PROPIEDADES Y USOS DEL ESTAÑO	7
1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	9
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	11
2.1 EL MODELO UNIDIMENSIONAL	12
2.1.1 ECUACIONES DE LA ENERGÍA SIMPLIFICADAS.....	14
2.1.2 CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO DEL PROBLEMA UNIDIMENSIONAL.....	15
2.2 SOLIDIFICACIÓN EN DOS DIMENSIONES	16
2.2.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA.....	17
2.2.2 ECUACIÓN DE LA ENERGÍA APLICADA EN LA GOTA.....	19
2.2.3 MODELO DE TRANSFORMACIÓN DE LA ENTALPÍA.....	19
2.2.4 ECUACIÓN DE LA ENERGÍA APLICADA EN EL SUSTRATO	22
2.2.5 CONDICIONES CONTORNO EN LA GOTA. LÍMITES Y CONTORNOS DEL ESTUDIO.	23
2.2.6 CONDICIONES DE CONTORNO SUPERFICIE LIBRE DE LA GOTA Y SUSTRATO	24
2.2.7 CONDICIONES INICIALES GOTA Y SUSTRATO.....	25
2.2.8 INTERFAZ SUSTRATO-GOTA.....	25
3. FUNDAMENTOS PRÁCTICOS	27
3.1 EL MÉTODO DE REDES.....	28
3.2 MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS EN TRANSMISIÓN DEL CALOR.....	29
3.3 FRAGMENTOS DE CÓDIGO	33
4. RESULTADOS	35
4.1 SIMULACIÓN SPREAD 0.8	37



4.2 SIMULACIÓN SPREAD 1.0	40
4.3 SIMULACIÓN SPREAD 1.5	43
4.4 SIMULACIÓN SPREAD 2.0	46
4.5 SIMULACIÓN SPREAD 2.5	49
4.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	52
4.6.1 REPRESENTACIÓN ALTURA Y ANCHURA DE CADA SPREAD.....	54
4.6.2 REPRESENTACIÓN TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS PARA CADA SPREAD	55
4.6.3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DIFERENCIA TEMPERATURAS PARA CADA SPREAD.....	57
4.6.4 PORCENTAJE DE GOTA SOLIDIFICADA CON RESPECTO AL SPREAD.....	58
4.6.5 PERFIL GOTAS. ESTADO ZONAS POR COLORES.	59
4.6.6 REPRESENTACIÓN TEMPERATURAS SOBRE LA SUPERFICIE RESPECTO EXTENSION	61
4.6.7 REPRESENTACIÓN TEMPERATURAS EJE VERTICAL SIMETRÍA PARA CADA SPREAD	66
4.6.8 COMPARACIÓN CUANTITATIVA TAMAÑOS DE CADA DIRECCIÓN Y SUS TEMPERATURAS.....	71
4.6.9 EFECTOS SOBRE LA SUPERFICIE METÁLICA	72
4.6.10 CASOS ANÓMALOS Y EXCEPCIONES	75
5. CONCLUSIONES	77
6. APLICACIONES	81
7. REFERENCIAS.....	85



1. INTRODUCCIÓN



1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo fin de grado es el estudio de la solidificación de una gota de estaño en función de su extensión para un determinado tiempo de solidificación. Se va a estudiar la forma, temperaturas y estado en las distintas partes de la gota. Para ello se utiliza el programa MatLab®, que usando un código basado en las ecuaciones de Navier Stokes y sirviéndose del método de redes, va a proporcionar diferentes representaciones de las distribuciones de temperaturas de las gotas donde se podrá observar con detalle los aspectos antes referidos.

Primeramente se va a proceder a realizar un estudio de las propiedades del estaño, sus usos y a hacer una actualización bibliográfica de los temas a tratar en este trabajo fin de grado. Se abordarán los fundamentos teóricos y prácticos (estudio del método de redes, programa utilizado, etc) y posteriormente, se va a analizar cómo es la forma de una gota de estaño que solidifica sobre una superficie metálica de acero y su distribución de temperaturas mediante la simulación de diferentes escenarios variando la extensión de la gota para un mismo tiempo de solidificación. Para finalizar se ofrece un análisis detallado de los resultados [1]. Además se recogen aplicaciones que este estudio tiene en la actualidad. Los pasos que se han llevado a cabo para la elaboración del trabajo han sido, tal y como se recoge en la propuesta:

- a) Estudio de las propiedades del estaño, realización de una actualización bibliográfica.
- b) Estudio de la forma de una gota de estaño que solidifica en una superficie metálica.
- c) Estudio del método de redes.
- d) Simulación de varios escenarios variando la extensión de la gota.
- e) Estudio de los resultados.
- f) Elaboración de la memoria del proyecto.

1.2 PROPIEDADES Y USOS DEL ESTAÑO

El elemento estaño fue descubierto alrededor del año 2100 a.c. El estaño puro es un elemento que se encuentra en la tabla periódica encuadrado en el grupo catorce y el periodo cinco. Se representa por el símbolo Sn y su número atómico es cincuenta. Al margen de sus propiedades electrónicas, físicamente posee una temperatura de fusión de 231,93 °C, una masa atómica relativa de 118,71 y una densidad de 7,287 g/cm³. En cuanto a su apariencia, se trata de un metal de aspecto suave y flexible, color grisáceo, maleable y que por debajo de -13 °C de temperatura adquiere textura y forma de polvo. [3]

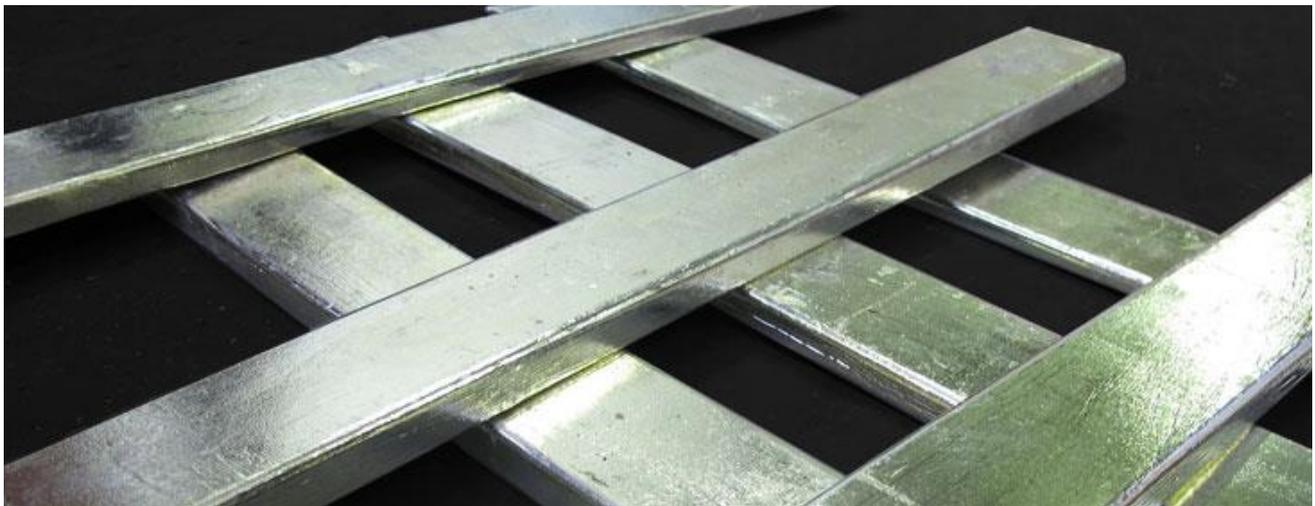


Figura 1. Estaño puro en forma de lingotes. [2]

Tal y como expone la RSC: Royal Society of Chemistry, el estaño tiene varios usos. De aspecto pulido, se usa para recubrir otros metales para prevenir la corrosión, cómo por ejemplo en el caso del acero recubierto de estaño. Las aleaciones de estaño están muy extendidas por su uso en soldadura blanda, o en la elaboración del bronce y fósforo bronce. La aleación de niobio estaño es empleada en la elaboración de imanes superconductores. Las sales de estaño pulverizadas sobre el cristal se emplean para la elaboración de recubrimientos conductivos eléctricamente.

Como curiosidad, algunos compuestos de estaño han sido usados en la elaboración de pinturas en cascos de barcos por su efecto repelente contra la adherencia de elementos marinos tales como lapas o plantas marinas. Actualmente han sido prohibidos en muchos países por sus efectos contra la vida marina debido a su toxicidad. El estaño puro aunque no es un metal excesivamente tóxico, sus compuestos pueden ser peligrosos para ciertos órganos del cuerpo humano por lo que se recomienda un manejo del mismo cuidadoso.



En la naturaleza se encuentra principalmente en su forma óxido de estaño (IV), siendo los principales productores el conocido como cinturón del estaño, compuesto por China, Tailandia e Indonesia. También se encuentra aunque en menor medida en Perú, Bolivia y Brasil. [3]

1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En este trabajo se desarrolla el estudio del depósito de una gota de estaño sobre una superficie sólida metálica fría de acero (a temperatura ambiente) en dos dimensiones, teniendo en cuenta los fenómenos de transmisión del calor (convección, radiación y conducción) que en el proceso de solidificación se producen y la presencia del frente irregular de solidificación.

Para ello se simula el impacto a velocidad normal a la superficie de la gota de estaño en estado líquido. Esta velocidad es lo bastante baja para considerar un depósito de la gota en vez de un impacto sobre la superficie. La gota se encuentra inicialmente a una temperatura de 240° (su punto de fusión se encuentra entorno a los 231°). La superficie metálica se encuentra a una temperatura de 25° , que es la misma que la temperatura del aire ambiente. Así pues quedan definidos los efectos de conducción del calor entre el estaño y la superficie metálica y los efectos de convección y radiación con el aire exterior.

Se mostrarán representaciones de una sección central de la gota transcurridos 12 ms desde que se deposita la misma. Son representaciones axilsimétricas (presentan simetría par respecto al eje y). El modelo computacional representa la gota dividida en celdas con diferentes colores según la temperatura a la que se encuentran y gracias a las cuales se determinará el estado en que se encuentra cada zona de la gota

Para llevar a cabo las simulaciones primeramente se han de definir una serie de parámetros mostrados a continuación y recogidos en la siguiente figura:

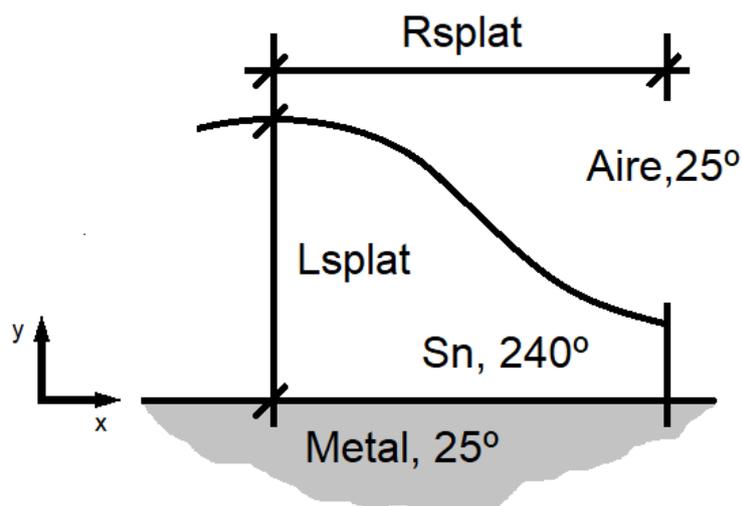


Figura 2. Perfil de la gota con sus principales magnitudes representadas. Condiciones iniciales referentes a temperaturas del aire que envuelve la gota, del estaño depositado y de la superficie metálica.



Para cada simulación se va a variar el parámetro spread (extensión) entre unos valores que oscilan entre 0,8 y 2,5. La función extensión o spread, viene dada por la expresión:

$$Spread = \frac{Rsplat}{Rdrop}$$

El valor Rdrop o radio de la gota inicial se mantiene en un valor fijo y es conocido en todas las simulaciones. Con este valor y el de spread deseado se obtiene el valor Rsplat. Este valor de Rsplat es el que desde ahora y en adelante se conocerá como anchura.

Finalmente conocido Rsplat y con el valor de Rdrop, se calcula el valor de Lsplat según la siguiente expresión. Lsplat será conocido desde ahora y en adelante como la altura de la gota:

$$Lsplat = \frac{4Rdrop^3}{3Rsplat^2}$$

Con estos valores, además de otros parámetros referentes a condiciones iniciales y de contorno y fijado un tiempo de estudio de solidificación, se puede llevar a cabo la resolución del paquete de ecuaciones que dará lugar a la representación de la distribución de temperaturas para cada spread, objeto de este trabajo fin de grado.



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 EL MODELO UNIDIMENSIONAL

Aunque no es el modelo a aplicar en este trabajo, en este apartado se realiza una aproximación del modelo unidimensional de cálculo de la fracción de volumen líquido $\theta(x,y,t)$, que es la que determina con su valor en una determinada posición e instante de tiempo, si la zona estudiada se encuentra en estado líquido, sólido o es la zona del frente de solidificación. Tal y como relata Pasandideh Fard, Mohammad en *Droplet impact and solidification in a thermal spray process* [4], si la fracción de volumen vale uno se estará ante una celda en la que solo hay líquido, si vale cero la celda se encontrará totalmente en estado sólido y si θ está entre cero y uno, en esa celda estará presente el frente de solidificación. La solidificación de una gota de cualquier material sobre un sustrato metálico puede ser obtenida resolviendo la ecuación de la energía, cuya solución permite la determinación del frente de solidificación y el estado de las diferentes zonas de la gota.

El modelo unidimensional asume dos hechos importantes. El primero, es que el proceso de solidificación ocurre según un frente de solidificación en el que las fases están separadas por una línea isoterma y el segundo, que existe una dirección principal de flujo de calor en la mayor parte del dominio físico, lo que hace que se pueda realizar una aproximación unidimensional de transferencia de calor en cada instante.

Pasandideh establece que bajo estas hipótesis, la solidificación de la gota se reduce a un movimiento unidimensional de la interfaz líquido-sólido. El movimiento de esta interfaz puede ser aproximado según el problema de Stefan (1890), problema con condición de contorno para una ecuación en derivadas parciales adaptado al caso en que la frontera de cambio de fase no se mantiene fija, sino que se desplaza en el tiempo.

Como antes se ha comentado, lo que hace que se pueda realizar una aproximación unidimensional es que exista una dirección principal de flujo de calor. Pasandideh asume que el gradiente de temperatura es mucho más grande en la dirección axial que en la radial, por lo que se puede aplicar el modelo unidimensional. Además establece que: el movimiento del fluido (en este caso, estaño líquido) es laminar e incompresible, sistema axilimétrico de coordenadas, depósito vertical de la gota sobre el sustrato y calores por convección y radiación despreciables. Respecto a la superficie del sustrato se establece que es lisa, homogénea e isotrópica, evitando que haya resistencias adicionales de calor entre la base de la gota y el sustrato. A continuación se muestra un esquema de la gota con la geometría antes descrita:

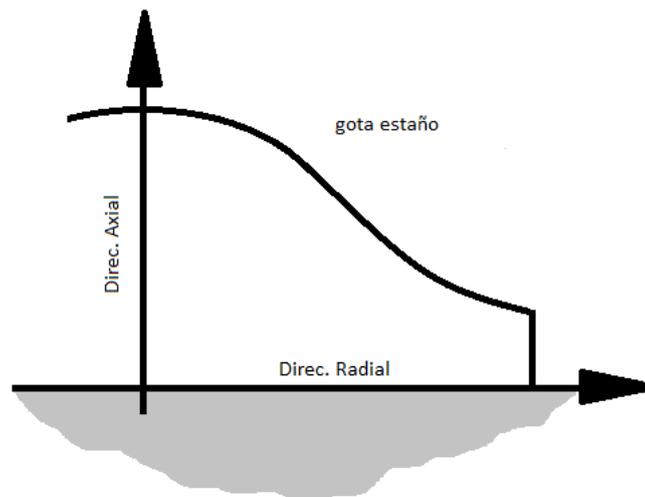


Figura 3. Representación del perfil de la sección de la gota mostrando la disposición de los ejes y su denominación. La dirección axial se corresponderá con el eje y y la radial con el eje x de ahora en adelante.

A continuación, se plantea el problema de solidificación de Stefan, en el que se presentan las ecuaciones y las condiciones iniciales y de contorno. La resolución de las ecuaciones de la energía simplificadas permite determinar explícitamente la posición del frente de solidificación en cualquier instante, lo cual permitirá calcular la fracción de volumen θ .

2.1.1 ECUACIONES DE LA ENERGÍA SIMPLIFICADAS

A continuación se muestran las tres ecuaciones de la energía que definen el problema de conducción de calor. Se denota a la fase líquida con índice l, la fase sólida con s y el sustrato con w. Así pues se tienen las tres zonas del dominio físico en que se aplican las ecuaciones. Estas quedan escritas de la siguiente forma:

$$\frac{\partial T_l}{\partial t} = \alpha_l \frac{\partial^2 T_l}{\partial y^2}, \quad y > \delta(t)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2}, \quad 0 \leq y \leq \delta(t)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \alpha_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial y^2}, \quad y < 0$$

Ecuación 1. Ecuaciones de conducción del calor unidimensionales. Expresiones dadas según la posición en el eje vertical y.

Donde T y α son la temperatura y el término de difusividad térmica, respectivamente y $\delta(t)$ es el espesor de la capa que ha solidificado en el instante t. A continuación se representa un esquema del frente de solidificación de la gota con parte ya solidificada de la misma y parte líquida en la zona superior. Se puede observar como el frente de solidificación avanza en dirección vertical desde la base del sustrato.[4]

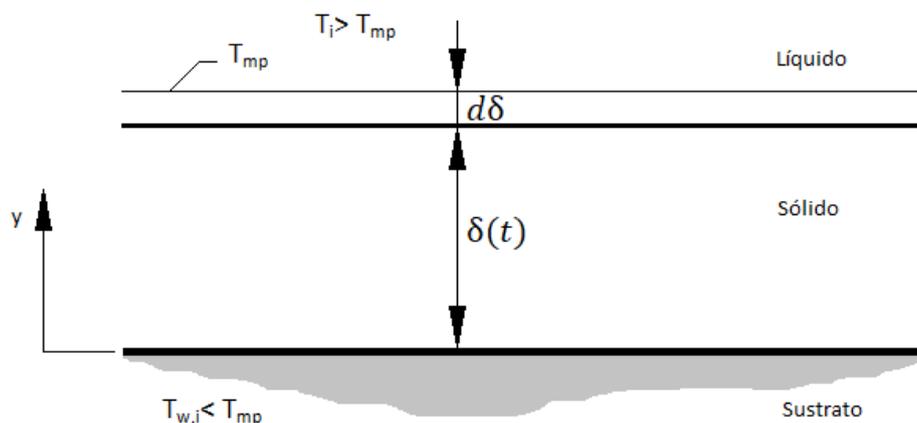


Figura 4. Representación del frente de solidificación bidimensional, con las temperaturas correspondientes a cada zona. Donde $T_{w,i}$ hace referencia a la temperatura superficial del sustrato, que es menor que la temperatura de fusión del estaño, T_{mp} . Por otra parte, T_i es la temperatura de la gota, que se encuentra en la zona líquida por ser mayor de T_{mp} . Finalmente también quedan representadas cada zona de estudio: sustrato, zona solidificada, de longitud δ y que depende del tiempo, la interfase sólido-líquido, de longitud $d\delta$ y la zona líquida. Reproducción de la imagen aparecida en [4].

2.1.2 CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO DEL PROBLEMA UNIDIMENSIONAL

Las condiciones de contorno y las condiciones iniciales para la colección de ecuaciones son:

$$y \rightarrow 0, \quad T_w = T_{w,i} < T_{mp}; \quad y \rightarrow \infty, \quad T_l = T_i > T_{mp}$$

$$t = 0, \quad T_l = T_i; \quad T_w = T_{w,i}$$

Ecuación 2. Condiciones de contorno e iniciales para el problema de conducción de calor unidimensional.

dónde T_i y $T_{w,i}$ son la temperatura de la gota y la superficie metálica, respectivamente, justo antes del depósito de la misma, y T_{mp} representa el punto de fusión del estaño.

Las anteriores son las condiciones iniciales y de contorno principales, pero es necesario establecer otras adicionales en distintas zonas del esquema presentado en la figura 4. En la interfaz líquido-sólido (frente de solidificación) hay otras dos condiciones de contorno por igualdad de temperatura y el balance de conducción de calor dadas por:

$$y = \delta(t), \quad T_l = T_s = T_{mp}; \quad k_l \frac{\partial T_l}{\partial y} + \rho_s H_f \frac{\partial \delta}{\partial t} = k_s \frac{\partial T_s}{\partial y}$$

Ecuación 3. Condiciones de contorno en la interfaz sólido líquido. Balance de conducción aplicado en dicha zona.

Dónde H_f es el calor latente de fusión. De forma similar hay dos condiciones más de contorno en la interfaz sólido-sustrato:

$$y = 0, \quad T_s = T_w; \quad k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = k_w \frac{\partial T_w}{\partial y}$$

Ecuación 4. Condiciones de contorno aplicadas en la interfaz superficie metálica- zona solidificada. Balance de calor por conducción aplicado en dicha zona.

Esta expresión anterior es válida cuando la resistencia térmica de contacto con el sustrato no es considerada, en caso contrario, varía, aunque no se va a profundizar en este aspecto. Queda así planteado el problema de conducción unidimensional cuya resolución conduce a la determinación del frente de solidificación y distribución de temperaturas y finalmente a la fracción de volumen, sin profundizar en más detalles, puesto que este modelo como se ha dicho al principio del apartado no es el aplicado al trabajo. Sirva como un anticipo o acercamiento al problema de solidificación de metales sobre un sustrato también metálico. [4].

2.2 SOLIDIFICACIÓN EN DOS DIMENSIONES

En el apartado anterior, se expuso un modelo de solidificación unidimensional para obtener el estado de las distintas partes de la gota una vez se había depositado la misma sobre el sustrato y se extendía sobre la superficie metálica. Sin embargo, este modelo no se ha aplicado a este trabajo, pues como expone Pasandideh Fard, Mohammad en *Droplet impact and solidification in a thermal spray process* [5], el modelo unidimensional no es aplicable a casos en los cuales la transmisión de calor por convección durante la extensión de la gota sobre el sustrato es significativa. Además, este modelo también desprecia el calor por conducción dentro de la propia gota en dirección radial durante el depósito y su posterior extensión tal y como se mencionó en el apartado anterior.

Lo que en realidad se produce en este problema es que la gota de estaño se deposita a una temperatura inicial de 240°C sobre una superficie de acero a 25°C y en unas condiciones de aire exterior también a 25°C . Justo tras el depósito de la gota, la forma de transmisión de calor dominante es la conducción desde la misma al sustrato ($Q_{\text{cond. 2}}$). En instantes posteriores, conforme la gota se extiende sobre la superficie, la convección y radiación con el fluido aire ($Q_{\text{conv y rad}}$) y la conducción a lo largo de la dirección de expansión en el propio estaño ($Q_{\text{cond. 1}}$) y ya en menor medida la conducción con el sustrato ($Q_{\text{cond. 2}}$) son importantes y en la mayoría de casos dominan la transferencia de calor del proceso. Por otra parte, se ha de tener en cuenta el calor latente, que es un problema de transmisión del calor asociado al cambio de fase ($Q_{\text{latente c.f.}}$). A continuación se representan los distintos calores que intervienen en el proceso:

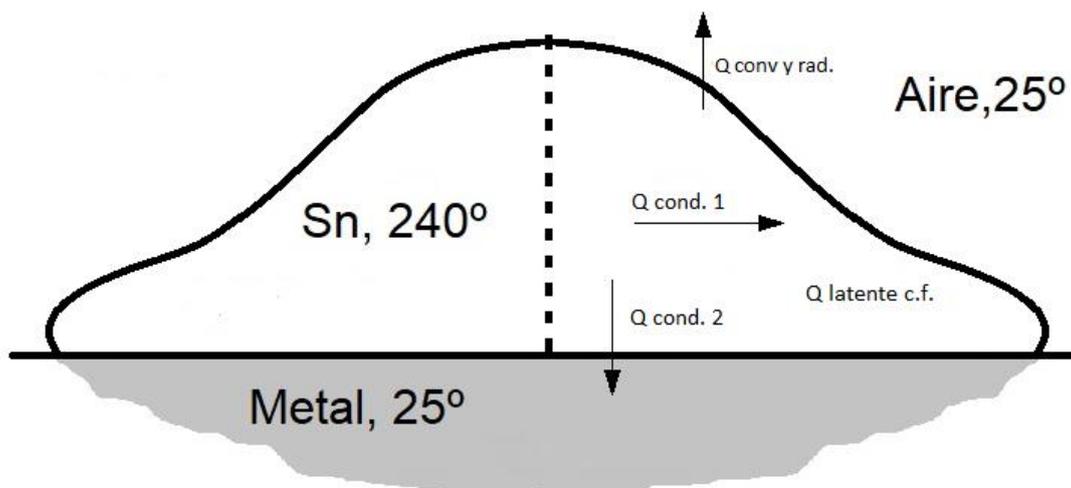


Figura 5. Sección de la gota. Calores que intervienen en su proceso de solidificación y sus direcciones. Q convección y radiación intercambiado con el aire exterior, Q conducción 1 transmitido a lo largo de la dirección radial durante la solidificación, Q conducción 2 transmitido desde la gota a la superficie metálica y Q latente de cambio estado en el interior de la gota.



