



## Ciencia Nicolaita 86

ISSN: 2007-7068



Universidad  
Michoacana  
de San Nicolás  
de Hidalgo

# Despliegue de gotas sobre superficie a alta temperatura

## Display of drops on surface at high temperature

Luis Fernando Huerta Mendoza, Gildardo Solorio Díaz, Crisanto Mendoza Covarrubias\*,  
Alicia Aguilar Corona

**Para citar este artículo:** Luis Fernando Huerta Mendoza, Gildardo Solorio Díaz, Crisanto Mendoza Covarrubias\*, Alicia Aguilar Corona, 2022. Despliegue de gotas sobre superficie a alta temperatura. Ciencia Nicolaita no. 86, 111-121.  
DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi86.662>



### Historial del artículo:

Recibido: 24 de mayo de 2022

Aceptado: 4 de octubre de 2022

Publicado en línea: diciembre de 2022



**Ver material suplementario**



**Correspondencia de autor:** [cmendoza@umich.mx](mailto:cmendoza@umich.mx)



**Términos y condiciones de uso:** <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



**Envíe su manuscrito a esta revista:** <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

# Despliegue de gotas sobre superficie a alta temperatura

## Display of drops on surface at high temperature

Luis Fernando Huerta Mendoza, Gildardo Solorio Díaz, Crisanto Mendoza Covarrubias\*,  
Alicia Aguilar Corona

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica

### Resumen

La extracción de calor debido al uso de agua es el principal método de enfriamiento utilizado en diversos procesos metalúrgicos, siendo el enfriamiento secundario en colada continua uno de ellos, donde por medio de chorros de agua generados por boquillas, se elimina la mayor cantidad de calor. Existen adaptaciones en este método de enfriamiento que permiten acelerar la transferencia de calor, tales como: variación de caudal de agua, velocidad de aspersión de agua y pulverización de agua. Sin embargo, existen pocos trabajos que se enfoquen en el conocimiento básico de la transferencia de calor entre la superficie a alta temperatura y gotas de agua que salen pulverizadas (Celata *et al.*, 2006). Por lo tanto, en este trabajo, mediante técnicas de imagen con cámaras de alta velocidad, se realiza una investigación de cómo se da el despliegue de la gota después de que esta impacta sobre una superficie que se mantiene a distintos valores de temperatura. Con la utilización de un microgotero y normogotero, se garantizan dos tamaños de gotas de 3.5 mm y 5 mm de diámetro, respectivamente. Las gotas se dejan caer por gravedad sobre la superficie desde una altura de 80 cm y, con la ayuda de las imágenes obtenidas mediante la cámara de alta velocidad, se analiza el despliegue de la gota para temperaturas que van desde la temperatura ambiente hasta los 800 °C. Como resultados se observa que, dependiendo de la temperatura superficial de la placa metálica, el comportamiento del despliegue de la gota al momento del contacto varía; asimismo, se observa cómo la rugosidad interfiere en el despliegue de la gota de agua al momento de hacer contacto con la placa.

**Palabras clave:** variación de temperatura, rugosidad, despliegue de gota, comportamiento de gota, velocidad



## Abstract

Heat extraction due to the use of water is the main cooling method used in various metallurgical processes, being the secondary cooling in continuous casting one of them, where through jets of water generated by nozzles, the most heat is removed. There are adaptations in this cooling method that allow to accelerate heat transfer, such as: water flow variation, water spray speed and water spray. However, there are few works that focus on the basic knowledge of heat transfer between the surface at high temperature and water droplets that spray out (Celata *et al.*, 2006). Therefore, in this work by means of imaging techniques with high-speed cameras, an investigation is made of how the drop unfolds after it impacts a surface that is maintained at different temperature values. With the use of a microdropper and normogotero, two drop sizes 3.5 mm and 5 mm in diameter are guaranteed, respectively. The drops are dropped by gravity on the surface from a height of 80 cm, and with the help of images obtained from the high-speed camera, the deployment of the drop is analyzed for temperatures ranging from ambient temperature, to 800 °C. As a result, depending on the surface temperature of the metal plate, the behavior of the drop deployment at the time of contact varies. It is also observed how the roughness interferes in the deployment of the drop of water when making contact with the plate.

**Keywords:** temperature variation, roughness, drop deployment, drop behavior, speed

## Introducción

La elaboración de acero por medio de colada continua representa, actualmente, su principal vía de obtención. En los últimos años, el empleo de esta tecnología ha ido creciendo en casi todos los países del mundo, reemplazando paulatinamente el colado convencional en lingotes (Cicutti, 1997). Sin embargo, a diferencia del colado convencional en lingotes, la solidificación del material procesado por colada continua ocurre en pocos minutos, estando el producto sometido a fuertes tensiones y deformaciones por lo que la calidad del mismo está íntimamente relacionada con la evolución térmica a lo largo del proceso. El enfriamiento secundario tiene como función solidificar el acero líquido a un remanente dentro de la sección colada, formando una “piel” estable y evitando la formación de grietas internas u otros defectos (Pulgar Hormazábal, 2017). En el proceso, la extracción de calor se produce, principalmente, debido a la conducción de calor por contacto del rodillo-línea, por radiación desde la superficie del acero, por evaporación parcial del agua que incide sobre el producto y por conducción de calor del agua que escurre y se acumula entre el rodillo y el acero (Sengupta *et al.*, 2005).

