



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“TRANSFERENCIA DE CALOR EN GOTAS EN AMBIENTES A ALTA TEMPERATURA”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
MECÁNICA

PRESENTA:

LUIS FERNANDO HUERTA MENDOZA

ASESORES:

- DR. CARLOS RUBIO MAYA
- DR. CRISANTO MENDOZA COVARRUBIAS

MORELIA MICHOACÁN, ENERO DEL 2022



Dedicatoria

A mis padres, José Luis y María Carmen, que nunca me dejaron que me rindiera por muy difícil situación que se presentara, y que sus sabias palabras siempre tuve presente, siendo de suma importancia para realizar y finalizar esta etapa académica.

A mis hermanos, Paulo Cesar y José Luis, que sin importar la distancia me apoyaron incondicionalmente a lo largo de este camino, y que, a pesar de las adversidades, siempre estuvieron ahí alentándome para no desistir.

A mis abuelos, Alfredo y Susana, que su apoyo tuve presente. Siempre escuchando las palabras de experiencia y sabiduría que solo ellos pueden transmitir. A mis abuelos, Eusebio y Sara, que desde el cielo han estado cuidándome.

A mis sobrinas, Mia y Paula, que sin saberlo me dieron la felicidad y calma para sobrellevar y concluir mis estudios de la mejor manera.

A mis tíos y primos, por contar con ellos en todo momento que necesité ayuda, por darme su apoyo sin importar la situación que presentara y por hacer que quisiera superarme día tras día en este camino de la sabiduría.

Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por abrirme sus puertas y permitirme realizar mis estudios.

Al Departamento de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica, que durante estos años fue mi segundo hogar y el lugar de mi formación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, que a través de su apoyo financiero fue posible llevar a cabo esta investigación.

A los profesores, el Dr. Crisanto Mendoza y el Dr. Gildardo Solorio, que, con su apoyo incondicional, se desarrolló de manera exitosa la investigación.

A mis amigos, Andrés Aldaba y David Poire, que a pesar de las dificultades que vivimos en estos años, pudimos salir adelante y logramos concluir de manera exitosa nuestros estudios.

Resumen

La extracción de calor debido al uso de agua es el principal método de enfriamiento utilizado en diversos procesos industriales, incluidos los metalúrgicos, siendo el enfriamiento secundario del proceso de colada continua uno de ellos, donde a través de chorros de agua por medio de 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, pulverización de agua. Sin embargo, no existen trabajos que se enfoquen en el conocimiento básico de la transferencia de calor entre la superficie a alta temperatura (1000 °C) y las gotas que salen dispersadas en jet de agua. Por lo tanto, en este trabajo mediante técnicas de imagen con cámaras de alta velocidad, se realiza una investigación sobre la influencia de la temperatura en el comportamiento de dos tamaños de gota (3.5 mm y 5 mm de diámetro) generadas a través de un microgotero y normogotero. Éstas son sometidas a pruebas de impacto por medio de caída libre en una placa, desde temperatura ambiente y hasta los 800°C. Determinando la influencia de la temperatura en la velocidad, tamaño, trayectoria, formación del vapor de agua y su efecto en el impacto de la gota con la superficie.

Palabras claves: enfriamiento secundario, vapor de agua, pruebas de impacto de gota.

Abstract

The extraction of heat due to the use of water is the main method of exploitation used in some metallurgical processes, being the secondary cooling on continuous casting process one of them, where through jets of water by means of nozzles, is eliminated amount of heat. There are adaptations in this cooling method that allow to accelerate the heat transfer, such as: water flow variation, water spray speed, water spray. However, there are not works that focus on the basic knowledge of heat transfer between the surface at high temperature (1000 °C) and the droplets that are dispersed in a water jet. Therefore, in this work, using image techniques with high-speed cameras, an investigation is carried out on the influence of temperature on the behavior of two droplet sizes (3.5 mm and 5 mm in diameter) generated through a micro dripper. and normo dripper. These are subjected to impact tests by means of free fall on a plate, from room temperature to 800 ° C. Determining the influence of temperature on the speed, size, trajectory, formation of water steam and its effect on the impact of the drop with the surface.

Key words: Secondary cooling, water steam, water droplets impact test.

Índice

Resumen	IV
Abstract	V
Nomenclatura	XII
Justificación	XIV
Objetivos	XV
Objetivo general	XV
Objetivos específicos	XV
Hipótesis	XVI
Introducción	XVII
1. Antecedentes	19
1.1. Impacto de gotas en superficies calientes	20
1.2. Temperatura de la superficie de contacto	24
1.3. Rugosidad en la superficie	26
2. Marco teórico	27
2.1. Producción de acero	28
2.2. Alto horno	28
2.3. Descripción y evolución de sus elementos	30
2.3.1. Torre de colada	30
2.3.2. La cuchara	30
2.3.3. Artesa	31
2.3.4. Molde	31
2.3.5. Enfriamiento secundario	32
2.3.6. Rodillos de arrastre	33
2.3.7. Corte	33
2.3.8. Almacenamiento	33
2.4. Tipos diferentes de colada continua	33
2.4.1. Molde vertical recto	34
2.4.2. Molde vertical con doblado solido	34
2.4.3. Molde vertical con doblado sin solidificar	34
2.4.4. Molde curvo	35
2.5. Horno eléctrico	35

2.6. Materiales de carga	36
2.6.1. Chatarra	36
2.6.2. Prerreducidos	36
2.7. Producción de acero a nivel mundial	37
2.7.1 Producción de acero por empresa	37
2.7.2. Producción de acero por país	38
2.7.3. Producción de acero en México	38
2.7.4. Panorama actual en el mundo	39
2.8. Enfriamiento secundario	41
2.9. Mecanismo de extracción de calor	41
2.9.1. Extracción de calor por contacto con los rodillos	42
2.9.2. Extracción de calor por medio de la radiación desde la superficie del acero	43
2.9.3. Extracción de calor por la acción directa del agua	43
2.9.4. Extracción de calor por agua acumulada entre rodillos	46
2.10. Transferencia de calor en el enfriamiento secundario	46
2.10.1. Ebullición en transición entre las temperaturas de agotamiento y Leidenfrost	47
2.10.2. Ebullición nucleada entre 100°C el punto de agotamiento	47
2.10.3. Ebullición de película a altas temperaturas	48
2.10.4. Aportes experimentales en la transferencia de calor en enfriamiento secundario	48
2.11. Efecto Leidenfrost	52
2.11.1. Aportes experimentales en el estudio del efecto de Leidenfrost en enfriamiento secundario	54
2.12. Boquillas en el enfriamiento secundario	55
2.12.1. Aportes experimentales de boquillas en el enfriamiento secundario	56
3. Metodología	59
3.1 Diseño y manufactura de paredes o límites de un volumen de control	60
3.2. Diseño y construcción de gotero	60
3.3. Modificación a goteros	61
3.4. Diseño y manufactura de placa con generación de calor interna	62
3.5. Prueba de funcionamiento de resistencia	62
3.6. Experimentación, primera parte: pruebas isotérmicas	64
3.6.1. Tamaño de gota	64
3.6.2. Pruebas de impacto de gotas	65

3.7. Experimentación, segunda parte: variaciones de temperatura	66
3.7.1. Arranque de máquina soldadora	66
3.7.2. Pruebas iniciales	67
3.7.3. Modificación a resistencia	69
3.7.4. Modificación a placa experimental	70
3.7.5. Pruebas finales	70
3.7.6. Pruebas de calentamiento de la placa por medio de horno refractario o mufla	71
3.7.7. Pruebas de calentamiento de la placa por medio de resistencia tipo kanthal: modificación a corriente eléctrica	72
3.7.8. Tamaños de gota	74
4. Resultados	75
4.1. Visualización de gota a diferentes temperaturas	76
4.1.1 Temperatura ambiente o isotérmica	76
4.1.2. Visualización de gota a temperatura de 100 °C	76
4.1.3. Visualización de gota a temperatura de 200 °C	77
4.1.4. Visualización de gota a temperatura de 300 °C	78
4.1.5. Visualización de gota a temperatura de 400 °C	79
4.1.6. Visualización de comportamiento de gota de 500 °C a 800 °C	79
4.2. Diámetros máximos de despliegue	81
4.3. Comportamiento de la gota a través de la variación de temperatura.	83
4.4. Comportamiento de la gota en función de la superficie de contacto.	85
Conclusiones	89
Referencias	90

Lista de figuras y tablas

Figuras

Figura 1.1. Diagrama de bloques del equipo experimental.	20
Figura 1.2. Diagrama esquemático del arreglo experimental.....	21
Figura 1.3. Vectores de velocidad y de corriente instantánea para una gota de 2 mm de diámetro que impacta a una velocidad de 1.3 m/s en una superficie de acero inoxidable a una temperatura de 120°C.	22
Figura 1.4. Distribución de presión para una gota de 2 mm de diámetro que impacta a una velocidad de 1.3 m/s en una superficie de acero inoxidable a una temperatura de 120°C.	22
Figura 1.5. Distribución de temperatura para una gota de 2 mm de diámetro que impacta a una velocidad de 1.3 m/s en una superficie de acero inoxidable a una temperatura de 120°C.	23
Figura 1.6. Esquema del banco experimental.	23
Figura 1.7. Coeficiente de transferencia de calor en la atomización de agua. Comparación de las predicciones teóricas vs datos experimentales	24
Figura 1.8. Gota de alcohol impactando una superficie de vidrio.	25
Figura 2.1. Proceso del alto horno.	29
Figura 2.2. Cuchara en la colada continua.	30
Figura 2.3. Artesa en la colada continua.	31
Figura 2.4. Molde o lingotera.	32
Figura 2.5. Tipos de máquinas de colada continua. a) Molde vertical recto, b) Molde vertical con doblado, c) Molde curvo.	35
Figura 2.6. Representación gráfica de un horno eléctrico.	36
Figura 2.7. Sistema de enfriamiento secundario.	42
Figura 2.8. Influencia de la temperatura superficial en el coeficiente de convección acero-agua.	455
Figura 2.9. Región de impacto de chorro de agua. a) Arreglo típico de boquillas de enfriamiento, b) Esquema de las zonas principales, c) Detalles del proceso de enfriamiento.....	47
Figura 2.10. Presión de impacto medido y coeficiente de transferencia de calor con un flujo de agua de 6 L <i>min</i> – 1.....	50
Figura 2.11. Presión de impacto medido y coeficiente de transferencia de calor con un flujo de agua de 11 L <i>min</i> – 1.....	51
Figura 2.12. Coeficiente de transferencia de calor en función de la densidad de impacto de agua.....	51
Figura 2.13. Coeficiente de transferencia de calor en función de la presión de impacto.	52
Figura 2.14. Generación de la capa de vapor debajo de una gota de agua por el efecto Leidenfrost.	52
Figura 2.15. a) Curva de ebullición en una superficie caliente, b) Curva de evaporación de una gota	53
Figura 2.16. Temperatura superficial medida: cambio en los valores del coeficiente de transferencia de calor al cruzar la temperatura de Leidenfrost.	54
Figura 2.17. Temperatura de Leidenfrost como función de la presión del agua para tres tamaños de boquillas y presión de aire constante.	55
Figura 2.18. Esquema del proceso de enfriamiento por aspersion de agua.....	56

Figura 2.19. a) Coeficiente de transferencia de calor con dos boquillas idénticas, con diferentes tamaños de gota y velocidades, b) Influencia de la velocidad de colada en la transferencia de calor. Exp. 3 es estacionario, Exp. 4 es para 2 m/min, y Exp. 5 para 5 m/min.....	57
Figura 2.20. Características del calor con distinto flujo de agua para: a) Flujo de calor, b) Coeficiente de transferencia de calor.	58
Figura 3.1. Modelo y dimensiones del acrílico.....	60
Figura 3.2. Goteros. a) Normogotero, b) Microgotero.	61
Figura 3.3. Modificación de goteros. a) Gotero normal, b) Microgotero modificado, c) Normogotero modificado.	61
Figura 3.4. Placa de acero inoxidable AISI 304.....	62
Figura 3.5. Resistencia hecha de alambre kanthal A-1, calibre 18.....	62
Figura 3.6. Prueba de calentamiento de resistencia.....	63
Figura 3.7. Banco de pruebas.....	64
Figura 3.8. Medición de tamaño de gota.	65
Figura 3.9. Trayectoria de la gota desde su generación, hasta su impacto.	65
Figura 3.10. a) Fuente de poder, b) Corriente mínima transmitida por la fuente de poder.....	66
Figura 3.11. Resistencias usadas para disminuir la corriente eléctrica: a) Resistencia de parrilla eléctrica, b) Resistencia para calentar agua, c) Resistencia tipo kanthal.....	67
Figura 3.12. Pruebas iniciales. a) Primera grabación con cámara de alta velocidad, b) Calentamiento de placa.	67
Figura 3.13. Secuencia de imágenes tomadas por la cámara fastcam PCI R2.	68
Figura 3.14. Fundición de resistencia tipo kanthal.	69
Figura 3.15. Imagen representativa de la configuración final de la resistencia tipo kanthal..	69
Figura 3.16. Reducción de tamaño de placa experimental.....	70
Figura 3.17. Grabaciones con cámara vision research phantom.....	70
Figura 3.18. Mufla de laboratorio.	71
Figura 3.19. Calentamiento de placa experimental a través de una mufla.	72
Figura 3.20. Variación de corriente por medio de la fuente de poder.	72
Figura 3.21. Desgaste de material por concentración de temperatura.....	73
Figura 3.22. a) Primera modificación en la geometría de la placa experimental, b) Segunda y última modificación en placa experimental.	73
Figura 3.23. Pruebas finales. a) Imagen a temperatura ambiente, b) Imagen a 800°C.	74
Figura 3.24. Obtención de los diámetros de gota. a) Gota generada por normogotero, b) Gota generada por microgotero.	74
Figura 3.25. Impacto de gota en la placa experimental. a) Normogotero, b) Microgotero.	74
Figura 4.1. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro en superficie isotérmica.....	76
Figura 4.2. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro sobre superficie caliente a 100°C.....	77
Figura 4.3. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro sobre superficie caliente a 200°C.....	78
Figura 4.4. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro sobre superficie caliente a 300°C.....	78
Figura 4.5. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro sobre superficie caliente a 400°C.....	79
Figura 4.6. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro sobre superficie caliente a 500°C.....	80
Figura 4.7. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro sobre superficie caliente a 600°C.....	80
Figura 4.8. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro sobre superficie caliente a 700°C.....	80
Figura 4.9. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro sobre superficie caliente a 800°C.....	80

Figura 4.10. Diámetros máximos de gotas al momento de su impacto sobre una superficie caliente.	81
Figura 4.11. Gráfica de valores máximos de diámetros de gotas de agua que impactan una superficie metálica caliente.	82
Figura 4.12. Gráfica del comportamiento de una gota de 3.5 mm de diámetro en función del tiempo.	84
Figura 4.13. Gráfica del comportamiento de una gota de 5 mm de diámetro en función del tiempo.	85
Figura 4.14. Impacto de gota de 5mm de diámetro sobre superficie pulida caliente a 200°C.....	86
Figura 4.15. Secuencia de imágenes que presenta el comportamiento del despliegue de gotas de agua en superficies metálicas calientes a una temperatura de 500°C.	87
Figura 4.16. Seguimiento del recorrido de una partícula de agua.	87
Figura 4.17. Despliegue de una gota de agua a 600°C sobre una superficie metálica caliente pulida.	88

Tablas

Tabla 2.1. Producción de acero por empresa a nivel mundial [24].....	37
Tabla 2.2. Producción de acero por país [24].....	38
Tabla 2.3. Producción de acero por estados en la República Mexicana [25].....	39
Tabla 2.4. Productores de acero en la República Mexicana [25].	39
Tabla 2.5. Producción de acero en el mundo [26].	40
Tabla 2.6. Valores de flujo de calor extraído por rodillos.	43
Tabla 2.7. Calor extraído por el contacto de los rodillos y el agua acumulada.....	46
Tabla 2.8. Comparación del rango de flujo de agua antes y después de la optimización [38].	50
Tabla 3.1. Especificaciones de placa de acero inoxidable.	62
Tabla 3.2. Especificaciones del alambre tipo Kanthal.	63
Tabla 4.1. Valores máximos de diámetros de gotas de agua en función de su temperatura.....	82

Nomenclatura

- A ----- Área de contacto, m^2
- A_s ----- Área de objeto radiador, m^2
- G_s ----- Caudal total de agua del enfriamiento secundario, L/min
- HTC ----- Coeficiente de transferencia de calor, $W/m^2 * K$
- h_w ----- Coeficiente local de transferencia de calor, $W/m^2 * K$
- I ----- Intensidad de enfriamiento, L/kg
- Mt ----- Mega toneladas, $\times 10^6$ toneladas
- $\dot{Q}_{emitida}$ ---- Flujo de calor por radiación, W/m^2
- q_w ----- Calor extraído, W/m^2
- S_p ----- Sección del producto, m^2
- ΔT ----- Cambio de temperatura, K
- T_s^4 ----- Temperatura de objeto radiador, K
- T_s ----- Temperatura superficial, K
- T_w ----- Temperatura del agua, K
- V_c ----- Velocidad de colada, m/s
- \dot{w}^n ----- Caudal específico local de agua, donde n es una constante que se encuentra entre 0.5 y 1, $L/m^2 * s$
- ϵ ----- Emisividad
- σ ----- Constante de Stefan-Boltzmann
- ρ ----- Densidad, kg/m^3

Planteamiento del problema

Los rocíos y nieblas son dispersiones de gotas producidas respectivamente por boquillas que emplean un solo líquido (por ejemplo, agua) o un líquido más un gas (por ejemplo, agua-aire). El enfriamiento mediante estas dispersiones de gotas es un proceso muy efectivo que puede extraer flujos de calor tan grandes como 10 MW/m^2 , y que ocurre al impactar las gotas sobre la superficie de un cuerpo caliente y provocar la remoción de calor por evaporación y/o por convección forzada. El enfriamiento por rocíos se ha aplicado tradicionalmente en procesos que involucran altos sobrecalentamientos, es decir, altas diferencias entre la temperatura de la superficie, T_w y la temperatura de saturación del líquido, T_s . Estos procesos aparecen en sistemas metalúrgicos tales como, colada continua de acero y tratamiento térmico de aleaciones, en sistemas de enfriamiento de emergencia de reactores nucleares, así como en sistemas para el almacenamiento de combustibles entre otros.