Al igual que en el caso unidimensional, para obtener una solución en el caso bidimensional hay que resolver la ecuación de la energía. Pasandideh se sirve del método de la entalpía desarrollado por Voller (1985), por el cual escribe la parte transitoria de la ecuación de la energía en términos de la entalpía en vez de temperatura. Se usará el método de entalpía con la formulación de Voller para tratar el cambio de fase durante el depósito de la gota en el sustrato pues esta formulación identifica la posición del frente de solidificación y utiliza esta información para mejorar la exactitud de la solución frente a otros métodos. La solución de esta formulación incluye la distribución de temperaturas en todo el material y la posición de la interfaz líquido sólido. La información de la posición de la interfaz líquido-sólido posteriormente será usada para determinar la fracción de volumen θ al igual que antes. Destacar que en el caso de este trabajo, los resultados que se obtendrán de las distintas simulaciones, serán únicamente las distribuciones de temperaturas en la sección transversal de la gota y la superficie metálica y a partir de ellas y conociendo el punto de fusión del estaño, se determinará el estado en cada zona para cada caso. Por tanto este apartado se ciñe a la presentación de las ecuaciones de la energía y las condiciones iniciales y de contorno que rigen el problema, al igual que en el caso unidimensional.

2.2.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Para obtener una solución correcta al problema planteado, es necesario tener en cuenta las condiciones de contorno que se han de aplicar. Se va a obtener una representación de la sección de la gota sobre la superficie metálica y por tanto se han de incluir todas las condiciones de las zonas que forman parte del problema. Las condiciones de contorno a aplicar se dan en la superficie libre de la gota, la interfaz líquido-sólido y la interfaz gota-superficie metálica. A continuación se muestra un esquema de la gota en la figura 6 con las zonas de contorno anteriormente nombradas marcadas en amarillo, rojo y azul respectivamente.

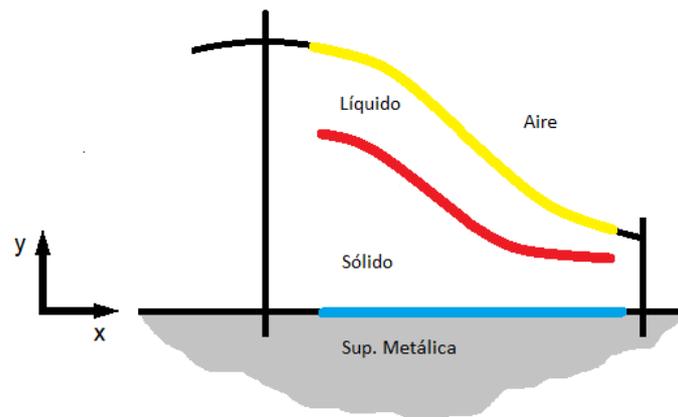


Figura 6. Representación de la sección de la mitad de la gota con las zonas donde es necesaria la aplicación de las condiciones de contorno. En amarillo, la superficie libre de la gota. En rojo, la interfaz líquido-sólido o frente de solidificación. En azul, la interfaz superficie metálica-base la gota.

En esta parte se va a desarrollar un método axilsimétrico de entalpía para el dominio físico de la gota (líquido, sólido y zonas de interfase) y posteriormente un modelo de transmisión del calor por conducción axilsimétrico para la superficie metálica. Una vez las ecuaciones de la energía queden definidas para la gota y la superficie del sustrato, se establecerán las condiciones iniciales y de contorno a aplicar al problema. Seguidamente se muestra un diagrama esquemático de la gota y el sustrato justo en el momento del depósito de la gota ($t=0$):

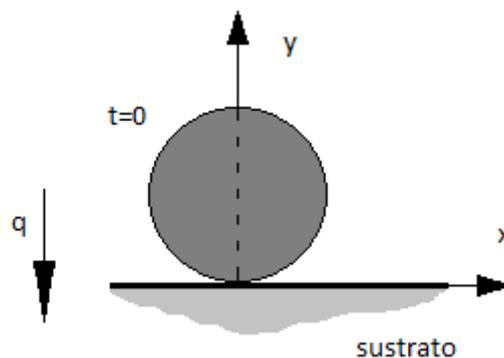


Figura 7. Disposición de la gota en el instante inicial sobre la superficie metálica. Dirección de transmisión del calor por conducción desde la gota a la superficie metálica. Reproducción de la imagen aparecida en [5].

2.2.2 ECUACIÓN DE LA ENERGÍA APLICADA EN LA GOTA

Pasandideh establece que las propiedades físicas y químicas son asumidas como constantes pero con diferentes valores en cada fase. Se desprecia la disipación viscosa en la ecuación de la energía. Utilizando estas simplificaciones, para el sistema de ejes coordenados axilimétricos se tiene la ecuación final de la energía empleada en el problema:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + u \frac{\partial}{\partial x}(\rho h) + v \frac{\partial}{\partial y}(\rho h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{k}{x} \frac{\partial T}{\partial x}$$

donde $k = k_s$, fase sólida; $k = k_m$, interfase; $k = k_l$, fase líquida

Ecuación 5. Expresión de la ecuación de la energía utilizada del modelo bidimensional.

Donde h es la entalpía, T la temperatura y k , la constante de conductividad térmica del material. Los subíndices s , l , m se refieren a sólido, líquido e interfase líquido-sólido respectivamente. Debido a la existencia de dos fases, líquido y sólido, en el dominio de cálculo, la situación presenta un problema de transmisión de calor complejo. Por otra parte, como se puede observar en la ecuación de la energía (5), ésta está escrita en términos de dos variables dependientes, temperatura T y entalpía h . Por ello se va aplicar el método de Voller antes citado para dejarla en función de la entalpía h solamente [5].

2.2.3 MODELO DE TRANSFORMACIÓN DE LA ENTALPÍA

A continuación se resume brevemente el proceso de transformación de la entalpía tal y como Pasandideh lo recoge en *Droplet impact and solidification in a thermal spray process*. Puesto que lo importante es la obtención de la ecuación final para aplicar en la gota y no el proceso para llegar a ella en sí, se realizará un breve resumen. En termodinámica, la temperatura está relacionada con la entalpía con la ecuación de estado:

$$\frac{dh}{dT} = c(T)$$

Ecuación 6. Ecuación de estado que relaciona entalpía y temperatura.

Donde c es el coeficiente de calor específico del material. Se puede definir una variación entre la entalpía total (sensible más latente) y temperatura, que se basa en el calor latente existente durante el cambio de fase del material. Esta variación tiene la forma de una función escalón para solidificación isoterma, tal y como se muestra en la figura 8. Se puede concluir que para un material en cambio de fase la entalpía es una función de la temperatura siendo los calores específicos constantes en cada fase.

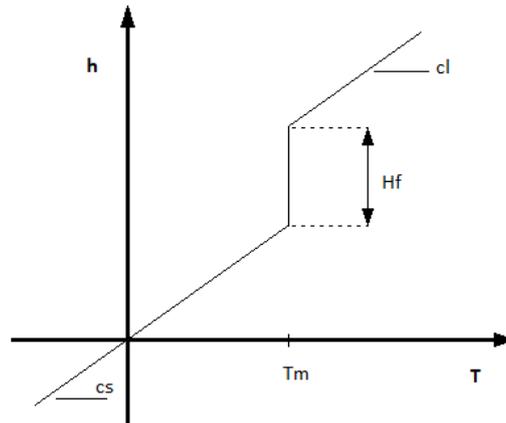


Figura 8. Relación entre entalpía y temperatura en un cambio de fase. Los calores específicos en cada fase son constantes. H_f representa el calor latente de fusión y T_m la temperatura o punto de fusión del material tratado. Reproducción de la imagen aparecida en [5].

La temperatura T para este caso viene dada por:

$$T = \frac{h}{c_s}, \quad h \leq c_s T_m \quad \text{fase sólida}$$

$$T = T_m, \quad c_s T_m < h < c_s T_m + H_f \quad \text{interfase}$$

$$T = \frac{(h - H_f)}{c_l}, \quad h \geq c_s T_m + H_f \quad \text{fase líquida}$$

Ecuación 7. Valores de temperatura en las fases sólida, líquida y en el frente de solidificación, con los valores de los rangos de entalpía que llevan aparejados en cada zona.

Donde H_f es el calor latente de fusión. A continuación, se establece un nuevo sistema coordenado, en el que $h=0$ corresponde al cambio de fase del material en su estado sólido a la temperatura T_m . Como consecuencia de ello, la expresión anterior puede ponerse como:



$$T = T_m + \frac{h}{c_s}, \quad h \leq 0 \quad \text{fase sólida}$$

$$T = T_m, \quad 0 < h < H_f \quad \text{interfase}$$

$$T = T_m + \frac{(h - H_f)}{c_l}, \quad h \geq H_f \quad \text{fase líquida}$$

Ecuación 8. Las nuevas expresiones de la temperatura y valores de h para el nuevo sistema de ejes coordenados.

Ahora, Pasandideh introduce la expresión de la temperatura de Kirchoff, T^* :

$$T^* = \int_{T_m}^T k(T) dT$$

Ecuación 9. Expresión de la temperatura de Kirchoff. T_m es temperatura de fusión del material, T la temperatura y $k(T)$ el valor de la constante de conductividad a la temperatura dada.

Dónde T^* es conocido como como calor de conducción potencial. K es el valor de la constante de conducción del calor para la temperatura T . Integrando esta sencilla expresión para las diferentes fases e introduciéndola en la ecuación 8 se tiene:

$$T^* = \frac{k_s h}{c_s}, \quad h \leq 0$$

$$T^* = 0, \quad 0 < h < H_f$$

$$T^* = \frac{k_l (h - H_f)}{c_l}, \quad h \geq H_f$$

Ecuación 10. Expresión de los valores de temperatura en cada zona de la gota con los valores de h que acarrearán, pero puestos en función de la expresión de T^* .

Por tanto, la ecuación 5 de la energía puede ser escrita en términos de T^* como sigue:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + u \frac{\partial}{\partial x}(\rho h) + v \frac{\partial}{\partial y}(\rho h) = \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T^*}{\partial x}$$

Ecuación 11. Ecuación de la energía 5, escrita en función de T^* .

El último paso a llevar a cabo consiste en ver que en la ecuación 10, T^* es una función lineal de h como:

$$T^* = \Gamma(h)h + S(h)$$

Ecuación 12. Expresión de T^ como función lineal de h , como se puede apreciar en la ecuación 10.*

Donde Γ y S son función de h . Sustituyendo la ecuación 12 en la ecuación 11 finalmente se tendrá la expresión de la ecuación de la energía a aplicar en la gota y los valores de Γ y S para las fases sólida, líquida e interfase. Como se puede observar, la ecuación queda totalmente escrita sólo en términos de entalpía:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + u \frac{\partial}{\partial x}(\rho h) + v \frac{\partial}{\partial y}(\rho h) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\Gamma}{x} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial S}{\partial x} \right)$$

Ecuación 13. Ecuación de la energía (9) en función de T^ escrita como función lineal de h .*

dónde:

$$\Gamma = \frac{k_s}{c_s}, \quad S = 0, \quad h \leq 0 \quad \text{fase sólida}$$

$$\Gamma = 0, \quad S = 0, \quad 0 < h < H_f \quad \text{interfase}$$

$$\Gamma = \frac{k_l}{c_l}, \quad S = \frac{-H_f k_l}{c_l}, \quad h \geq H_f \quad \text{fase líquida}$$

Ecuación 14. Valores de Γ y S y sus correspondientes valores de h en las zonas líquida, sólida e interfase o frente de solidificación en el material.

2.2.4 ECUACIÓN DE LA ENERGÍA APLICADA EN EL SUSTRATO

A continuación se muestra la expresión de la ecuación de la energía aplicada en el sustrato. Se considera el sustrato como una pared sólida, que ha de tener un punto de fusión mayor al material de la gota. La ecuación de la energía se reduce a la ecuación de transmisión del calor por conducción la cual puede ser escrita para un sistema de coordenadas axilimétrico. El subíndice w hace referencia al sustrato y la dirección y_w es opuesta a la dirección y que muestra la figura 7 del momento en que se deposita la gota [5]:

$$\rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y_w} \left(k_w \frac{\partial T_w}{\partial y_w} \right) + \frac{k_w}{x} \frac{\partial T_w}{\partial x}$$

Ecuación 15. Ecuación de la energía aplicada en el la superficie del sustrato (superficie metálica). Los subíndices w hacen referencia a la superficie del mismo.

2.2.5 CONDICIONES DE CONTORNO EN LA GOTA. LÍMITES Y CONTORNOS DEL ESTUDIO.

Para la ecuación de energía aplicada a la gota, Pasandideh expresa la temperatura T en términos de la entalpía h y las funciones Γ y S . Si se relacionan las ecuaciones 8 y 14 se llega a:

$$T = T_m + \frac{1}{k} (h\Gamma + S)$$

dónde:

$$k = k_s, \quad h \leq 0 \quad \text{fase sólida}$$

$$k = k_m, \quad 0 < h < H_f \quad \text{interfase}$$

$$k = k_l, \quad h \geq H_f \quad \text{fase líquida}$$

Ecuación 16. Expresión de la temperatura en la gota con los valores de k correspondientes a cada zona de la misma: fase sólida, fase líquida e interfase.

Este problema es simétrico con respecto al eje y como se muestra en la figura 7, y por ello solo se considerará el estudio de “media gota”. El límite izquierdo, esto es, aquel por el que pasa el eje y de simetría se trata como una pared adiabática. La superficie superior del sustrato se trata de dos formas diferentes. Por un lado, el área no mojada por la gota tiene condiciones de contorno adiabáticas. Por otro lado, el área mojada del sustrato no puede ser considerada como adiabática, pues como ya se comentó al principio del capítulo, es entre la gota y el sustrato bajo ella donde se produce un importante intercambio de calor por conducción. El resto de límites o contornos como por ejemplo el derecho carecen de interés en el estudio y se considerarán paredes adiabáticas.

De tal forma, según lo comentado, en el contorno izquierdo se tendrá:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad \text{en el contorno izquierdo}$$

Utilizando Γ y S , que son funciones de h basadas en la ecuación 14, la condición escrita arriba resultará:

$$\frac{\partial h}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad \text{en el contorno izquierdo}$$

Para el contorno de la base, superficie metálica, en el área no mojada, de igual forma se tiene:

$$\frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad \text{y en consecuencia:} \quad \frac{\partial \Gamma}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial y} = 0$$

En la región mojada del contorno de la base de la gota, habrá una interacción de calor con el sustrato. Si q es la cantidad de calor transferida desde la gota al sustrato por unidad de área como se muestra en la figura 7, entonces la condición de contorno puede ser escrita como:

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = q$$

Ecuación 17. Transmisión de calor por conducción desde la parte de la gota en contacto con la superficie metálica hacia la misma. Sentido positivo de la expresión: la dirección de transmisión del calor es de la gota al sustrato.

dónde la dirección positiva de q es asumida de tal forma que éste fluye desde la gota al sustrato.

2.2.6 CONDICIONES DE CONTORNO SUPERFICIE LIBRE DE LA GOTA Y SUSTRATO

En la superficie libre de la gota en cualquier fase, usamos una condición de frontera adiabática. Esta condición debe ser suplementada con la especificación de la entalpía h y las funciones Γ y S inmediatamente exteriores a la superficie, donde estos valores son necesarios en las aproximaciones por diferencias finitas para puntos exteriores a la superficie.

Para la ecuación de la energía aplicada al sustrato se aplican las siguientes condiciones. La frontera izquierda, esto es, el eje y de simetría mostrado en la figura 7, debería ser tratada como una frontera adiabática. De forma similar al área no mojada de la frontera superior sobre el sustrato se tiene una condición adiabática: $dT_w/dy_w=0$. En el área mojada de la frontera superior sobre el sustrato se tiene una interacción del calor con la gota. Esta condición por lo tanto puede ser escrita de forma similar a la ecuación 17 como [5]:

$$-k_w \frac{\partial T_w}{\partial y_w} = q$$

Ecuación 18. Al igual que en la ecuación 17, transmisión de calor de la gota al sustrato, hay una expresión de transmisión del calor por conducción para el sustrato. En este caso el calor recibido por la superficie metálica tiene signo negativo para que exista coherencia con lo considerado para la ecuación 17.



dónde la dirección positiva de q (gota a sustrato) ahora es en la dirección positiva de y_w en la región del sustrato como se muestra en la figura 7.

2.2.7 CONDICIONES INICIALES GOTA Y SUSTRATO

Las condiciones iniciales son los valores iniciales de h (y en consecuencia: Γ , S y k) en el instante del depósito de la gota, que se asume como tiempo $t=0$. Para el caso de estudio, la temperatura de la gota se considera uniforme y por encima del punto de fusión, estando la gota completamente en fase líquida en el momento de su depósito. En este trabajo se ha considerado una temperatura inicial de 240°C .

Las condiciones iniciales en el sustrato pueden ser alguna distribución de temperaturas en el instante del depósito ($t=0$). Para los casos considerados en este trabajo, se asume una temperatura uniforme en todo el sustrato como la condición inicial en el mismo, en este caso igual a 25° .

2.2.8 INTERFAZ SUSTRATO-GOTA

La interacción de calor q relaciona las soluciones de la ecuación de la energía aplicada al sustrato y la aplicada a la gota. Como ya se ha dicho, la región no mojada no realiza intercambio de calor, pero en la mojada se tiene:

$$q = \frac{\delta T}{R_t}$$

Ecuación 19. Transmisión de calor para la interfaz gota-sustrato en la región mojada por la gota.

Donde δT es la diferencia de temperatura entre las dos celdas adyacentes, una sobre la superficie del sustrato en la región de la gota y otra bajo la superficie del sustrato en la región del mismo. R_t es la resistencia térmica total por unidad de área que existe entre las dos celdas. [5]

En el capítulo 2 de este trabajo se ha expuesto como abordar el modelo unidimensional y bidimensional de solidificación de una gota de metal estaño basándose en lo recogido por Pasandideh Fard en su ya citado trabajo, que sirve de inspiración para la elaboración de éste. Aunque por ejemplo en la elaboración del código que da como resultados la distribución de temperaturas que se muestran en el capítulo 4 se tienen en cuenta efectos de transmisión de calor como la radiación que este autor no considera, sirva este capítulo



para entender los fundamentos básicos en los que se basa el proceso de solidificación estudiado y como se obtienen los resultados que se proporcionan más adelante en este trabajo.



3. FUNDAMENTOS PRÁCTICOS



3.1 EL MÉTODO DE REDES

La utilidad del método de simulación por redes es la del estudio de cualquier proceso que puede definirse mediante algún proceso matemático. Consiste en un procedimiento que se divide en dos partes bien diferenciadas. Primero se elabora lo que se llama un modelo en red o circuito equivalente del proceso que se esté estudiando. En el caso de este trabajo, el proceso es el de transmisión de calor en sus diferentes formas en la gota y sus alrededores como el aire que le rodea y el sustrato. La segunda parte del procedimiento consiste en la simulación del proceso a través de ese modelo en red y posterior obtención de su solución con un programa de resolución de circuitos eléctricos, como es Ngspice[®], el empleado en este trabajo.

Partiendo del conjunto de ecuaciones en derivadas parciales que definen el problema, y discretizando la variable espacial se establece la red eléctrica equivalente. Además de en la transmisión del calor, este método ha sido aplicado en diferentes campos como puede ser por ejemplo el de las reacciones químicas, dándose por hecho la equivalencia del modelo de red con el proceso a estudiar cuando las ecuaciones del modelo matemático discretizado y las ecuaciones del modelo en red para un elemento de volumen correspondiente a variables análogas coinciden.

Los elementos de volumen se obtienen reticulando el espacio en celdas elementales. En este trabajo, media sección transversal central de la gota ha sido dividida en un determinado número de celdas y aplicando las ecuaciones diferenciales a éstas, se obtiene un conjunto de ecuaciones diferenciales en diferencias finitas. Una vez se ha establecido la correspondencia entre variables del proceso de estudio y las eléctricas, los resultados de la simulación adquieren sentido y se pueden extrapolar al caso del proceso que se está modelando. La disposición de celdas según la geometría del problema configura el modelo en red correspondiente a todo el medio finito. El tamaño de las celdas y la cantidad de ellas son lo que hacen que un modelo sea más fiel o menos al proceso real. [6]

3.2 MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS EN TRANSMISIÓN DEL CALOR

En este apartado, se realiza una breve introducción al método de diferencias finitas en transmisión del calor, que sirve de ejemplo de lo aplicado en este trabajo. Tal y como relatan Madrid García, C. Nicolás y Navarro Andreu, José Ramón en su libro *Transmisión del calor* [7], este es un método útil cuando se tiene un problema de conducción de calor en dos o tres dimensiones y se quiere hallar la temperatura del cuerpo en cualquier punto y en cualquier instante. Si el problema resulta demasiado extenso o complejo, se usa el método de aproximación numérica de diferencias finitas, muy extendido a casos como son el de paredes, barras, aletas, etc.

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, en el método numérico de diferencias finitas se considera al cuerpo sólido constituido por elementos de volumen muy pequeño pero finito, representando una aproximación de los elementos diferenciales usados en la formulación analítica. Al hacer el tamaño de estos elementos cada vez más pequeños, la diferencia en los resultados obtenidos usando el modelo de diferencias finitas y el modelo diferencial disminuye. Así se consigue la aproximación. El centro de estos elementos recibe el nombre de nudo y la temperatura de éste representa a la del elemento completo.

En el caso de la conducción que se da en el interior de la gota y en la transmisión de calor de la gota al sustrato, lo que se haría es un análisis de conducción bidimensional en el que se aplica el principio de conservación de la energía a un elemento de profundidad unitaria $\Delta z=1$; de anchura Δx y altura Δy , como el que se muestra en la siguiente figura [7]:

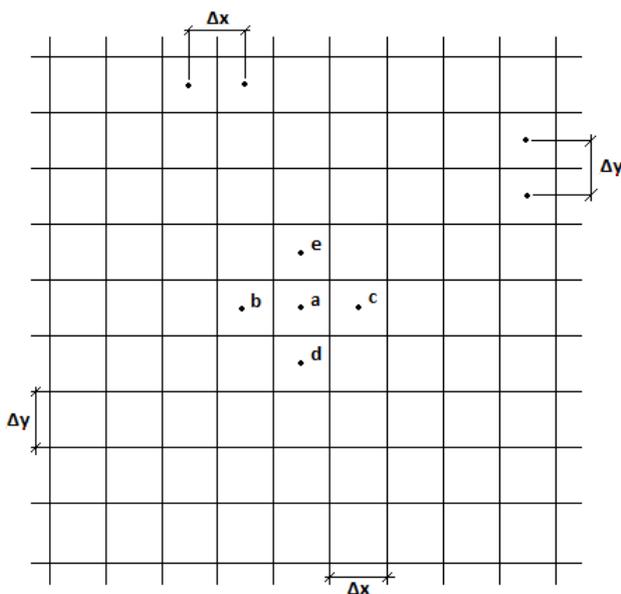


Figura 9. Red de nodos en que se divide el cuerpo a estudiar. En este caso se trata de una red bidimensional con cuadrícula de lados Δx y Δy y espesor uno, que es como se aplicará en el problema que se estudia en este trabajo. Se presenta la situación de los nodos a, b, c, d y e cualquiera. Reproducción de la figura aparecida en [7].

Si se aplica un balance de energía al nudo interior a , por el que la suma de los flujos de calor entre los diferentes nudos que le rodean es cero, y planteando las ecuaciones de calor por conducción entre los diferentes nudos en las que intervienen las temperaturas de cada nudo y un valor R , función de la conductividad del material y la geometría del problema, esto es, distancia entre nudos y superficie de contacto entre elementos de volumen, quedan planteadas las ecuaciones a aplicar en el siguiente circuito, siguiendo con la geometría empezada en la página anterior:

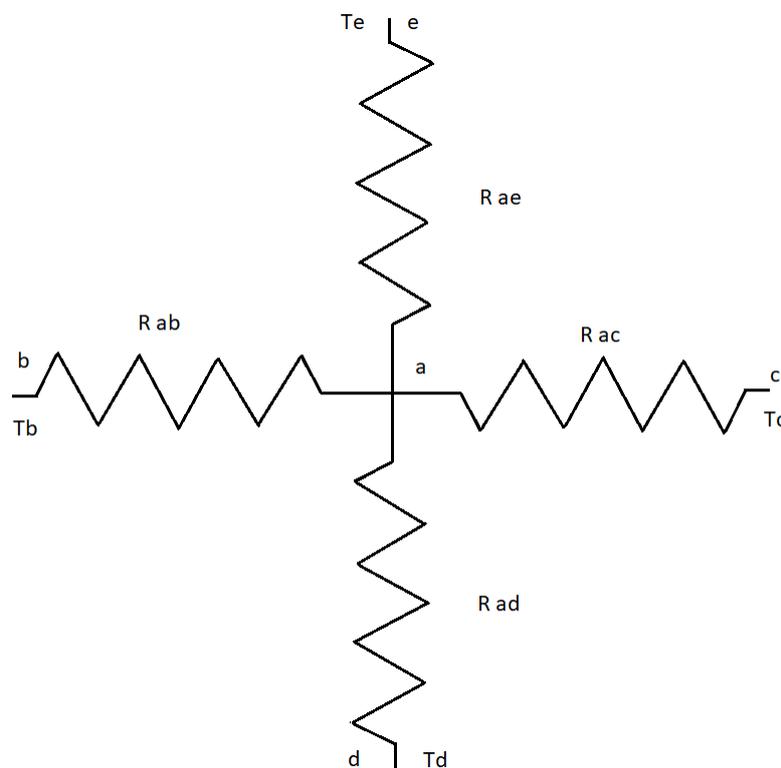


Figura 10. *Equivalente eléctrico del nudo centrado en el punto a planteado anteriormente. Cada extremo con su temperatura y entre el centro y cada extremo la resistencia correspondiente, al igual que cualquier circuito eléctrico al que se aplica la ley de Kirchoff. Reproducción de la imagen aparecida en [7].*

Dónde el calor q de un nudo a otro estaría representado por la intensidad entre dos puntos de ese circuito. La diferencia de temperaturas entre dos nudos, sería la diferencia de voltaje entre dos puntos del circuito representado y finalmente la resistencia térmica R , función de la geometría de la red, equivaldría a una de las impedancias del circuito. De esta forma se tiene:



$$q_{ij} = \frac{T_i - T_j}{R_{ij}} \quad \leftrightarrow \quad I = \frac{V_{ij}}{R_{ij}}$$

Ecuación 20. Correspondencia entre la expresión del calor de conducción entre dos elementos de volumen finito en la red y la expresión de la ley de Ohm aplicada al circuito eléctrico equivalente al proceso estudiado.