## Antecedentes

El proceso de colada continua se desarrolló hace varias décadas para producir formas posteriores en procesos de semi-fabricación como laminado o extrusión en aceros. La productividad del proceso está controlada por la velocidad de fundición, por lo que siempre se buscan las velocidades más altas; sin embargo, la velocidad de salida del planchón o palanquilla no se puede aumentar arbitrariamente por diferentes razones (Sengupta *et al.*, 2005), por ejemplo, por el sistema de enfriamiento secundario. Aquí se basa solamente en la velocidad de colada y en un control de avance, el cual se aplica para calcular el agua de refrigeración y el caudal requerido. Un aumento en la velocidad de colada, implica un enfriamiento menos eficiente (Ji & Yang, 2010). Comúnmente, en el enfriamiento secundario son utilizadas boquillas en donde se mezcla agua y aire, la cual se regula variando el caudal del agua y manteniendo constante la presión de la boquilla del aire (Montes & Castillejos *et al.*, 2008). Se ha visto que la medición de la distribución del coeficiente de transferencia de calor, no está en función de la distribución del líquido suministrado por las boquillas (Horský & Raudenský, 2005). En cambio, el coeficiente de transferencia de calor es más sensible al

cambio con la modificación de la presión del aire. La combinación de ambos parámetros da una buena función de correlación de calidad (Kotrbacek *et al.*, 2021).

La mayoría de los estudios sobre el enfriamiento secundario se basan en la investigación de las boquillas que inducen una mezcla de agua y aire, variando velocidad de aspersión de agua, caudal de agua, presión de aire, por mencionar algunos, pero pocos se basan en la influencia de la temperatura de una superficie caliente y una gota derivada de la pulverización del chorro de agua a través de boquillas. Existen también investigaciones en donde se trabaja en una superficie caliente que ronda entre los 200 °C y 300 °C, cuyo objetivo principal es conocer más a fondo lo que sucede con un impacto de gota y el efecto Leidenfrost (Karl & Frohn, 2000). Labeish y Pimenov (1984), hicieron pruebas de transferencia de calor entre gotas y pared, en donde la superficie fue calentada desde los 120 °C y continuaron con más análisis que superaron los 360 °C de temperatura. Por su parte, Tartarini y colaboradores (1999) realizaron pruebas de impacto de gotas en una superficie que osciló entre 100 °C y 200 °C, esto para conocer el efecto del inicio de la ebullición en la tasa de evaporación de la gota de agua, medir la evolución de la temperatura de la superficie sólida durante la evaporación y examinar alguna posibilidad de hacer una mejora en cuanto a la eficiencia del enfriamiento por aspersión de agua. Por otro lado, en el trabajo de Bertola (2015) se estudia la morfología del impacto de una gota de agua sobre una superficie que es calentada en un rango de temperatura de los 50 °C hasta los 400 °C. En su investigación, propone varios regímenes de impacto en función del resultado final del comportamiento de la gota.

Del mismo modo, la rugosidad en superficies calientes es de importancia, pues existe una influencia directa sobre la transferencia de calor y las gotas que impactan en la misma. Las superficies irregulares presentan cavidades y picos que causan una transferencia de calor no homogénea que repercute directamente a la gota que impacta. Se han realizado diversos estudios sobre el efecto de la rugosidad en superficies calientes para conocer un poco más de este comportamiento. Por ejemplo, Mudawar y colaboradores (1996), presentan un trabajo en donde realizan técnicas de fotografía a alta velocidad y miden la transferencia de calor para el estudio del impacto de

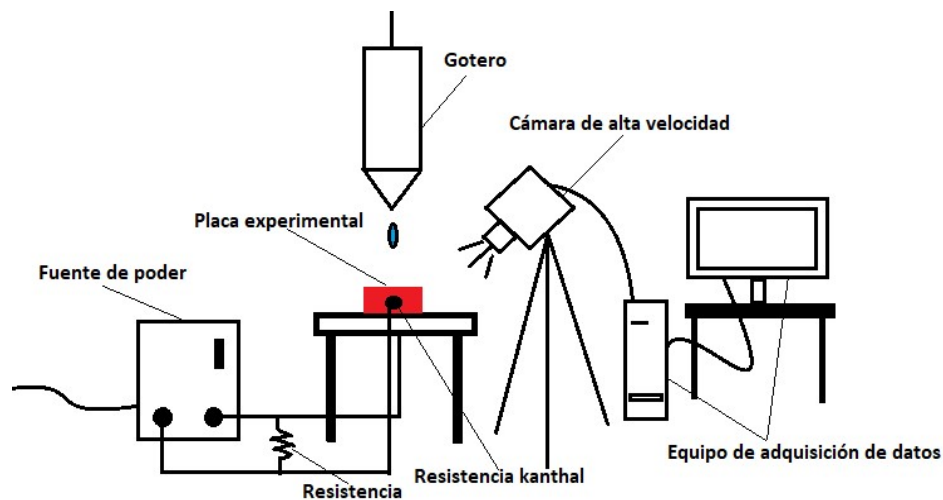
una gota sobre superficies calientes a diferentes valores de rugosidad: de 97, 970 y 2960 nm, en donde encuentran que, gracias a la rugosidad, la gota es capaz de romper en temperaturas menores que en superficies pulidas. Karl y Frohn (2000), en cambio, mencionan que el comportamiento general del impacto de gotas no cambia con los diferentes valores de rugosidad en la superficie.