Para el enfriamiento secundario del proceso de colada continua, el mecanismo de enfriamiento por boquillas de agua es la principal forma de extracción de calor. Diversos estudios se han enfocado directamente en analizar tanto el flujo de agua que la boquilla suministra al planchón o palanquilla, como la presión necesaria de salida de gotas de agua para enfriar la superficie caliente. Asimismo, existe evidencia experimental en donde se trabaja particularmente al análisis y comportamiento de una sola gota de agua, esto con el motivo de conocer el efecto de la transferencia de calor de una manera más profunda. Sin embargo, no existe un acervo extenso sobre el conocimiento del comportamiento de impacto de gotas de agua sobre superficies calientes mayores a los 600°C , pues la mayoría de trabajos se centran en observar el efecto Leidenfrost, tomando como temperatura máxima de pruebas entre 350°C y 400°C . En este trabajo se tiene como meta observar los fenómenos que sucedan en gotas individuales que se sometan a temperaturas desde los 23°C (temp. ambiente), hasta los 800°C . De esta manera, se genera conocimiento para complementar información acerca de diversas optimizaciones que las boquillas de rocío y niebla requieran.

Justificación

Los desarrollos e innovaciones que ha tenido el proceso de colada continua lo han convertido en un proceso sofisticado que actualmente produce cerca del 94% de acero en el mundo. Respecto de otros procesos de colada, la colada continua generalmente involucra altos costos de capital, pero bajos costos de operación. Es el método más eficiente en cuanto costo-energía para producir en masa productos semi-terminados con una calidad consistente y en una variedad de formas y tamaños.

La importancia del enfriamiento por rocíos en la colada continua de acero, CC, es fácil de percibir considerando que en 2011 la producción mundial de acero crudo alcanzó 1515 millones de toneladas. Sin embargo, este tipo de enfriamiento secundario presenta ciertos problemas, pues se ha visto que afecta la calidad del producto en el control de la velocidad de eliminación de calor que crea y enfría la cubierta sólida y en la generación de tensiones térmicas dentro del metal solidificado.

Para el caso particular en el que nos estamos enfocando, se realizará un modelo experimental en donde se estudiará el comportamiento del despliegue de gotas de agua que impactan una superficie calentada a diferentes temperaturas. Con base en lo anterior, se desarrollará un modelo experimental en condiciones estacionarias, donde se observará la influencia de la temperatura sobre la gota de agua, seguido de un análisis en su despliegue, velocidad de impacto, y el efecto de la rugosidad de la superficie de contacto. Con este estudio se pretende conocer el comportamiento de gotas bajo las variables y condiciones antes mencionadas, pudiendo establecer la mejor opción para realizar un enfriamiento por rocío óptimo.

Objetivos

Objetivo general

- Estudiar el comportamiento de la transferencia de calor de gotas de agua desplegadas sobre superficies a altas temperaturas.

Objetivos específicos

- Desarrollar un sistema experimental para observar la caída de una gota de agua que es influenciada por la gravedad.
- Determinar las velocidades de impacto de gota en función de la temperatura.
- Comparar los comportamientos de impacto de gota en función de la rugosidad de la superficie.

Hipótesis

Suponiendo condiciones de estado estable, se pretende que, a través de diversas pruebas de impacto de gotas de agua sobre superficies calientes, se obtenga información sobre el despliegue, velocidad, influencia de rugosidad y comportamiento de la misma. Esto con la finalidad de conocer de manera particular información que sea de utilidad para la optimización de sistemas de boquillas de rocío y niebla, utilizadas en el enfriamiento secundario de la colada continua.

Introducción

El enfriamiento secundario en la colada continua es de suma importancia, pues aquí recae la responsabilidad de que el producto que se obtenga sea de buena calidad. Los mecanismos principales que se presentan en el enfriamiento secundario en la colada continua son: enfriamiento por radiación de la superficie del material, enfriamiento por contacto con rodillos, enfriamiento por acción directa del agua, y enfriamiento por agua acumulada entre rodillos.

Para obtener un producto libre de defectos, junto con una productividad elevada, es importante mantener una distribución adecuada del agua de refrigeración en las distintas zonas en que se divide el enfriamiento secundario. Se ha mostrado que el recalentamiento superficial producido al pasar de una zona a otra con menor intensidad de enfriamiento origina tensiones de tracción en el frente de solidificación. Debido a que el material es frágil en este intervalo de temperaturas, dichas tensiones térmicas pueden originar la iniciación de grietas internas en el producto. Inversamente, un enfriamiento excesivo del producto también puede originar tensiones de tracción en la superficie que provoquen grietas o propaguen algunas ya existentes. Por este motivo, tanto el recalentamiento como el enfriamiento de la superficie se debe mantener dentro de niveles adecuados para reducir el porcentaje de defectos. La contracción producida al terminar la solidificación provoca también tensiones térmicas que pueden generar grietas en el centro del producto.

Los cambios de los gradientes de temperatura a través de la cascara debido a un aumento o disminución abrupto en la tasa de extracción de calor, tienen como consecuencia una expansión térmica en el metal solidificado, así como la generación de un alto estrés térmico. Esto puede provocar defecto internos o superficiales, lo que puede comprometer la calidad del producto que se ha fundido. Las boquillas localizadas entre los rodillos de contacto generan una niebla de agua y aire bajo presión que tienen como objetivo enfriar el planchón o palanquilla. El agua es forzada a salir sobre presión para disipar la mayor cantidad de calor posible. El abultamiento de la carcasa de acero causado por la presión ferrostática, puede afectar estas zonas de transferencia de calor, especialmente cerca de los rodillos, pues si están demasiado separados, generan zonas de menor disipación de calor.

El mecanismo de extracción de calor por acción directa del agua, provee la mayor tasa de transferencia de calor sobre el planchón o palanquilla. Las boquillas de atomización de agua sirven para hacer incidir el flujo de agua hacia la superficie caliente, siendo este elemento el más estudiado y con mejoras continuas. El flujo de calor extraído por el impacto de rocíos sobre superficies calientes se ha investigado experimentalmente usando métodos tanto en estado estable, como en estado inestable. La tecnología del enfriamiento por rocíos de agua ha encontrado un uso extensivo en muchos campos industriales ya que ofrece un buen balance en cuanto a su capacidad para remover altos flujos de calor, obtener una buena uniformidad de la temperatura de la superficie y un uso eficiente del líquido. Sin embargo, existen pocos estudios que ofrezcan información sobre impacto de gotas individuales, siendo entonces, un área de investigación de interés.

Existe en la industria interacciones entre las gotas y la pared en el revestimiento de superficies, limpieza de superficies, refrigeración de componentes electrónicos, extinción de incendios, combustión de inyección directa de combustible, enfriamiento de metales, impresión por inyección de tinta, etc. Cuando una gota volátil impacta sobre un sólido sobrecalentado, el movimiento de aire y la generación de vapor se mezclan para crear una capa de vapor intermedia que retrasa o incluso evita el contacto entre el líquido y el sólido. Para el caso particular de esta investigación, la experimentación se centra en el enfriamiento secundario del proceso de colada continua, siendo el impacto de gotas individuales de agua sobre una superficie caliente, la idea principal del trabajo.

1. Antecedentes

1.1. Impacto de gotas en superficies calientes

El principal mecanismo de enfriamiento en colada continua es por aspersion de agua [1]. De aquí que sea de interés el estudio del comportamiento de las gotas que impactan las superficies de los planchones o palanquillas para disminuir su temperatura. Pedersen [2], presenta una investigación sobre el impacto de gotas en una superficie caliente. En esta investigación el impacto de gota se da de manera horizontal a través de un jet en donde el chorro se somete a vibraciones sinusoidales transversales uniformes que permiten obtener un tamaño de gota uniforme (ver Fig. 1.1). Se montó un horno que contenía por dentro el objetivo de impacto y sobre rodillos que se mueven sobre una pista horizontal perpendicular a la trayectoria. Se encuentra en este trabajo que la transferencia de calor mejora con un aumento de velocidad de impacto de gota.

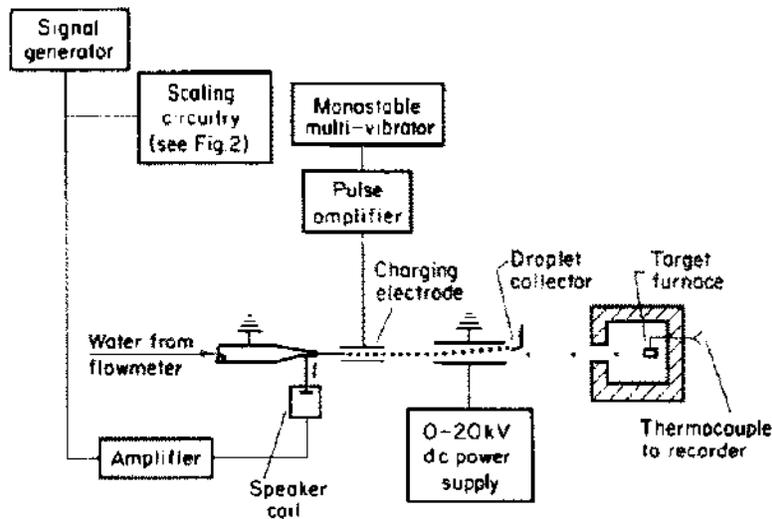


Figura 1.1. Diagrama de bloques del equipo experimental.

Makino [3], presenta un trabajo sobre impacto de gotas a diferentes temperaturas, desde temperatura de saturación atmosférica del agua, hasta una temperatura superior a la de Leidenfrost. En su trabajo, realiza pruebas de impacto de gotas sobre diferentes superficies, entre ellas acero inoxidable, latón y acero al carbono. Para la metodología experimental, utiliza gotas de diferentes diámetros las cuales deja caer sobre los platillos de diferente material, previamente calentados. En su experimentación, a través de un voltaje que suministra al platillo experimental, encuentra los periodos de contacto de la gota en la superficie, al igual que un flujo de calor promedio durante el contacto.

De igual manera, Karl y Frohn [4], realizan un estudio sobre el comportamiento del impacto de gotas sobre superficies calientes por encima de la temperatura de Leidenfrost, siendo la pérdida de impulso, deformación y desintegración de las gotas, los puntos principales a desarrollar. Para su metodología experimental, desarrolla un equipo capaz de generar una gota que impacte una superficie a un cierto ángulo de inclinación, registrando el

comportamiento a través de una cámara de video (*ver Fig. 1.2*). Como resultado, obtienen correlaciones que son de importancia para mejorar el modelado numérico de flujos de dos fases. Usando la correlación para la pérdida de impulso, se obtuvo una aproximación teórica para la deformación máxima de la gota.

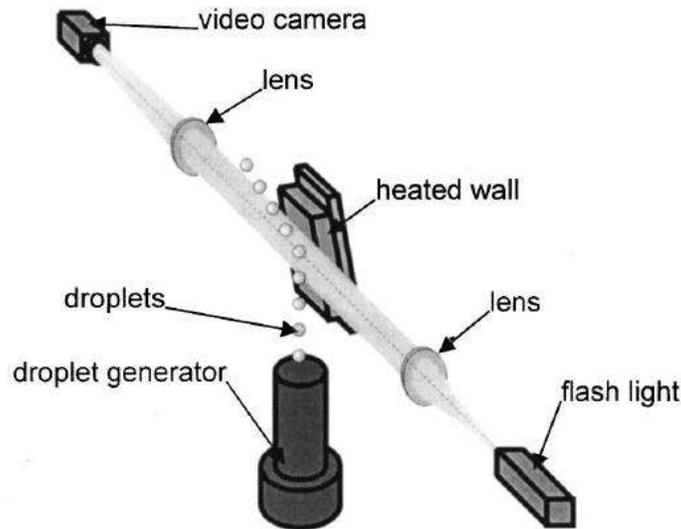


Figura 1.2. Diagrama esquemático del arreglo experimental.

En la investigación de Chandra y colaboradores [5], se realiza una comparación entre un modelo experimental y un modelo numérico, en donde estudian el impacto de gotas de agua en una superficie caliente de acero inoxidable. Para el modelo experimental, se realizan los experimentos variando la temperatura de la placa desde los 50°C hasta los 120°C, así como la velocidad de impacto de gota de 0.5 a 4 m/s. En el modelo numérico, la mecánica de fluidos y la transferencia de calor durante el impacto de la gota son las variables modeladas a través de un código llamado “Volumen de un Fluido” (VOF). El código utiliza una solución de diferencia finita para las ecuaciones de energía y de momentum en un sistema axisimétrico de coordenadas. El flujo de fluido se asume como laminar e incompresible. Como resultados del modelo numérico, se obtiene el comportamiento de la gota al momento del impacto para la velocidad, presión y temperatura (*ver Fig. 1.3, 1.4, 1.5*). Con esto concluyen que, el modelo numérico desarrollado para la transferencia de calor durante el impacto de una gota puede ser usado como opción para simular una observación experimental de impacto de gotas de agua sobre superficies calientes de acero inoxidable.

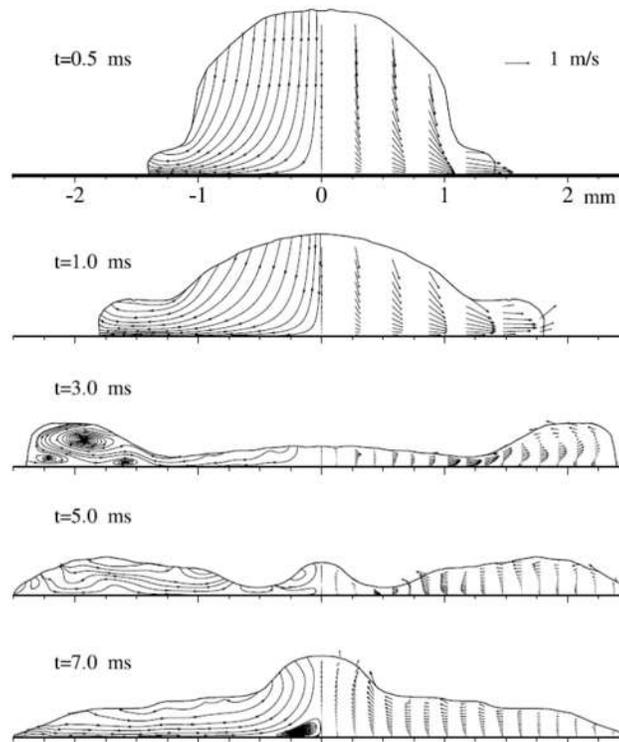


Figura 1.3. Vectores de velocidad y de corriente instantánea para una gota de 2 mm de diámetro que impacta a una velocidad de 1.3 m/s en una superficie de acero inoxidable a una temperatura de 120°C.

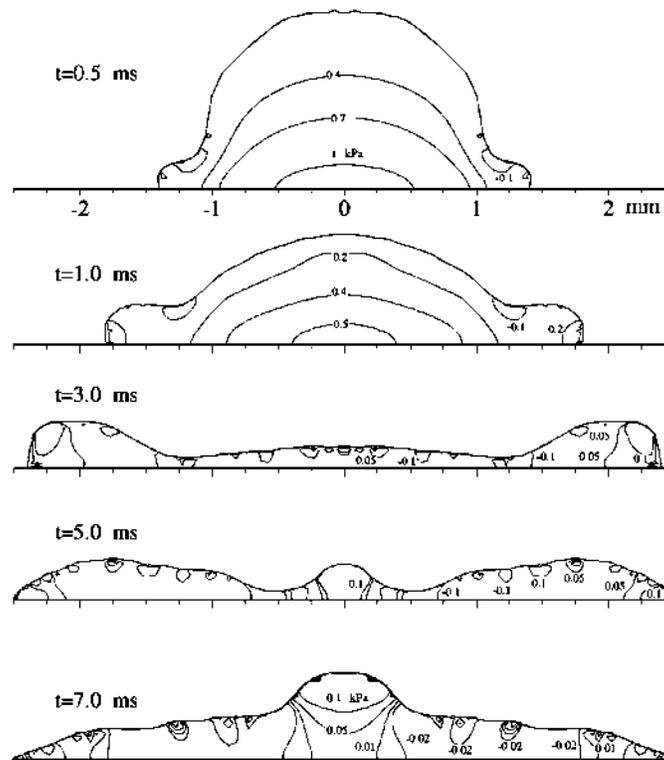


Figura 1.4. Distribución de presión para una gota de 2 mm de diámetro que impacta a una velocidad de 1.3 m/s en una superficie de acero inoxidable a una temperatura de 120°C.