Por otra parte, también hay que estudiar los bordes de la malla reticulada, esto es, los elementos finitos de espesor que corresponda que tienen una o dos caras en contacto con un fluido exterior. En el caso de este trabajo, se estaría hablando de los límites de la gota (superficie exterior) que están en contacto con el medio exterior, aire a 25°C. En este caso es aire en reposo, presentándose un problema de intercambio de calor en convección no forzada. Se puede aplicar el mismo razonamiento de los circuitos eléctricos antes expuesto pero adaptado al caso convectivo, con una R diferente, según las características del medio que envuelve al sólido.

Finalmente comentar que el método en diferencias finitas también se puede aplicar a problemas en régimen transitorio considerando la expresión en diferencias finitas de la primera derivada de la temperatura respecto al tiempo. De esta forma, una vez conocida la temperatura en puntos distintos separados por un intervalo espacial, deben calcularse las temperaturas en un instante posterior en los mismos puntos, con un incremento finito de tiempo. El tiempo puede ser incrementado sucesivamente y calcular las temperaturas para cada incremento. El problema que nos ocupa consiste en calcular la distribución de temperaturas en la sección de la gota transcurrido un tiempo de 12 ms, es decir, en un instante $t=12$ ms transcurridos desde su depósito. De igual forma que en los casos anteriores, el problema de transmisión de calor se modeliza mediante un circuito eléctrico similar al tratado anteriormente, sólo que ahora se incorpora un condensador cuya constante de tiempo, carga y descarga en función del tiempo, aporta el carácter transitorio del potencial en a, que equivale a la temperatura en el problema de calor. Es el mostrado en la figura 11.

Al final, lo que se consigue aplicando el método de diferencias finitas es un sistema de n ecuaciones con n incógnitas, siendo n el número de nudos considerado en la red que divide al sólido. El resultado del sistema son las temperaturas en cada nudo en el instante deseado, que se resolverá según el método apropiado dependiendo de la cantidad de incógnitas del problema [7].

A continuación se muestra la representación del circuito equivalente para el caso del problema de conducción de calor transitorio.

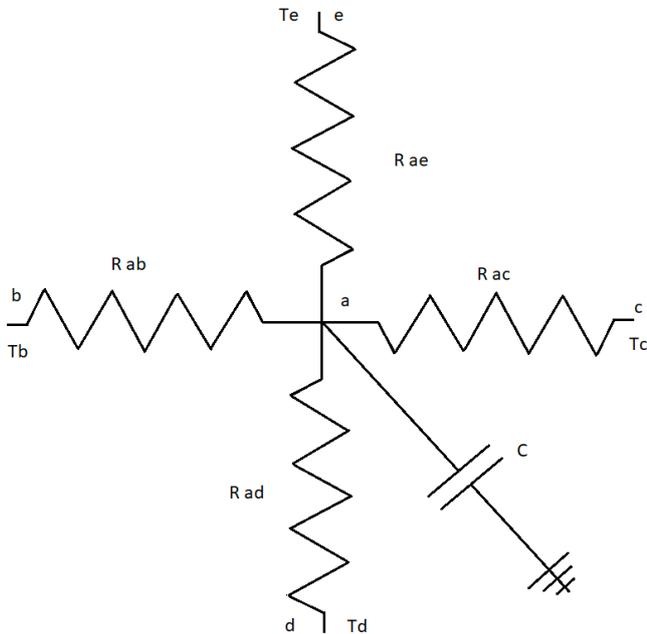


Figura 11. Equivalente eléctrico del nudo centrado en el punto a planteado anteriormente. Cada extremo con su temperatura y entre el centro y cada extremo la resistencia correspondiente, al igual que cualquier circuito eléctrico al que se aplica la ley de Kirchoff. En el caso transitorio se añade al circuito el condensador que aporta carácter temporal al mismo. Reproducción de la imagen aparecida en [7].

3.3 FRAGMENTOS DE CÓDIGO

A continuación se muestran unos fragmentos significativos del código utilizado para la resolución del problema y unas descripciones de los elementos más importantes que en ellos aparecen.

```
% PARÁMETROS GENERALES
%%%
% Reference drop radius
Rdrop=2.1e-3/2;
spread=1; %2.5
Rsplat=spread*Rdrop;           % Tin splat radius
Lsplat=4*Rdrop^3/(3*Rsplat^2); % Tin splat thickness
```

Figura 12. Fragmento de código correspondiente a los parámetros más generales del problema. Valor de Rdrop, valor de spread, que es el que se alterará y expresiones que dan lugar al cálculo de Rsplat y Lsplat.

En este primer fragmento se observan los principales parámetros de tamaño o geometría de la gota. El valor del Rdrop, radio de la gota inicial, que es fijo aparece en primer lugar. Debajo, aparece el spread o extensión de la gota, éste es el valor que se ha variado para cada simulación, desde 0,8 hasta 2,5. Se definen además los valores de Rsplat (anchura) y Lsplat (altura) de la gota ya sobre la superficie mediante sus expresiones correspondientes.

```
% Domain and spatial discretization of the drop (m)
ng=25;           %15; (con 7 funciona) (Pasandideh uses 60 partitions, ng=30)
%delatay=fix(Lsplat/ng);
delatay=Lsplat/ng;
delatay=delatay;
delatay=delatay;
nsy=ng;
nsx=fix(Rsplat/delatay)+1;
```

Figura 13. Valor de ng, número de grids o celdas empleadas para simulación. A mayor número de grids se obtendrán representaciones más exhaustivas aunque ello provocará el aumento del tiempo de simulación.

Aquí se muestra otro de los parámetros importantes. Es el ng o número de grids (celdas). A mayor número de celdas, mayor exactitud a lo largo del espacio de los resultados obtenidos aunque un aumento excesivo de las mismas provoca la ralentización de los tiempos de simulación.



```
% Temperatures
```

```
Ta=25+273; %Ambient Temperature  
Ta4=Ta^4;  
Tl=240+273; % Initial liquid temperature  
Ts=25+273; % Initial solid temperature  
TSOL=231.9+273; % Temperatura de solidificación  
Tmini=Ta; % Initial steel temperature
```

```
% Tin Properties
```

```
rol=6940; % Liquid Density (kg/m3)  
ros=7298.4; % Solid Density (kg/m3)  
Rco=1e-6; % Contact resistance (m²K/W); If spread=2 Rco=1e-6;  
If spread=2.65 Rco=5e-6  
Hcapl=260; % Heat Capacity (J/kgK)  
Hcaps=226; % Heat Capacity (J/kgK)  
Lamdas=63; % Solid conductivity (W/mK)  
Lamdal=32.6; % Liquid conductivity (W/mK)  
Lh=59000; % Fusion latent heat (J/kg)  
hca=10; % Convective heat transfer coefficient (W/m²K) valor  
dado 10  
emis=0.07; % Emissivity
```

Figura 14. Fragmento que corresponde con las condiciones iniciales de temperatura del problema. Temperatura del aire ambiente, temperatura inicial de la gota de estaño y de la superficie metálica. Temperatura de solidificación del estaño. Además se muestran las propiedades físicas más importantes del estaño, que se pueden leer en los comentarios a la derecha del código.

En este fragmento se muestra lo referente a condiciones iniciales, como son la temperatura ambiente, la temperatura inicial del estaño en estado sólido, la temperatura de la superficie metálica o la temperatura de solidificación del estaño. Además se introducen los principales parámetros que caracterizan el estaño densidades, conductividades... en estados sólido y líquido.



4. RESULTADOS



A continuación se presentan los resultados de las simulaciones realizadas. Se han obtenido unas gráficas en las que hay tres ejes coordenados. Se representan las distribuciones de temperaturas para cada spread de forma que se tienen los ejes x e y, que representan la anchura y la altura en metros de la gota respectivamente, y el eje z que sirve para indicar la temperatura en grados Kelvin. Se muestran así las celdas que representan un determinado valor de temperatura. Se muestran diferentes tonalidades de colores que ayudan a identificar las temperaturas de las diferentes zonas.

Para cada valor de spread se muestran tres representaciones. La primera representa la distribución de temperaturas en la gota y en la superficie metálica, dónde se puede apreciar cómo afecta la presencia de la gota sobre la misma. La siguiente figura que se muestra, es una ampliación de la distribución de temperaturas, donde se puede apreciar mejor las dimensiones de la gota y temperaturas de las diferentes zonas. A continuación se realiza un comentario y análisis de cada gota y finalmente en la página siguiente se muestra la representación de la distribución de temperaturas con etiquetas de diferentes celdas que representan las zonas más destacadas de cada gota. De esta forma cada etiqueta muestra el valor de la coordenada x,y,z y así se pueden extraer los diferentes datos de forma exacta que posteriormente serán utilizados para realizar los análisis de los siguientes apartados y conclusiones.

De esta forma y puesto que para los cinco casos estudiados el procedimiento de muestra de resultados será el mismo, se omiten de ahora en adelante las explicaciones de que representa cada gráfica etc, y se pasa directamente al estudio de cada caso, empezando por el de spread 0,8 ya en la página siguiente.

4.1 SIMULACIÓN SPREAD 0.8

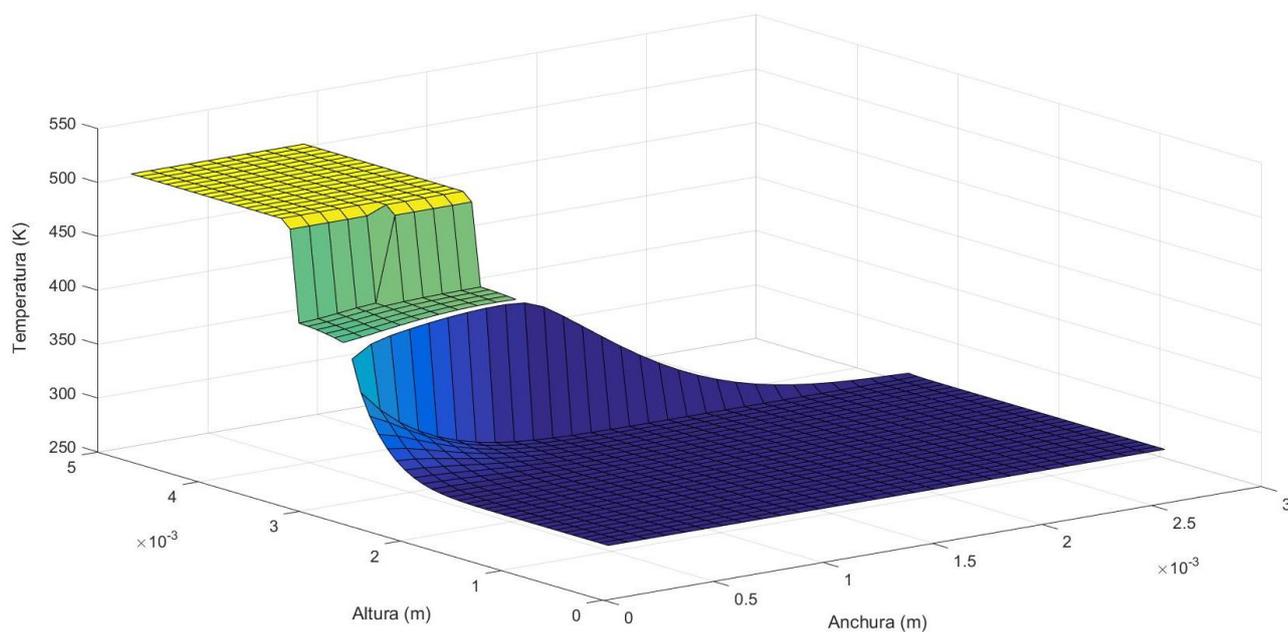


Figura 15. Representación de la distribución de temperaturas en la sección de la gota estudiada y la superficie metálica sobre la que se encuentra para un spread de 0,8 y transcurridos 12 ms desde su depósito. Representación de la parte derecha sobre el eje de simetría y (altura) de la gota. La anchura se corresponde con el eje x del sistema de ejes cartesiano empleado. El eje z muestra los valores de la temperatura.

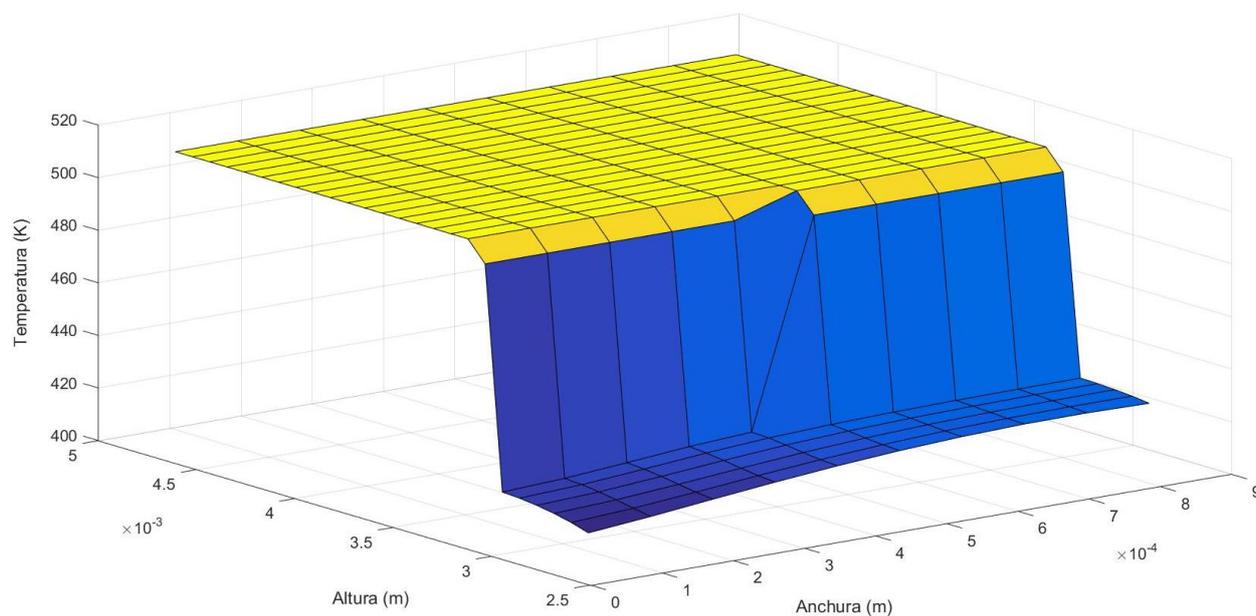


Figura 16. Representación de la distribución de temperaturas en la sección de la gota estudiada únicamente sin la superficie metálica para mejor observación de la misma para un spread de 0,8 y transcurridos 12 ms desde su depósito. Representación de la parte derecha sobre el eje de simetría y (altura) de la gota. La anchura se corresponde con el eje x del sistema de ejes cartesiano empleado. El eje z muestra los valores de la temperatura.



A continuación para cada gota se van a realizar unas observaciones de los resultados obtenidos y una descripción de cada gota obtenida.

En este primer caso para un spread de 0,8 se tiene una gota de forma esbelta, esto es, más alto que ancha. Se puede observar que posee una distribución de temperaturas bastante homogénea, sin picos o discontinuidades grandes. En cuanto a la solidificación, se puede observar como hay una gran extensión de la gota que aún no ha solidificado, lo que quiere decir que hay zonas de la misma que están por encima de los 504,9 K. En total, hay alrededor de un 80% sin solidificar en la gota, teniendo en cuenta el número de celdas totales. Esta zona líquida se encuentra en la zona superior de la gota, y ocupa gran parte de la longitud altura. En cuanto a la longitud anchura, aunque es casi inapreciable, en las zonas en estado sólido, ya se aprecia como las zonas más frías se hallan en el interior de la gota justo en el eje de simetría de la misma.

La variabilidad de temperaturas en la zona en estado líquido es muy pequeña. La máxima temperatura alcanzada en la gota es de 512,9 K. La temperatura mínima en la zona líquida es de 504,9 K, punto de solidificación del estaño. Puesto que la solidificación es a temperatura constante, se aprecia claramente el frente de solidificación de la gota. Observando las temperaturas en dirección radial a diferentes alturas, vemos como éstas varían de forma ascendente desde el centro de la gota hasta el exterior de la misma. Por una parte se puede ver como las temperaturas son casi constantes en la zona líquida. Por otro lado, se puede observar como en las zonas ya solidificadas la subida de temperaturas hacia el exterior es lenta, de apenas unos 10 K. La corta longitud del eje radial sin duda favorece este hecho. La variación de las temperaturas es muy elevada desde el punto de vista del eje axial y paralelos. En muy poca longitud, hay una diferencia de prácticamente 100 K, entre la zona líquida y parte recién solidificada. La tendencia de la gota es que ha empezado a solidificar por la parte central de la base, sobre la superficie metálica y de ahí hacia el exterior y hacia arriba. A continuación se muestra la distribución de temperaturas, de la que se han obtenido los datos anteriormente comentados.

Decir que en este caso y en el resto, la temperatura en la parte superior de la superficie sólida metálica presenta una tendencia que se comentará más adelante y que merece un apartado aparte en este capítulo de resultados del trabajo.

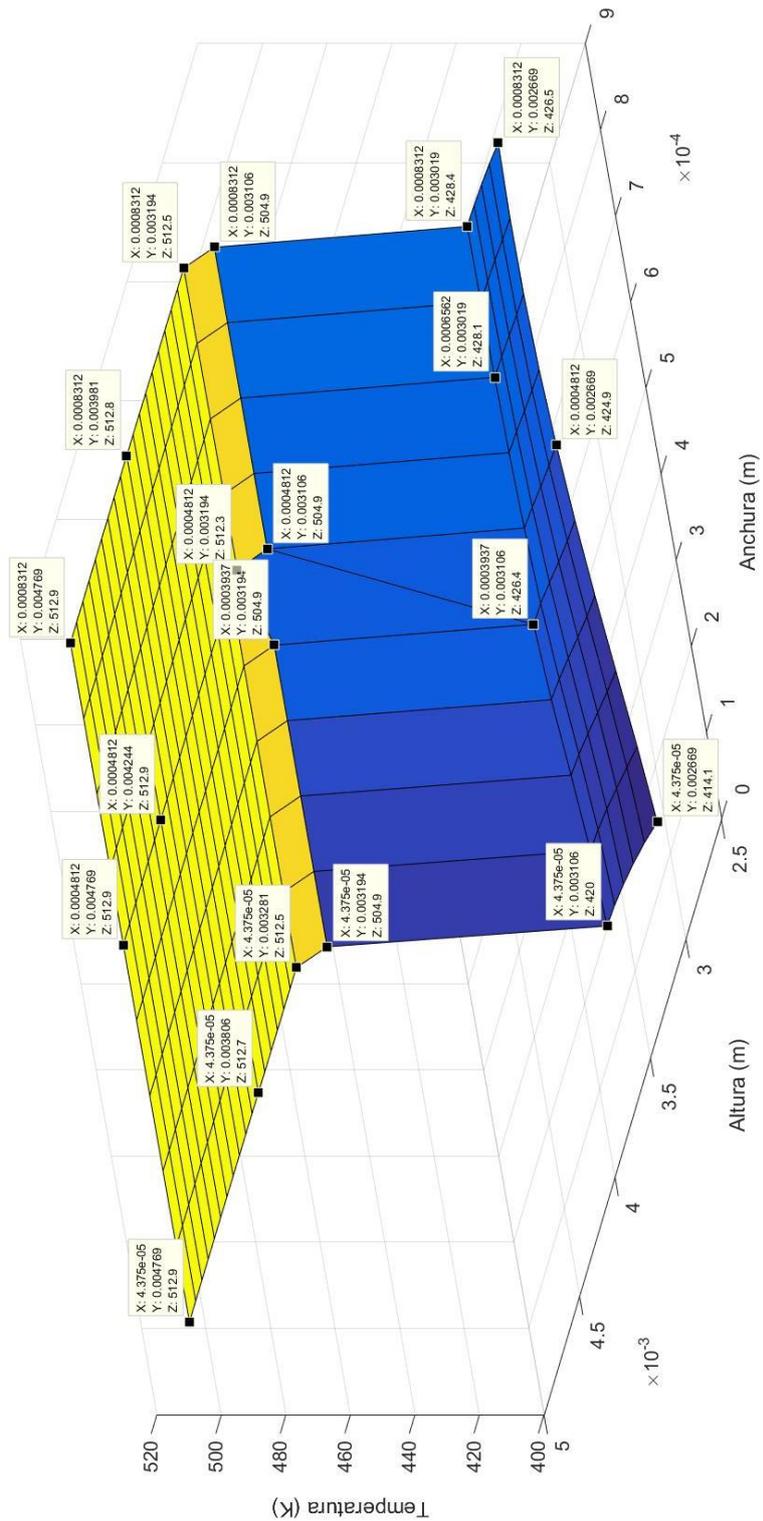


Figura 17. Representación de la distribución de temperaturas en la sección de la gota estudiada únicamente sin la superficie metálica para mejor observación de la misma para un spread de 0,8 y transcurridos 12 ms desde su depósito. Se añaden unas etiquetas con los valores de las coordenadas x, y, z de los puntos más destacables para su posterior análisis. Representación de la parte derecha sobre el eje de simetría (altura) de la gota. La anchura se corresponde con el eje x del sistema de ejes cartesiano empleado. El eje z muestra los valores de la temperatura.

4.2 SIMULACIÓN SPREAD 1.0

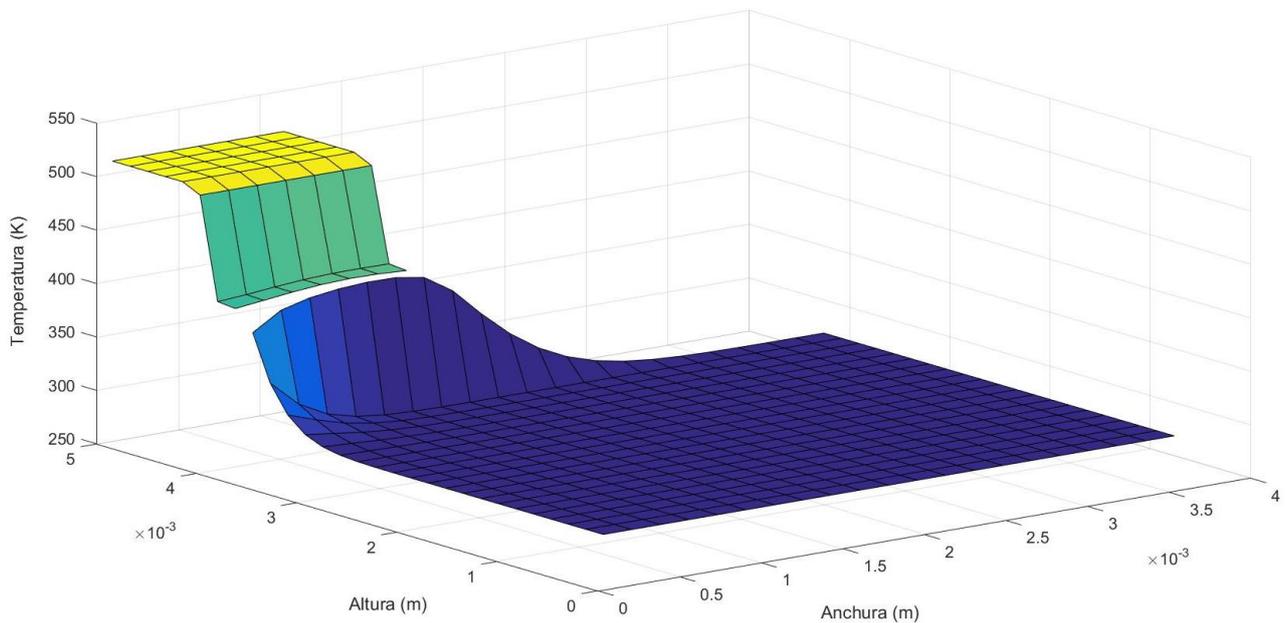


Figura 18. Representación de la distribución de temperaturas en la sección de la gota estudiada y la superficie metálica sobre la que se encuentra para un spread de 1,0 y transcurridos 12 ms desde su depósito. Representación de la parte derecha sobre el eje de simetría y (altura) de la gota. La anchura se corresponde con el eje x del sistema de ejes cartesiano empleado. El eje z muestra los valores de la temperatura.