En este trabajo se estudió el comportamiento y despliegue de gotas sobre una superficie caliente a distintas temperaturas, así como la velocidad de la gota cercana a la superficie caliente, además se analizó el efecto de la rugosidad de la superficie sobre el despliegue de la gota.

## Metodología experimental

Para la metodología experimental se llevó a cabo la construcción de un banco de pruebas que se muestra de manera representativa en la figura 1.

Las pruebas parten con el calentamiento de una placa de acero inoxidable AISI 304, la cual tiene dimensiones de 25.4 mm x 25.4 mm x 62 mm, y una perforación céntrica longitudinal de 15 mm de diámetro en donde se coloca una resistencia tipo Kanthal, la cual es calentada por medio de una máquina para soldar que suministra 18 amperes, corriente necesaria para alcanzar los 800 °C en la superficie de la placa experimental. La transferencia de calor que se da entre la resistencia tipo Kanthal y las paredes internas de la placa es por radiación. Una vez alcanzada la temperatura a la cual se hará la prueba, se deja caer una gota de agua que es influenciada por la acción de la gravedad y generada por un normogotero o microgotero (5 mm y 3.5 mm de diámetro de gota, respectivamente). Estos goteros han sido previamente modificados para poder controlar la caída de la gota en función del tiempo a través de un estrangulador. Simultáneamente a la caída de la gota, se utiliza una cámara de alta velocidad *visión research phantom* modelo *miro 340*, que permite tomar videos a 3000 fps. Una buena iluminación es fundamental para obtener imágenes de calidad en la experimentación, pues al tomar videos por encima de los 1000 fps, el obturador de las cámaras tiende a absorber menores cantidades de luz. Como parte final de la prueba, se guarda el video obtenido por la cámara de alta velocidad y se dispone de softwares específicos para hacer edición y análisis de



**Figura 1.** Esquema representativo del banco experimental.

los datos generados. Esta metodología es utilizada para todos los casos de investigación que parten de los 100 °C hasta los 800 °C. En las pruebas isotérmicas, se omite el calentamiento de la placa.

## Resultados

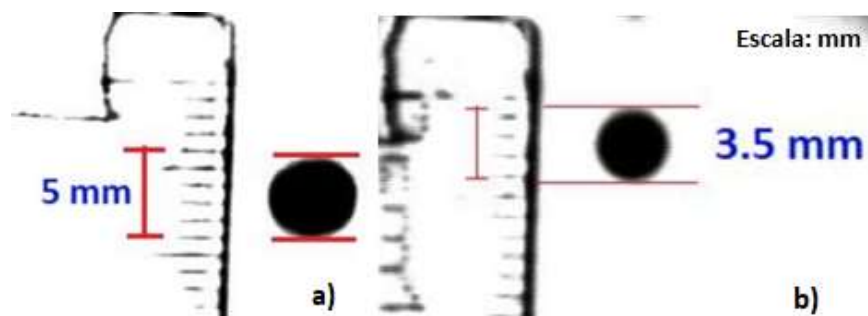
A continuación se muestran los resultados y observaciones realizadas en los experimentos de impacto de gotas en superficies a altas temperaturas.

### Visualización de gota a diferentes temperaturas

En la prueba de 100 °C se nota claramente que después del despliegue de la gota, esta no se desprende de la superficie para romper y generar partículas de gotas más pequeñas. Se observa cómo la película de agua se encuentra en transición, pues no tiene la temperatura necesaria como para generar una capa de vapor estable que permita un rebote de partículas. Esto sucede porque la superficie no es lo suficientemente caliente, ya que, con base en la literatura, a partir de

los 193 °C se genera el efecto de Leidenfrost, que es el fenómeno que explica el movimiento errático de las partículas de algún líquido volátil al hacer contacto con una superficie metálica caliente.

La segunda prueba realizada de una gota que impacta sobre una superficie caliente, fue de 200 °C. Se puede corroborar que, efectivamente, la gota rompe y se despliega en partículas más pequeñas, demostrando que el efecto Leidenfrost ocurre a temperaturas superiores de los 193 °C. También se observa que el rompimiento de la gota en volúmenes más pequeños no se da justo después del impacto de la gota, sino que tarda un periodo de tiempo para que se desprenda de la superficie: alrededor de 4.66 milisegundos para el caso particular. En este tiempo de transición, la energía potencial de la gota se transforma a energía cinética, acción por la cual, en conjunto con el efecto Leidenfrost, se logra visualizar la elevación y movimiento de las partículas de agua.



**Figura 2.** Obtención de los diámetros de gota (cada línea horizontal). a) Gota generada por normogotero, b) Gota generada por microgotero.

Para la temperatura de 300 °C, la capa de vapor que existe entre la superficie caliente y la gota comienza a mostrar una tendencia estable, puesto que la diferencia de temperaturas es cada vez mayor y, por lo tanto, la evaporación de la gota sucede a más velocidad.

Para una gota que impacta la superficie caliente a 400 °C se observa que, en cuanto al despliegue, desprendimiento y movimiento de la gota, presenta una tendencia similar a la mostrada con la temperatura de 300 °C. La película de vapor pasa de estar bajo un régimen en transición a una fase estable, en la cual la capa de vapor hace que el coeficiente de transferencia de calor disminuya, por lo que en esta etapa se puede considerar un aumento en la velocidad de impacto de la gota.