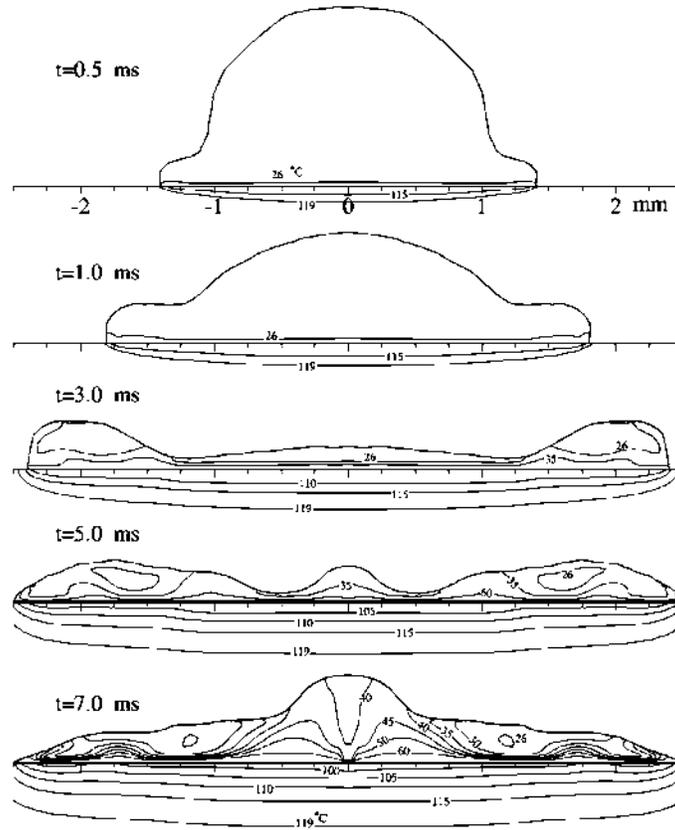


Figura 1.5. Distribución de temperatura para una gota de 2 mm de diámetro que impacta a una velocidad de 1.3 m/s en una superficie de acero inoxidable a una temperatura de 120°C.

Celata y colaboradores [6], evalúan el comportamiento del impacto de una gota sobre una superficie caliente variando la temperatura, la velocidad de la gota y la posición de la superficie, a temperaturas por debajo y encima del efecto Leidenfrost. El experimento se realiza a través de tres componentes principales: una superficie caliente, generador de gotas y un sistema de adquisición de video por medio de una cámara de alta velocidad (*ver Fig. 1.6*). Variando la temperatura de la superficie desde los 220°C hasta los 300°C, se realizan las pruebas de impacto de gota. Como resultado, se encuentra la temperatura para la cual la gota ya no moja la superficie y en cambio, esta rebota.

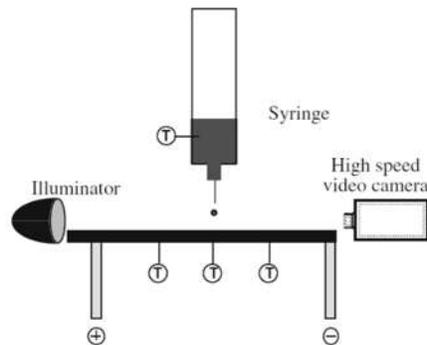


Figura 1.6. Esquema del banco experimental.

Roisman y colaboradores [7], desarrollan un modelo de transferencia de calor para el impacto de una gota en una superficie sólida caliente en el régimen de ebullición de la capa de vapor. La finalidad de este modelo, es comparar sus resultados con los experimentales. El banco experimental se compone por un sistema de calentamiento, generador de gotas, sistema de iluminación, cámara de alta velocidad y una unidad de control por computadora. Variando la temperatura de la superficie en donde impacta la gota, obtiene resultados y se comparan con los resultados analíticos, teniendo resultados similares en los dos casos (*ver Fig. 1.7*).

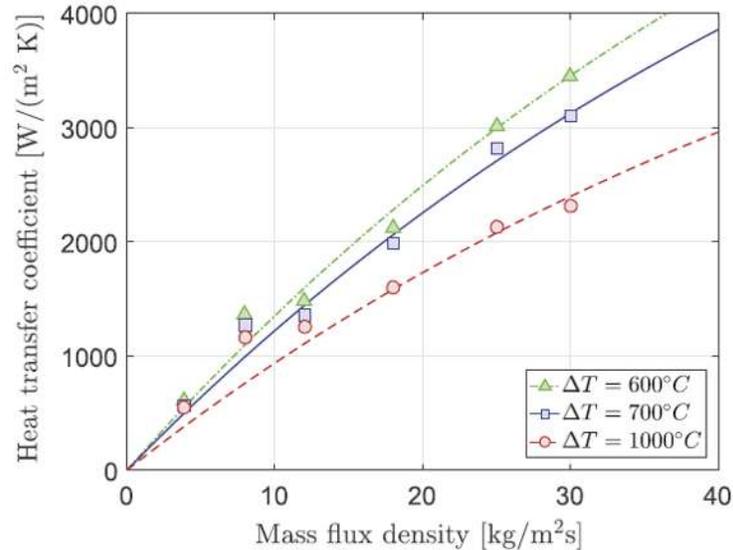


Figura 1.7. Coeficiente de transferencia de calor en la atomización de agua. Comparación de las predicciones teóricas vs datos experimentales

1.2. Temperatura de la superficie de contacto

El comportamiento de una gota, ya sea su salpicadura, rebote, despliegue, se encuentra en función de la temperatura de la superficie en donde haga contacto. Este fenómeno es de importancia pues existen varios procesos en donde se utiliza este conocimiento, ya sea en su aplicación para enfriamiento secundario, o también para la inyección de un combustible en motores de combustión interna. Se han hecho estudios en donde se utilizan gotas de iso-octano que impactan una superficie caliente ([8], [9], [10]), variando la temperatura de la superficie y buscando como objetivo el efecto de la transferencia de calor que se da dentro del pistón y cilindro.

Existen también investigaciones en donde se trabaja en una superficie caliente que ronda entre los $200^\circ C$ y $300^\circ C$, donde su objetivo principal es conocer más a fondo lo que sucede con un impacto de gota y el efecto Leidenfrost ([11], [4], [6], [12]).

Labeish y Pimenov [13], hicieron pruebas de transferencia de calor entre gotas y pared, en donde la superficie fue calentada desde los $120^\circ C$, y continuaron con más análisis que superaron los $360^\circ C$ de temperatura. Por su parte, Tartarini y colaboradores [14], realizaron pruebas de impacto de gotas en una superficie que osciló entre $100^\circ C$ y $200^\circ C$, 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.

Tran y colaboradores [15], realizan un trabajo en donde manejan temperaturas de superficie desde los 380°C hasta los 580°C, para conocer el comportamiento del impacto de gota, en donde estudian específicamente tres regímenes: ebullición por contacto, ebullición de una película suave de vapor, y la pulverización de la película de ebullición.

En el trabajo de Bertola [16], 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, Bertola propone varios regímenes de impacto en función del resultado final del comportamiento de la gota.

Wachters [17], investiga la transferencia de calor del impacto de gotas de agua sobre superficies calientes. Para su investigación, realiza las pruebas donde compara los resultados experimentales con los teóricos. Como observación, la superficie utilizada para recibir los impactos de gotas a distintas temperaturas, fue hecha de oro. Aquí la variación de la temperatura comprendió de los 170°C a los 400°C, y encontró que, al aumentar la temperatura de la superficie caliente, no evapora con mayor facilidad la gota de agua.

En 1968, McGinnis y Holfman [18], observan el comportamiento de una gota de agua, alcohol y acetona al momento de su rebote y salpicadura sobre una superficie caliente. En la investigación trabajan a una temperatura no mayor a los 150°C donde encuentran un máximo para la transferencia de calor en la salpicadura. Este resultado es por los efectos opuestos del incremento del gradiente térmico y disminución del tiempo de contacto de la gota.

Xu y colaboradores [19], observan un curioso fenómeno en su trabajo: la salpicadura de una gota puede suprimirse disminuyendo la presión del gas circundante al impacto (*ver Fig.1.8*). En este caso se utilizaron diferentes líquidos para las pruebas (metanol, propanol, 2-propanol), así como cuatro gases circundantes diferentes (helio, aire, kriptón y SF_6). Los resultados muestran la efectividad de disminuir la presión de un gas que rodea una superficie, y el contacto de una gota sobre esta.

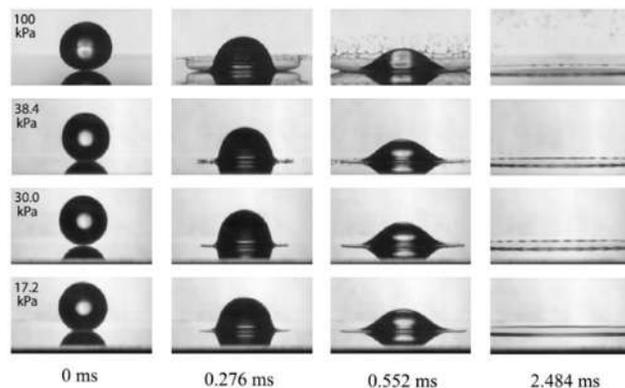


Figura 1.8. Gota de alcohol impactando una superficie de vidrio.

Gonor y Yakovlev [20], desarrollan un método donde obtienen una solución numérica para el estado inestable en la colisión de una gota con una superficie rígida.

De igual manera, Schmidt y Boye [21], desarrollan un método de determinación cuasi-estacionario para el coeficiente de transferencia de calor dado en el enfriamiento por spray para superficies calentadas a altas temperaturas. Los experimentos realizados muestran que, para temperaturas de superficie entre los 300°C y los 600°C, se observa un incremento significativo en el coeficiente de calor a medida que aumenta la velocidad de las gotas.

1.3. Rugosidad en la superficie

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 los cuales causan una transferencia de calor no homogénea y 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.

Mudawar y colaboradores [11], 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. En el estudio toman 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 [4], en cambio, mencionan que el comportamiento general del impacto de gotas no cambia con los diferentes valores de rugosidad en la superficie.

En el capítulo siguiente, se aborda una investigación más extensa sobre las diferentes variables que llegan a afectar el comportamiento de la gota al impactar una superficie metálica que está sometida a diferentes temperaturas.

2. Marco teórico

2.1. Producción de acero

La elaboración de los aceros 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 al colado convencional en lingotes [22].

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. Por ello, resulta de gran importancia conocer las variables que gobiernan la extracción de calor en las distintas etapas del proceso. El proceso siderúrgico tiene como meta la obtención de acero, lo que se puede conseguir a través de dos sistemas: mediante *alto horno* o con *horno eléctrico*.

2.2. Alto horno

El proceso siderúrgico de *alto horno*, también llamado integral, comienza con el tratamiento del mineral de hierro. El mineral con la granulometría adecuada se introduce directamente en el horno. Los finos del mineral de hierro junto con los fundentes (caliza) se aglomeran para darles un tamaño apto para su consumo en el horno. Este proceso de conversión se denomina sinterización y el producto conseguido, sinter. En el horno también se introduce carbón destilado, también denominado coque. El coque siderúrgico es un material duro, poroso y con un contenido en carbono superior al 90 %. Esa mezcla de mineral de hierro, sinter y coque se calienta en el horno mediante una inyección de aire caliente. El coque actúa como combustible y elemento reductor del oxígeno que lleva el hierro. Los fundentes añadidos se encargan de formar la escoria, subproducto que atrapa las impurezas del mineral de hierro. El producto obtenido en el horno alto es el arrabio, un material con una riqueza en hierro cercana al 95 % y alrededor del 3,5 % de carbono. Para minimizar la cantidad de azufre, un elemento muy negativo para el acero, se le añade posteriormente carburo cálcico. La escoria que también genera el horno está formada por silicio, el manganeso, el azufre y el fósforo. Una vez tratado, este subproducto se utiliza como capa base de carreteras y en la fabricación de cementos.

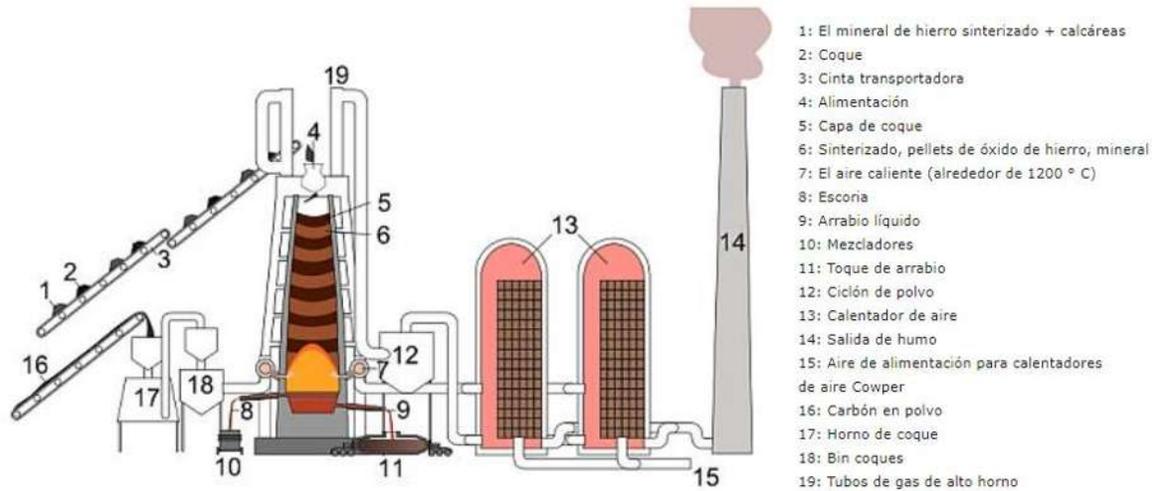


Figura 2.1. Proceso del alto horno.

La diferencia entre el arrabio y el acero estriba en la cantidad de carbono que tiene el producto férrico. Si el contenido es inferior al 1.7 % se considera acero. Si es superior recibe el nombre de fundición. El arrabio forma parte de este último grupo.

El acero presenta innumerables ventajas sobre la fundición: es un material resistente pero elástico, capaz de absorber impactos y que se puede laminar en forma de láminas e hilos. La fundición, por el contrario, es extremadamente dura pero quebradiza. Además, apenas se puede laminar ni estirar sin que se rompa. Por eso es necesario transformar el arrabio en acero. En este proceso se emplean los convertidores de las acerías, instalaciones que se encargan de eliminar ese exceso de carbono del arrabio líquido a través de un soplado de oxígeno. Tras el convertidor, el acero pasa por la metalurgia secundaria de la acería. Su función es ajustar la composición mediante la incorporación de ferroaleaciones y de gases.

El acero se solidifica en la colada continua, también ubicada en la acería. En esta instalación se trasvasa el acero líquido a un molde para darle forma de semiproductos. En función de la forma del molde se obtienen desbastes planos (slabs); destinados a la fabricación de productos planos; desbastes de sección cuadrada (blooms), utilizados en la producción de perfiles y carriles; y palanquillas, empleadas en la fabricación de redondos. Estos procesos aprovechan la capacidad de deformación (ductilidad) del acero y se pueden realizar tanto en caliente como en frío.

Cuando la laminación se realiza en frío, el acero sufre alteraciones en su estructura interna por lo que es necesario someter el producto a un proceso de recocido, que permite regenerar esa estructura y mejorar sus características mecánicas. Los productos planos (bobinas y chapas), van destinados a los sectores del automóvil y los electrodomésticos entre otros clientes. La hojalata o el galvanizado son productos planos que han pasado por un proceso posterior de recubrimiento con estaño en el primer caso, y zinc en el segundo, para aumentar su capacidad de protección y alargar su vida. Los productos largos, como el alambroñ y los perfiles, se dirigen, principalmente, al sector de la construcción.

2.3. Descripción y evolución de sus elementos

Las principales partes que constituyen una colada continua son: La torre de colada, la cuchara, la artesa, el molde o lingotera, la cámara de enfriamiento de agua, zona de enfriamiento al aire, rodillos conductores, sistema de corte y sistema de recogida y almacenamiento.

2.3.1. Torre de colada

La torre de colada sirve para agilizar la secuencia entre una colada y otra. Es una estructura vertical giratoria, provista de dos cucharas. Una de las cucharas alimenta la artesa y la segunda cuchara se llena y se mantiene en espera hasta que se agote el metal de la cuchara que está vertiendo en la artesa. Una vez termina, la torre gira y se pone a verter el metal la segunda cuchara.

2.3.2. La cuchara

La cuchara es un recipiente de material refractario, que sirve de intermediario entre el horno y la máquina de colada continua (*Fig. 2.2*). De esta forma impide que el horno deje de funcionar para la siguiente colada.

- La cuchara se divide en varias zonas de trabajo, y cada una de ellas tiene un tipo de material refractario:
- La zona más alta, que es la línea de escoria, se usa el revestimiento de trabajo magnesia-carbono con un contenido de carbono residual de entre un 9 y un 16%. Esta es la zona que más se daña y, por tanto, la que más reparaciones necesita.
- Para las paredes laterales se usa dolomita temperizada o alta alúmina ya que este revestimiento es más económico. La zona de máximo desgaste como es la zona de impacto del chorro de descarga de la colada de acero, se refuerza con magnesia-carbono reimpregnada, para así ser más resistente a la abrasión.
- En el fondo de la cuchara se usa alta alúmina y dolomita temperizada, pero en las zonas de mayor desgaste, se usa magnesia-carbono reimpregnada o magnesia-cromo de alta calidad.



Figura 2.2. Cuchara en la colada continua.

2.3.3. Artesa

La artesa es un elemento fundamental en la colada continua. Es el elemento que reparte el metal fundido de forma continua a los moldes o lingoteras de la línea de colada continua (*Fig. 2.3*). Estas lingoteras suministran un chorro continuo y homogéneo de acero a velocidad constante. Estas artesas pueden tener tantos orificios de salida como líneas de colada existan. Existen instalaciones de colada continua pueden estar compuestas hasta por 8 líneas de colada.

Otra de las funciones de la artesa, consiste en separar la escoria que cubre la superficie del acero fundido. Para ello hay que tener especial cuidado al regular la salida del este metal por las buzas, esto lo conseguimos hacer con los tapones, que se regulan mecánicamente. También existen artesas con sifones que evita que la escoria pase a la parte inferior y vaya con el acero.