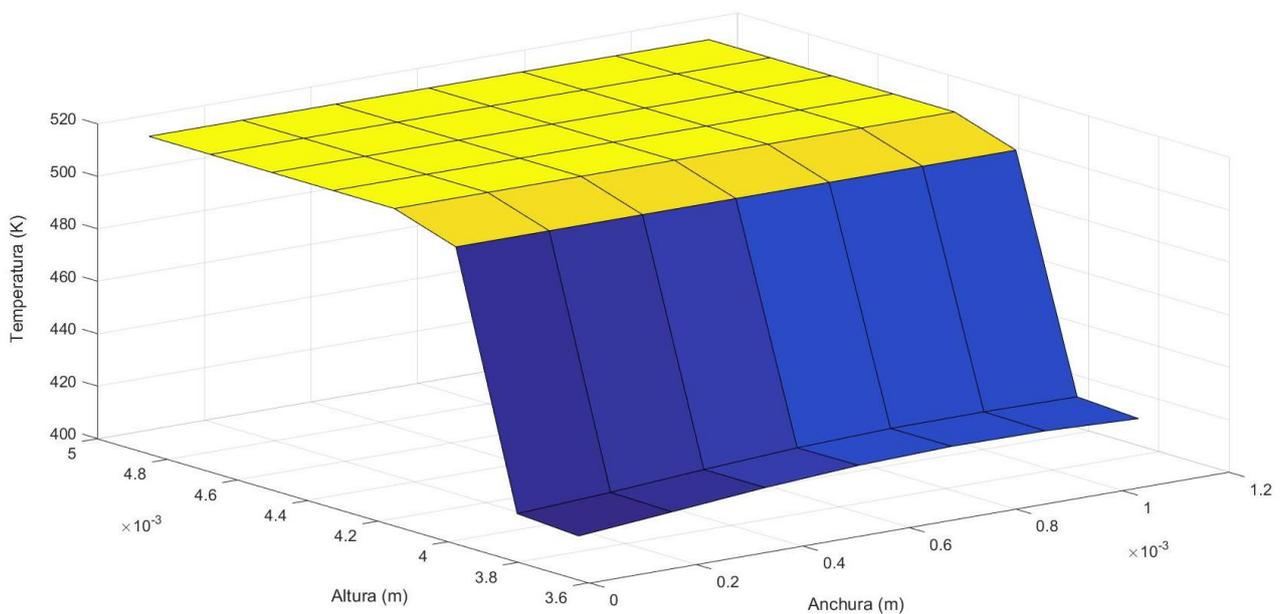


Figura 19. Representación de la distribución de temperaturas en la sección de la gota estudiada únicamente sin la superficie metálica para mejor observación de la misma para un spread de 1,0 y transcurridos 12 ms desde su depósito. Representación de la parte derecha sobre el eje de simetría y (altura) de la gota. La anchura se corresponde con el eje x del sistema de ejes cartesiano empleado. El eje z muestra los valores de la temperatura.



Para un spread de 1, obtenemos un resultado muy similar al anterior. En cuanto a lo comentado en el caso anterior de temperaturas en la parte superior de la superficie metálica, como ya se dijo, presenta la misma tendencia y se verá más adelante.

Ahora la altura de la gota ha descendido ligeramente. La anchura ha aumentado. De nuevo, se encuentra una gran extensión de la gota sin solidificar. El porcentaje de gota sin solidificar es, llevando a cabo un recuento de celdas, del 72% aproximadamente. Esto quiere decir, que a priori un aumento de la extensión de la gota ha generado un descenso de la cantidad de material en estado líquido en la gota. Es la tendencia que se va a ir observando conforme vayamos aumentando el spread. Ahora, la extensión de la zona líquida ocupa una longitud menor relativa en la dirección altura respecto al primer caso. Se empieza a ver con más claridad cómo se va a ir produciendo un aumento de la temperatura del estaño desde el interior hasta el exterior de la gota.

La temperatura máxima alcanzada es de 512,7 K. La mínima alcanzada en la zona sin solidificar es de nuevo la de solidificación del estaño. Las temperaturas en la zona líquida son de nuevo muy parejas. La zona sin solidificar se extiende por toda la zona alta de la gota y la variación de las temperaturas en esta zona es prácticamente nula tanto horizontal como verticalmente. Apenas hay 8 K de diferencia. En la zona en estado sólido las temperaturas son muy constantes. Todas se encuentran entorno a los 416 K. Horizontalmente hay apenas unos 10 K de diferencia entre interior y extremo exterior de la gota. De nuevo la temperatura más baja de la gota se encuentra en el centro del eje coordenado altura- anchura. Desde ese punto, las temperaturas en la zona solidificada van aumentando en dirección vertical y horizontal. De nuevo se observa como la gota comienza solidificando desde el interior y hacia el exterior.

Finalmente comentar la horizontalidad que presenta el frente de solidificación y la variación de temperatura que se produce en tan poco espacio en la zona de interfase. De esta forma, se produce una variación de casi 100 K en apenas 0,2 mm en la dirección vertical. A continuación se muestra la distribución de temperaturas, de la que se han obtenido los datos anteriormente comentados.

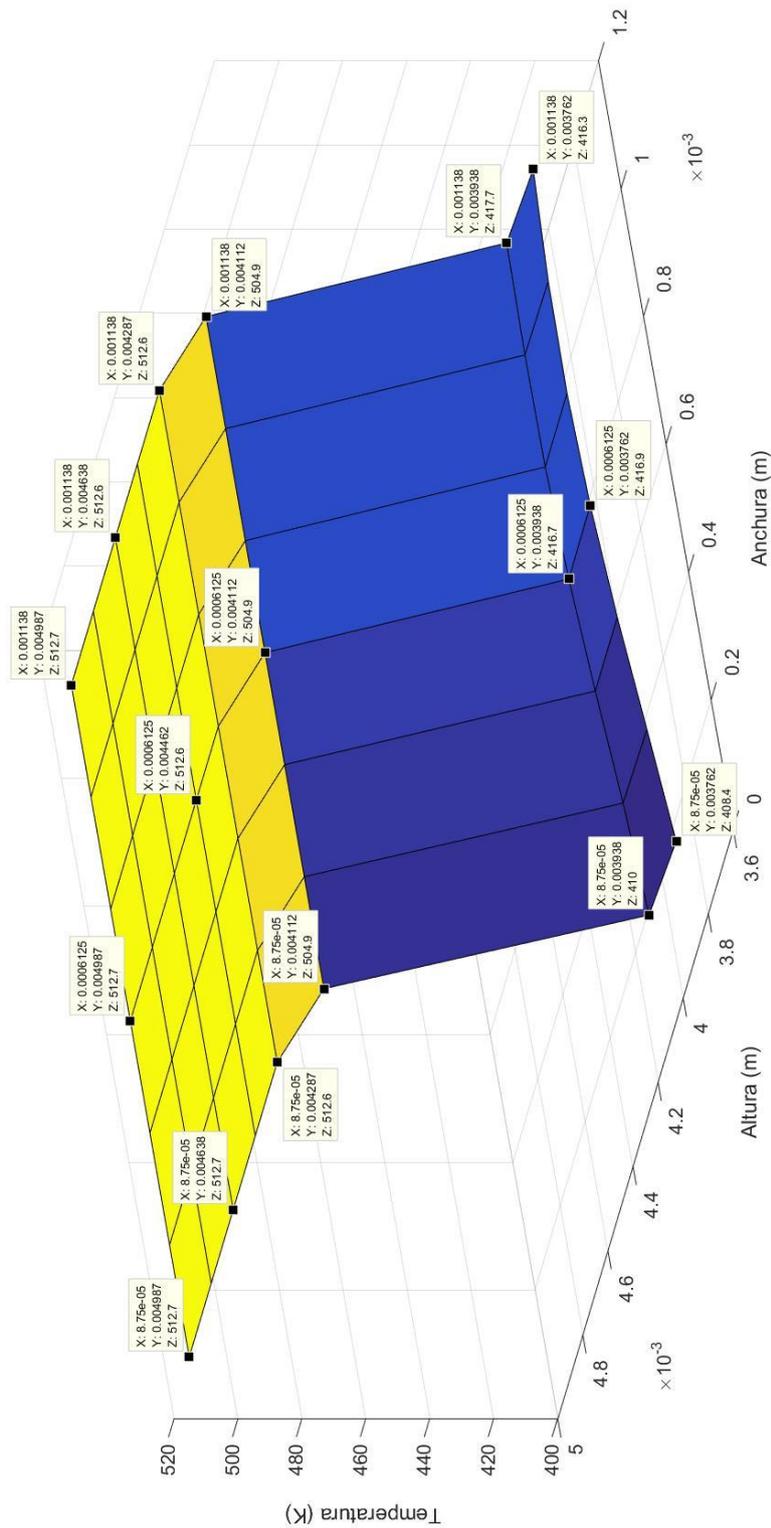


Figura 20. Representación de la distribución de temperaturas en la sección de la gota estudiada únicamente sin la superficie metálica para mejor observación de la misma para un spread de 1,0 y transcurridos 12 ms desde su depósito. Se añaden unas etiquetas con los valores de las coordenadas x, y, z de los puntos más destacables para su posterior análisis. Representación de la parte derecha sobre el eje de simetría y (altura) de la gota. La anchura se corresponde con el eje x del sistema de ejes cartesianos empleado. El eje z muestra los valores de la temperatura.

4.3 SIMULACIÓN SPREAD 1.5

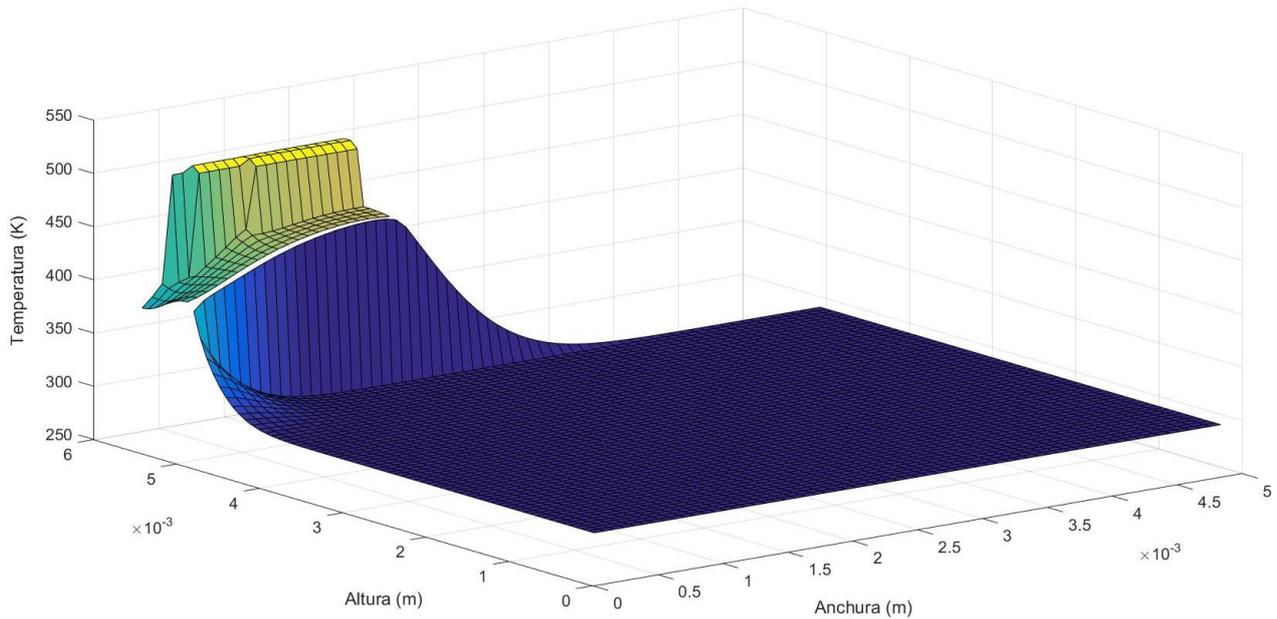


Figura 21. Representación de la distribución de temperaturas en la sección de la gota estudiada y la superficie metálica sobre la que se encuentra para un spread de 1,5 y transcurridos 12 ms desde su depósito. Representación de la parte derecha sobre el eje de simetría y (altura) de la gota. La anchura se corresponde con el eje x del sistema de ejes cartesianos empleado. El eje z muestra los valores de la temperatura.

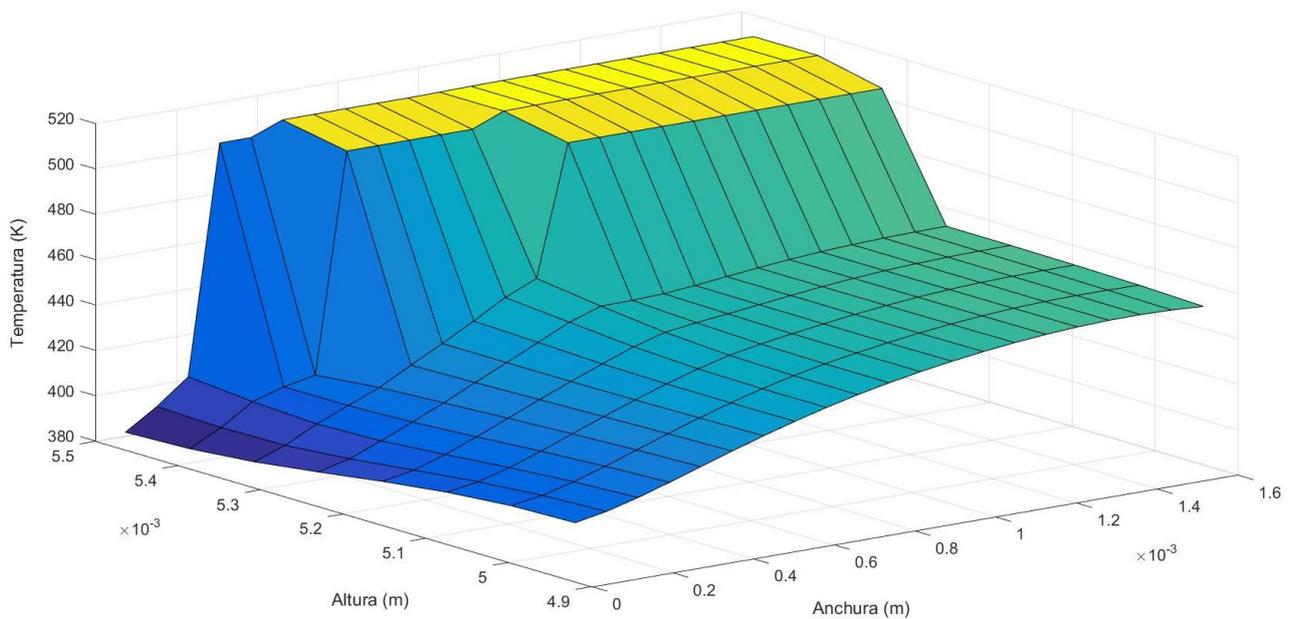


Figura 22. Representación de la distribución de temperaturas en la sección de la gota estudiada únicamente sin la superficie metálica para mejor observación de la misma para un spread de 1,5 y transcurridos 12 ms desde su depósito. Representación de la parte derecha sobre el eje de simetría y (altura) de la gota. La anchura se corresponde con el eje x del sistema de ejes cartesianos empleado. El eje z muestra los valores de la temperatura.



Para el spread de 1,5, se puede seguir observando el descenso de la altura y el aumento de la anchura. La zona sin solidificar sigue disminuyendo. Ahora, representa aproximadamente el 18% de la gota. Se puede observar una gota con valores de temperatura más cambiantes, debido a la mayor variabilidad de temperaturas representadas en este modelo y que quizá no han sido obtenidas anteriormente debido al pequeño tamaño de las gotas antes representadas. Se ha de comentar que a lo largo de la longitud anchura, y al igual que en los dos casos anteriores, la temperatura experimenta un cierto aumento (desde el interior hacia el exterior de la gota) pero esta vez resulta más pronunciado. La zona sin solidificar se ve como pasa de ocupar toda la zona a lo ancho de la gota, a ir desplazándose poco a poco de dentro hacia fuera de la misma, disminuyendo así su porcentaje respecto al total de la gota. Ahora ocupa una zona muy pequeña, poco profunda y desplazada a la derecha. Se puede observar como ya no es perfectamente horizontal respecto al eje anchura.

La anchura de la gota en este caso se ha hecho bastante más grande que la altura. Se puede ver como en las direcciones horizontales la variación de temperaturas desde el interior hacia el exterior está entorno a los 50 K, mucho más grande que en los casos anteriores. De nuevo se observan variaciones de entorno 100 K entre la zona sin solidificar y la zona solidificada inmediatamente a su lado.

Por último comentar un hecho que sólo se produce en este caso. Atendiendo al eje vertical y su zona más cercana, se puede observar como la temperatura en el centro de los ejes coordenados no es la más baja de toda la gota. Se puede ver como justo en la zona del eje vertical (columna de anchura una celda), las temperaturas descienden conforme aumenta la altura, encontrándose justo en el centro de la superficie superior de la gota la menor temperatura. Este hecho produce que en las zonas que rodean al eje vertical en la mitad superior se produzca una extraña distribución de temperaturas que no se parece a las obtenidas en las simulaciones de spread 2 y 2,5. A continuación se muestra la distribución de temperaturas, de la que se han obtenido los datos anteriormente comentados.

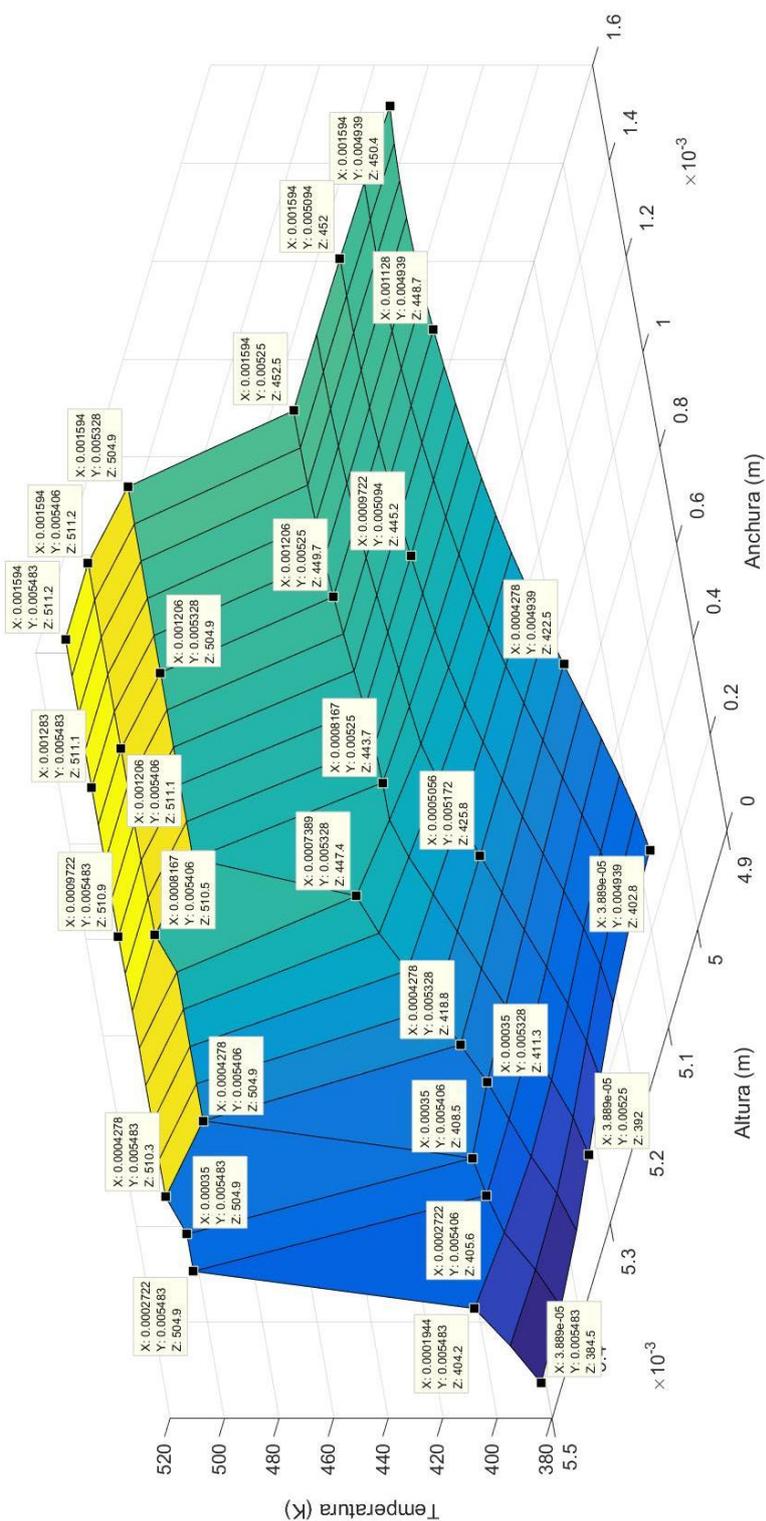


Figura 23. Representación de la distribución de temperaturas en la sección de la gota estudiada únicamente sin la superficie metálica para mejor observación de la misma para un spread de 1,5 y transcurridos 12 ms desde su depósito. Se añaden unas etiquetas con los valores de las coordenadas x, y, z de los puntos más destacables para su posterior análisis. Representación de la parte derecha sobre el eje de simetría y (altura) de la gota. La anchura se corresponde con el eje x del sistema de ejes cartesiano empleado. El eje z muestra los valores de la temperatura.

4.4 SIMULACIÓN SPREAD 2.0

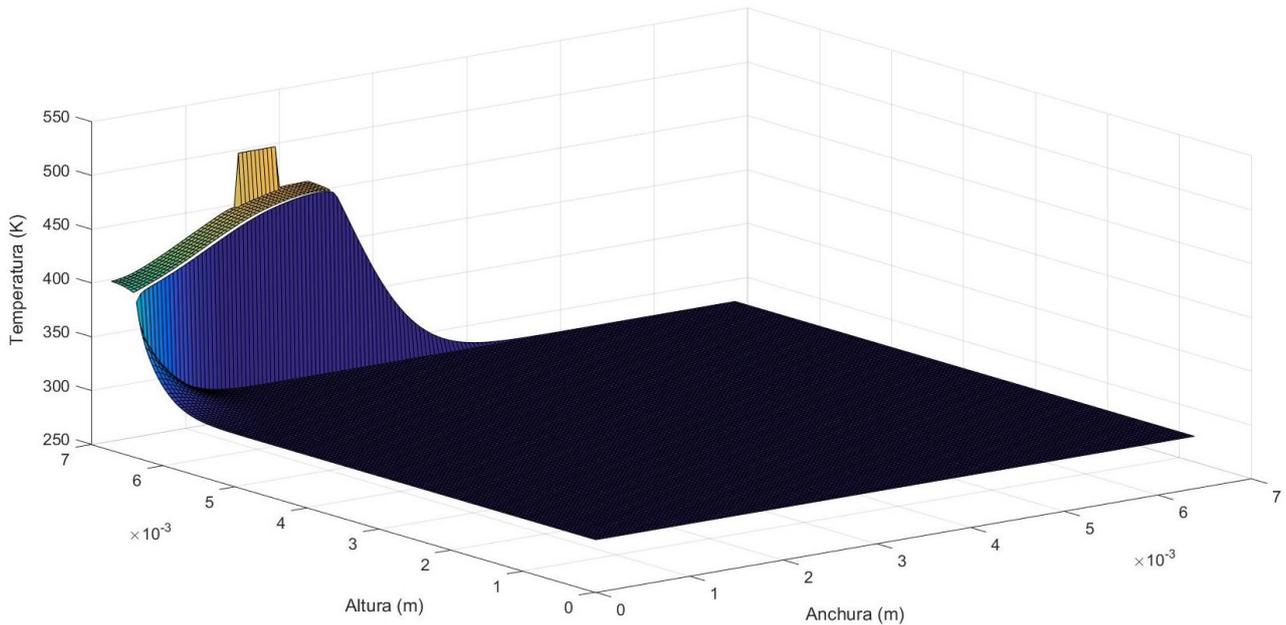


Figura 24. Representación de la distribución de temperaturas en la sección de la gota estudiada y la superficie metálica sobre la que se encuentra para un spread de 2,0 y transcurridos 12 ms desde su depósito. Representación de la parte derecha sobre el eje de simetría y (altura) de la gota. La anchura se corresponde con el eje x del sistema de ejes cartesianos empleado. El eje z muestra los valores de la temperatura.