Una vez que se ha alcanzado una temperatura que permite generar una película de vapor estable (de 600 °C a 800 °C), se observa la interacción entre la superficie caliente y la gota. En esta etapa se visualiza cómo el vapor permite que se despliegue en un mayor diámetro el agua que impacta en la superficie. Ciertas variaciones pueden producir que la gota no tenga un comportamiento habitual, por ejemplo, la suciedad en la superficie en donde impactan las gotas produce un comportamiento distinto, ya que no permite que se haga un contacto homogéneo. En este sentido, para la prueba de 500 °C la superficie metálica presenta suciedad, de ahí que, al no existir un contacto libre de imperfecciones, la gota genera una capa de vapor inestable, por lo que rompe en partículas de agua y, a su vez, impide que se extraiga calor como lo haría a través de un despliegue homogéneo.

En la Figura 3 se observa cómo se comportan las gotas que están en contacto con una superficie caliente a diferentes temperaturas.

### **Diámetros máximos de despliegue**

Se analizaron nueve videos y se capturó el momento en donde la gota generada por el microgotero mostró el despliegue máximo de la película de agua a través de la variación de la temperatura, antes de que esta se rompiera y se dividiera en partículas de agua de menor volumen. Con base en los resultados del análisis de imágenes y la medición de los diámetros máximos de despliegue de la gota, se puede comprobar que existen tres etapas en el comportamiento de

una gota que impacta una superficie metálica caliente, y que se encuentra en función de la temperatura.

Como primera etapa se tiene el comportamiento de despliegue de gota regular (véase d1 y d2 de Figura 4). Aquí se tiene una película de agua que se expande de manera natural, pues la temperatura de la superficie no tiene el calor suficiente como para generar alguna alteración o capa de vapor entre la gota y la placa metálica. La transferencia de calor bajo estas condiciones se puede considerar alta, ya que se presenta un contacto en la totalidad del tiempo.

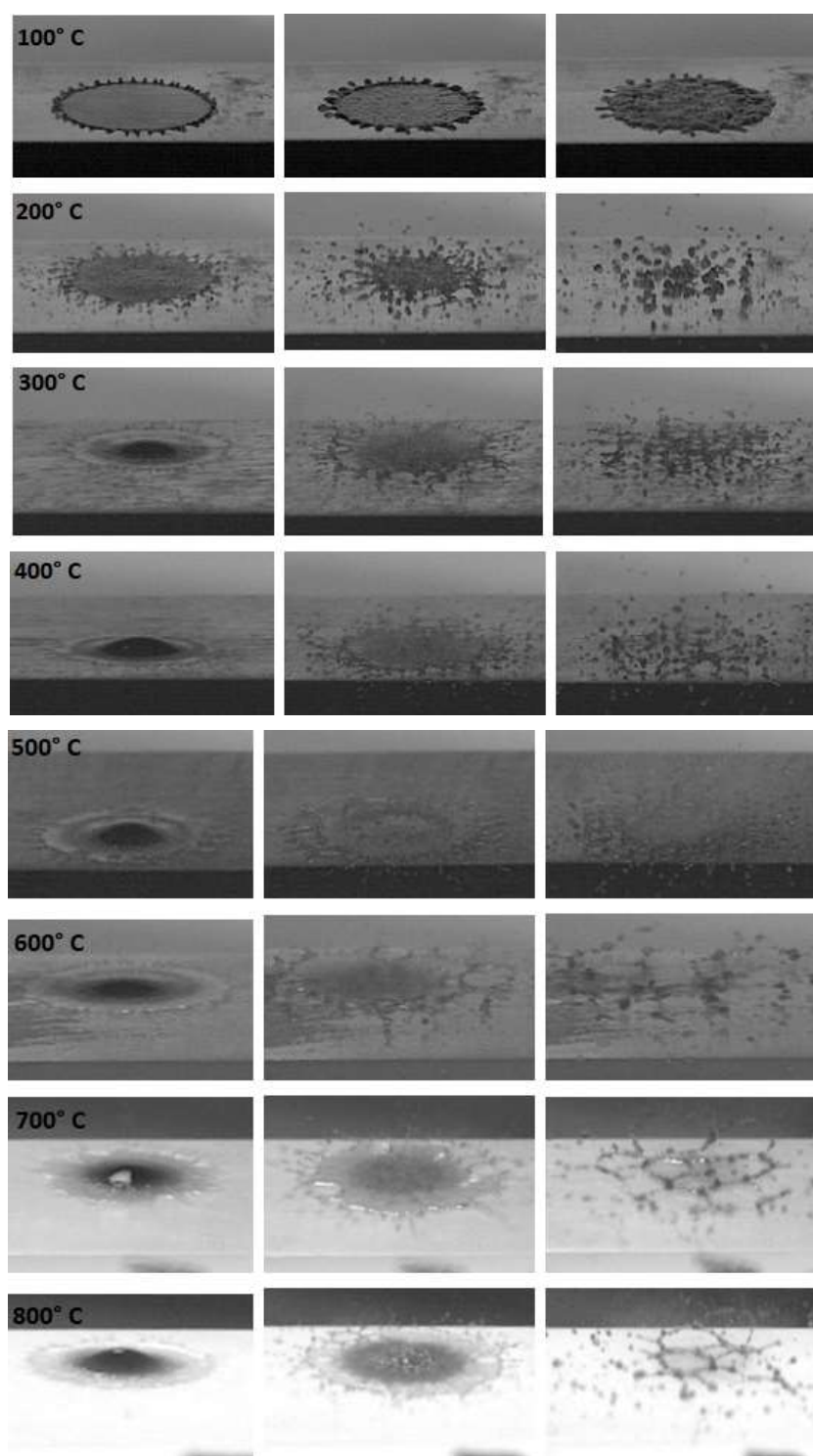
En la segunda etapa, se inicia con la presencia del efecto Leidenfrost, el cual indica la aparición de una capa de vapor entre la gota y la superficie. Para el caso particular de esta investigación, desde el d3 hasta el d6 (véase Figura 4 y Tabla 1), se encontró evidencia de una capa de vapor inestable, pues se observa cómo el diámetro máximo de despliegue es menor que el diámetro en condiciones isotérmicas. Esto es debido a que la inestabilidad de la capa de vapor provoca un rompimiento aleatorio de partículas en la película de agua, evitando que se expanda a un diámetro mayor.