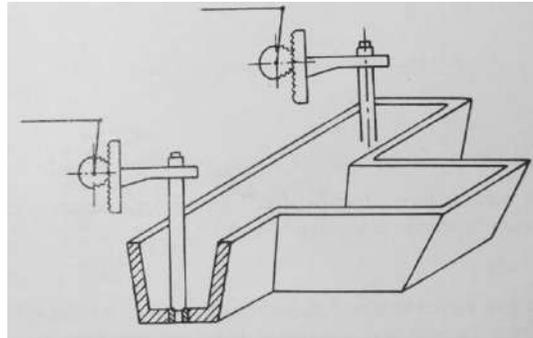


Figura 2.3. Artesa en la colada continua.

2.3.4. Molde

El molde sirve para dar forma al producto. Estos moldes, también llamados lingoteras, suelen ser de cobre y tienen perforaciones para que puedan ser refrigerados por agua (*Fig. 2.4*). Por el interior están pulidos y tienen forma de tubo sin fondo. La longitud varía de 500 a 800 milímetros. En un principio los moldes se fabricaban a partir de un tocho macizo de cobre, al que se le mecanizaba el hueco central, por donde pasaba la colada y, unos canales de comunicación que servía para el paso del agua de refrigeración. Estos moldes tenían el inconveniente de ser muy pesados y costosos de fabricar. El molde debe asegurar la formación rápida de la costra exterior del lingote de forma que sea bastante gruesa y resistente. Debe salir del molde con un espesor de entre unos 8 y 25 mm. De ahí, que el molde sufra una refrigeración muy intensa, tanto en su interior como en su exterior. La refrigeración del molde suele hacerse por la entrada que tiene en la parte inferior y, por la entrada de la parte superior se evacua el agua. El paso del agua se hace a unos 5 m/s como mínimo, ya que, el agua que se evacua no tiene que exceder los 50 °C. El consumo de agua está en torno a los 100 y 120 m³.

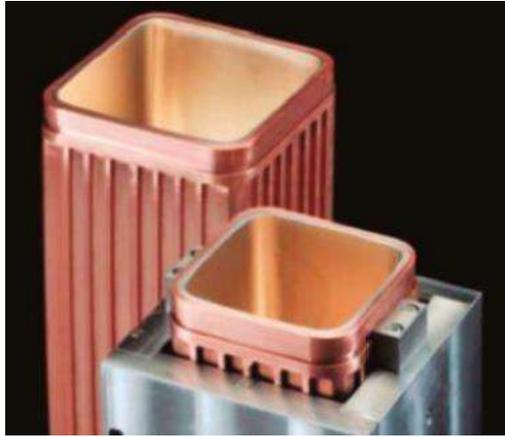


Figura 2.4. Molde o lingotera.

Actualmente, se usan moldes con radio grande, pero con algunas modificaciones para que tampoco se produzcan grietas longitudinales superficiales. Como estas grietas se forman debido al enfriamiento brusco de la superficie de la pieza al entrar en contacto con la pared del molde, lo que se ha optado es por utilizar el molde con una pared más fina, que disminuye la temperatura de la cara caliente y mejora el comportamiento del agitado electromagnético. Este molde en su parte exterior tiene unas ranuras longitudinales. Al salir la barra con un radio mayor, el canto redondeado se enfría más lentamente y se forman menos grietas. Con estos moldes se podría sustituir, en algunos casos, a los moldes de placas, ya que estos son más caros y complejos.

2.3.5. Enfriamiento secundario

Esta zona, también se llama, sistema de refrigeración secundario y sirve para solidificar la zona central de la barra. Esta zona está justo a la salida del molde metálico. Se dice que es enfriamiento secundario, porque el metal fundido es sometido a un enfriamiento primario al entrar en contacto con el molde. Estos enfriamientos tienen mucha importancia en el resultado de la calidad del metal. El enfriamiento secundario influye considerablemente sobre la calidad interna del acero, mientras que el enfriamiento producido en el molde influye principalmente en la calidad superficial. La barra de acero se tiene que solidificar completamente en su interior al salir de la cámara de enfriamiento. Cuantas más duchas de agua tenga, más rápido se enfriará su interior.

El agua se pulveriza sobre la superficie del metal, de forma muy controlada. Se genera un consumo de agua muy grande, se suele usar unos 10 litros de agua por cada kilogramo de acero.

2.3.6. Rodillos de arrastre

Sirven para guiar la barra a la velocidad deseada por el proceso. Tiene que ir a la misma velocidad que el molde. Estos rodillos están accionados automáticamente. La barra suele ser tirada por una o dos cajas de toma que esta justo debajo de la zona de enfriamiento secundario. Cada caja consta de dos o tres pares de cilindros.

En el caso de las coladas curvas, la disposición de los rodillos tiene que estar en un lugar determinado para poder realizar con éxito la curvatura de la barra. Estas curvas se realizan con la barra totalmente solidificada. En las instalaciones curvas se pone una caja de toma y enderezamiento para estirar y enderezar la barra. Esta caja, está compuesta por cilindros en la parte de arriba y en la parte de abajo. Los de abajo son locos y los de arriba son fijos y estos se aprietan contra la barra del lingote con unos cilindros hidráulicos, que hace fuera para enderezar la barra.

2.3.7. Corte

Los mecanismos de corte dividen el producto en las longitudes que se desean. El corte se hace mediante sopletes o cizallas que se desplazan a la vez que cortan la barra. El corte por soplete tiene un movimiento perpendicular a la barra y otro paralelo que se mueve a la misma velocidad que la barra, gracias a un mecanismo con unos agarradores neumáticos. El problema de este tipo de corte es, que se pierde material al formarse cascarilla por donde se corta el metal. Sin embargo, aunque el corte por cizalla no tiene perdida de material, está limitado a ciertos espesores, no puede cortar más de 200 mm.

2.3.8. Almacenamiento

Son dispositivos que sirven para recoger las barras y almacenarlas en grupos claramente identificables.

2.4. Tipos diferentes de colada continua

- De molde vertical recto
- De molde vertical, con doblado de la palanquilla solidificada en caliente
- De molde vertical recto con doblado de la palanquilla en la zona de refrigeración secundaria, sin solidificar la barra en el interior.
- De molde curvo, con enderezado progresivo de la palanquilla.

2.4.1. Molde vertical recto

En estas instalaciones de unos 40 m de altura, lo que tienen como principal inconveniente su gran altura. Las máquinas de colada continua verticales, se ponen o en grandes estructuras verticales o usando pozos subterráneos o bien una combinación de ambos. La altura de estas instalaciones variara principalmente por la altura del hoyo líquido, que es la zona del interior de la barra que se está fabricando, que aún está líquida en su proceso de solidificación. Este hoyo variará en función de las dimensiones del producto colado y de la velocidad a la que se cuela. A la altura en que la barra está totalmente solidificada, se corta mediante oxicorte o cizallas volantes. El hoyo líquido, no debe exceder los 18 m, porque si se hace más grande la altura del hoyo, la presión ferrostática aumenta y puede deformar los dispositivos de apoyo del enfriamiento secundario. Dentro de las ventajas de la colada continua vertical está que es la instalación más económica y sencilla.

2.4.2. Molde vertical con doblado solido

Esta instalación surgió con el objetivo de evitar la gran altura que debían tener las instalaciones de colada en vertical. Su principio básico se basa en doblar la palanquilla cuando ya está solidificada la barra, lo que permite disminuir la altura de la instalación, ya que la longitud de la barra solidificada se corta en horizontal.

En estos tipos de máquinas tienen una parte vertical, una parte curva, y una horizontal. La parte de la curva esta justo después de la zona de enfriamiento secundario. Para poder curvar la barra se usa un cilindro instalado detrás de la caja de rodillos. Este pistón consigue introducir el lingote en los cilindros enderezadores. Después del enderezador se encuentra las máquinas de oxicorte o la cizalla hidráulica.

El radio del curvador debe de ser de unas 30 veces como mínimo el espesor del lingote, sino se podrían producir agrietamientos en el lingote. Debido al gran radio de curvatura, mediante este tipo de máquinas no se pueden producir lingotes de gran sección, sino que está destinado a piezas inferiores a 150 o 200 mm. Si se produce un lingote de gran sección el radio de curvatura sería muy grande, de forma que no se reduciría mucho la altura de la instalación y convendría más una máquina de colada continua en vertical.

2.4.3. Molde vertical con doblado sin solidificar

Este tipo de instalación es muy similar a la de doblado cuando la barra está totalmente sólida, pero con la diferencia de que, en esta, el doblado se hace al salir del molde cuando el metal del interior aún es líquido. De esta forma el enfriamiento secundario se hace en una zona recta horizontal.

2.4.4. Molde curvo

Con este tipo de instalación se consigue mucha menor altura que con las anteriores. El molde metálico es curvo y el enfriamiento secundario se realiza en la curva. Después de pasar por el enfriamiento secundario, pasará a una zona de rodillos de enderezamiento para así conseguir que las barras sean rectas.

Entre las máquinas de molde curvo existen varios tipos de curvatura. La curva puede ser de radio fijo, en el que el molde se mueve siguiendo el radio de la curva y los de radio variable. Para enderezar la barra, en el caso de las de radio fijo, se realiza en la parte recta justo después de la curva mediante una caja de toma y enderezamiento. En el caso de las de radio variable, se va curvando la barra cada vez menos, según avanza por el enfriamiento secundario incorporado en la curva. De esta forma, en la curva se encontraría el tren de toma y enderezamiento. La altura de la instalación finalmente vendrá dada prácticamente por el radio de curvatura.

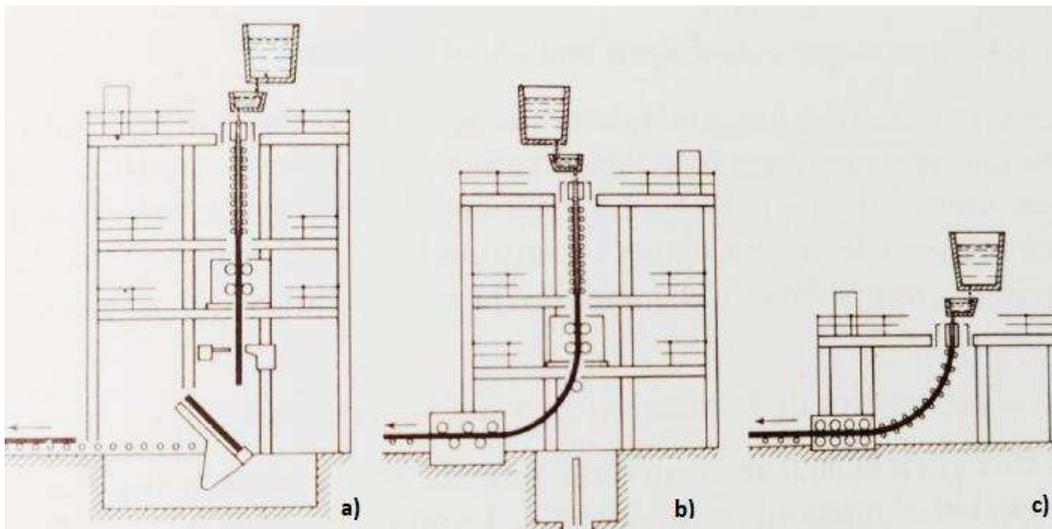


Figura 2.5. Tipos de máquinas de colada continua. a) Molde vertical recto, b) Molde vertical con doblado, c) Molde curvo.

2.5. Horno eléctrico

El proceso de obtención de acero a través del *horno eléctrico* se diferencia del anterior en dos puntos fundamentales. En primer lugar, la principal materia prima es la chatarra, es decir, el propio acero reciclado al final de su vida útil. La segunda diferencia es el uso de hornos eléctricos, donde se carga la chatarra y en los que se crea un arco eléctrico que salta entre los electrodos. La mayor parte del acero obtenido por este procedimiento se destina a productos largos empleados en la construcción. El elemento fundamental del equipo, desde el punto de vista de funcionamiento, es el transformador [23]. Éste cambia la corriente de alta tensión y baja intensidad que llega a la planta a corriente de baja tensión y alta intensidad que resulta adecuada para aprovechar el efecto Joule en el calentamiento y fusión de la carga.

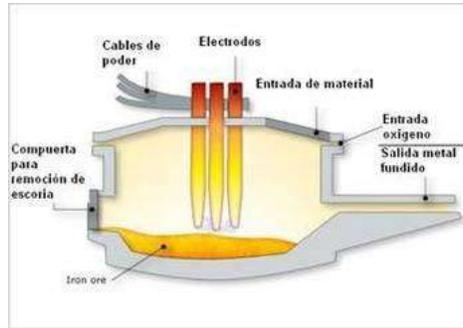


Figura 2.6. Representación gráfica de un horno eléctrico.

2.6. Materiales de carga

2.6.1. Chatarra

Es el componente básico de la carga. Cualidades deseables son, entre otras:

- Lo más gruesa y masiva posible. En este sentido la mejor puede ser la procedente de astilleros, desguace de buques, maquinaria, calderería pesada y ferrocarriles.
- Son preferibles aceros al carbono o de muy baja aleación para acortar la duración oxidante de las coladas y evitar problemas en la laminación derivados de la presencia de elementos trampa.
- A pesar de lo anterior algunas chatarras (inoxidable, Hadfield...) pueden ser útiles para fabricar los mismos aceros.
- Es favorable que estén limpias y libres de óxido, suciedad, pinturas, aceites, taladrinas, etc. En este sentido es preferible la chatarra desmenuzada a la compactada.
- En las instalaciones antiguas la chatarra se carga fría porque no resulta fácil la implantación de equipos de precalentamiento. En las nuevas instalaciones se implantan hornos con sistemas de precalentamiento de chatarras mediante recuperación y aprovechamiento de los calores sensible y químico (postcombustión) de los gases de colada.

2.6.2. Prerreducidos

Los prerreducidos (pellets, briquetas, hierro esponja) son los productos obtenidos por reducción directa en estado sólido, mediante carbón o hidrocarburos, de minerales muy puros y lo más exentos posible de ganga. Ha de tenerse en cuenta que la ganga produce en la colada una escoria poco reactiva, viscosa y difícil de manipular.

Aportan la ventaja de que son hierro prácticamente puro exento de cualquier elemento contaminante o de aleación. Por ello su presencia en la carga es favorable como diluyente de elementos (Ni, Sn, Cu...) perjudiciales e imposibles de eliminar en las marchas de colada en acería.

Los prerreducidos pueden cargarse de cinco formas:

- Discontinua, añadiéndolos en la cesta de carga.
- Continua, mediante agujeros practicados en bóveda o cuba del horno.
- Inyectados en la cuba mediante equipos especiales.
- En hornos de corriente continua que tienen electrodo hueco, a través de éste.
- Si la acería está al lado de la reducción directa cargarlos calientes, a la salida de los hornos de reducción, para aprovechar su calor sensible.

Otros materiales de carga

- A veces se carga arrabio o fundición (3-5 % de carbono) o carbón (preferiblemente coque) para aumentar el contenido de carbono que favorezca el “hervido” y la escoria espumosa.
- Cuando el horno está situado en serie con instalaciones de reducción directa en estado líquido (fusión reductora, Corex, D.I.O.S.) la fundición carburada producida puede formar parte de la carga adoptando los medios de transporte que sean necesarios.
- Puede emplearse también arrabio producido en mini-horno alto como complemento o sustitución de los convertidores de siderurgia integral.

2. 7. Producción de acero a nivel mundial

2.7.1 Producción de acero por empresa

Tabla 2.1. Producción de acero por empresa a nivel mundial [24].

Rank	Company	Tonnage	Rank	Company	Tonnage
1	ArcelorMittal ⁽¹⁾	97.31	26	Rizhao Steel	14.20
2	China Baowu Group ⁽²⁾	95.47	27	U. S. Steel Corporation	13.89
3	Nippon Steel Corporation ⁽³⁾	51.68	28	EVRAZ	13.81
4	HBIS Group ⁽⁴⁾	46.56	29	CITIC Pacific	13.55
5	POSCO	43.12	30	Gerdau	13.13
6	Shagang Group	41.10	31	Jingye Steel	12.58
7	Ansteel Group	39.20	32	MMK	12.46
8	Jianlong Group	31.19	33	Shaanxi Steel	12.45
9	Tata Steel Group	30.15	34	Sanming Steel	12.40
10	Shougang Group	29.34	35	thyssenkrupp	12.25
11	Shandong Steel Group	27.58	36	Zenith Steel	11.93
12	JFE Steel	27.35	37	Severstal	11.85
13	Valin Group	24.31	38	Tsingshan Stainless ⁽⁶⁾	11.40
14	Nucor Corporation	23.09	39	Nanjing Steel	10.97
15	Hyundai Steel	21.56	40	Taiyuan Steel	10.86
16	IMIDRO ⁽⁵⁾	16.79	41	Anyang Steel	10.54
17	JSW Steel	16.26	42	Metinvest Holding	9.58
18	SAIL	16.18	43	Xinyu Steel	9.47
19	Benxi Steel	16.18	44	Donghai Special Steel	8.90
20	Fangda Steel	15.66	45	Jinxi Steel	8.73
21	NLMK	15.61	46	Erdemir Group	8.61
22	Baotou Steel	15.46	47	Steel Dynamics, Inc.	8.59
23	China Steel Corporation	15.23	48	Kunming Steel	7.73
24	Techint Group	14.44	49	SSAB	7.62
25	Liuzhou Steel	14.40	50	Jiuquan Steel	7.48

2.7.2. Producción de acero por país

Tabla 2.2. Producción de acero por país [24].