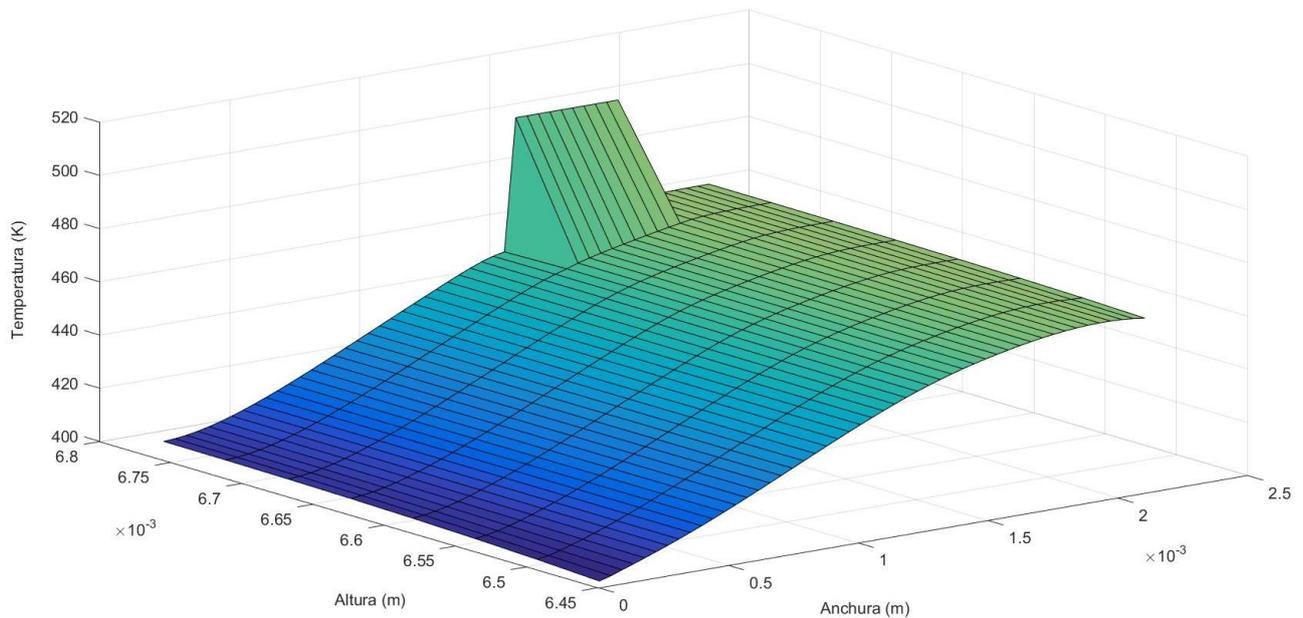


Figura 25. Representación de la distribución de temperaturas en la sección de la gota estudiada únicamente sin la superficie metálica para mejor observación de la misma para un spread de 2,0 y transcurridos 12 ms desde su depósito. Representación de la parte derecha sobre el eje de simetría y (altura) de la gota. La anchura se corresponde con el eje x del sistema de ejes cartesianos empleado. El eje z muestra los valores de la temperatura.



Con un spread de 2, se puede observar como existe una región sin solidificar o que acaba de solidificar de muy pequeño tamaño a 504,9 K, justo la temperatura de solidificación del estaño. Esta zona representa un 2,7 %, un porcentaje casi inapreciable de la gota. Viniendo de los casos anteriores, esta zona se puede considerar el último reducto de zona sin solidificar o prácticamente recién solidificada de todos los casos que se van a estudiar. Esta zona se haya aislada, ya que no llega hasta el extremo final de la gota. Se encuentra desplazada a la derecha, siguiendo la tendencia descrita de la zona sin solidificar del caso anterior de spread 1,5.

Se sigue observando la tendencia del aumento de la temperatura desde el interior al exterior a lo largo de la longitud radial de la gota. Ahora desde el interior hasta la zona exterior de la gota, las diferencias de temperatura oscilan alrededor de los 60 K trazando líneas horizontales desde la coordenada cero de la anchura hasta el exterior. Se puede observar como conforme se aumenta la extensión de la gota y decrece la altura las diferencias de temperatura van aumentando. Por otra parte, verticalmente hablando, vemos que al haber solidificado prácticamente toda la gota, las diferencias de temperatura en esta dirección son muy pequeñas. Oscilan entre 2 y 10 K, salvo en la zona que acaba de solidificar donde la diferencia es de unos 60 K. Resaltar que ahora la altura es muy pequeña.

Se puede comentar que conforme la zona solidificada comienza a extenderse y a ocupar la totalidad de la gota, las temperaturas tienden a suavizarse, desapareciendo las discontinuidades generadas alrededor de las zonas del frente de solidificación por las zonas que se encuentran a la temperatura de solidificación del estaño y temperaturas superiores a ésta.

4.5 SIMULACIÓN SPREAD 2.5

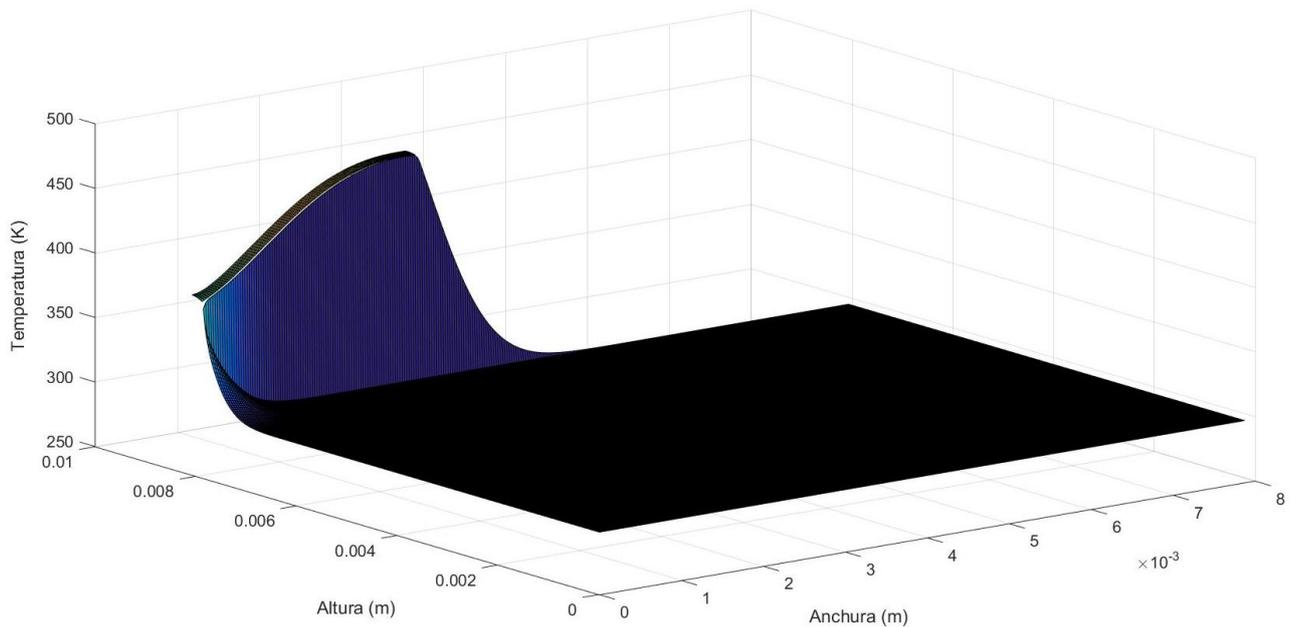


Figura 27. Representación de la distribución de temperaturas en la sección de la gota estudiada y la superficie metálica sobre la que se encuentra para un spread de 2,5 y transcurridos 12 ms desde su depósito. Representación de la parte derecha sobre el eje de simetría y (altura) de la gota. La anchura se corresponde con el eje x del sistema de ejes cartesianos empleado. El eje z muestra los valores de la temperatura.

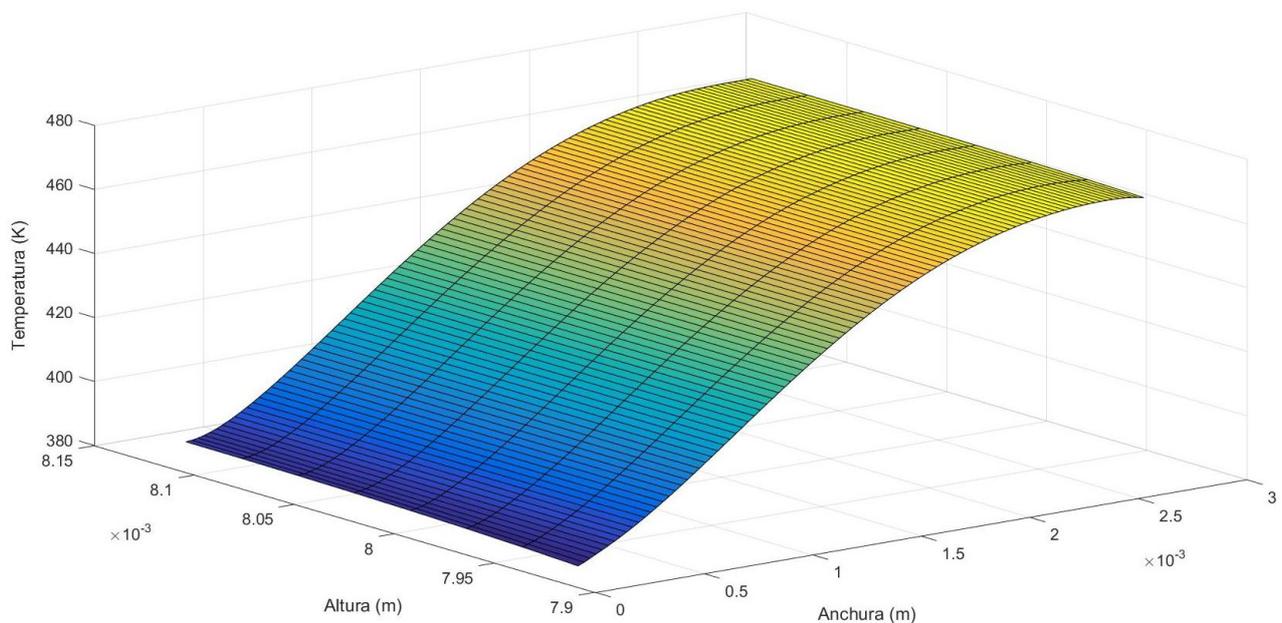


Figura 28. Representación de la distribución de temperaturas en la sección de la gota estudiada únicamente sin la superficie metálica para mejor observación de la misma para un spread de 2,5 y transcurridos 12 ms desde su depósito. Representación de la parte derecha sobre el eje de simetría y (altura) de la gota. La anchura se corresponde con el eje x del sistema de ejes cartesianos empleado. El eje z muestra los valores de la temperatura.



Finalmente, el caso de spread 2,5 representa una gota con una extensión a lo largo del eje radial máximo y una altura mínima. Todas las temperaturas recogidas en la misma están por debajo de los 504,9 K, punto de solidificación del estaño, por lo que no existen zonas sin solidificar. Se observan variaciones de temperaturas suaves, sin picos o grandes discontinuidades.

De nuevo las temperaturas aumentan desde el interior al exterior de la gota. Ahora, el rango de temperaturas a distintas alturas horizontalmente oscila en torno a los 85 K. Como se puede ver conforme sigue aumentando la anchura, la diferencia de temperaturas sigue creciendo. Verticalmente, y ya con todas las zonas solidificadas desde hace tiempo, la diferencia de temperaturas no llega a los 10 K. Añadir que este caso es parecido al anterior en lo que distribución y evolución de las temperaturas se refiere.

Se puede observar como en el resto de casos, salvo en el de 1,5, como la menor temperatura se encuentra en el origen del sistema de ejes coordenados altura-anchura y como las temperaturas se van elevando desde este punto.

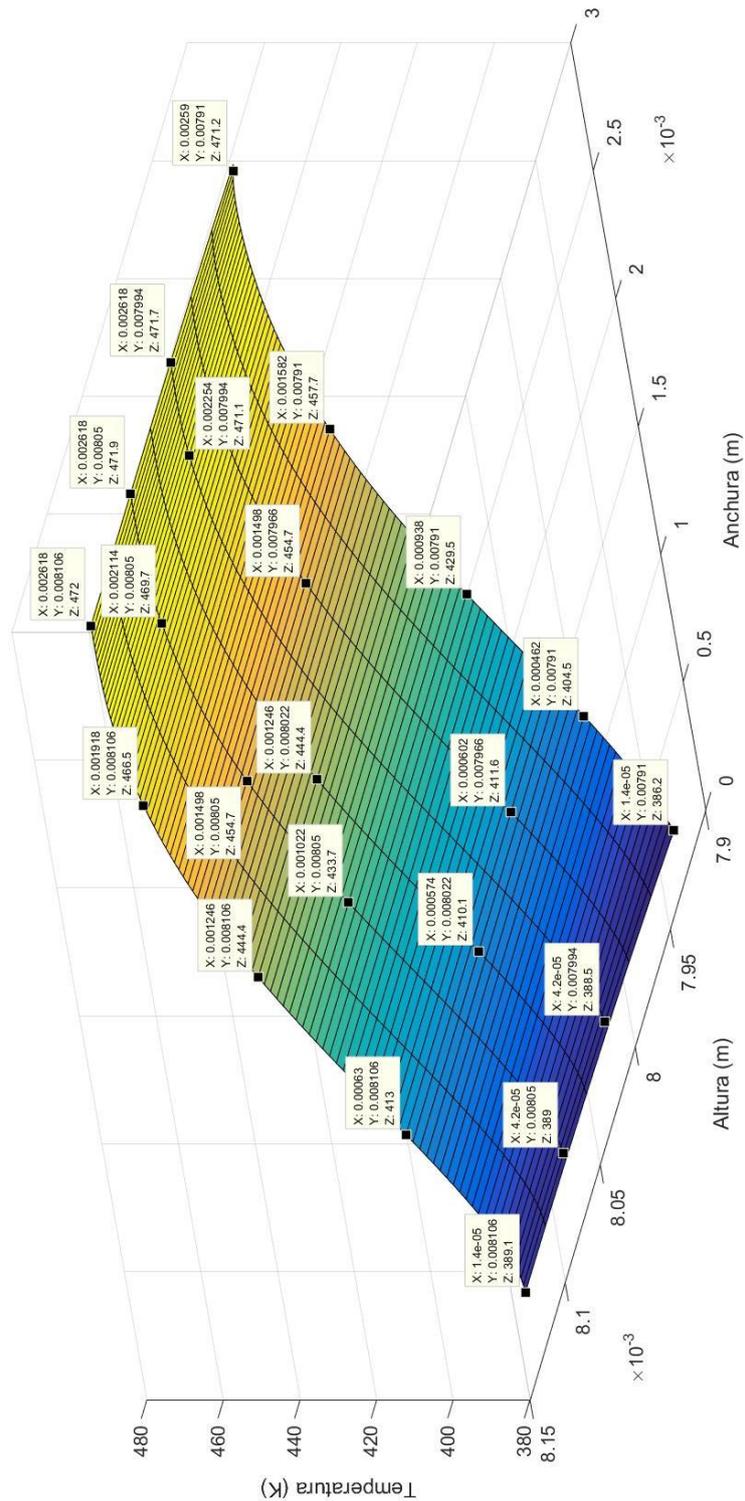


Figura 29. Representación de la distribución de temperaturas en la sección de la gota estudiada únicamente sin la superficie metálica para mejor observación de la misma para un spread de 2,5 y transcurridos 12 ms desde su depósito. Se añaden unas etiquetas con los valores de las coordenadas x, y, z de los puntos más destacables para su posterior análisis. Representación de la parte derecha sobre el eje de simetría y (altura) de la gota. La anchura se corresponde con el eje x del sistema de ejes cartesiano empleado. El eje z muestra los valores de la temperatura.

4.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación se va a realizar un análisis y discusión de los resultados obtenidos de las simulaciones llevadas a cabo. Seguidamente se muestra una imagen de la gota en 3D y de la sección transversal plana cuyas dimensiones y distribución de temperaturas se van a analizar. La sección de estudio de la gota, con las magnitudes altura y anchura definidas, es la marcada en amarillo en la figura 30.

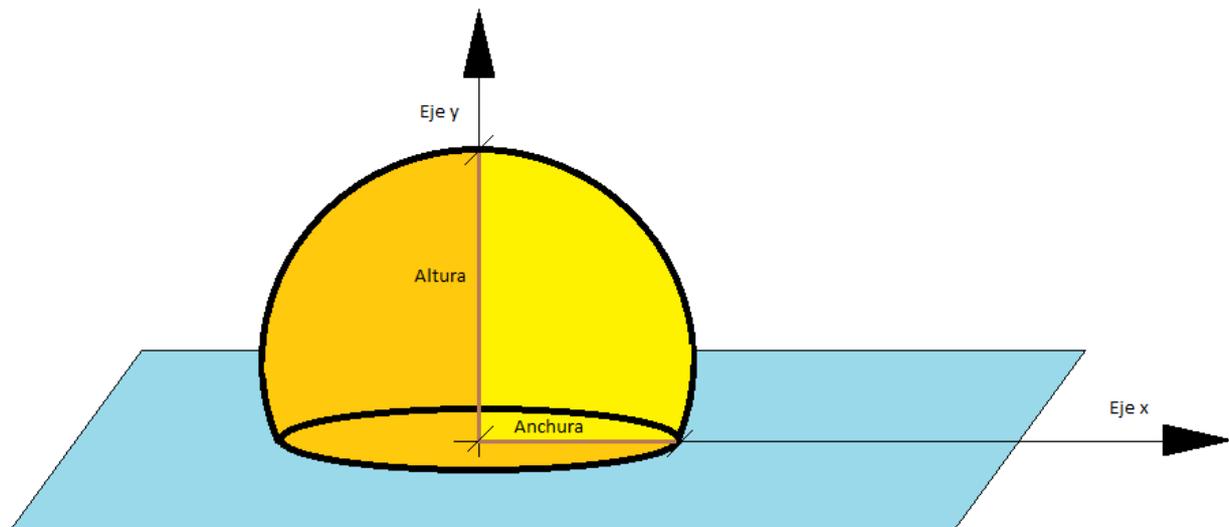


Figura 30. Sección de estudio de la gota (color amarillo) sobre la superficie metálica con las dimensiones anchura y altura que se van a analizar.

Se va a comenzar realizando una tabla resumen con los parámetros más importantes para cada gota. En ella se muestran el valor de cada extensión y la correspondiente altura y anchura de la gota y las temperaturas máxima y mínima alcanzadas en la misma para un tiempo de estudio de solidificación de 12 ms. Estos valores son obtenidos directamente del análisis de las gráficas obtenidas en las simulaciones. Los datos han sido recogidos usando el comando data course de Matlab®.



Spread	Altura (m)	Anchura (m)	T mínima (K)	T máxima (K)
0,8	0,0021	0,00078745	414,1	512,9
1	0,001225	0,0010505	408,4	512,7
1,5	0,000554	0,00155511	384,5	511,2
2	0,000306	0,00210012	401,6	504,9
2,5	0,000196	0,002604	386,2	472,0

Figura 31. Tabla resumen en la que cada para cada spread se recogen las dimensiones en altura y anchura de la gota y las temperaturas mínimas y máximas alcanzadas en cada una de ellas para un tiempo de solidificación de 12 ms.

A continuación se van a realizar una serie de representaciones gráficas en las que se recogen los valores anteriores y se llevará a cabo un análisis de los resultados obtenidos para tratar de obtener una serie de conclusiones sobre los estudios realizados.

4.6.1 REPRESENTACIÓN ALTURA Y ANCHURA DE CADA SPREAD

En la serie de representaciones gráficas que se van a mostrar a continuación, se va a comenzar haciendo una representación gráfica de cada valor de la extensión spread con la correspondiente magnitud de altura y anchura de la gota. En la figura 33 se muestra esta representación:

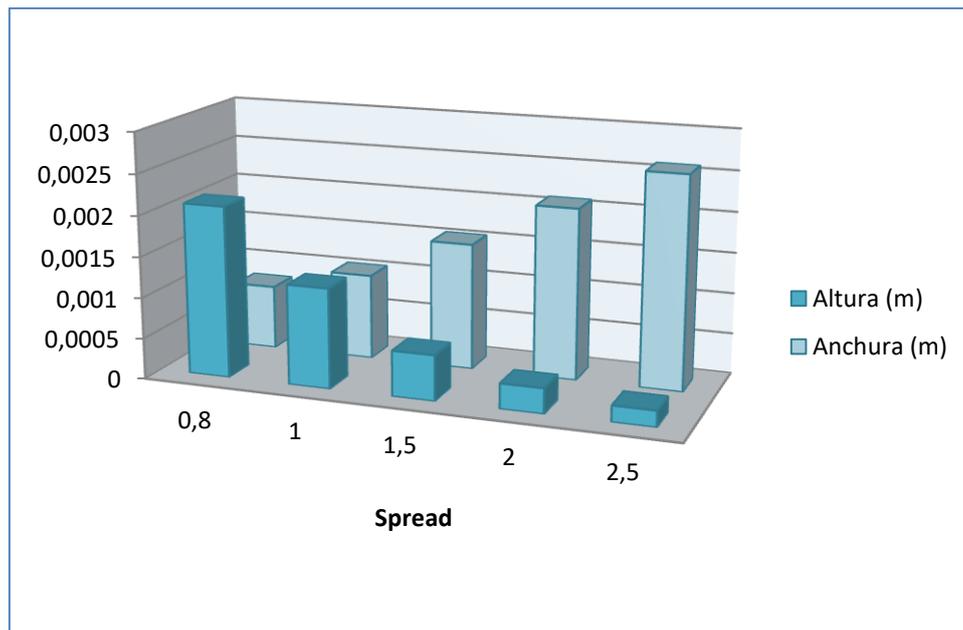


Figura 32. Representación cuantitativa de las dimensiones de la gota en altura y anchura para cada spread para tiempo de solidificación 12 ms. Se observa la tendencia de la altura al descenso conforme se aumenta la anchura de la gota.

Como se puede observar en la gráfica, a medida que se va aumentando el valor del spread (extensión), el valor de la altura de la gota va disminuyendo. Por otra parte, el valor de la anchura de la misma experimenta un aumento. Los incrementos y descenso no siguen una relación lineal. Por tanto se puede afirmar que el valor de la extensión de la gota influye en la forma de la misma. A mayor valor de la función spread, la gota será mucho más amplia en dirección radial que axial y a menor extensión, sucederá lo contrario.

4.6.2 REPRESENTACIÓN TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS PARA CADA SPREAD

A continuación se realiza un análisis de las temperaturas máximas y mínimas alcanzadas en cada gota transcurrido el tiempo preestablecido de solidificación. En la figuras 33 y 34 se puede observar la representación del valor de la temperatura mínima y máxima alcanzada en cada gota para cada spread:

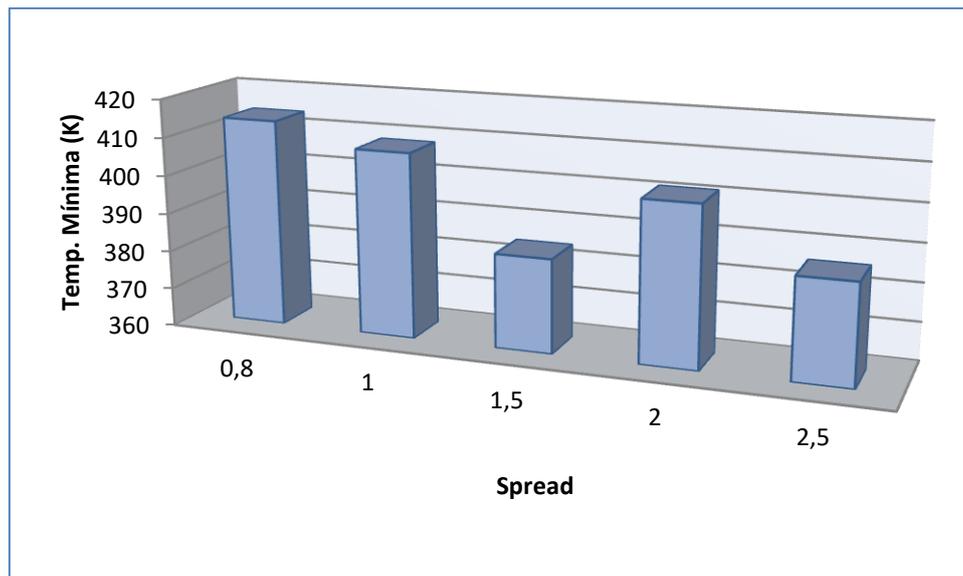


Figura 33. Representación gráfica de las temperaturas mínimas alcanzadas en la gota. Tiene tendencia a descender conforme aumenta el spread. Obsérvese que el caso de 1,5 es singular por ser menor la temperatura al de spread 1 y 2.