Como etapa final, se tiene un comportamiento de despliegue de gota en donde se encuentra una capa de vapor totalmente desarrollada y estable, teniendo un tamaño de diámetro similar a los de la primera etapa. Como se observa en la figura 4, los diámetros d7, d8 y d9, presentan una similitud a la hora de expandirse. La película de agua sugiere una estabilidad que también permite observar un contacto mayor comparado con la etapa de vapor inestable, aunque eso no indica que la tasa de transferencia de calor sea también mayor. Al tener una capa de vapor estable en toda el área de contacto, se reduce el calor que se pudiera disipar, pues el vapor evita una correcta transferencia de calor.

### **Comportamiento de la gota a través de la variación de temperatura**

Para observar la influencia de la temperatura en la gota, se realizó un análisis en su trayectoria, donde se obtuvieron las velocidades correspondientes para cada uno de los casos de investigación. Las pruebas realizadas se tomaron en el umbral de impacto, a una altura no mayor a los 50 mm sobre la superficie metálica. El propósito de mostrar los resultados a esta distancia, es revisar si existe un cambio de velocidad



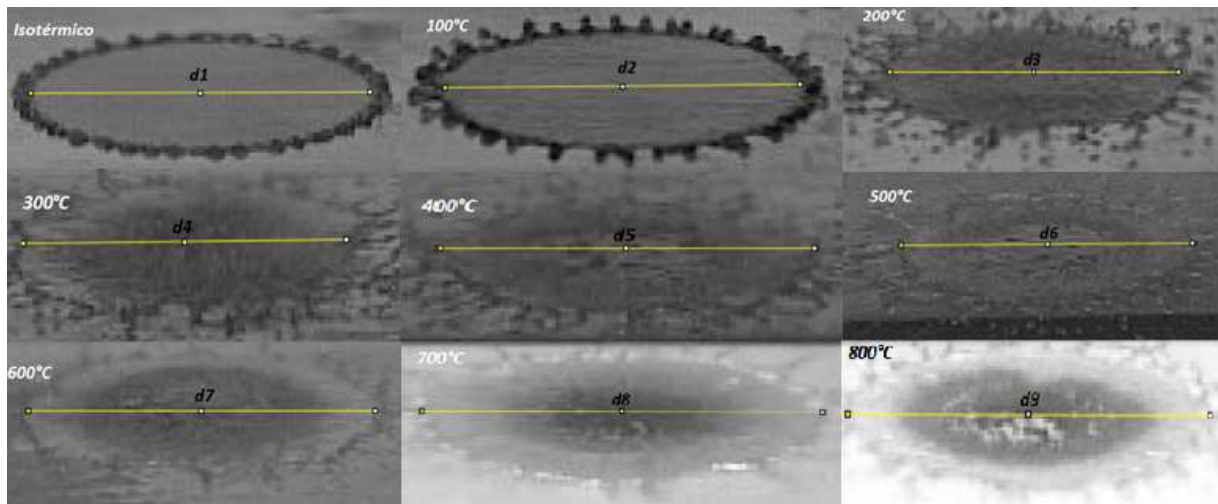


**Figura 3.** Visualización de impacto de gotas de 3.5 mm de diámetro a diferentes temperaturas.

justo antes del impacto de la gota sobre la superficie caliente, variando la temperatura.

Se analizaron nueve videos para un tamaño de gota de 3.5 mm de diámetro (desde temperatura iso-

térmica, hasta los 800 °C), mientras que para un tamaño de gota de 5 mm de diámetro, se revisaron 10 videos (desde temperatura isotérmica, hasta los 800 °C). Los resultados de estos análisis se presentan en



**Figura 4.** Diámetros máximos de gotas generadas por microgotero al momento de su impacto sobre una superficie caliente

las figuras 5 y 6, donde se engloban los resultados y se presentan en función de su diámetro.

**Tabla 1**

Valores máximos de diámetros de gotas de agua en función de su temperatura.