Country	2019		2018	
	Rank	Tonnage	Rank	Tonnage
China	1	996.3	1	920.0
India	2	111.2	2	109.3
Japan	3	99.3	3	104.3
United States	4	87.8	4	86.6
Russia	5	71.9	6	72.1
South Korea	6	71.4	5	72.5
Germany	7	39.7	7	42.4
Turkey	8	33.7	8	37.3
Brazil	9	32.2	9	35.4
Iran	10	25.6	10	24.5
Italy	11	23.2	11	24.5
Taiwan, China	12	22.0	12	23.2
Ukraine	13	20.8	13	21.1
Vietnam	14	20.1	15	15.5
Mexico	15	18.5	14	20.2
France	16	14.4	16	15.4
Spain	17	13.6	17	14.3
Canada	18	12.9	18	13.4
Poland	19	9.0	19	10.2
Saudi Arabia	20	8.2	20	8.2
Belgium	21	7.8	21	8.0
Austria	22	7.4	24	6.9
Egypt	23	7.3	22	7.8
United Kingdom	24	7.2	23	7.3
Netherlands	25	6.7	25	6.8
Indonesia ^(a)	26	6.4	28	6.2
South Africa	27	5.7	27	6.3
Australia	28	5.5	29	5.7
Slovak Republic ^(a)	29	5.3	30	5.2
Sweden	30	4.7	34	4.7
Argentina	31	4.6	31	5.2
Malaysia ^(a)	32	4.5	36	4.1
Czech Republic	33	4.4	32	4.9
Thailand	34	4.2	26	6.4
Kazakhstan	35	4.1	37	4.0
Finland	36	3.5	35	4.1
Romania	37	3.4	38	3.5
United Arab Emirates	38	3.3	39	3.2
Pakistan	39	3.3	33	4.7
Byelorussia	40	2.6	41	2.5
Qatar	41	2.6	40	2.6
Algeria ^(a)	42	2.4	42	2.3
Luxembourg	43	2.1	43	2.2
Portugal	44	2.0	44	2.2
Oman ^(a)	45	2.0	45	2.0
Serbia	46	1.9	47	2.0
Hungary	47	1.8	46	2.0
Switzerland ^(a)	48	1.5	48	1.5
Philippines ^(a)	49	1.4	49	1.5
Greece	50	1.4	50	1.5
Others		15.9		15.9
World		1 868.8		1 813.6

2.7.3. Producción de acero en México

México ocupó el lugar número 15 como productor mundial de acero en el año 2019, con una producción total de 18.4 millones de toneladas. Esta actividad generó cerca de 672 mil empleos directos e indirectos a la fecha mencionada, siendo de gran importancia para la economía nacional.

Una gran ventaja que se presenta en la producción de acero en México es el uso de chatarra reciclada. Se tiene que en el país cerca del 41 % de la producción del acero, viene por esta vía, en comparación con un promedio del 25 % de producción de acero por chatarra reciclada en el mundo.

Tabla 2.3. Producción de acero por estados en la República Mexicana [25].



Tabla 2.4. Productores de acero en la República Mexicana [25].

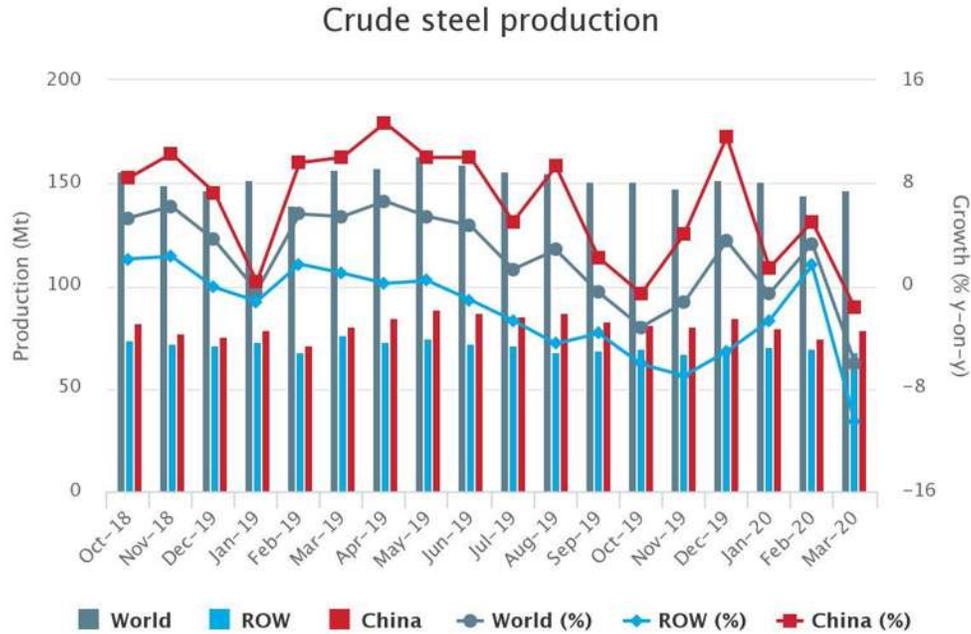
Productores de acero	ID	Productos													
		Planchón	Planchilla	Placa (Hoja - Rollo)	Lámina Caliente	Lámina Fría	Lámina Galvanizada	Cromada & Estanada	Varilla	Alambrión	Alambre & Derivados	Barras	Tubos	Perfil Comercial	Perfil Estructural
AHMSA	1														
ArcelorMittal México	2														
Deacero	3														
Gerdau Corsa	4														
Grupo Acerero	5														
Grupo Simec	6														
Tenaris TAMSА	7														
Ternium México	8														
Tyasa	9														

2.7.4. Panorama actual en el mundo

La producción mundial de acero bruto fue de 443.0 Mt en los primeros tres meses de 2020, un 1.4% menos que en el mismo período de 2019. Asia produjo 315.2 Mt de acero bruto en el primer trimestre de 2020, una disminución del 0,3% con respecto al primer trimestre de 2019. La UE produjo 38.3 Mt de acero bruto en el primer trimestre de 2020, un 10.0% menos en comparación con el mismo trimestre de 2019. La producción de acero crudo de América del Norte en los primeros tres meses de 2020 fue de 29.5 Mt, una disminución de 4.0 % respecto al primer trimestre de 2019.

China produjo 79.0 Mt de acero crudo en marzo de 2020, una disminución del 1.7 % en comparación con marzo de 2019. India estima 8.7 Mt de producción de acero crudo en marzo de 2020, un 13.9 % menos que en marzo de 2019. Japón estima 8.2 Mt de producción de acero crudo en marzo 2020, un 9.7 % menos que en marzo de 2019. Corea del Sur produjo 5.8 Mt de acero crudo en marzo de 2020, un 7.9 % menos que en marzo de 2019.

Tabla 2.5. Producción de acero en el mundo [26].



En la UE, Alemania estima 2.9 Mt de producción de acero bruto en marzo de 2020, un 20.9% menos que en marzo de 2019. Italia produjo 1.4 Mt de acero bruto en marzo de 2020, un 40,2% menos que en marzo de 2019. Francia estima 1.2 Mt de producción de acero bruto en marzo de 2020, una disminución del 13.2 % en comparación con marzo de 2019. España produjo 1.2 Mt de acero bruto en marzo de 2020, un 14.6 % menos que en marzo de 2019.

Estados Unidos produjo 7.2 Mt de acero crudo en marzo de 2020, una disminución del 6.0% en comparación con marzo de 2019.

Rusia estima 5.9 Mt de producción de acero bruto en marzo de 2020, un 4.4 % menos que en marzo de 2019. Ucrania produjo 1.8 Mt de acero bruto en marzo de 2020, un 10.3 % menos que en marzo de 2019.

Brasil produjo 2.6 Mt de producción de acero crudo para marzo de 2020, un 8.2 % menos que en marzo de 2019.

La producción de acero bruto de Turquía para marzo de 2020 fue de 3.1 Mt, un 4.1 % más que en marzo de 2019.

2.8. Enfriamiento secundario

Este sistema tiene como función solidificar el acero líquido aun remanente dentro de la sección colada, formando una piel estable y evitando la formación de grietas internas u otros defectos [27].

La transferencia de calor se puede calcular mediante la Ley de enfriamiento de Newton, dada por la expresión:

$$q_w = h_w(T_s - T_w) \quad (1)$$

Enfriar no siempre significa sólo enfriar. En el complejo campo de la fabricación de hierro y acero en particular, hay que tener en cuenta numerosos factores de influencia diferentes [28]. Los diferentes grados de acero requieren procesos de enfriamiento individuales. Lo mismo se aplica a los diferentes formatos de acero. Se necesitan perfiles de refrigeración ajustados por separado para garantizar la refrigeración sin tensiones de las coladas de productos planos y largos.

Sus ventajas

- Soluciones de boquillas hechas a medida para palanquillas, blooms y lajas
- Aumento de la velocidad de lanzamiento
- Mayor productividad
- Ampliación de la gama de productos (aceros especiales)
- Mayor vida útil y reducción de los costos de mantenimiento
- Aumento de la calidad del producto

2.9. Mecanismo de extracción de calor

El metal semi-líquido posee una cáscara solidificada por lo que los mecanismos de transferencia de calor tienen en cuenta la convección forzada del agua calentada, el calor latente de solidificación del acero, la conducción en el sistema palanquilla-rodillos y la radiación térmica, entre otros. Sin embargo, no todos tienen la misma intensidad por lo que se pueden despreciar algunos para simplificar el modelo [29]. La *Figura 2.7*, muestra esquemáticamente la disposición de rodillos y rociadores que se hallan en la zona de enfriamiento secundario de una máquina de colada continua de planchones [1]. La extracción de calor se produce, principalmente, por los siguientes mecanismos:

- Conducción por contacto rodillo-línea.
- Radiación desde la superficie del acero.
- Evaporación parcial del agua que incide sobre el producto.
- Conducción de calor al agua que escurre y se acumula entre rodillo y acero.

En los puntos siguientes se analiza en detalle cada uno de los cuatro mecanismos de extracción de calor mencionados.

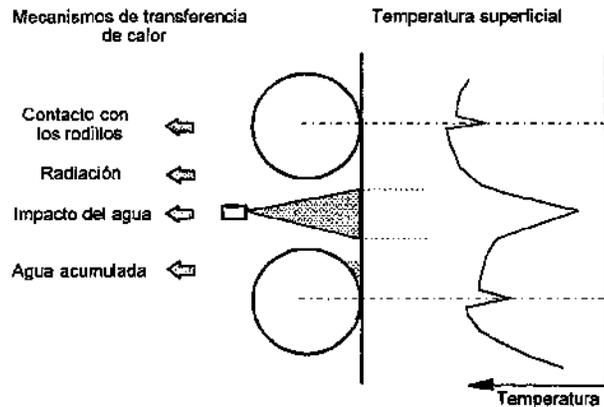


Figura 2.7. Sistema de enfriamiento secundario.

2.9.1. Extracción de calor por contacto con los rodillos

La extracción de calor producida por efecto de los rodillos depende, principalmente, del diseño del sistema interno de refrigeración de los mismos, de su diámetro, de la ubicación en la máquina y del tipo de rociador de agua empleado. Con respecto al sistema interno de refrigeración, se ha mostrado que el enfriamiento producido en la superficie del acero es más intenso cuando se emplean rodillos con canales de refrigeración periféricos axiales o helicoidales que cuando se utiliza refrigeración central. Por otro lado, el uso de rodillos de menor diámetro implica menores tiempos y fuerzas de contacto y, por lo tanto, una menor disipación de calor. El flujo de calor extraído por los rodillos se incrementa al aumentar la presión ferrostática ejercida por el acero líquido. En consecuencia, a igualdad de las otras variables, el calor extraído es mayor en los rodillos ubicados a distancias más alejadas del menisco de acero. Finalmente, la capacidad de extracción de calor de los rodillos varía si son refrigerados sólo internamente o si reciben la acción de rociadores externos. En el primer caso, el calor extraído por los mismos se puede evaluar midiendo el caudal y la elevación de temperatura del agua de refrigeración. Planteando un balance térmico de los rodillos se puede observar que el calor recibido por los mismos proviene, básicamente, de dos fuentes: del contacto directo con el producto y de la radiación desde la superficie del acero. La proporción estimada de estos dos aportes varía del orden del 50 % cada uno. El enfriamiento de los rodillos se produce por la refrigeración interna, por el agua de los rociadores que lo bañan parcialmente y por la radiación y convección al medio ambiente.

Asimismo, se evaluó el calor total absorbido por los rodillos midiendo la distribución radial de temperaturas en función del ángulo de giro y ajustando a estas mediciones un modelo matemático [1]. Los resultados encontrados se muestran en la *Tabla 2.6* junto con mediciones realizadas por otros investigadores en diferentes circunstancias. La longitud de contacto rodillo-acero se puede suponer de aproximadamente 5 mm, mientras que también se estima una región de contacto equivalente a un ángulo de 4 ° del rodillo. Se tiene que la extracción

de calor por el contacto con los rodillos se puede calcular empleando un coeficiente de transferencia que varía entre 350 y $1.745 \frac{W}{m^2-K}$, según la posición del rodillo con respecto al menisco de acero.

Tabla 2.6. Valores de flujo de calor extraído por rodillos.

Diámetro, mm	Flujo de calor*, kW/m	Posición, m	Evaluación del flujo de calor	Observaciones
300	25,4	10,7	Medición de temperaturas en el rodillo y aplicación del modelo matemático	Agua de los rociadores bañando los rodillos
300	14,0	10,7		
300	27,7	10,7		Sin agua de rociadores
288	24-40	5,3	Medición de caudal y elevación de temperatura del agua de refrigeración	Rodillo dentro de la cámara de enfriamiento secundario
320	22-30	7,5		
480	52-65	17,0		Rodillo fuera de cámara
310	6,1		Medición de caudal y elevación de la temperatura del agua de refrigeración	Caudal: 26 L/min-gap
310	9,0			Caudal: 8 L/min-gap
310	13,3			Caudal: 4 L/min-gap

* Flujo de calor por unidad de longitud del rodillo.

2.9.2. Extracción de calor por medio de la radiación desde la superficie del acero

La cantidad de calor perdida por radiación se puede estimar aplicando la ley de Stefan-Boltzman [30].

$$\dot{Q}_{emitida} = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (2)$$

donde los valores de emisividad normalmente empleados oscilan entre 0.7 y 0.9, siendo 0.8 el más utilizado. También se han propuesto expresiones que permiten calcular la emisividad en función de la temperatura superficial del acero [1]

2.9.3. Extracción de calor por la acción directa del agua

Este mecanismo es el principal del enfriamiento secundario, no sólo porque es el que permite extraer la mayor cantidad de calor sino porque variando el caudal de agua es posible regular la intensidad del enfriamiento. De hecho, una forma de caracterizar la magnitud del enfriamiento secundario es relacionando el caudal total de agua empleado por kg de acero colado, según la siguiente expresión:

$$I = \frac{G_s}{\rho * S_p * V_c} \quad (3)$$

Los valores usuales de la intensidad de enfriamiento oscilan entre 0.5 y 2 L/kg, dependiendo del producto colado, del tipo de acero y de la estrategia adoptada en cada planta. Los rociadores empleados para impulsar el agua son muy variados, pudiendo ser de chorro plano o cónico, con ángulos de barrido que varían entre 45 y 120 ° y secciones llenas o huecas. Además, pueden impulsar exclusivamente agua o agua atomizada con aire a presión.

El calor extraído se puede calcular mediante la expresión (1):

$$q_w = h_w * (T_s - T_w)$$

donde h_w es el coeficiente local de transferencia de calor. Este coeficiente depende, principalmente, del caudal específico de agua, es decir, de la cantidad de agua impulsada por unidad de tiempo y superficie. Sin embargo, otros factores, tales como la temperatura superficial del acero y la del agua de refrigeración, también afectan al valor de este coeficiente.

El caudal específico de agua debajo de los rociadores no es uniforme, sino que presenta una distribución que depende, entre otras cosas, del tipo de tobera, de la presión de alimentación de agua y de la distancia del rociador a la superficie. Se ha estudiado la influencia de las variables mencionadas en el caudal específico de agua. Para ello se emplea un dispositivo consistente en una placa con pequeños orificios donde recoge el agua impulsada por los picos bajo estudio. Midiendo el volumen de agua acumulado a lo largo de un cierto tiempo en cada orificio se construyen las curvas de caudal específico de cada pico. Luego, en las mismas posiciones en que se encuentran los orificios, se realiza determinaciones del coeficiente de transferencia térmica, logrando, de esta manera, vincularlo con los datos de caudal específico de agua. En un caso para medir el coeficiente local de transferencia térmica, se calienta una placa de acero sobre la que se hace incidir el chorro de agua del rociador a estudiar y se mide la energía requerida para mantener esta temperatura constante a lo largo del ensayo (método estacionario). En un segundo caso, también se calienta una placa de acero, pero ahora se registra el enfriamiento producido en distintos puntos de la misma por efecto del agua impulsada. Resolviendo la ecuación de conducción de calor en estado no estacionario es posible determinar el coeficiente de transferencia térmica para las distintas temperaturas en la superficie de la placa.