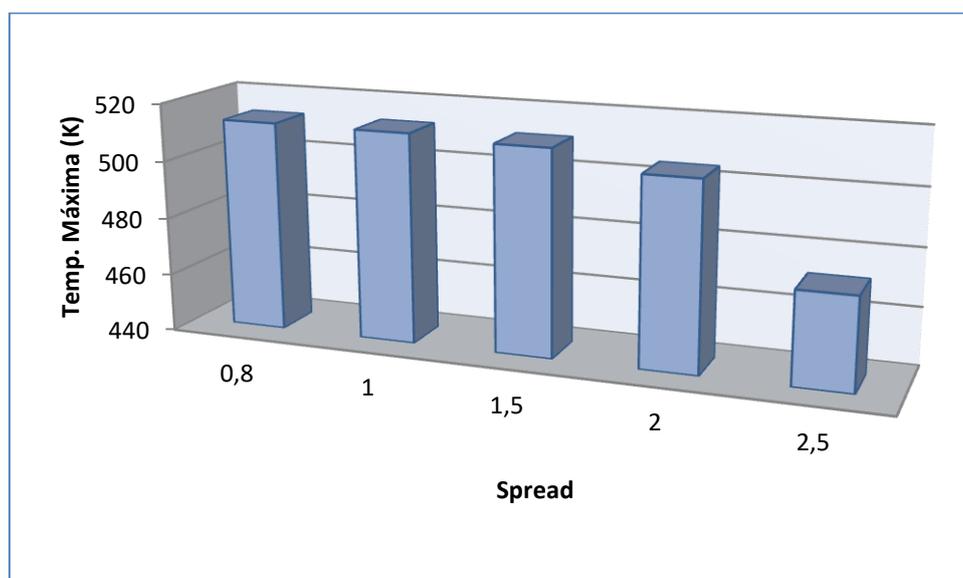


Figura 34. Representación gráfica de las temperaturas máximas alcanzadas en la gota. Tiene tendencia a descender conforme aumenta el spread, que se agrava en el caso de spread 2,5.



En el caso de las temperaturas máximas alcanzadas se puede observar que en los cinco casos son bastante similares, excepto en el caso del spread 2,5, que se aleja un poco del resto. Se observa cierta tendencia a descender con el aumento del spread. En el caso de 0,8 y 1, las temperaturas son iguales a 512,7 K y 512,9 K respectivamente. En el caso de 1,5 y 2 son 511,2 K y 504,9K, respectivamente y es con un spread de 2,5 dónde se acusa un descenso importante de la temperatura máxima con 472 K. El rango de temperaturas máximas obtenidas (casos spread 1 y spread 2,5) oscila en un valor de 40,9 K, por lo que se puede afirmar que la influencia del spread resulta bastante importante en el valor de las temperaturas máximas alcanzadas. Además se ha de recordar que se ha observado que al aumentar el spread, se produce un descenso de la temperatura máxima alcanzada, por lo que el spread influiría en el valor de esta magnitud.

Analizando las temperaturas mínimas que se alcanzan en cada gota, se puede ver que presentan una tendencia a descender conforme aumenta el spread, salvo en el caso del spread 1,5, donde se da un valor mínimo más pequeño que en el de spread 2. A pesar de lo anteriormente comentado el rango de temperaturas mínimas entre todos los casos es bastante pequeño, siendo la más alta la de 0,8 igual a 414,1 K y la más pequeña en el caso de 2,5 igual a 386,2 K, teniéndose una diferencia de 27,9 K entre ambas. Por tanto se puede afirmar que el spread influye de forma más o menos importante, al igual que antes, en el valor de la temperatura mínima obtenida en la gota. Se podría decir que el aumento del spread provoca un descenso de la temperatura máxima, pero el dato obtenido en 1,5, hace dudar de esta afirmación.

De todas formas, en general, se puede afirmar que un aumento en la extensión de la gota que solidifica, genera un descenso en las temperaturas tanto mínimas como máximas alcanzadas en un instante t de solidificación.

4.6.3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DIFERENCIA TEMPERATURAS PARA CADA SPREAD

A continuación se muestra una representación gráfica de la máxima oscilación térmica que se ha obtenido en cada gota. Esto es, se representa para cada spread la diferencia de la temperatura máxima alcanzada y la mínima en cada gota.

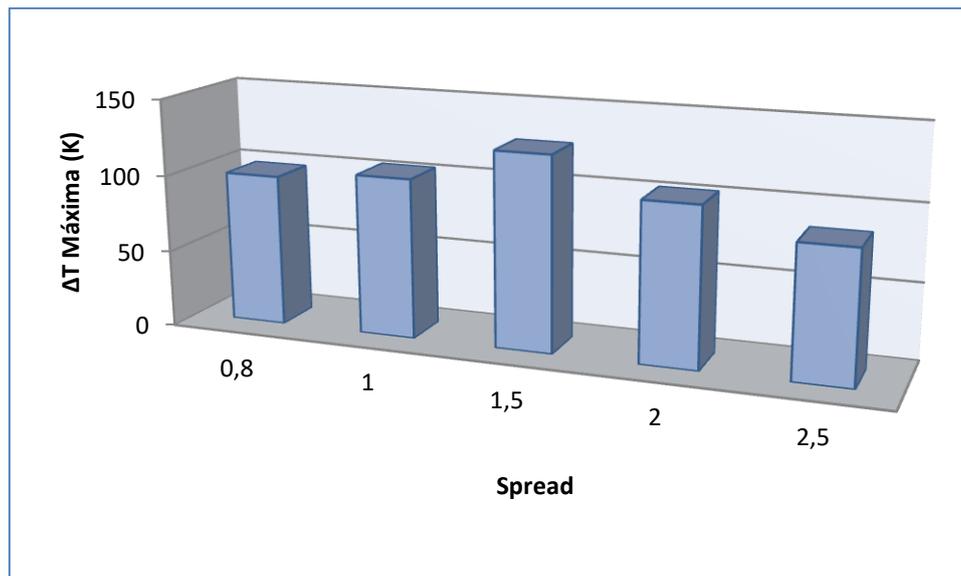


Figura 35. Representación de la diferencia de temperaturas máxima alcanzada en cada gota. Diferencia entre la temperatura máxima alcanzada y la mínima en cada gota. De nuevo el caso de spread 1,5 presenta un valor atípico que rompe con la tendencia del resto de gotas.

Son valores importantes en cantidad, que en todos los casos se encuentran entorno a los 100 K, lo cual implica que las variaciones de temperatura dentro de la gota son grandes, a pesar del reducido tamaño de la misma, del orden de mm. Se detallan para cada spread los valores exactos. Para spread 0,8, $\Delta T = 98,8$ K. Spread= 1, $\Delta T = 104,3$ K. Spread= 1,5, $\Delta T = 126,7$ K. Spread= 2, $\Delta T = 103,3$ K. Spread= 2,5, $\Delta T = 85,8$ K. En todo caso, se puede afirmar que no existe una relación clara entre la extensión de la gota y la diferencia de temperaturas que en ella se da, pues no existen una relación ascendente ni descendente con el spread, y los valores son prácticamente iguales. De nuevo, se observa el caso de 1,5 y se ve que el valor destaca, al ser el más alto de todos con diferencia. Para comprender esta diferencia hay que observar la representación gráfica de las temperaturas y ver la zona central de la gota y su peculiar distribución de temperaturas en la misma.

4.6.4 PORCENTAJE DE GOTA SOLIDIFICADA CON RESPECTO AL SPREAD

A continuación se muestra una representación gráfica del porcentaje de gota que se encuentra en estado líquido respecto al total de la misma para cada spread, con los datos recogidos anteriormente. Se puede observar claramente la tendencia. Para un mismo tiempo de estudio de solidificación, se ve como conforme se aumenta la extensión de la gota, el porcentaje de material en estado líquido en la gota va disminuyendo hasta desaparecer completamente en el caso de extensión 2,5. Por tanto se puede afirmar que la extensión de la gota, que da lugar a su forma, juega un papel fundamental en la forma de solidificación de la misma. De esta forma transcurrido un cierto tiempo t , y según el spread que se tenga podemos encontrarnos con una gota en estado líquido prácticamente en su totalidad o con una ya solidificada, con las consecuencias que ello acarrea. Recordando los valores exactos obtenidos de porcentaje sin solidificar se tiene. Spread 0,8, %sin solidificar \approx 78%. Spread 1, %sin solidificar \approx 72%. Spread 1,5, %sin solidificar \approx 18%. Spread 2, %sin solidificar \approx 3%. Spread 2,5, %sin solidificar = 0%.

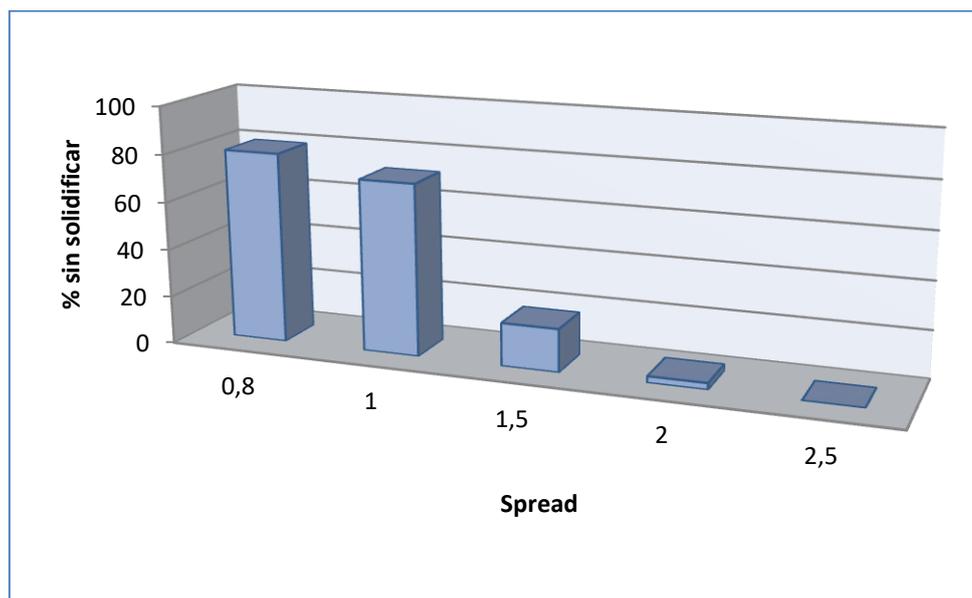


Figura 36. Porcentaje de gota en estado líquido respecto al total de la gota. Se observa como desciende de forma brusca desde un alto porcentaje en el caso de spread 0,8 a un cero por ciento en el caso de máximo spread.



4.6.5 PERFIL GOTAS. ESTADO ZONAS POR COLORES.

En la página siguiente se puede observar una representación cualitativa aproximada de las zonas de solidificación de cada gota. Se tiene para cada spread unos tamaños de anchura y altura de tamaños relativos entre ellos. El color rojo identifica las zonas donde el estaño aún se encuentra en estado líquido. Los colores naranja y amarillo representan zonas en estado sólido, siendo el color naranja correspondiente a temperaturas más altas y el amarillo a temperaturas menores. Se puede observar las tendencias antes comentadas de una forma más sencilla y se muestra cómo actúa el mecanismo de solidificación en las gotas según su extensión cuando ha transcurrido un mismo periodo de tiempo. La representación se ha llevado a cabo realizando un estudio de las gráficas obtenidas en la solidificación estudiando el valor de las temperaturas y observando si éstas se encuentran por encima o por debajo de la temperatura de solidificación del estaño, delimitando así el estado en el que se encuentra cada parte de la gota.

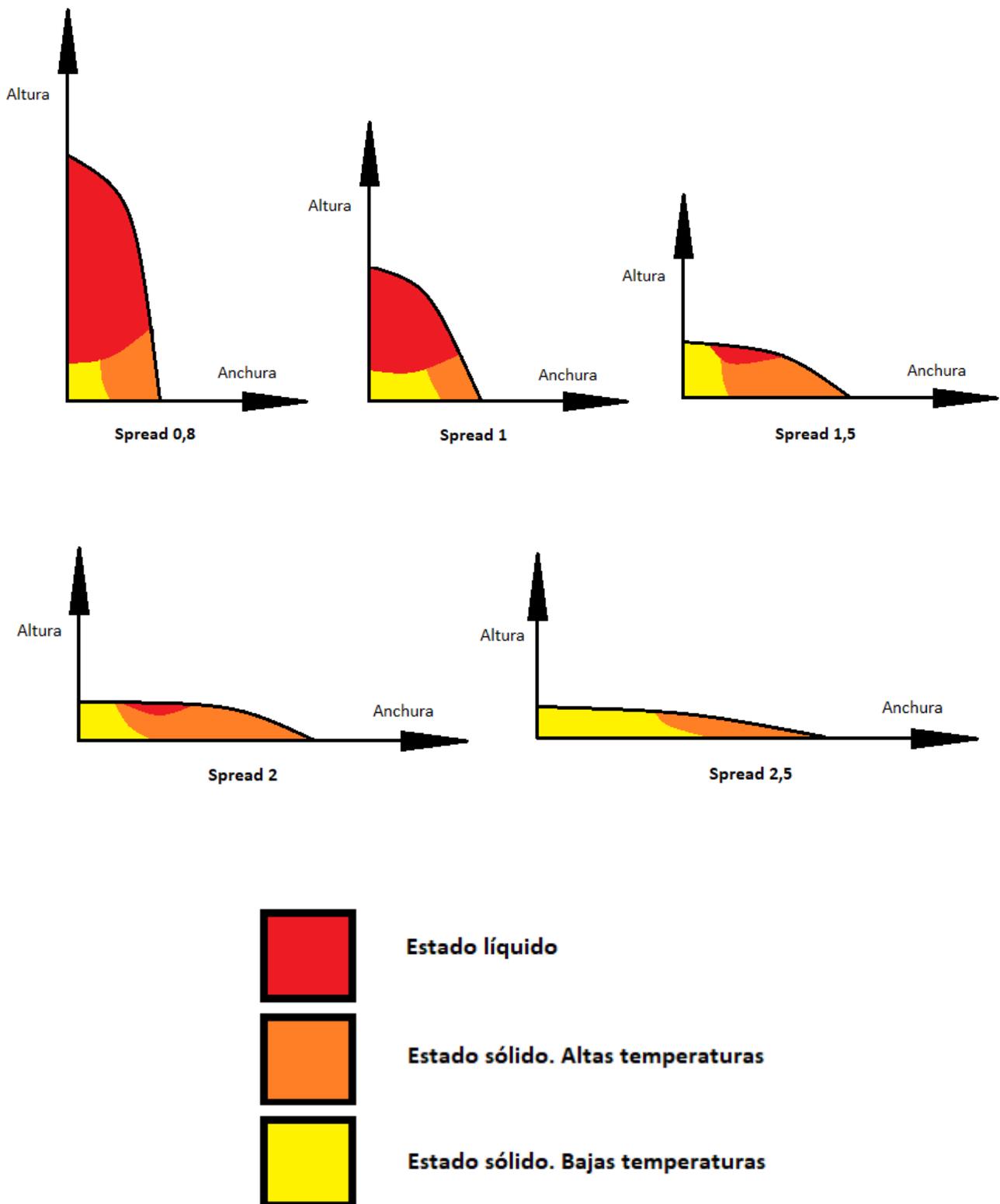


Figura 37. Representación cualitativa de los estados en que se encuentra la gota basadas en la observación de las temperaturas de las simulaciones realizadas. El color rojo se corresponde con estado líquido. El color naranja y amarillo representa zonas en estado sólido correspondiéndose con zonas de alta y bajas temperaturas respectivamente.

4.6.6 REPRESENTACIÓN TEMPERATURAS SOBRE LA SUPERFICIE RESPECTO EXTENSION

A continuación se realiza una representación gráfica de las temperaturas recogidas justo sobre el eje x, esto es, la dirección de la anchura. Son las temperaturas de la zona de la gota que está justo sobre la superficie metálica en el eje de simetría x. Se representan temperaturas en Kelvin frente a la coordenada en metros en el eje x.

Se muestra para cada spread la representación de estos valores. Se realizará un comentario de las mismas después de la representación del spread 2,5 y se mostrará finalmente una representación de todas las curvas obtenidas para cada caso de forma conjunta para su posterior análisis y comentario.

Spread 0,8:

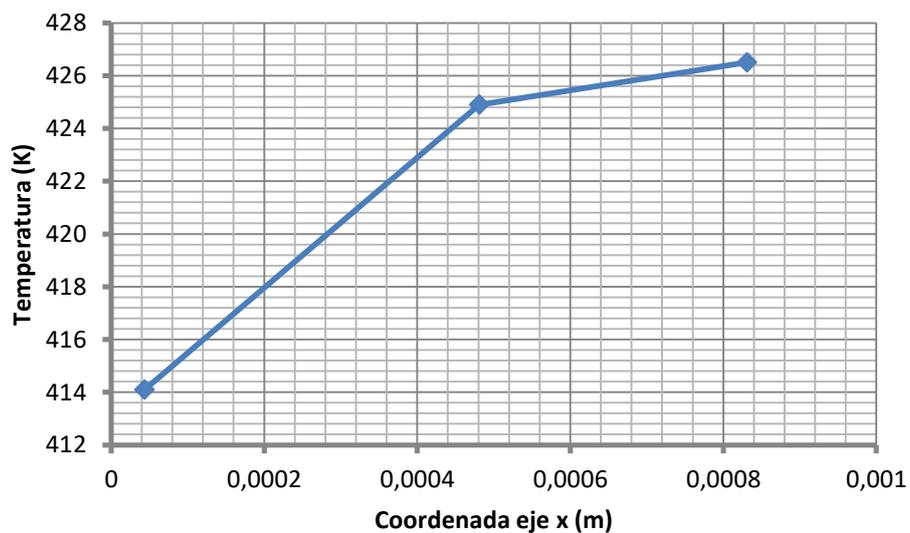


Figura 38. Evolución de la temperatura a lo largo del eje x justo sobre la superficie metálica para un spread 0,8, tiempo solidificación 12 ms.

Spread 1:

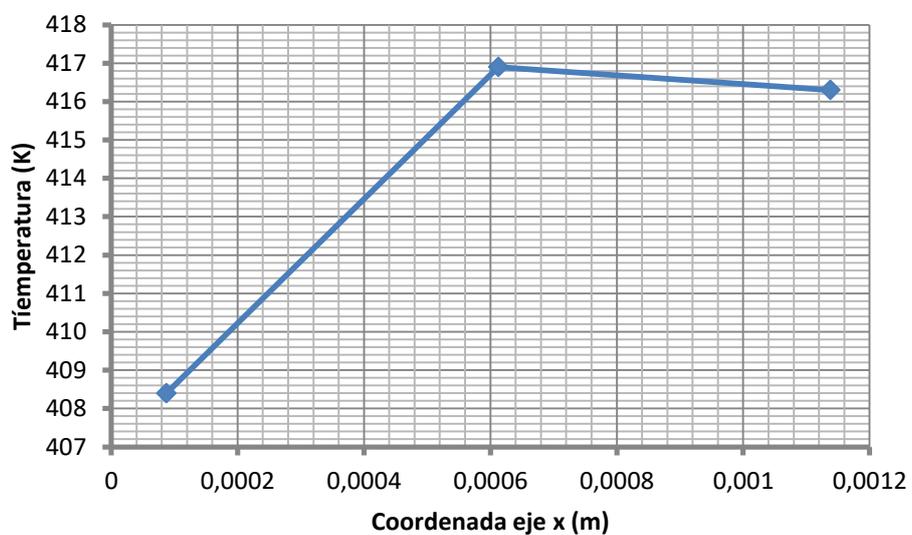


Figura 39. Evolución de la temperatura a lo largo del eje x justo sobre la superficie metálica para un spread 1,0, tiempo de solidificación 12 ms.

Spread 1,5:

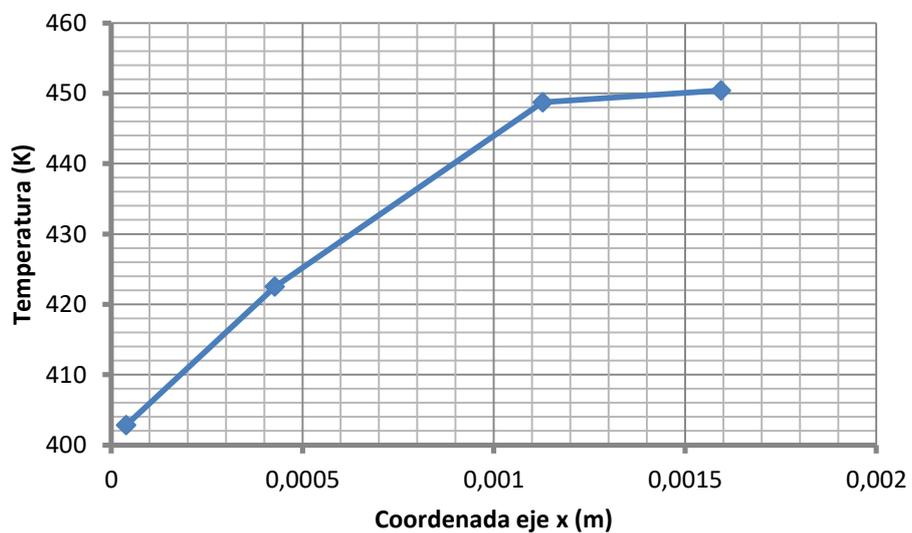


Figura 40. Evolución de la temperatura a lo largo del eje x justo sobre la superficie metálica para un spread 1,5, tiempo de solidificación 12 ms.

Spread 2:

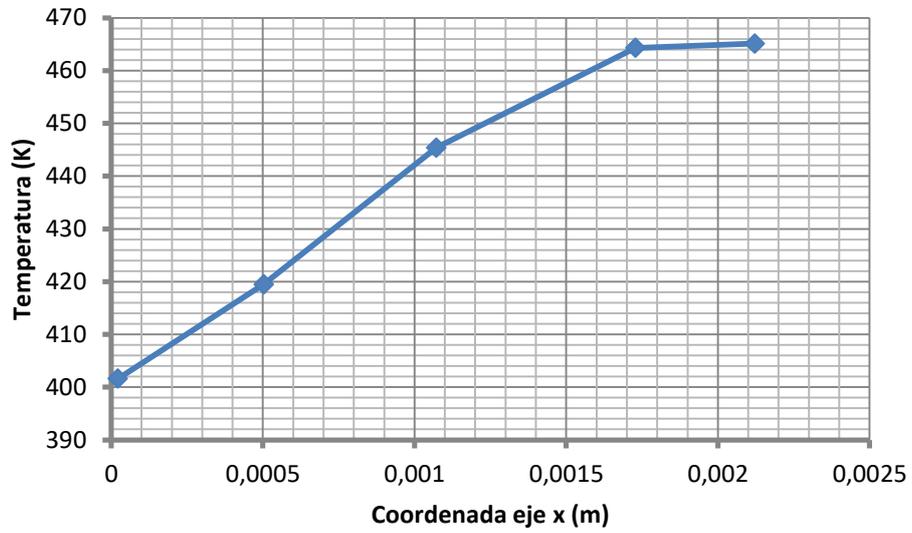


Figura 41. Evolución de la temperatura a lo largo del eje x justo sobre la superficie metálica para un spread 2,0, tiempo de solidificación 12 ms.

Spread 2,5:

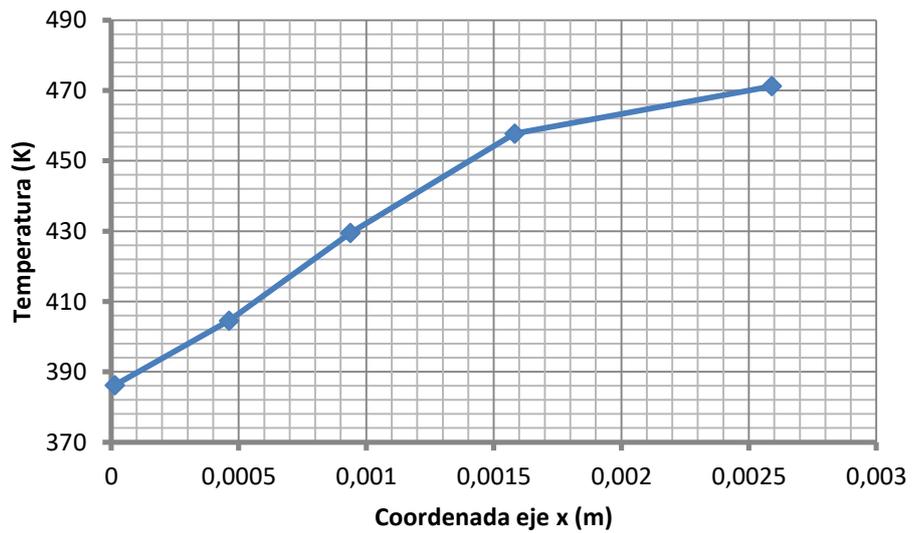


Figura 42. Evolución de la temperatura a lo largo del eje x justo sobre la superficie metálica para un spread 2,5, tiempo solidificación 12 ms.

Como se puede deducir de la observación de estas gráficas, la primera conclusión que se obtiene es que la temperatura es en todo momento creciente desde el centro de la gota hasta el exterior. El incremento de temperatura es mucho más grande hasta la mitad o dos tercios de la longitud total radial y el crecimiento de la temperatura se hace menor desde esta parte hasta el extremo final de la misma. Comentar además que en el caso de spread igual a 1 se produce un ligero descenso de la temperatura tomada a mitad de la longitud x y la del extremo. La diferencia son 0,3 K por lo que podemos considerar que la diferencia es casi nula y achacar este resultado a un posible uso de número de grids insuficiente para este caso de spread tan pequeño. Puesto que en el resto de gotas no se observa una tendencia como esta, se mantiene la conclusión de que la temperatura incrementa con el valor de la coordenada x . Por tanto, se cumple la tendencia antes descrita de que horizontalmente, la temperatura tiende a incrementarse. Más adelante y una vez se haya estudiado los valores de la temperatura a lo largo de la coordenada y , se establecerá cómo funciona la mecánica de solidificación.