Temperatura	Diámetro
<b>Isotérmico</b>	$d1 = 25.659 \text{ mm}$
100 °C	$d2 = 26.840 \text{ mm}$
200 °C	$d3 = 23.005 \text{ mm}$
300 °C	$d4 = 23.771 \text{ mm}$
400 °C	$d5 = 21.982 \text{ mm}$
500 °C	$d6 = 20.619 \text{ mm}$
600 °C	$d7 = 25.816 \text{ mm}$
700 °C	$d8 = 26.968 \text{ mm}$
800 °C	$d9 = 26.330 \text{ mm}$

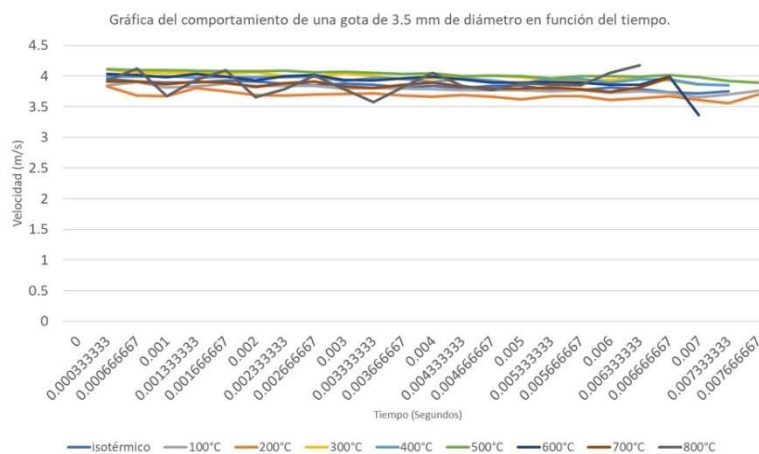
Se tiene que, para gotas de 3.5 mm y 5 mm de diámetro, justo antes de impactar una superficie metálica que no supere los 800 °C, la variación en la velocidad por la influencia de la temperatura será mínima y aleatoria. Se asume un comportamiento aleatorio en este umbral, pues no se tiene una predicción sobre en qué momento aumentará o disminuirá la velocidad en su trayectoria. Para la prueba de tamaño de gota de 5 mm, fue posible medir una temperatura superior a las establecidas en la investigación, que fue de 890 °C (Figura 6). Esta temperatura se obtuvo suministrando corriente eléctrica a la resistencia tipo Kanthal hasta hacerla fallar; la falla ocurrió por derretimiento del material. Debido a que fue la última prueba, en ningún momento entorpeció el propósito de esta investigación.

### Comportamiento de la gota en función de la superficie de contacto

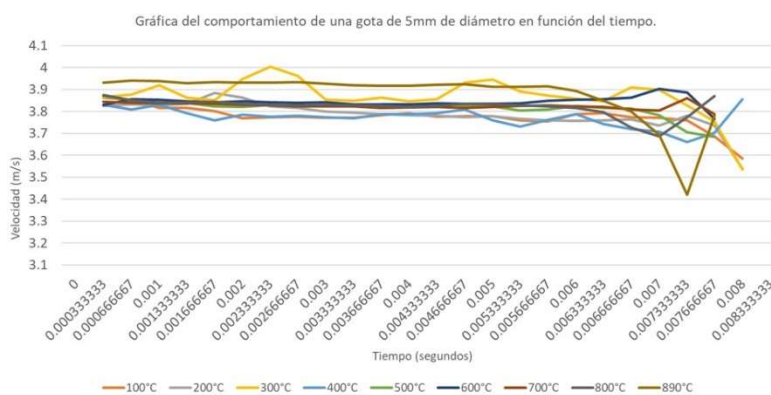
Se observó en las pruebas realizadas para un tamaño de gota de 5 mm de diámetro con una superficie pulida, el comportamiento del despliegue de la película de agua sobre la superficie metálica caliente.

Un caso particular se presenta en estas pruebas. Para las temperaturas de 400 °C y 500 °C, se puede notar cómo después de que se despliega la gota, la inercia de la película debido a la diferencia de presiones que se da al momento de impactar, obliga a converger el líquido justo en el lugar donde fue el contacto de la gota, liberando partículas de agua en todo el recorrido, esto sin romper la película (Figura 7). Este fenómeno solo aparece en temperaturas que se consideran en esta investigación como temperaturas en transición, siendo solo en dos casos de los cuatro que se presentan en esta etapa. Este fenómeno se considera que aparece cuando la rugosidad que existe en la superficie es tan pequeña, que no afecta el despliegue de la gota con alguna irregularidad que pudiera tener. Los diferentes valores de rugosidad superficial tienden a hacer que la salpicadura en la superficie metálica sea de menor duración y con un comportamiento errático, en donde se puede considerar que los picos, relieves y cavidades generan capas de vapor de diferentes tamaños, teniendo como resultado explosiones de partículas de agua y bajas tasas de transferencia de calor al medio ambiente.