Se han llevado a cabo numerosos trabajos de laboratorio para estudiar el efecto de las diferentes variables en el coeficiente de transferencia acero-agua. Los resultados de dichas experiencias se han recopilado en trabajos. Si bien el coeficiente de transferencia depende también de la temperatura del agua, de la presión de alimentación y de la velocidad de las gotas, la variable que mayor influencia ejerce es el caudal específico de agua. Esto ha llevado a que, de forma simplificada, los resultados de la literatura se expresen con una ecuación del tipo:

$$h_w = A - \dot{w}^n \tag{4}$$

donde n es una constante que varía entre 0.5 y 1. La temperatura superficial del acero también afecta al valor del coeficiente de transferencia térmica, como muestra la *Figura 2.8*. A temperaturas elevadas, la transmisión de calor se lleva a cabo a través de una película estable de vapor y, por lo tanto, el coeficiente de transferencia sólo varía levemente con la temperatura. Esta es la situación normalmente obtenida, en estado estacionario, en los productos de colada continua. Sin embargo, cuando la temperatura disminuye por debajo de un cierto valor, conocido como temperatura de Leidenfrost, el coeficiente de transferencia se incrementa drásticamente debido a que la película de vapor se hace inestable y parte de la superficie del acero es mojada directamente por las gotas de agua (*Fig. 2.8*). Si bien en este caso la eficiencia del enfriamiento se incrementa de forma notable, es difícil controlar la uniformidad del enfriamiento, por lo que durante el funcionamiento de las máquinas se trata de evitar esta situación. En ensayos de laboratorio se ha encontrado que la temperatura de Leidenfrost se incrementa con el flujo de agua y, además, varía con las propiedades térmicas del material que se enfría. Se ha mostrado que la exfoliación de cascarillas de óxido en la superficie del acero puede incrementar sensiblemente la temperatura de Leidenfrost. Sin embargo, estos resultados obtenidos en laboratorio no son directamente trasladables a las condiciones de planta. Se encontró además que, en el caso de mantenerse una película estable de vapor, la presencia de una capa de óxido modifica la transferencia de calor sólo cuando dicha capa se mantiene adherida a la superficie y cubriendo más de un 90 % de la misma. En tal circunstancia, se debe considerar la resistencia térmica aportada por el óxido.

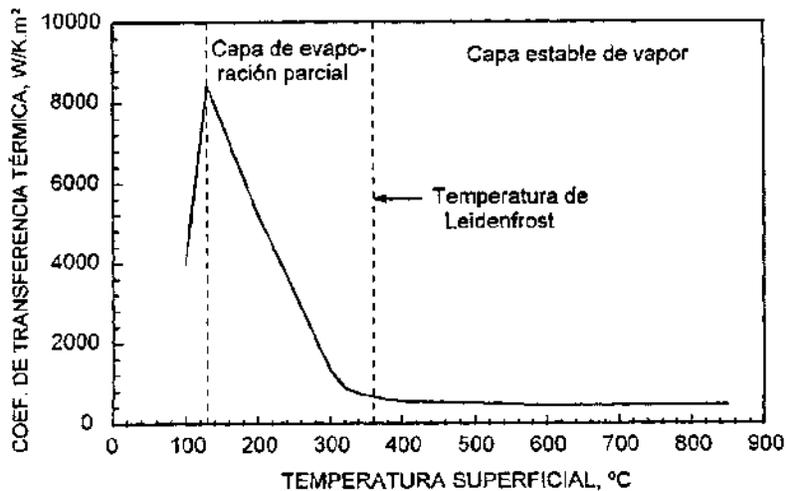


Figura 2.8. Influencia de la temperatura superficial en el coeficiente de convección acero-agua.

Si bien el empleo de aire en combinación con agua es una vieja idea para mejorar las condiciones de enfriamiento, las primeras experiencias industriales aplicables a la colada continua comenzaron alrededor de 1974. El aire a presión inyectado en los rociadores provoca la atomización de las gotas de agua, modificando el perfil de distribución de agua bajo los picos y disminuyendo la posibilidad de bloqueo de los mismos. Además, la presencia de aire a presión permite barrer el agua acumulada entre rodillos y línea. Esto trae como consecuencia una distribución más uniforme de la temperatura superficial del producto y mejoras en la calidad superficial. Se han observado que, a igual caudal específico de agua, el

empleo de enfriamiento aire-agua aumenta la eficiencia en la extracción de calor con respecto al sistema convencional.

2.9.4. Extracción de calor por agua acumulada entre rodillos

Debido a que sólo una parte del agua impulsada por los rociadores se evapora al entrar en contacto con el acero, el resto escurre y se acumula, parcialmente, entre los rodillos y la superficie del producto. La cantidad de calor eliminada por este mecanismo es de difícil evaluación. En la *Tabla 2.7* se presentan valores estimativos del flujo de calor extraído por acción conjunta del agua acumulada y del contacto rodillos-acero.

Tabla 2.7. Calor extraído por el contacto de los rodillos y el agua acumulada.

Caudal específico de agua, L/m ² -s	Calor extraído, kW/m ²
< 1	90
1 - 5	100
> 5	125

2.10. Transferencia de calor en el enfriamiento secundario

La extracción de calor en el enfriamiento secundario tiene más efectividad en el centro de la región de impacto de las gotas generadas por las boquillas de niebla (ver *Fig. 2.9*), pues aquí se ha demostrado tener una mayor velocidad en las gotas de agua, suficiente como para penetrar la capa de vapor generada en la superficie caliente. También, se desarrollan condiciones de flujo irregulares dentro del límite de la capa de vapor, pues se registra una capa inestable que puede volverse ondulada y de espesores diferentes. Los tiempos cortos de contacto entre las gotas de spray que salen de las boquillas y el planchón incrementan con la el aumento de velocidad de las gotas, debido al momentum del agua. Por lo tanto, la transferencia de calor en el enfriamiento secundario aumenta en gran medida con el caudal de agua pulverizada y la velocidad con la que impacta la superficie caliente.

A medida que la superficie del metal se enfría, la capa de vapor se rompe y la película de agua comienza a hacer contacto con la superficie del planchón. El área de contacto aumenta al disminuir la temperatura de la superficie, y viene acompañado de un repentino aumento de la transferencia de calor. Este proceso de enfriamiento es difícil de controlar. Este proceso de extracción de calor es complejo pues tanto para el agua a través de nieblas, así como las condiciones de enfriamiento de la película, son gobernados por el fenómeno de la ebullición del agua, en donde depende en gran medida de la temperatura.

2.10.1. Ebullición en transición entre las temperaturas de agotamiento y Leidenfrost

Debajo del punto de agotamiento, las burbujas de agua comienzan a adherirse en la superficie del metal y se comienza a formar una capa de vapor, la cual impide la circulación del calor. El coeficiente de transferencia de calor se reduce con el incremento de la temperatura, mientras la película de vapor continúa cubriendo la superficie del metal. Cuando la superficie del metal está completamente cubierta por una película de vapor estable, el coeficiente de transferencia de calor asociado con la curva de ebullición alcanza un mínimo, el cual se refiere al punto de Leidenfrost. La temperatura de Leidenfrost puede variar, yendo desde los 200 °C hasta los 1000 °C.

2.10.2. Ebullición nucleada entre 100°C el punto de agotamiento

Cuando la temperatura de la superficie aumenta, burbujas de vapor de agua se forman en la superficie del metal, rompen, y fluyen en la película de agua, donde después de un tiempo, su trayectoria continúa hasta que deja de hacer contacto. La intensidad de la formación de las burbujas y su rompimiento incrementa cuando la temperatura de la superficie se eleva. Este efecto fomenta la buena circulación en la película de agua, causando un incremento en el coeficiente de transferencia de calor hasta alcanzar un máximo [31]. La temperatura de agotamiento ronda entre los 500 °C y 700 °C.

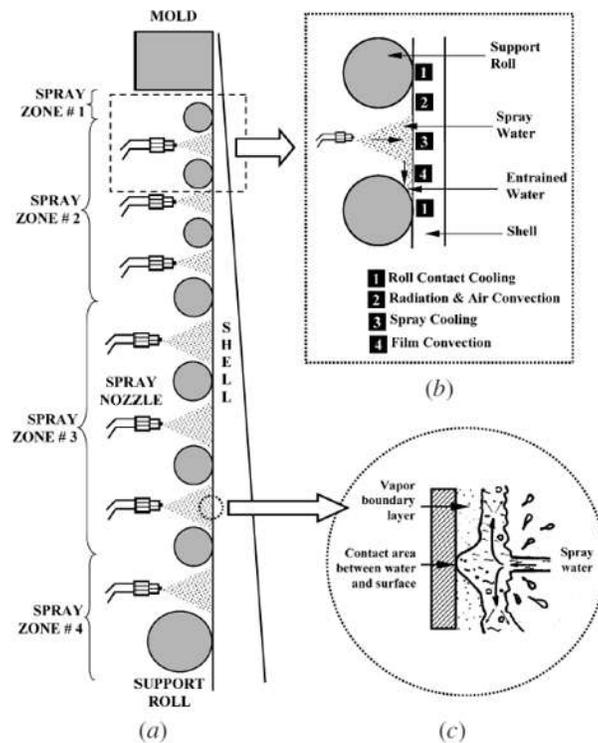


Figura 2.9. Región de impacto de chorro de agua. a) Arreglo típico de boquillas de enfriamiento, b) Esquema de las zonas principales, c) Detalles del proceso de enfriamiento.

2.10.3. Ebullición de película a altas temperaturas

A temperaturas por encima del punto de Leidenfrost, el calor se transfiere por conducción a través de la película de vapor estable. El coeficiente de transferencia de calor no cambia mucho con la temperatura y es muy bajo en comparación con el punto de agotamiento. Debido a la fuerte correlación entre el coeficiente de transferencia de calor y la temperatura de la superficie, las tasas de extracción de calor por el enfriamiento secundario pueden cambiar rápidamente con el tiempo y la ubicación cerca de la temperatura de Leidenfrost. Altas tasas de transferencia de calor asociadas con la ebullición nucleada pueden hacer que la temperatura de la superficie disminuya rápidamente. En contraste, las bajas tasas de transferencia de calor asociadas con la ebullición de la película pueden permitir que la temperatura de la superficie aumente. Como resultado, los cambios bruscos en la temperatura de la superficie del metal pueden ocurrir a medida que los fenómenos de ebullición se desplazan de la nucleación a la ebullición de la película y viceversa, dependiendo de si la temperatura de Leidenfrost es superada. Además, las variaciones extremas de enfriamiento pueden ocurrir simultáneamente en diferentes lugares en la superficie del metal, dependiendo del comportamiento de ebullición local.

Para optimizar el enfriamiento secundario, la tasa de transferencia de calor de la superficie del metal debe producir una temperatura de superficie estable que disminuye monótonamente. La ebullición de la película se promueve deliberadamente durante el proceso de enfriamiento secundario para la colada continua de acero, para evitar temperaturas superficiales inestables y tasas de extracción de calor que acompañan a la ebullición nucleada/en transición, si la temperatura de la superficie del acero desciende demasiado.

La tasa de transferencia de calor es significativamente menor dentro de la región de eyección de agua, ya que hay poco o ningún contacto de la película de agua con la superficie del lingote o planchón. El resultado es una región con un enfriamiento reducido en la parte más caliente de la superficie del lingote debajo de la zona de impacto. Los diversos mecanismos de transferencia de calor asociados con el enfriamiento secundario durante la colada continua son importantes porque determinan los gradientes de temperatura que se desarrollan dentro del lingote y su solidificación. Esto influye significativamente en el desarrollo de estrés/tensión térmica debajo del molde y pueden agravar los defectos generados en el interior del molde o introducir nuevos defectos.

2.10.4. Aportes experimentales en la transferencia de calor en enfriamiento secundario

Mudawar y Estes [32], realizan un experimento en donde se centran en el estudio de la transferencia de calor en la ebullición nucleada y el flujo de calor crítico que se presenta en las boquillas de spray de agua. Los efectos de la boquilla, flujo volumétrico, subenfriamiento y el fluido de trabajo son los temas que desarrollan a través de la investigación. Como resultados obtienen que, los sprays con un flujo volumétrico alto, demuestran un incremento pequeño en la pendiente de la curva de ebullición entre los regímenes de ebullición monofásica y la nucleada, debido a una supresión de la nucleación y una reducción a la eficiencia del vapor. Los bajos flujos volumétricos en las boquillas de spray, por otro lado,

muestran un aumento pronunciado en la pendiente de la curva de ebullición debido a una mayor eficiencia de evaporación. También, el flujo de calor crítico incrementa con el aumento del caudal y el aumento del subenfriamiento.

Holl y colaboradores [33], realizan un modelo matemático para calcular el enfriamiento en colada continua. Parten del problema de Stefan y utilizan las condiciones de frontera térmicas como variables de control para tratarlo. El objetivo del trabajo se centra en lograr altas tasas de enfriamiento sin que el centro de la pieza se agriete. En los resultados de la experimentación, obtienen valores de deformación, en donde el valor más alto obtenido para este método de enfriamiento, sigue estando por debajo del valor crítico.

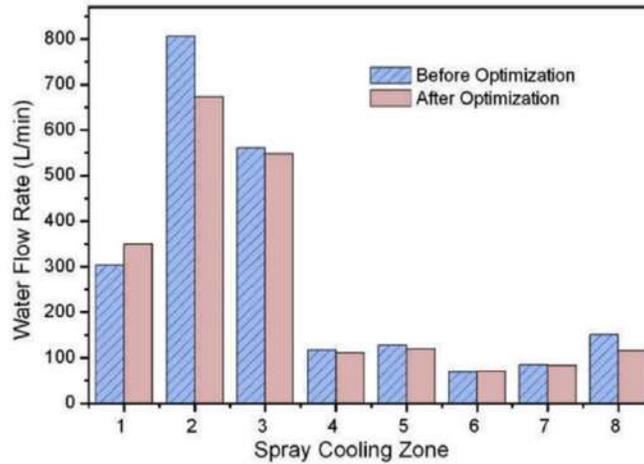
Ji y yang [34], desarrollan un sistema de control para el enfriamiento secundario dinámico en la colada continua. El propósito de la investigación es mantener constante la temperatura de la superficie del planchón o lingote independientemente de los cambios de velocidad en la colada del acero. Para predecir con precisión y controlar la temperatura en tiempo real durante la colada continua, un modelo de solidificación transitoria rápida y precisa es desarrollado, funcionando como un “sensor de software”, el cual permite proporcionar una retroalimentación a un sistema de control. Como resultado obtienen un novedoso algoritmo de modelado capaz de actualizarse en tiempo real. El perfil de temperatura y solidificación completa en dos dimensiones se realiza a intervalos de cinco segundos durante la operación en línea. Este nuevo sistema de control mantiene la temperatura con menos variaciones que el sistema de control convencional utilizado en la mayoría de las plantas.

Wang y colaboradores [35], diseñan un programa para el enfriamiento secundario en la colada continua, basado en el diseño de los rodillos y en el principio de funcionamiento de enfriamiento secundario. Combinado con el modelo numérico de solidificación y de transferencia de calor, los resultados de la simulación realizada muestran que la temperatura de la superficie del planchón que se obtiene a partir de la tecnología de enfriamiento diseñada, es cercana a la temperatura que se fijó como objetivo, lo que verifica la viabilidad del esquema de distribución de agua de enfriamiento secundario.

Yu y colaboradores [36], desarrollan un método de optimización dinámica para establecer el valor del caudal del agua. Presentan un algoritmo iterativo, el cual no solo puede reducir el tiempo de cálculo, sino también seleccionar un tamaño de paso adecuado. Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones y experimentación, demuestran que el método utilizado ayuda a obtener una distribución de temperatura más estable.

Klimes y colaboradores [37], identifican y analizan los enfoques que permiten minimizar el consumo de agua. Se investiga computacionalmente el enfriamiento por aspersión usando agua de un solo paso y su sustitución con enfriamiento en seco junto con rodillos refrigerados internamente por medio de agua de circuito cerrado. Un modelo 3D de transferencia de calor y solidificación para colada continua se utilizó para dicho propósito. Como resultados obtienen un consumo de agua menor que el proceso normal, cerca de un 48 % de ahorro sobre los valores nominales.

Tabla 2.8. Comparación del rango de flujo de agua antes y después de la optimización [38].



Raudensky y colaboradores [39], realizan pruebas experimentales para observar el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor, en donde analizan boquillas de agua y de aspersión de niebla. Como resultados de las mediciones en la experimentación, se confirma que las ecuaciones basadas solamente en los parámetros de la densidad de impacto de gota no demuestran suficientes datos como para predecir el coeficiente de transferencia de calor. Los ajustes de presión que se realizaron para el caudal proporcionaron una gran diferencia en las mediciones realizadas (ver Fig 2.10 y 2.11). Diferencias en las presiones de impacto de gotas producen un gran cambio en el coeficiente de transferencia de calor, pues un aumento de presión sobre la gota, significa un aumento en el valor del coeficiente.

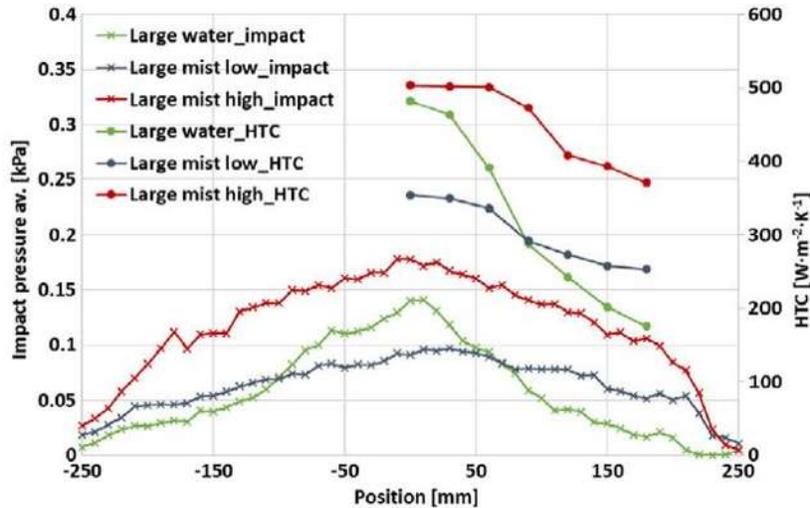


Figura 2.10. Presión de impacto medido y coeficiente de transferencia de calor con un flujo de agua de 6 L min^{-1} .