A continuación se realiza una comparación para cada spread de sus temperaturas sobre la superficie del sustrato:

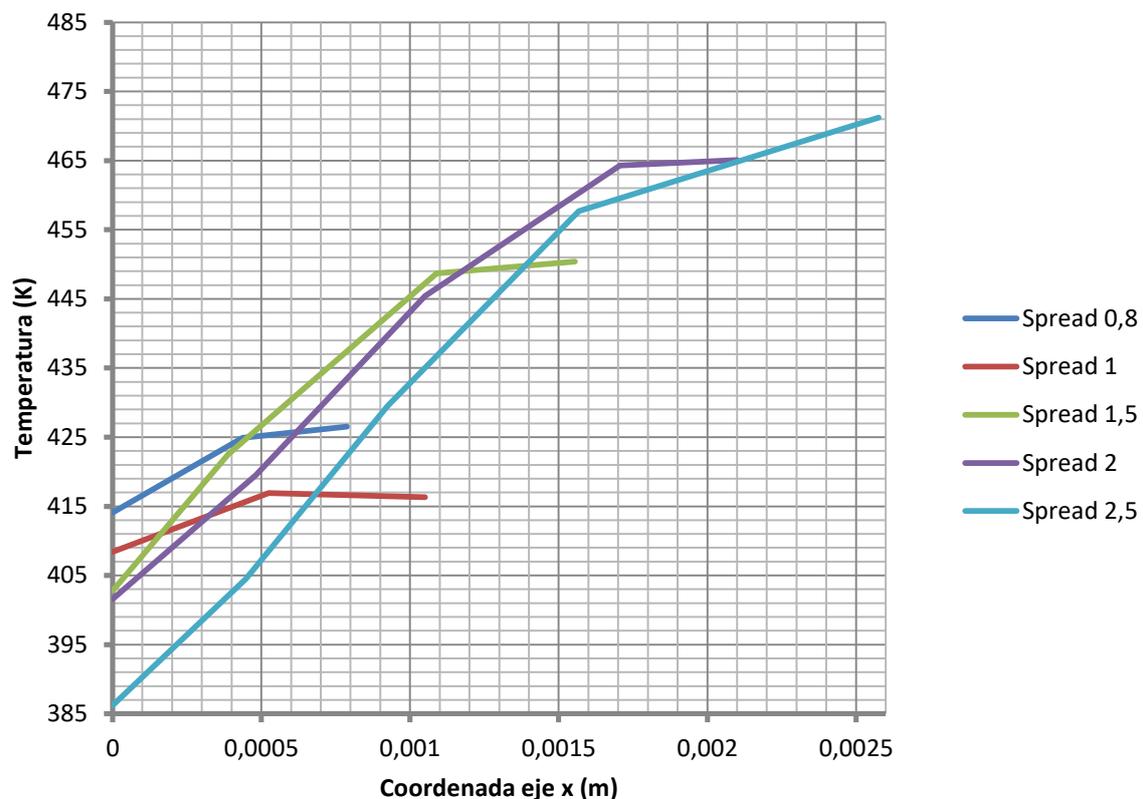


Figura 43. Gráfica en la que se establece la comparación de las temperaturas justo sobre la superficie metálica en la coordenada x y sus diferentes longitudes para cada spread, tiempo de solidificación 12 ms.



Lo que se observa en la gráfica de la página anterior es la comparación entre las temperaturas alcanzadas en cada gota en la dirección x justo sobre la superficie metálica así como las longitudes radiales de cada una. Se observa como a medida que aumenta la longitud radial, las temperaturas alcanzadas en el extremo de cada gota justo sobre la superficie metálica son mayores, presentando en todos los casos la tendencia antes comentada. La primera conclusión que se obtiene es que a mayor extensión de material a recorrer por el calor de conducción, mayores temperaturas son alcanzadas a lo largo de esa dirección.

Por otra parte, se observa que a mayor anchura de la gota y menor altura, para un mismo tiempo de solidificación, la temperatura de partida desde el centro y sus cercanías es cada vez menor. Esta tendencia se mantiene solo durante el principio de la coordenada anchura. De hecho, ya con una longitud anchura de 0,2 mm las líneas de 1 y 1,5 se cruzan. Así pues, desde el caso de 0,8 hasta el de 2,5, se va produciendo un descenso de la temperatura en el punto inicial, centro de la gota, sobre la superficie metálica. Por contra, la temperatura en el extremo final del caso 2,5 supera ampliamente a la alcanzada en el extremo del caso de spread 0,8. Por tanto, se puede afirmar que los gradientes de temperatura a lo largo de la gota sobre el eje de anchura crecen conforme aumenta el spread. Por el contrario comentar que la temperatura en el extremo de la gota de spread 1 es menor que en 0,8, alrededor de 10 K. El caso de spread 1 tampoco cumple la tendencia de los gradientes de temperatura. Son las únicas excepciones encontradas a las tendencias descritas.

Finalmente comentar que las temperaturas justo en el extremo final de la gota presentan valores muy parecidos en los casos de 0,8 y 1 y se produce un gran salto en el caso de 1,5, que presenta temperaturas muy parecidas a 2 y 2,5.

4.6.7 REPRESENTACIÓN TEMPERATURAS EJE VERTICAL SIMETRÍA PARA CADA SPREAD

A continuación se realiza una representación gráfica de las temperaturas recogidas justo sobre el eje y de simetría, esto es, la dirección de la altura. Son las temperaturas de la zona de la gota que está justo sobre la dirección vertical en el eje de simetría y. Se representan temperaturas en Kelvin frente a la coordenada en metros en el eje y.

Se muestra para cada spread la representación de estos valores. Se realizará un comentario de las mismas después de la representación del spread 2,5 y se mostrará finalmente una representación de todas las curvas obtenidas para cada caso de forma conjunta para su posterior análisis y comentario, igual que en el caso anterior para el eje x.

Spread 0,8:

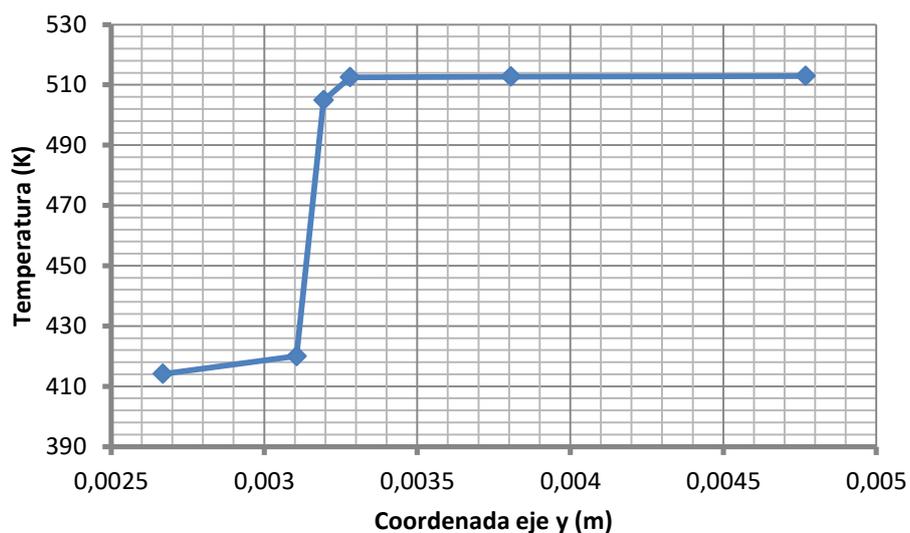


Figura 44. Distribución de temperaturas sobre el eje y de simetría para el caso de spread 0,8, transcurrido un tiempo de solidificación de 12 ms.

Spread 1:

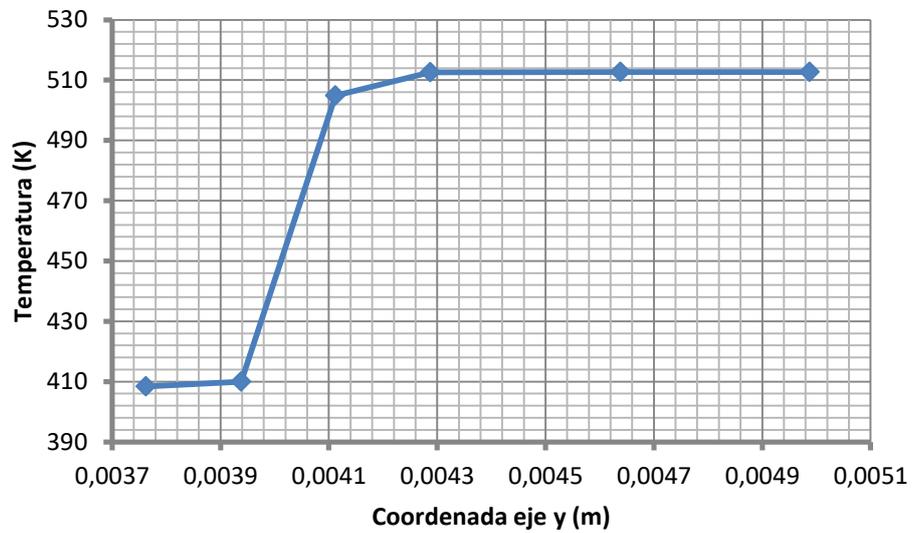


Figura 45. Distribución de temperaturas sobre el eje y de simetría para el caso de spread 1, transcurrido un tiempo de solidificación de 12 ms.

Spread 1,5:

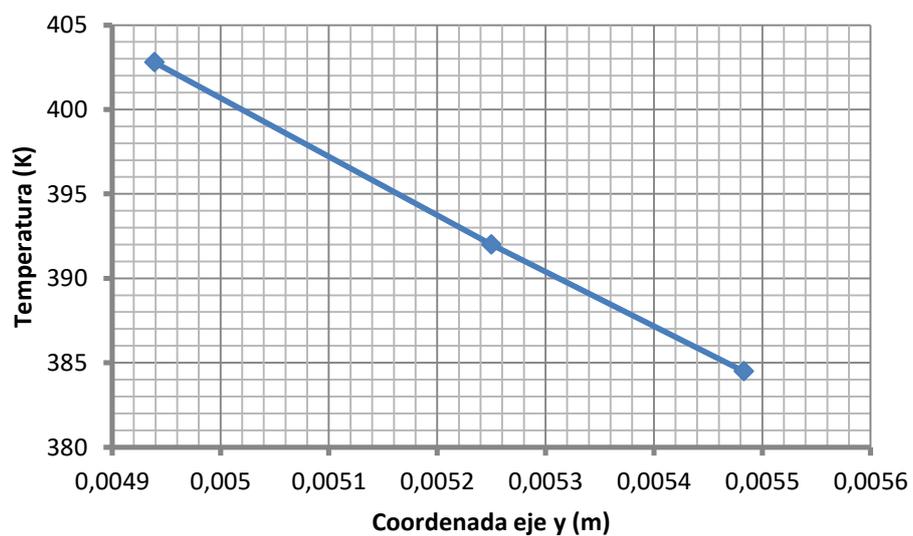


Figura 46. Distribución de temperaturas sobre el eje y de simetría para el caso de spread 1,5, transcurrido un tiempo de solidificación de 12 ms.

Spread 2:

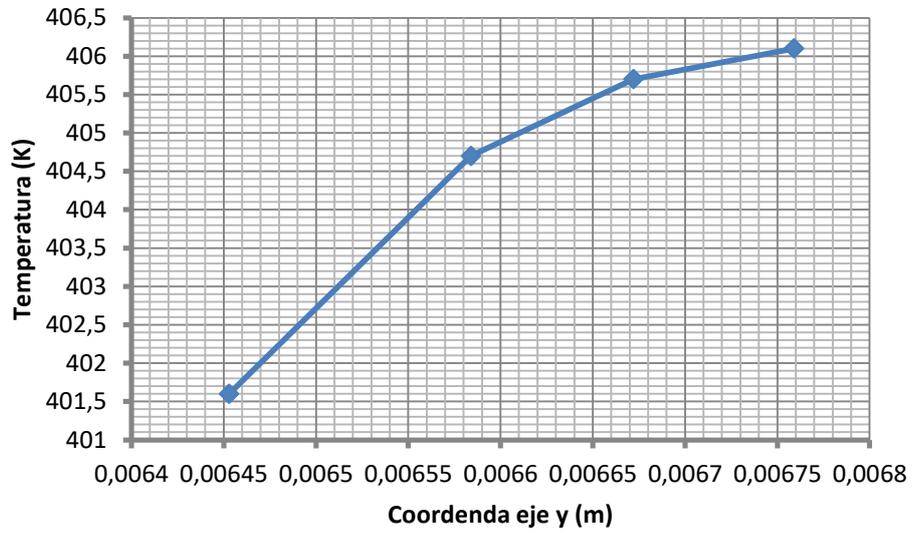


Figura 47. Distribución de temperaturas sobre el eje y de simetría para el caso de spread 2, transcurrido un tiempo de solidificación de 12 ms..

Spread 2,5:

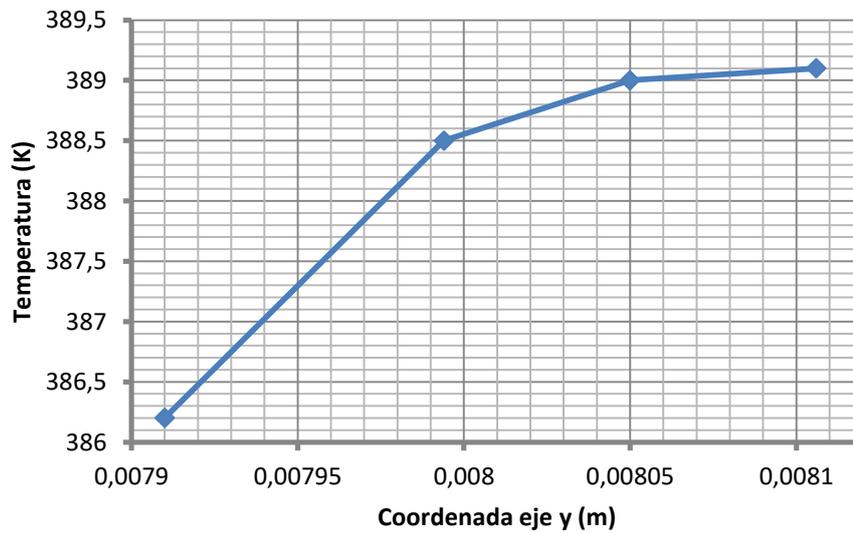


Figura 48. Distribución de temperaturas sobre el eje y de simetría para el caso de spread 2,5, transcurrido un tiempo de solidificación de 12 ms.

Como se ha dicho antes, en las figuras anteriores se ha llevado a cabo una representación para cada spread de las temperaturas del eje y de simetría y la posición que ocupa cada una. Se puede apreciar en estas gráficas la extensión de la altura de cada gota y las temperaturas que hay en ella. La tendencia de las temperaturas es a aumentar, desde la cota cero del eje y hasta la altura total de la gota. En los casos de 2 y 2,5, ya con la zona estudiada solidificada, vemos como el incremento de temperatura es más o menos grande al principio y se va frenando al final. En el caso spread 0,8 y 1, la zona en el eje de simetría se haya ampliamente en estado líquido. La tendencia de las temperaturas, es al igual que antes, a crecer con la altura, sin embargo se puede observar el salto de temperaturas existente entre la zona en estado líquido aún y la zona que ha solidificado. Mención aparte merece el caso de spread 1,5. Presenta una tendencia diferente al resto de casos. Para este spread, la temperatura decrece con la altura.

El caso de spread 1,5 resulta la única excepción en las tendencias antes descritas. Este hecho puede deberse a la determinada geometría que adquiere la gota por la altura y anchura específicas y al tiempo de solidificación. Es posible que para otro tiempo de solidificación transcurrido la tendencia sea diferente.

A continuación se muestra una comparación para los distintos spread de las temperaturas sobre el eje y de simetría:

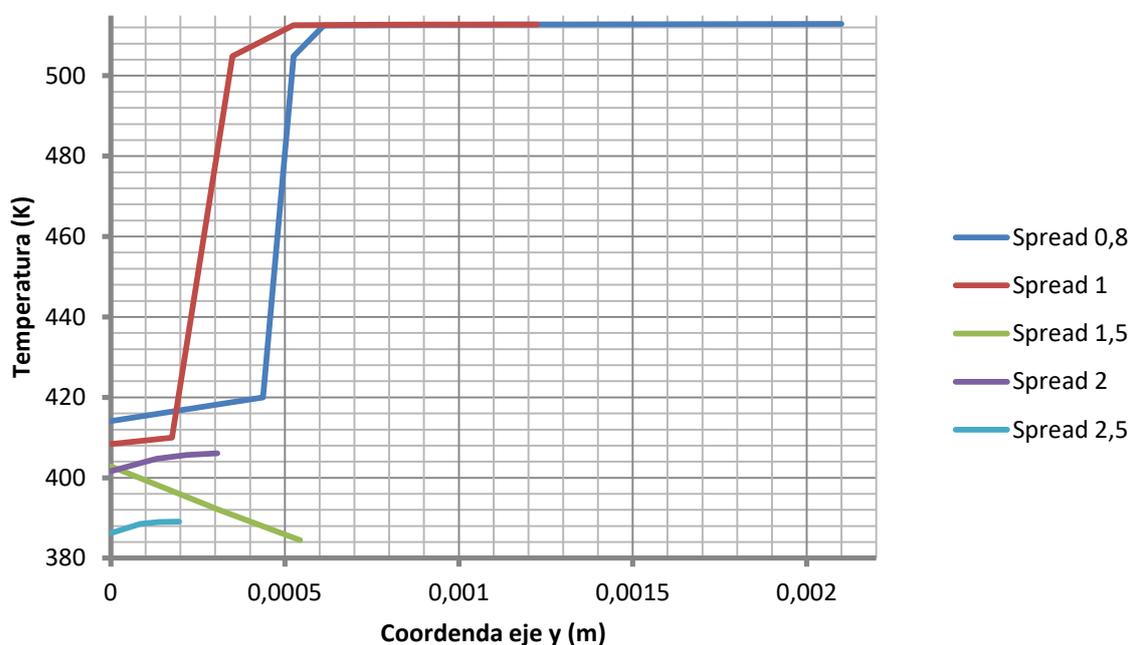


Figura 49. Gráfica en la que se establece la comparación de las temperaturas para los ejes y de simetría y sus diferentes longitudes para cada spread, tiempo de solidificación 12 ms.



Se puede observar que, a mayor longitud de la coordenada y (altura), las temperaturas que se alcanzan son mayores. Por tanto se puede asegurar que al igual que en el caso anterior, a más superficie de la gota donde transmitir calor, las temperaturas alcanzadas serán mayores. Destacar también, que el cambio de estado de líquido a sólido se realiza a temperatura constante, en un único frente de solidificación, tal y como se puede observar en las gráficas de las simulaciones realizadas para spread 0,8 y 1. Es dónde se producen los mayores incrementos de temperatura. Conforme aumenta el spread y decrece la altura, las diferencias de temperatura sobre el eje vertical de simetría se van haciendo cada vez menores. De nuevo, encontramos una excepción en el caso de spread 1, donde esta diferencia es mayor que en el caso de 0,8.

A continuación en la página siguiente se va a realizar una comparación en la misma página de cada spread y la representación de las longitudes de la coordenada x e y y las temperaturas que le corresponden.

4.6.8 COMPARACIÓN CUANTITATIVA TAMAÑOS DE CADA DIRECCIÓN Y SUS TEMPERATURAS

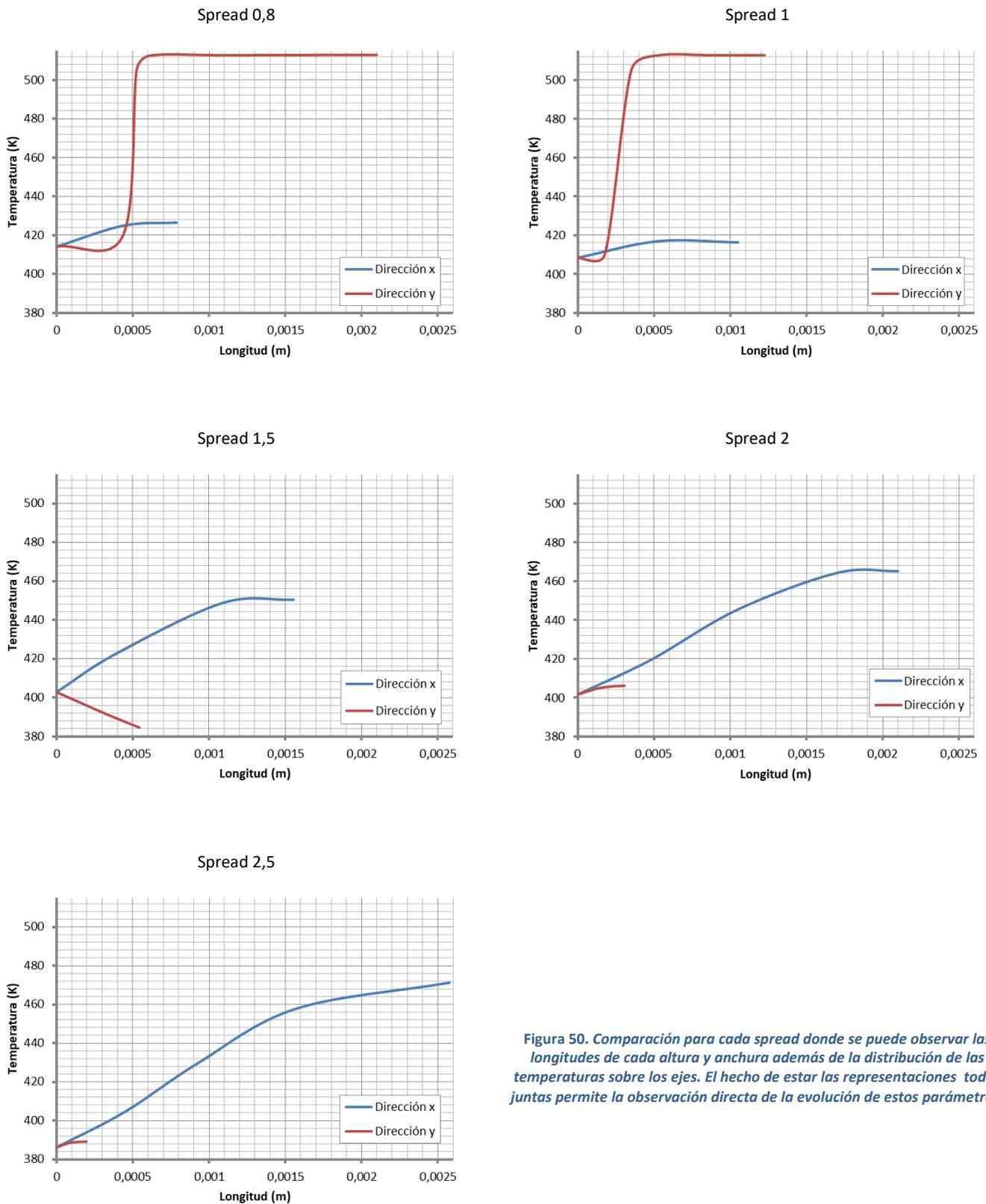


Figura 50. Comparación para cada spread donde se puede observar las longitudes de cada altura y anchura además de la distribución de las temperaturas sobre los ejes. El hecho de estar las representaciones todas juntas permite la observación directa de la evolución de estos parámetros.

Como ya se ha dicho, en la página anterior, se ha realizado esta representación en la misma hoja de las gráficas de cada spread con los valores de los ejes x e y en longitud y temperatura para observar con más claridad las tendencias descritas anteriormente en cuanto a temperaturas, para poder comparar tamaños de los ejes altura y anchura cualitativa y cuantitativamente, etc.

4.6.9 EFECTOS SOBRE LA SUPERFICIE METÁLICA

A continuación se pasa a comentar los efectos sufridos por la superficie metálica o sustrato de material acero debidos a la transmisión de calor por conducción desde la gota. Evidentemente se esperan variaciones de temperatura en la superficie metálica en contacto con la gota y los alrededores por tratarse de un metal, a una temperatura muy diferente de la temperatura inicial que posee la gota en el momento en que deposita sobre el mismo, incluso habiendo transcurrido un tiempo de estudio tan pequeño como es 12 ms.

Se estudia la línea de celdas superior en sentido horizontal de la superficie metálica, esto es, justo la que está en contacto con la gota y que se puede apreciar claramente en las simulaciones. En realidad la zona de estudio es la delgada capa de la superficie del sustrato en contacto con la gota y sus alrededores. Se puede ver como en el centro de la gota, siguiendo el eje y, la temperatura evidentemente da un gran salto, pero continúa una bajada suavizada hasta los 25 °C desde la temperatura de la base de la gota, penetrando este gradiente de temperaturas hasta una zona más o menos amplia de profundidad (figura 52, rectángulo rojo). Conforme se recorre la gota desde el interior hasta el exterior, este suave gradiente va desapareciendo, de forma que paulatinamente se va alcanzando en la superficie del sustrato la temperatura inicial del acero, dándose así en esta zona un gran salto de temperaturas muy brusco entre la base de la gota y la superficie superior del sustrato en una mínima longitud de altura y no apreciándose más este efecto del gradiente de temperaturas que se adentra en el interior de la superficie metálica.