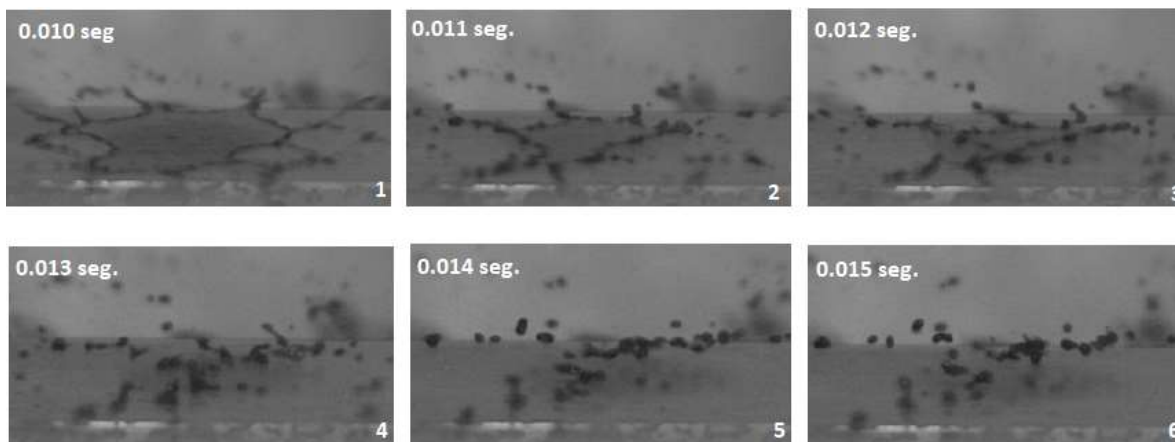
**Figura 5.** Gráfica del comportamiento de una gota de 3.5 mm de diámetro en función del tiempo.



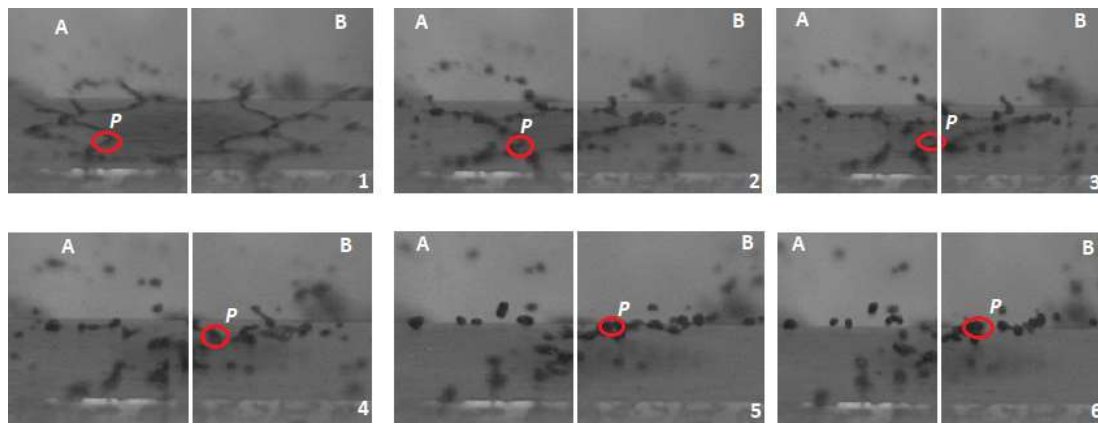
**Figura 6.** Gráfica del comportamiento de una gota de 5 mm de diámetro en función del tiempo.

También se puede observar que este fenómeno genera que las partículas que se encuentran en un extremo de la película de agua, cambien su trayectoria y hagan un recorrido hacia el sentido opuesto. Como ejemplo, en la figura 8 se observa el recorrido de una partícula que se encuentra encerrada en un círculo

rojo. La partícula **P** aparece en el cuadrante A de la imagen 1, que es en el momento cuando el despliegue de la gota alcanza su diámetro máximo, antes de comenzar a converger. Después de esto, se puede observar cómo la partícula **P** va siguiendo una trayecto-



**Figura 7.** Secuencia de imágenes que presenta el comportamiento del despliegue de gotas de agua en superficies metálicas calientes a una temperatura de 500°C.



**Figura 8.** Seguimiento del recorrido de una partícula de agua.

ria hacia el cuadrante B. Este fenómeno solo se observa cuando la superficie metálica caliente se encuentra con una rugosidad baja, con acabado pulido.

En el caso de las temperaturas que superan los 600 °C, la capa de vapor se encuentra en la etapa estable (Figura 9). Como resultado de las pruebas realizadas, se presentaron comportamientos similares a las demás pruebas hechas con el microgotero.

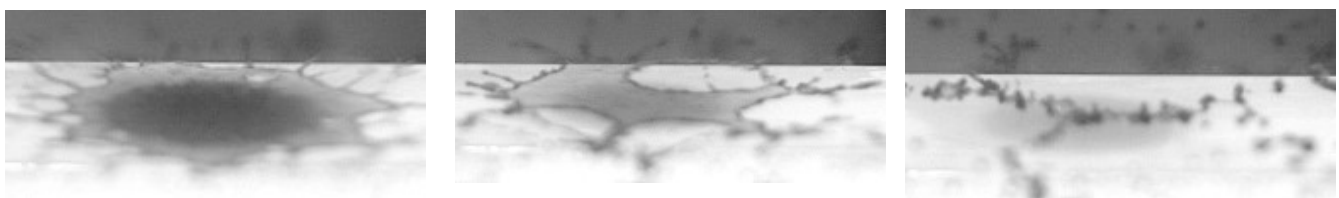
## Conclusiones

En este trabajo de investigación se construyó un banco experimental en donde se realizaron pruebas de impacto de gotas de agua sobre una superficie metálica, la cual fue calentada a diferentes temperaturas por medio de una resistencia tipo Kanthal. Estas pruebas se hicieron con gotas de agua influenciadas por la acción de la gravedad y se generaron por medio de goteros de uso médico. Los experimentos permitieron conocer datos sobre la influencia de la temperatura en la velocidad de la gota, en el despliegue, así como el comportamiento de la gota con respecto a la rugosidad superficial. A continuación, se mencionan los aspectos más importantes de esta investigación.