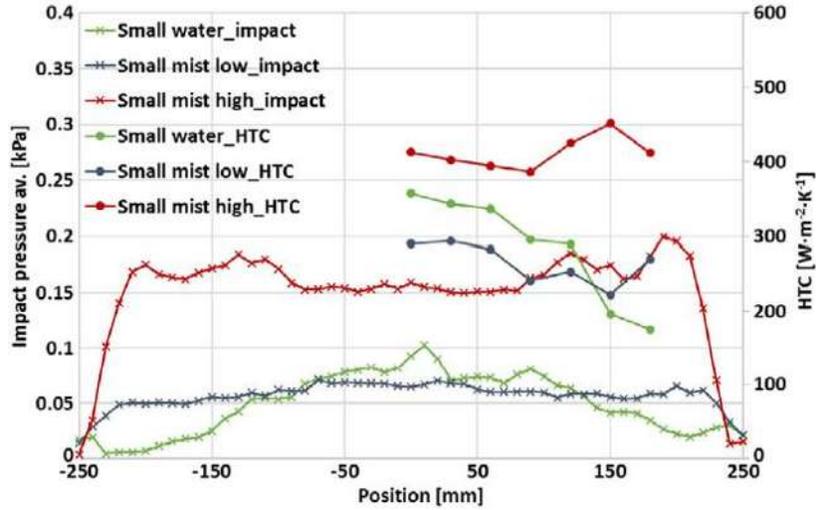


Figura 2.11. Presión de impacto medido y coeficiente de transferencia de calor con un flujo de agua de 11 L min^{-1} .

Se puede comprobar que el coeficiente de transferencia de calor es más sensible al cambio de presión de impacto de gota, que al cambio de densidad de impacto del agua (ver Fig.2.12 y 2.13). La densidad de impacto del agua no puede usarse como un único parámetro para estimar el coeficiente de transferencia de calor. La presión de impacto tiende a generar mayor información sobre la transferencia de calor que la densidad de impacto del agua. En cambio, si existe una correlación de estos dos parámetros, los datos obtenidos generan un resultado más concreto y verídico sobre el comportamiento de la tasa de transferencia de calor.

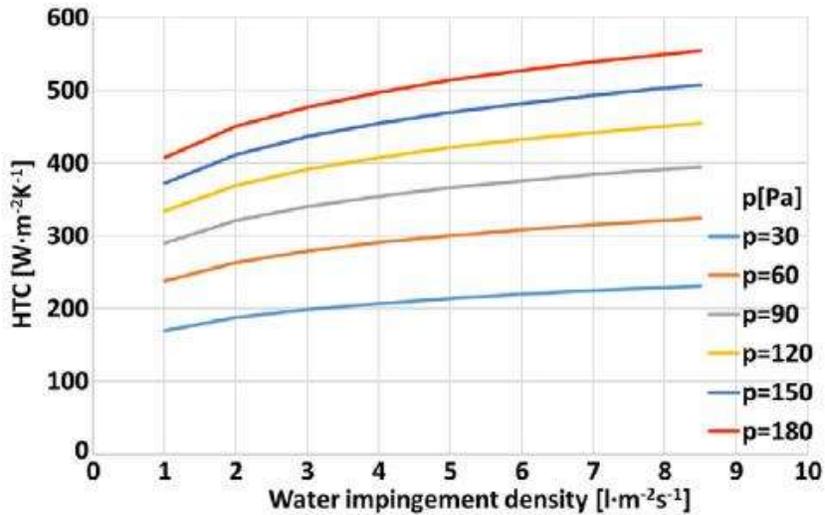


Figura 2.12. Coeficiente de transferencia de calor en función de la densidad de impacto de agua.

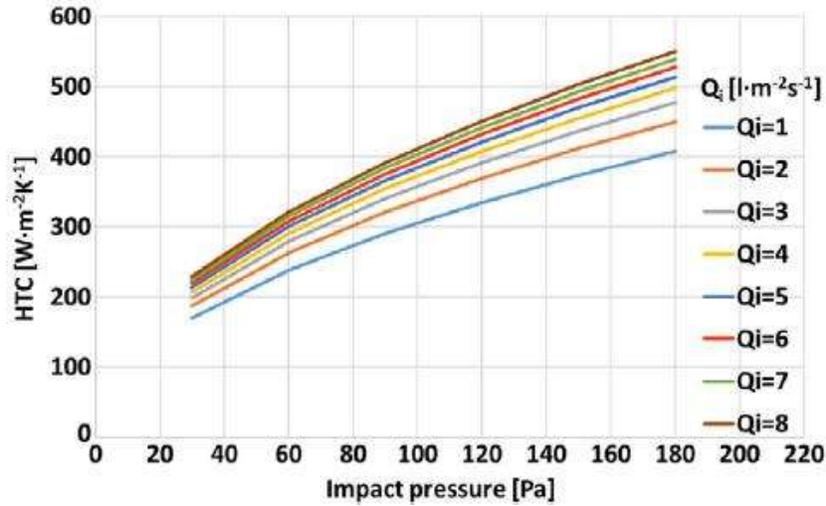


Figura 2.13. Coeficiente de transferencia de calor en función de la presión de impacto.

2.11. Efecto Leidenfrost

El efecto se puede visualizar rociando gotas de agua sobre una superficie metálica a distintas temperaturas. Inicialmente, con la temperatura de la superficie por debajo de los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, el agua toma una morfología plana y se evapora lentamente. A medida que la temperatura de la superficie pasa por encima de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, las gotas de agua emiten un ruido o silbido al tocar la superficie y se evapora rápidamente. Más tarde, cuando la temperatura excede el punto de Leidenfrost, el efecto Leidenfrost entra en juego. Al contacto con la superficie metálica caliente, se forma un grupo de pequeñas gotas de agua que resbalan sobre la superficie, tardando en evaporarse más tiempo que cuando la temperatura de la superficie era menor. Este efecto sucede hasta alcanzar una temperatura mucho más alta que hace que cualquier gota de agua manifieste el efecto. Esto es debido a que a temperaturas por encima del punto Leidenfrost, la parte inferior de la gota de agua se evapora inmediatamente en contacto con la placa caliente. El vapor resultante eleva el resto de la gota de agua justo encima de la superficie, impidiendo cualquier contacto directo entre el agua líquida y la placa caliente (*ver Fig. 2.14*). Como el vapor tiene una conductividad térmica mucho menor, la transferencia de calor entre la bandeja y la gota se ralentiza considerablemente. Además, esto permite a la gota deslizarse con muy poco rozamiento sobre la capa de vapor bajo ella.

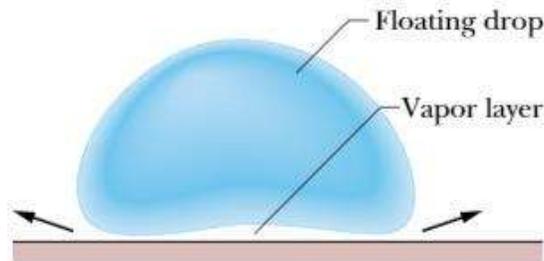


Figura 2.14. Generación de la capa de vapor debajo de una gota de agua por el efecto Leidenfrost.

La temperatura a la cual el efecto Leidenfrost comienza a ocurrir no es fácil de predecir. Incluso si el volumen de la gota de líquido permanece igual, el punto Leidenfrost puede ser bastante diferente, con una dependencia complicada en las propiedades de la superficie, así como cualesquiera impurezas en el líquido. Algunas investigaciones han llevado a cabo en un modelo teórico del sistema, pero es bastante complicado. Como un cálculo muy aproximado, el punto de Leidenfrost de una gota de agua en una superficie metálica puede ocurrir a 193 °C. Existen observaciones donde una gota de agua que se evapora casi de inmediato a 168 °C persiste durante aproximadamente 152 segundos a 202 °C. Como resultado paradójico, las temperaturas más bajas pueden evaporar el agua más rápidamente. Un enfoque alternativo es aumentar la temperatura más allá del punto Leidenfrost. El punto Leidenfrost también se puede definir como la temperatura para la cual la gota flota a través de un cierto tiempo.

La temperatura de Leidenfrost también es de suma importancia para el temple de aleaciones de metales, ya que marca una transición de transferencia de calor superior, asociado con la ebullición en transición [40]. El punto de Leidenfrost es definido como el punto donde la curva de ebullición de la capa presenta un flujo mínimo. Por debajo de esta temperatura, la superficie empapada incrementa el flujo de calor rápidamente. Incluso cuando el punto de Leidenfrost está definido, como en el caso de enfriamiento por aspersión, es difícil obtener los datos precisos a la hora de realizar pruebas experimentales. En la *Figura 2.15*, se muestra una variación en la temperatura de Leidenfrost para agua, en donde se observa el comportamiento a través de la temperatura [41]. Las discrepancias en la gráfica se dan por la diferencia en el tamaño de las gotas, masa del líquido, método de impacto de gota, propiedades térmicas del material, presión a la cual se somete la gota, tipo de material utilizado para el impacto y rugosidad de la superficie.

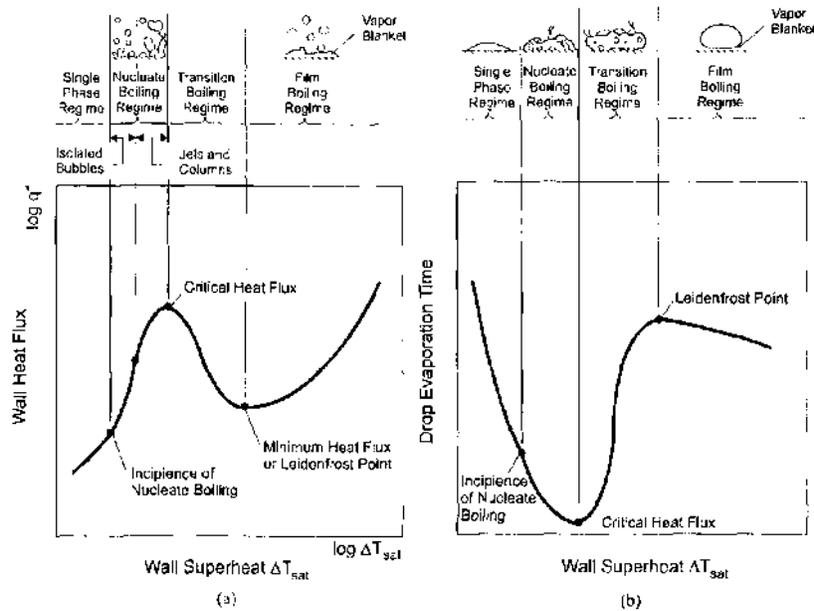


Figura 2.15. a) Curva de ebullición en una superficie caliente, b) Curva de evaporación de una gota

En la *Figura 2.16*, se muestran los resultados de una investigación en donde una superficie metálica caliente es enfriada por un chorro de agua [42]. La temperatura de la superficie muestra un cambio rápido en la tasa de enfriamiento durante 80 segundos. Al mismo tiempo, un cambio repentino en el coeficiente de transferencia de calor es observado. El régimen de ebullición de la película junto con el coeficiente de transferencia de calor, cambian a un régimen de ebullición nucleada. La temperatura de Leidenfrost es de 800°C.

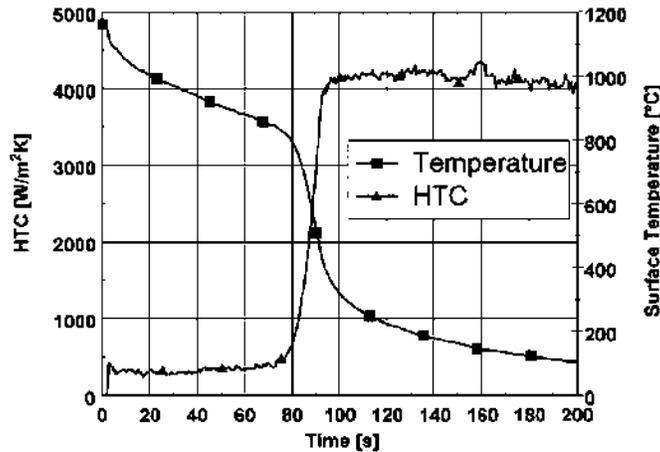


Figura 2.16. Temperatura superficial medida: cambio en los valores del coeficiente de transferencia de calor al cruzar la temperatura de Leidenfrost.

2.11.1. Aportes experimentales en el estudio del efecto de Leidenfrost en enfriamiento secundario

Bernardin [41], presenta un estudio sobre el punto de Leidenfrost, donde se centra en la evaporación de gotas de acetona, benceno, FC-72 y agua, esto con el fin de observar su comportamiento sobre distintas calidades de superficie (rugosidades), y la relación existente con las propiedades de los fluidos. Como resultados obtiene que las propiedades térmicas de la superficie actúan para controlar la interfaz, y de ahí, la temperatura de Leidenfrost. Sin embargo, aparte de las propiedades térmicas, el punto de Leidenfrost es relativamente insensible al material de la superficie, así como las energías superficiales y las características de salpicadura. También se encuentra que la rugosidad de la superficie que se sitúa por debajo de la calidad de pulido, tiende a ser un parámetro de importancia en el control del comportamiento del efecto Leidenfrost.

De nueva cuenta, Bernardin [43], realiza una investigación de la temperatura mínima requerida en la interface solida/liquida para soportar la ebullición de la película de vapor en superficies lisas. Este modelo consiste en activar un cierto número de cavidades en donde la tasa de generación de burbujas es suficientemente rápida, que se establece una capa de vapor justo entre el sólido y el líquido. Como resultados se encontró primeramente que la temperatura de Leidenfrost de una gota que impacta una superficie caliente es dependiente en gran medida de la velocidad de impacto. Los datos obtenidos en este trabajo, muestran la dependencia de esta velocidad. Como resultado subsecuente, los datos empíricos adicionales revelaron que, para superficies más rugosas, el modelo predice un límite superior de la temperatura de Leidenfrost.

Raudensky [42], describe en su trabajo un método experimental para la medición de la intensidad de enfriamiento en el enfriamiento secundario en donde se aplican las boquillas de aspersión. También presentan nuevos datos acerca de las especificaciones de la temperatura de Leidenfrost, donde se observan variaciones de interés en cuanto al comportamiento de la tasa de transferencia de calor. Una parte de gran interés en la investigación, es el análisis que realiza con boquillas en donde varía los tamaños de gotas que salen a través de las boquillas de aspersión, manteniendo constante la presión. Los resultados de esta prueba demuestran que la temperatura de Leidenfrost aumenta con el aumento de la presión.

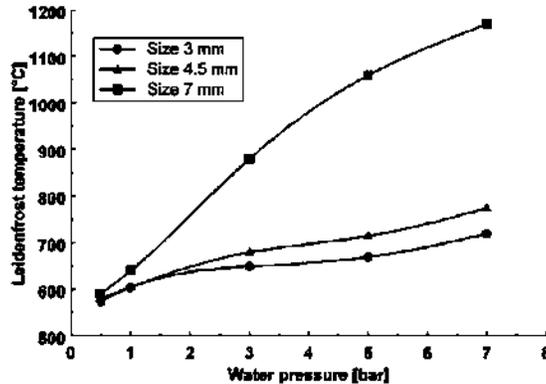


Figura 2.17. Temperatura de Leidenfrost como función de la presión del agua para tres tamaños de boquillas y presión de aire constante.

Como resultados generales de este trabajo se encuentra que la importancia de la medición real del coeficiente de transferencia de calor y la temperatura de Leidenfrost, siguen siendo valor aproximados, pues no hay un método analítico o numérico que demuestren los valores precisos para las boquillas de pulverización. Se obtuvo también que la variación en la velocidad de colada muestra que la intensidad de enfriamiento no es constante. La velocidad de colada es otra variable que se debe de considerar.

2.12. Boquillas en el enfriamiento secundario

En el proceso de colada continua, acelerando la velocidad de enfriamiento del hierro líquido y acortando el tiempo de enfriamiento, se puede mejorar la productividad de los planchones y mejorar la vida útil del equipo utilizado para colar el material [44]. Sin embargo, para evitar la reacción de tipo explosión del agua de enfriamiento, esta debe ser rociada en el caso en el que se haya formado una capa o costra de hierro fundido en la superficie del planchón. El agua de enfriamiento por pulverización directa, se pulveriza en medio de la pieza, y si el agua atomizada es demasiado frecuente, puede causar daños por fatiga térmica del material. El dispositivo de enfriamiento por pulverización reflectante es bastante adoptado por la industria. El agua se rocía uniformemente sobre la superficie del bloque de hierro, y el área de enfriamiento aumenta, después el molde y el planchón se enfrían uniformemente (Fig. 2.18).

La tecnología del enfriamiento por aspersión para superficies a altas temperaturas, juega un papel importante en la industria acerera, en donde el primer parámetro de importancia es la temperatura de la superficie, y el segundo es la densidad de impacto de agua, ya que, dependiendo de la cantidad de agua utilizada, se puede acelerar el proceso de enfriamiento del planchón.

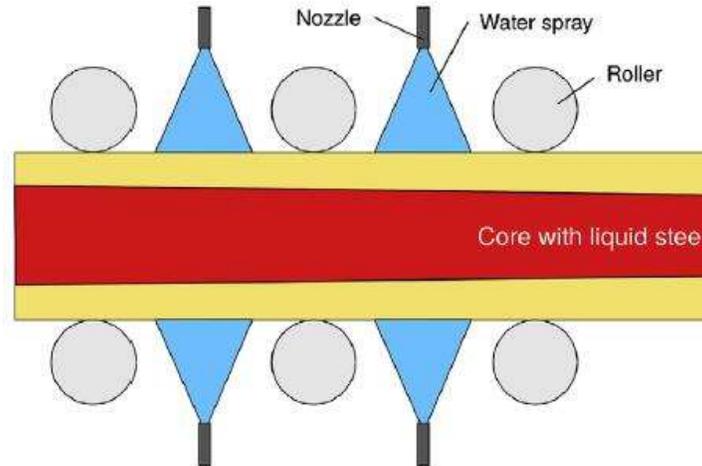


Figura 2.18. Esquema del proceso de enfriamiento por aspersión de agua.