Para ilustrar de que zonas se está hablando y apreciar con claridad este efecto, se adjunta a continuación la figura 52 perteneciente al spread 0,8 que sirve de ejemplo y dónde se han remarcado las zonas mencionadas:

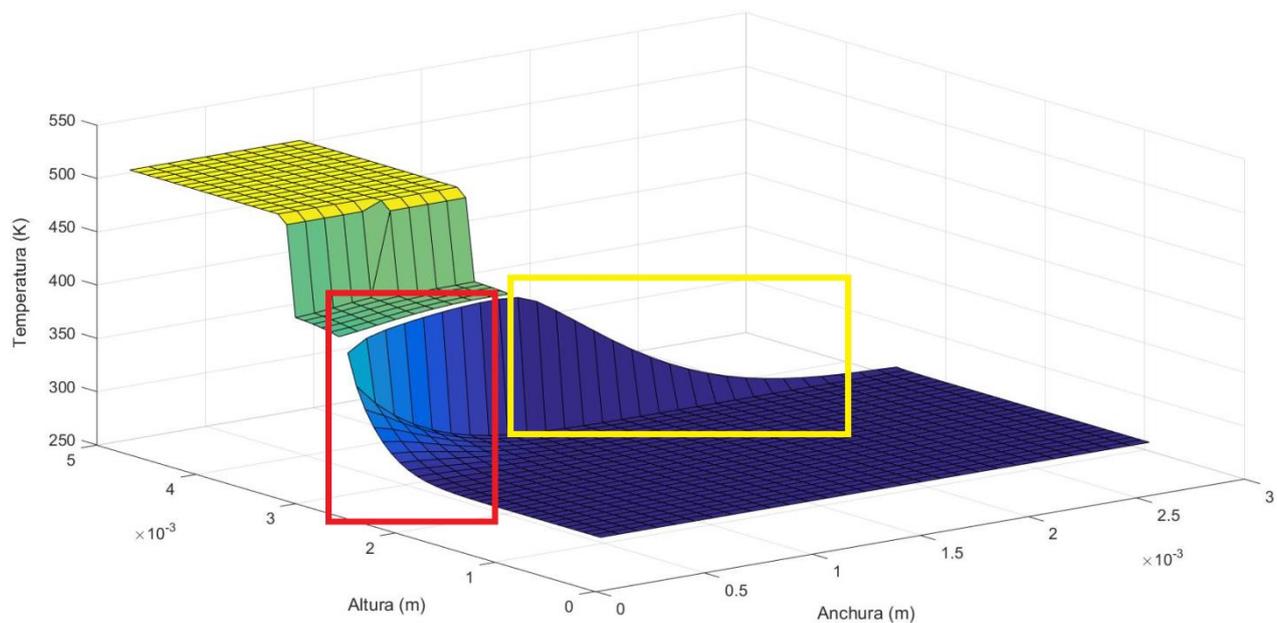


Figura 51. Imagen de la gota de spread 0,8 con la superficie metálica. En rojo, se destaca la zona del sustrato en la que la temperatura inicial se ve afectada por la transmisión de calor de la gota al mismo. En amarillo, la zona superficial del sustrato alrededor de la gota en la que la temperatura va descendiendo desde la temperatura de la gota hasta alcanzar los 25 °C, que es la temperatura inicial de la superficie metálica.

Por tanto parece que a mayor cantidad de material sobre el sustrato, circunstancia que se da en la parte central de la gota, la conducción del calor de la gota al sustrato es mucho mayor que en zonas más exteriores donde prácticamente no hay conducción y donde solo se puede ver el salto de temperaturas a nivel superficial de la temperatura de la gota caliente a la de 25 °C. Además hay que comentar, que aunque la gota finalice en dirección anchura, la temperatura sobre la superficie metálica en este eje sigue por encima de 25 °C, aunque sobre ella no haya gota (figura 52, rectángulo amarillo). Esto es, la temperatura sobre la superficie metálica, va cayendo lentamente en el espacio hasta volver a su temperatura original.

Estas dos situaciones quedan reflejadas en la siguiente imagen donde en rojo se tiene la temperatura de la base de la gota (muy caliente), en amarillo temperaturas inferiores a ésta y en azul, la temperatura de 25 °C. Quedan así reflejadas las temperaturas en toda la sección de la superficie metálica:

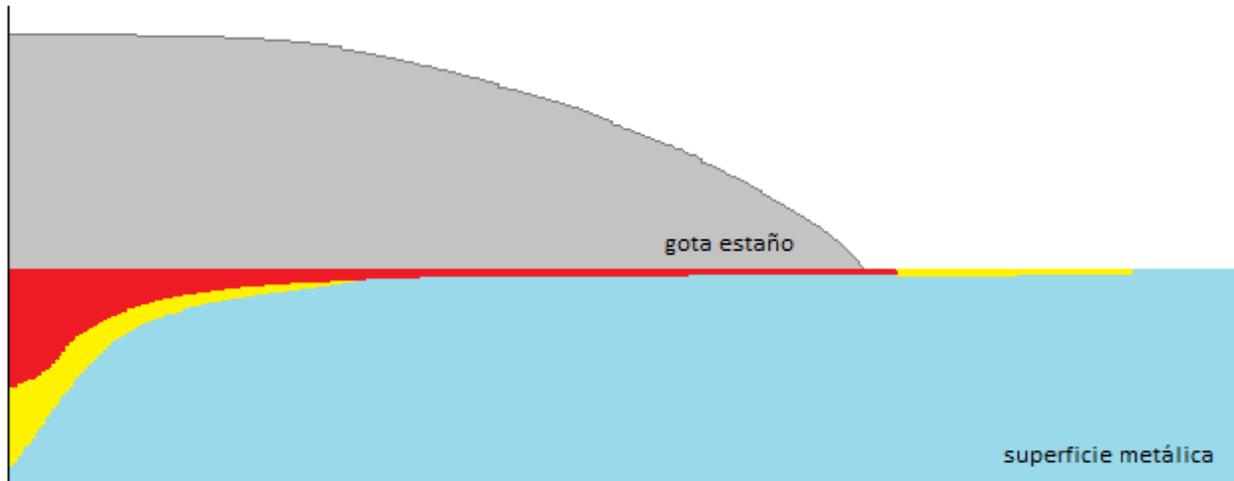


Figura 52. Representación del perfil de la gota sobre la superficie metálica. Sección transversal. Se aprecia lo descrito arriba. Hay una fina capa bajo la gota que se encuentra a la misma temperatura de la misma (color rojo). Continuando esa línea, en amarillo, se aprecia sobre la superficie metálica una temperatura mayor a la inicial de la superficie metálica, hasta que se alcanza la temperatura de 25 °C, representada en azul. Finalmente en la parte central se aprecia como el gradiente de temperaturas penetra en la superficie metálica y se va desvaneciendo conforme se recorre la coordenada x hacia el exterior.

En todos los casos, sobre el eje y, la temperatura del metal del sustrato no alcanza los 25 °C hasta 1 mm de profundidad. Alrededor de esa zona, se produce un gradiente de temperaturas, tal y como se puede apreciar en las figuras del apartado 4, hacia la derecha en sentido creciente del eje x y hacia abajo en sentido decreciente del eje y hasta se alcanza la temperatura original del acero. Esta zona de gradientes suaves decrece en tamaño relativo respecto a la anchura de la gota conforme aumenta el spread. Se ha de esperar que a medida que hay menos material en estado líquido, y por tanto temperaturas más bajas en la gota, la conducción de calor vaya decreciendo, haciendo que su efecto sobre la superficie metálica se vaya disipando. En la siguiente imagen se muestra la evolución entre el spread 0,8 y el 2,5 de la tendencia antes descrita.

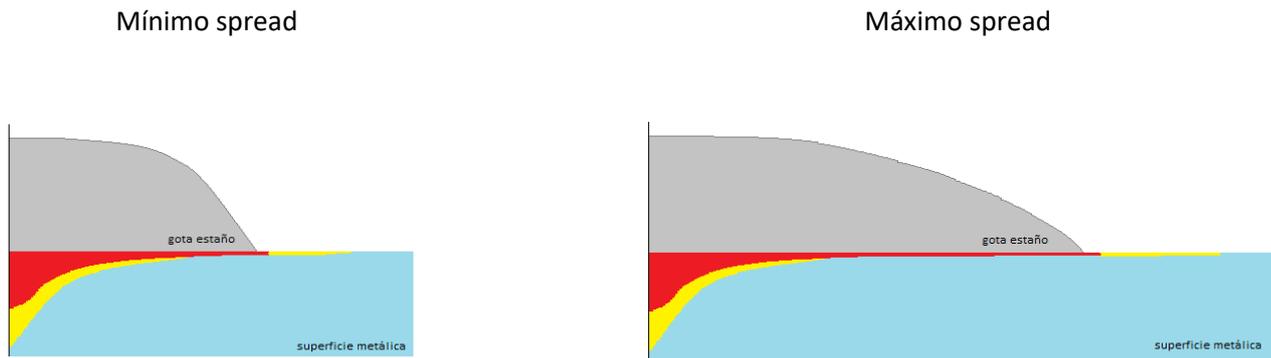


Figura 53. Evolución de la extensión del gradiente de temperaturas en el interior de la superficie metálica que se adentra hasta 1mm en el sustrato en todos los casos. Se aprecia como decrece su extensión respecto al tamaño de la anchura de la gota conforme aumenta el spread.

Por otra parte, una vez finaliza la gota en la dirección anchura, la caída de temperatura en la superficie metálica es muy pronunciada al principio y después se suaviza hasta los 25 °C. En todos los casos estas longitudes de superficie que no están a la temperatura inicial se extienden 1-1,5 mm alrededor de la gota.

4.6.10 CASOS ANÓMALOS Y EXCEPCIONES

A pesar de lo comentado anteriormente, en algunos casos de spread no se sigue la tendencia que cabría esperar respecto a ciertas temperaturas.

En el caso de spread 1, se tiene que la temperatura alcanzada en el extremo del eje anchura, es menor a la alcanzada que la del caso 0,8, lo cual rompe la tendencia de ascensión de temperaturas conforme aumenta el spread. Por otra parte, las diferencias de temperatura, ΔT del eje y es mayor que en el caso de spread 0,8, lo cual rompe la tendencia de que conforme aumenta el spread (y disminuye la altura), las ΔT disminuyen. Hay que comentar por otra parte que la diferencia entre estas diferencias de temperatura de spread 0,8 y 1 son prácticamente nulas por lo que tampoco se considera un caso tan anómalo y puede deberse a que para el estudio llevado a cabo con un n_g (número de cedas) igual 7, al tratarse de una gota de pequeña extensión, este n_g fuera insuficiente. Por ejemplo, el caso de spread 0,8 se realizó con un n_g igual a 25. De nuevo, se encuentra que para la ΔT en el eje x de anchura, que sigue la tendencia de aumentar conforme crece el spread, en el caso de 1 es menor que en el de 0,8, lo cual contradice lo anterior. De nuevo la diferencia entre



estas ΔT es muy pequeña por lo que tampoco se considerará un gran error. El gran salto de los valores de ΔT se produce por el caso de 1,5, esta vez si ya cumpliéndose hasta 2,5 la tendencia descrita.

El caso que si resulta más curioso es el de spread 1,5. En él las temperaturas del eje vertical descienden, encontrándose la temperatura más baja de la gota, justo en el centro de la superficie superior. En ninguno de los otros spread se registra este comportamiento. No se tiene explicación para este hecho concreto y a lo único que se puede achacar es a una configuración específica de tamaño. Esto es, que se produzca este fenómeno por tenerse una determinada combinación de altura y anchura.



5. CONCLUSIONES



5. CONCLUSIONES

A continuación se va a realizar un resumen de los resultados obtenidos, así como de las tendencias y posibles influencias de los distintos spread en diferentes parámetros.

La primera conclusión clara que se obtiene es que el spread de la gota tiene influencia sobre la altura. Conforme aumenta el spread de la misma, la altura decrece para un mismo tiempo de solidificación. Por otra parte, si el spread aumenta, la anchura aumenta.

Conforme aumenta el spread, las temperaturas máximas y mínimas alcanzadas en cada gota decrecen. El descenso de las temperaturas mínimas es más significativo que en las máximas que es bastante constante salvo en el caso de 2,5, donde se produce un desplome de la misma.

El spread no tiene influencia en la máxima ΔT (diferencia entre la temperatura máxima y mínima que se producen en la gota) alcanzada en la gota. Son valores que no presentan ninguna tendencia y son bastante parejos.

El spread resulta, para un tiempo de solidificación determinado, determinante para la cantidad de material solidificado en la gota. Conforme aumenta el spread (aumenta anchura, desciende altura) el porcentaje de estaño líquido disminuye hasta ser nulo en el caso de 2,5.

Sobre los ejes x (anchura) e y (altura), las temperaturas aumentan desde el interior hasta el exterior de la gota. Conforme aumenta el spread, la temperatura en el centro de la gota sobre la superficie metálica desciende.

En general a más extensión de material, más conducción de calor desde el centro de la gota hasta el exterior se produce y mayores temperaturas en los extremos se alcanzan, disminuyendo las temperaturas en la parte central de la gota, es decir, aumentan las diferencias de temperatura, insistiendo en todo momento, para un mismo tiempo de solidificación. Se deduce de las distribuciones de temperaturas por tanto que el calor por conducción dentro de la gota va desde dentro hacia fuera.

Finalmente comentar los efectos sobre la superficie metálica del calor de la gota y que son los responsables de que la gota comience siempre a solidificar desde el interior hacia el exterior y sobre todo que la primera parte en solidificar sea la central de la gota. Se produce una penetración del calor por conducción en la zona central bajo la gota hacia el sustrato que hace que se produzcan gradientes de temperatura bajo la superficie del mismo que alcanzan una cierta profundidad y que se van disipando conforme se avanza hacia el exterior de la gota en dirección x hasta que se vuelven a alcanzar los 25 °C bajo la parte más exterior de la gota.

La presencia de este gradiente denota la importancia de la transmisión de calor por conducción desde la gota a la superficie metálica en los primeros compases de la solidificación. La presencia de este gradiente indicia la gran cantidad de calor transmitido al sustrato, lo que hace que la gota comience a solidificar por la parte central y también aunque en menor medida por la parte baja en contacto con el sustrato. Sobre la superficie metálica y alrededor de la gota en la superficie no mojada más cercana, también hay una zona donde se produce un descenso de temperatura desde la de la gota hasta la inicial del acero. Este fenómeno último es solo a nivel superficial del sustrato.

De la observación de las temperaturas de las gotas y de los estados de las zonas y por lo comentado en el párrafo anterior, se prevé que en general la solidificación de cualquier gota se produce de la siguiente forma según el siguiente esquema. En amarillo, zona en estado líquido y en azul, zona en estado sólido. Son secciones transversales de la gota iguales que las representadas anteriormente pero con los dos planos de simetría. Evolución de la gota desde el instante inicial de depósito $t=0$, hasta el tiempo final de solidificación t solid:

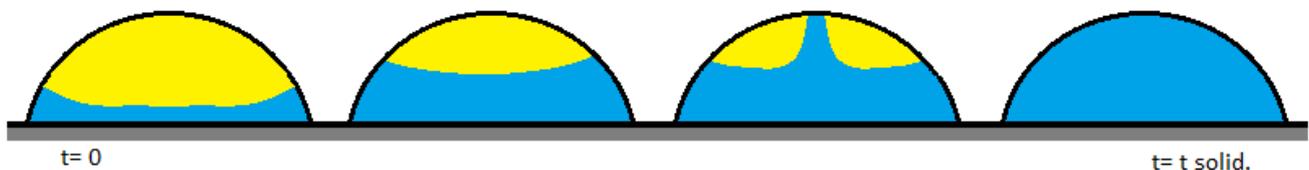


Figura 54. Evolución del proceso de solidificación de la gota a lo largo del tiempo desde su depósito hasta el tiempo final de solidificación. Sección transversal de la gota. En amarillo, zonas en estado líquido y en azul, zonas en estado sólido.

A continuación se muestra un esquema resumen con las tendencias de diferentes temperaturas respecto al aumento de spread. En general:

Si aumenta spread {

- Disminuye la altura y aumenta anchura*
- Disminuye la temp. máxima*
- Disminuye la temp. mínima*
- No influye sobre la ΔT máxima*
- Disminuye cantidad de material sin solidificar*
- Disminuyen temperaturas origen eje simetría*
- Aumentan temperaturas máximas alcanzadas en el eje anchura*
- Disminuyen temperaturas máximas alcanzadas en el eje altura*

Figura 55. Esquema resumen de las observaciones más relevantes realizadas. Respecto al aumento en el spread, se observan estas tendencias de las temperaturas y el estado del material de la gota.



Una vez comentados todos estos aspectos, corresponderá según las necesidades, especificaciones requeridas etc, de la aplicación que se vaya a realizar la toma de decisión sobre la extensión de gota a emplear. Sirva este trabajo para conocer cómo se comporta el metal estaño y por extensión otros metales con características físicas y químicas parecidas.

Sea una aplicación en la que se depositen gotas de estaño sobre una superficie para la creación por ejemplo de una capa de material a base de gotas del mismo, es posible estableciendo el spread en el instrumento que se emplee para el depósito de las gotas, controlar la altura que van a tener esas gotas que formarán la capa. Según los tiempos de solidificación que sean necesarios durante la aplicación, para obtener gotas completamente solidificadas, se tiene una referencia para un tiempo de 12 ms de la velocidad de solidificación de la gota, sabiendo para diferentes extensiones el estado en que se encuentra la gota para ese tiempo. También se conoce por qué zonas comienza a solidificar la gota, esto es el mecanismo de solidificación observando las temperaturas en cada caso, lo cual también puede resultar bastante útil. Además se conocen los efectos sobre la superficie de metal que sustenta a la gota en cuanto a temperaturas alcanzadas, profundidad del sustrato y a nivel superficial alrededor de la gota, lo cual ayudará a elegir el correcto material y su espesor sabiendo la distribución de temperaturas que en él se produce.



6. APLICACIONES

6. APLICACIONES

A continuación se detallan algunas de las aplicaciones para las que este estudio se puede haber realizado.

La pulverización de material líquido o el depósito de gotas de material fundido sobre diferentes superficies en los procesos de fabricación están muy extendidos. Por ejemplo en la elaboración de los recubrimientos térmicos de superaleaciones, en las que se van depositando capas de diferente material una sobre otra para formar la estructura o por ejemplo, la pintura por pulverización de automóviles, aviación, etc. Resulta importante conocer como la morfología y tamaño de estas gotas pueden influir sobre las propiedades del elemento final del que forman parte. Hablamos de efectos aerodinámicos por ejemplo en la pintura utilizada para cubrir aviones o efectos de la tensión a nivel superficial entre una gota de material líquido sobre una superficie metálica en estado sólido y cuyos efectos pueden tener consecuencias negativas o favorables en la resistencia de un material compuesto de capas de diferentes elementos.



Figura 56. Dos imágenes de ejemplos anteriormente comentados de la aplicación del estudio de solidificación de gotas de material sobre una superficie. A la izquierda, un esquema de una superaleación con diferentes recubrimientos térmicos [9]. A la derecha un avión comercial, pues la industria aeronáutica es uno de los grandes focos de aplicación de las técnicas de fabricación comentadas arriba. [11].

El impacto de una gota en estado líquido sobre una superficie sólida es un interesante fenómeno de estudio. Tal y como relatan Aziz, Shiraz D. y Chandra, Sanjeev en su artículo *Impact, recoil and splashing of molten metal droplets*, las primeras investigaciones que se llevaron a cabo consistieron en fotografiar gotas de agua que chocaban contra una superficie sólida, mostrando las complejas formas que las gotas adquirían mientras se extendían e impactaban contra la superficie. Desde entonces, ha habido muchos esfuerzos dedicados a estudios de impacto de gotas, motivado por el desarrollo de diferentes tecnologías de fabricación e ingeniería que atañen al depósito de gotas sobre superficies sólidas.

Las aplicaciones en las cuales diferentes modelos de impactos de gotas han sido utilizados son variadas. Por ejemplo el enfriamiento por pulverizado de superficies calientes, técnicas de impresión, pintura en spray, apagado de incendios mediante sistemas de aspersión, deposición de gotas de material de soldadura sobre

placas de circuitos integrados, recubrimientos térmicos de distintos materiales o erosión de superficies por lluvia de gotas de un determinado material. Un proceso industrial extendido es en el cuál polvos de metal o material cerámico son inyectados en un reactor de gas a alta temperatura, dónde estas partículas se funden y son aceleradas para impactar sobre la zona a recubrir. Estas gotas rápidamente solidifican cuando impactan en el sustrato, produciéndose depósitos densos de grano fino y estructuras muy homogéneas. Estos recubrimientos térmicos son ampliamente usados para proteger componentes expuestos a corrosión, calor o desgaste. Las propiedades mecánicas de los recubrimientos dependen fuertemente de la forma de las salpicaduras formadas por las diferentes gotas que impactan y solidifican. El conocimiento de las principales leyes físicas que rigen la solidificación de las gotas permitirá variar sus parámetros y obtener las propiedades deseadas [8].

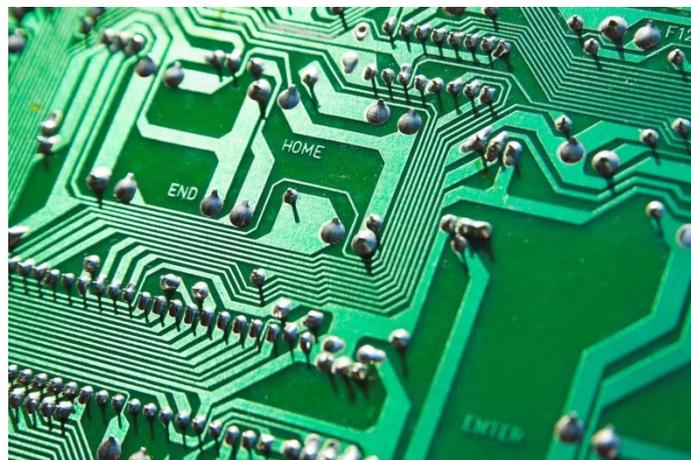


Figura 57. Un circuito impreso donde se pueden apreciar las numerosas gotas depositadas de material metálico, como puede ser el estaño, que forman parte del mismo. Es de gran importancia la técnica y exactitud en la elaboración de estos elementos [10].

Este trabajo (estaño sobre superficie de acero) es aplicable al caso concreto de los aceros recubiertos de estaño o aceros estañados. El estaño se emplea para la prevención de la corrosión del acero, esto es, la oxidación del hierro que mayoritariamente lo compone. Esta combinación de metales está muy extendida en la industria alimentaria, por ejemplo, en la elaboración de latas de refresco o envases para conservas. El alto precio del estaño, conduce a la elaboración de recubrimientos cuyas capas sean lo más delgadas posible pero que no comprometan la integridad del acero. En la búsqueda de este equilibrio resulta imprescindible el conocimiento del comportamiento del estaño sobre el acero y de sus mecanismos de solidificación, formas que adquieren, temperaturas etc.



Para finalizar, comentar que muchos de los fenómenos físicos que intervienen o que se producen en este proceso son poco conocidos, como por ejemplo, la complejidad que representa el hecho de que la gota solidifique mientras se extiende o algunos efectos de transmisión del calor concretos. Desde el punto de vista del investigador, el análisis del impacto de gotas y su posterior expansión ofrece varios y complejos retos que se siguen estudiando en la actualidad.



7. REFERENCIAS

7. REFERENCIAS

- [1] SÁNCHEZ PÉREZ, Juan Francisco. Propuesta trabajo fin de grado, “Estudio del tiempo de solidificación de una gota de estaño en función de su extensión”
- [2] Codam S.A. com [en línea], consulta: 2/8/18, disponible en: <http://Codam.com/wp-content/uploads/2016/10/estano-puro-en-anodos-003.jpg>
- [3] RSC: Royal Society of Chemistry [en línea], consulta: 14/8/18, disponible en: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/50/tin>.
- [4] PASANDIDEH FARD, Mohammad. Droplet impact and solidification in a termal spray process. Tesis doctoral. Departamento de ingeniería mecánica e industrial de la Universidad de Toronto. 1998. Pag. 70-74.
- [5] PASANDIDEH FARD, Mohammad. Droplet impact and solidification in a termal spray process. Tesis doctoral. Departamento de ingeniería mecánica e industrial de la Universidad de Toronto. 1998. Pag. 88-101.
- [6] GONZALO GARCÍA, Martín. Comparación de los distintos modelos para la difusión de contaminantes emitidos por fuentes puntuales. TFG. Departamento de ingeniería mecánica UPCT.2017. Pag. 31.
- [7] MADRID GARCÍA, C. Nicolás. NAVARRO ANDREU, José Ramón. Transmisión del calor. Escuela técnica superior de ingeniería industrial. UPCT. Pag. 77-85.
- [8] AZIZ, Shiraz D. CHANDRA, Sanjeev. Impact, recoil and splashing of molten metal droplets. Artículo. Departamento de ingeniería mecánica e industrial de la Universidad de Toronto. 1999. Pag. 1-2.
- [9] BERMÚDEZ OLIVARES, María Dolores. Apuntes de Tecnología de Materiales. Fatiga, Creep y Superaleaciones. 4º curso de GITI. UPCT.
- [10] Circuitos impresos S.A [en línea], consulta: 14/8/18, disponible en: <https://www.circuitosimpresos.net/wp-content/uploads/2017/11/circuitos-electronicos.jpeg>.
- [11] Aeronauticap.com [en línea], consulta: 14/8/18, disponible en: <https://aeronauticap.com.files.wordpress.com/2017/08/concorde4.jpg>.