Se observó cómo a través del incremento de la temperatura superficial de la placa, la gota fue tomando diferentes características después de impac-

tar. La variación en la temperatura de la superficie metálica generó un comportamiento diferente en el despliegue de la gota para los distintos casos de estudio. Se tiene que, a menor temperatura de la superficie metálica (100 °C), mayor es la transferencia de calor, ya que no existe una capa de vapor formada por debajo de la gota. A partir de los 200 °C, se comienza a formar una capa de vapor, aunque se presenta de manera inestable y esto ocasiona que las gotas reboten y se dispersen. Llegando a los 600 °C, la transferencia de calor resultaría menos eficiente, pues al tener un despliegue mayor, el área de contacto aumenta, pero la capa de vapor impide que se genere un contacto directo con la superficie caliente.

Se realizaron análisis en las trayectorias de las gotas de agua de 3.5 mm y 5 mm de diámetro, donde se obtuvieron las velocidades correspondientes para cada uno de los casos de investigación. Se encuentra que, para las condiciones mencionadas, la variación en la velocidad de la gota por la influencia de la temperatura será mínima y aleatoria, por lo que se puede decir que no genera variaciones trascendentes para los casos de estudio. Esto quiere decir que el impacto de una gota de agua de 3.5 mm y de 5 mm de diámetro que es influenciada por la acción de la gravedad



**Figura 9.** Despliegue de una gota de agua a 600°C sobre una superficie metálica caliente pulida.



sobre una superficie metálica, desde temperatura ambiente hasta los 800 °C a una altura no mayor a los 50 mm, tendrán un comportamiento similar.

Se visualizó cómo es que la rugosidad superficial de la placa influye en el comportamiento del impacto de la gota. En las pruebas de impacto de gotas de agua sobre una superficie pulida, se presentó un despliegue similar al que muestran las pruebas isotérmicas, lo que favorecería la transferencia de calor. En cambio, las superficies con una cierta rugosidad, muestran una tendencia a generar el rompimiento de la película de agua en la superficie metálica, impidiendo extraer el máximo calor de la superficie caliente.

## Referencias

- Bernardin, J.D., Stebbins, C.J., and Mudawar, I., 1996, Effects of surface roughness on water droplet impact history and heat transfer regimes: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40, 1, 73-88. doi.org/10.1016/S0017-9310(96)00067-1.
- Bertola, V., 2015, An impact regime map for water drops impacting on heated surfaces: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85, 430-437. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.084.
- Celata, G.P., Cumo, M., Mariani, A., and Zummo, G., 2006, Visualization of the impact of water drops on a hot surface: Effect of drop velocity and surface inclination: *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 42, 10, 885-890. doi.org/10.1007/s00231-006-0139-1.
- Cicutti, C., 1997, Transferencia de calor en la colada continua de aceros. I parte. El molde: *Revista de Metalurgia*, 33, 5, 333-344. doi.org/10.3989/revmetalm.1997.v33.i5.846.
- Ji, Z., and Yang, J., 2010, Online dynamic control of secondary cooling for the continuous casting process: *Proceedings - 3rd International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*, 269-272. doi.org/10.1109/ICINIS.2010.21.
- Karl, A., and Frohn, A., 2000, Experimental investigation of interaction processes between droplets and hot walls: *Physics of Fluids*, 12, 4, 785-796. doi.org/10.1063/1.870335.
- Kotrbaček, P., Bellerova, H., Luks, T., and Raudenský, M., 2021, Heat Transfer Correlations for Secondary Cooling in Continuous Casting: *Steel Research International*, 92, 3. doi.org/10.1002/srin.202000465.
- Labeish, V.G., and Pimenov, A.G., 1984, Experimental study of heat transfer between a hot wall and impinging drops: *Journal of Engineering Physics*, 47, 6, 1400-1406. doi.org/10.1007/BF00870055.
- Pulgar Hormazábal, J.P., 2017, Perfil de solidificación de acero bajo distintas condiciones operacionales en colada continua de palanquillas: Tesis de Licenciatura, *Universidad de Concepción*, pp. 9-11.
- Montes, J.J., Castillejos, A.H., Acosta, F.A., Gutiérrez, E.P., and Herrera, M.A., 2008, Effect of the Operating Conditions of Air-Mist Nozzles on the Thermal Evolution of Continuously Cast Thin Slabs: *Canadian Metallurgical Quarterly*, 47, 2, 187-204. doi.org/10.1179/000844308794408416.
- Sengupta, J., Thomas, B.G., and Wells, M.A., 2005, The use of water cooling during the continuous casting of steel and aluminum alloys: *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 36 A, 1, 187-204. doi.org/10.1007/s11661-005-0151-y.
- Tartarini, P., Lorenzini, G., and Randi, M.R., 1999, Experimental study of water droplet boiling on hot, non-porous surfaces: *Warme- Und Stoffuebertragung Zeitschrift*, 34, 6, 437-447. doi.org/10.1007/s002310050280.
- Horský, J., and Raudenský, M., 2005, Measurement of heat transfer characteristics of secondary cooling in continuous casting: *Metal*, 1-8. http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal\_05/papers/235.pdf