2.12.1. Aportes experimentales de boquillas en el enfriamiento secundario

Montes y colaboradores [45], implementaron correlaciones en un modelo transitorio de calor 2-D, para investigar la influencia de las nuevas condiciones de enfriamiento sobre la temperatura de la superficie y la longitud del planchón y, en su posibilidad, aumentar la velocidad de colada, es decir, la productividad. Como resultados se obtuvo, a partir de simulaciones, un aumento considerable en la velocidad de movimiento sin causar una extensión indebida en la longitud del planchón más allá del último soporte de los rodillos de la máquina. Estas predicciones se realizaron en la industria, es donde se pusieron a prueba y tuvieron un resultado positivo.

Wendelstorf y colaboradores [46], realizan pruebas experimentales para medir el coeficiente de transferencia de calor a través de un banco de pruebas automatizado, en donde se utiliza una superficie limpia (sin presencia de óxido). Se aplica un modelo simple de la región de flujo de dos fases para conocer la transferencia de calor entre la superficie caliente y las boquillas de pulverización de agua. Como resultado se tiene que, en el régimen de ebullición de la película de vapor, el coeficiente de transferencia de calor disminuye con una diferencia de temperatura cercana a 800 K. También se encontró que la precisión del coeficiente de transferencia de calor fue mejor un 11% en el régimen de ebullición de la película.

Zhang y colaboradores [47], presentan un arreglo desigual en el intervalo de boquillas en la dirección de la colada del proceso de enfriamiento secundario para la colada continua. Diseñaron y aplicaron un sistema de enfriamiento secundario optimizado para lograr un

enfriamiento uniforme, de tal manera que se evite el agrietamiento intermedio de las palanquillas. Como resultados obtienen que, a partir de esta disposición desigual, se puede ayudar a mejorar el diseño en la zona de enfriamiento secundario. La disminución de las distancias entre las zonas, ayudan a que la distribución de la tensión y temperatura de una palanquilla sean más uniformes.

Horský y Raudenský [48], realizan un método experimental para la medición de los parámetros la transferencia de calor en las boquillas de niebla utilizadas comúnmente. Estas boquillas son probadas para hacer ajustes de presión, ver la influencia de la velocidad de colada, el comportamiento en las áreas superpuestas. Estas pruebas sirven para conocer el coeficiente de transferencia de calor en la superficie del acero enfriada (Fig.2.19 a). En los resultados obtenidos con respecto a la velocidad de colada, indican que la intensidad de enfriamiento no es constante (Fig.2.19 b). La velocidad del movimiento de la superficie enfriada es otra variable que se debe de usar cuando la colada continua es modelada para propósitos de algún diseño o de control.

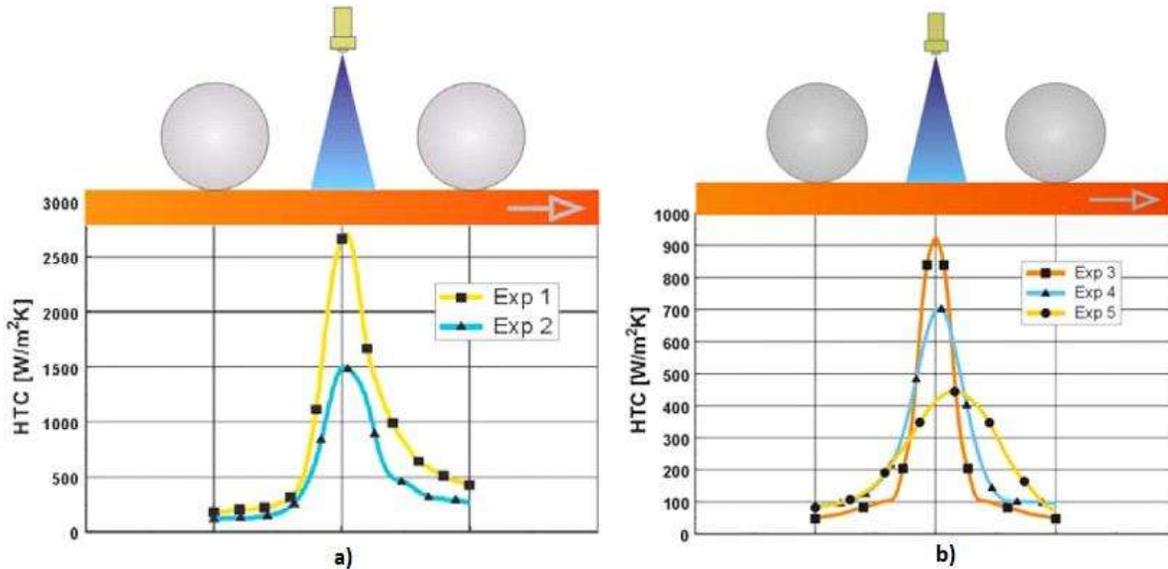


Figura 2.19. a) Coeficiente de transferencia de calor con dos boquillas idénticas, con diferentes tamaños de gota y velocidades, b) Influencia de la velocidad de colada en la transferencia de calor. Exp. 3 es estacionario, Exp. 4 es para 2 m/min, y Exp. 5 para 5 m/min.

Zhang y colaboradores [49], explican una estrategia de control de enfriamiento por aspersión dinámica de circuito abierto. Esta estrategia de control se aplica a una máquina de colada continua, donde parten dividiendo un planchón en secciones pequeñas de una determinada longitud, donde establecen como punto de control, la zona media de cada sección. Esta estrategia de control dinámico resultó ser de ayuda para mejorar las fluctuaciones de temperatura en la superficie del planchón, cuando la velocidad y el recalentamiento cambian bruscamente. También, la estrategia puede ayudar a reducir la necesidad de computadoras de

alto rendimiento o altos niveles de precisión y confiabilidad en las mediciones de temperatura.

Zhang y colaboradores [50], realizan un experimento para investigar las características de transferencia de calor por pulverización con niebla de aire durante el proceso de enfriamiento secundario en la colada continua. En la investigación se utilizó un algoritmo de conducción de calor inversa para el cálculo de los flujos de calor de la superficie durante el enfriamiento del planchón. La ebullición en transición fue la característica principal de transferencia de calor en el rango de los 1100 a 800°C (ver Fig. 2.20), durante el enfriamiento secundario para la colada continua.

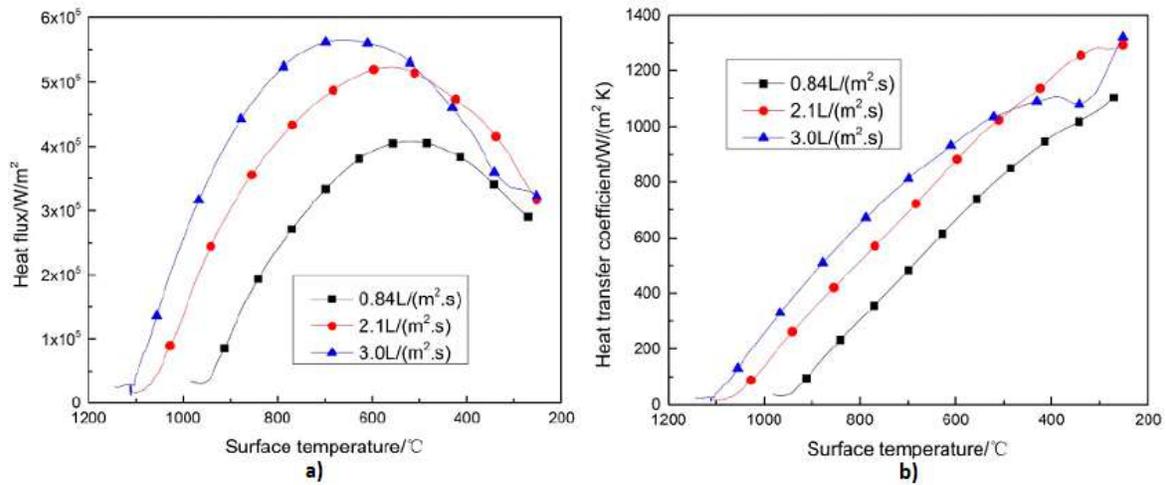


Figura 2.20. Características del calor con distinto flujo de agua para: a) Flujo de calor, b) Coeficiente de transferencia de calor.

3. Metodología

3.1 Diseño y manufactura de paredes o límites de un volumen de control

Para la investigación que se propone, es necesario mantener una temperatura constante a la hora de la experimentación, pues alguna variación puede significar errores en el análisis de resultados. Dado esto, se designa un volumen de control tal que permita construir físicamente una geometría que impida sufrir algún cambio en la temperatura en la placa o probeta.

Se plantean dos tipos de materiales para crear las paredes que funcionarán como los límites del volumen de control: vidrio y acrílico. Después de revisar pros y contras, se decidió utilizar el material acrílico para fabricar la geometría. En la *Figura 3.1* se muestra el trabajo realizado y sus dimensiones.

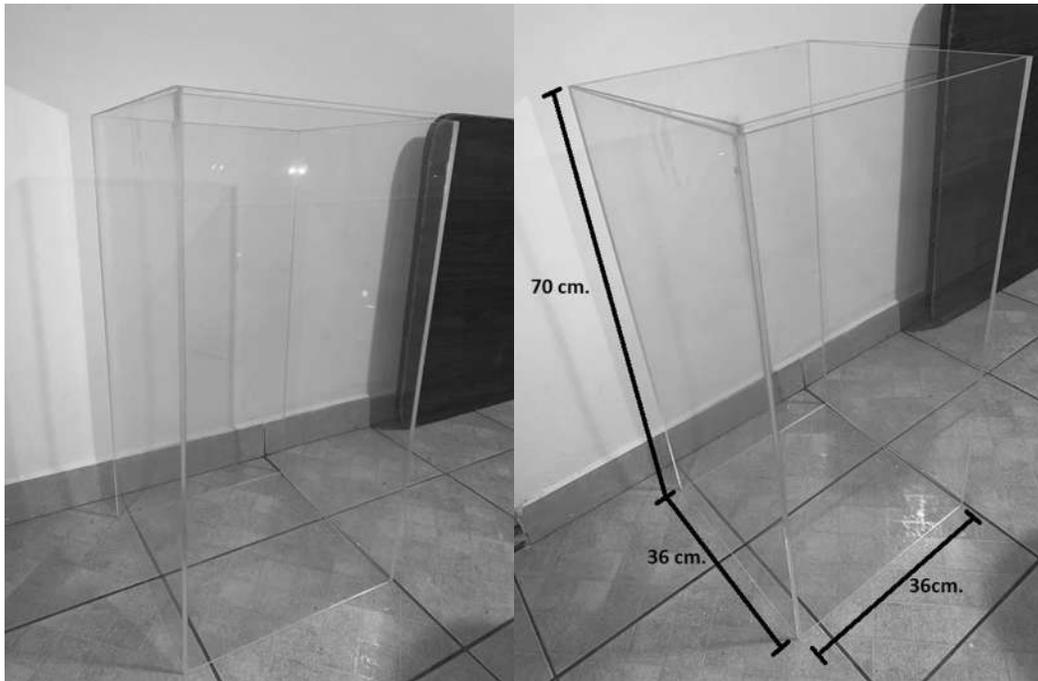


Figura 3.1. Modelo y dimensiones del acrílico.

3.2. Diseño y construcción de gotero

El gotero tiene como finalidad generar gotas que impacten de manera continua la placa o probeta, pues de esta manera se obtienen datos que permiten hacer una simulación de manera óptima. Se diseñaron dos goteros a partir de los instrumentos utilizados en el área de la salud conocidos como *normogotero* y *microgotero*. Estos dispositivos son utilizados para los pacientes que necesitan estar recibiendo suero y medicamentos de manera intravenosa durante un periodo de tiempo. Para el caso de esta investigación, se modificaron los dispositivos antes mencionados para adaptarlos a las necesidades propias del proyecto.



Figura 3.2. Goteros. a) Normogotero, b) Microgotero.

3.3. Modificación a goteros

Para realizar el gotero que nos proporcionara las gotas en un intervalo de tiempo, se tuvo que hacer una pequeña modificación o ajuste en los dispositivos tal que, permitiera controlar la caída de la gota. Para esto, se movió de posición el estrangulador que viene en el gotero, colocándolo en la parte superior de la estructura del mismo. De esta manera, se puede manipular la cantidad de gotas que caen en un periodo de tiempo.

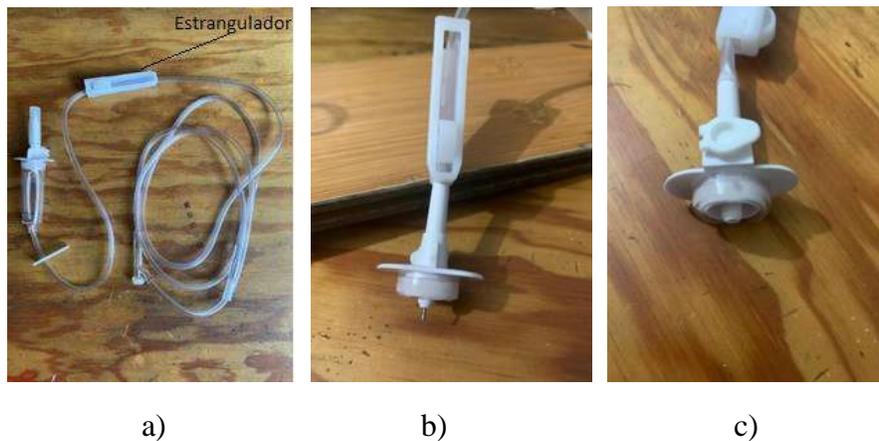


Figura 3.3. Modificación de goteros. a) Gotero normal, b) Microgotero modificado, c) Normogotero modificado.

3.4. Diseño y manufactura de placa con generación de calor interna

Para realizar el principal objetivo de esta investigación, se diseñó y construyó una placa en acero inoxidable. Dicha placa consta de una perforación que permite introducir una resistencia, la cual será la encargada de suministrar el calor.

Tabla 3.1. Especificaciones de placa de acero inoxidable.

Material	Acero inoxidable AISI 304
Largo	120 mm
Alto	25.4 mm
Ancho	50 mm
Diámetro de perforación	15 mm
Profundidad de perforación	115 mm



Figura 3.4. Placa de acero inoxidable AISI 304.

3.5. Prueba de funcionamiento de resistencia

La generación de calor al interior de la probeta experimental se logra a través de una resistencia fabricada en Kanthal A-1 calibre 18 (1.8 mm de diámetro). Dicha resistencia fue reutilizada, pues ésta fue diseñada y manufacturada para otra investigación [51].



Figura 3.5. Resistencia hecha de alambre kanthal A-1, calibre 18.

El alambre de Kanthal A-1, con una longitud de 125 mm y un valor de 1.5 ohms, calienta directamente por radiación la funda de acero inoxidable, en el centro de la resistencia se colocan anillos cerámicos de 7 mm de diámetro exterior, que sirven como aislante eléctrico (evitando que las espiras toquen al acero y se produzca un corto circuito). Si la resistencia eléctrica de Kanthal A-1 toca el acero se reducirá el valor de la resistencia y será muy difícil lograr el calentamiento de la probeta hasta 800°C. La probeta experimental con generación de calor necesita ser alimentado con una corriente de 17 Amperes por medio de una fuente de potencia de 433 Watts.

Tabla 3.2. Especificaciones del alambre tipo Kanthal.

Kanthal A-1	
Composición nominal	
% Cr	22
% Al	5.8
% Fe	72.2
Máxima temperatura de operación continua (°C)	1400
Temperatura de fusión (°C)	1600

La prueba de la resistencia se realizó en un principio durante unos segundos (15 seg.), esto con la finalidad de conocer si tenía algún defecto o fractura en su estructura. Después, las pruebas se realizaron durante 1 minuto, 1 minuto con 30 segundos como máximo ya que se estuvo suministrando un amperaje de 40 A, siendo este una cantidad que sobrepasa al recomendado (17 A). Todas las pruebas fueron hechas bajo un voltaje de 120 V.

Los resultados fueron satisfactorios, ya que durante las pruebas se registraron temperaturas de trabajo optimas, que oscilan entre los 900°C y los 1000°C.



Figura 3.6. Prueba de calentamiento de resistencia.

3.6. Experimentación, primera parte: pruebas isotérmicas

Como primera parte de la experimentación, se realizaron pruebas de impacto de gotas en la placa de manera isotérmica. Estas pruebas son de utilidad pues permiten cerciorarnos de que el banco experimental es óptimo para trabajar. Algunas de estas pruebas se enlistan a continuación:

- Funcionamiento de microgotero.
- Funcionamiento de normogotero.
- Medición de tamaño de gota.
- Pruebas de impacto de gotas.



Figura 3.7. Banco de pruebas.

3.6.1. Tamaño de gota

Una parte fundamental de la investigación, es proponer un tamaño de gota con el cual se estará trabajando. En esta etapa se utilizó el tamaño de gota que proporciona el *normogotero*, siendo ésta un poco más grande en volumen que la del *microgotero*. Para saber el diámetro de gota, se utilizó una regla común y se colocó en la parte trasera del gotero, sobre su estructura misma. Como resultado se obtuvo un diámetro de 6mm, y será utilizado como parámetro en la simulación. A continuación, se muestra una imagen del tamaño de gota.

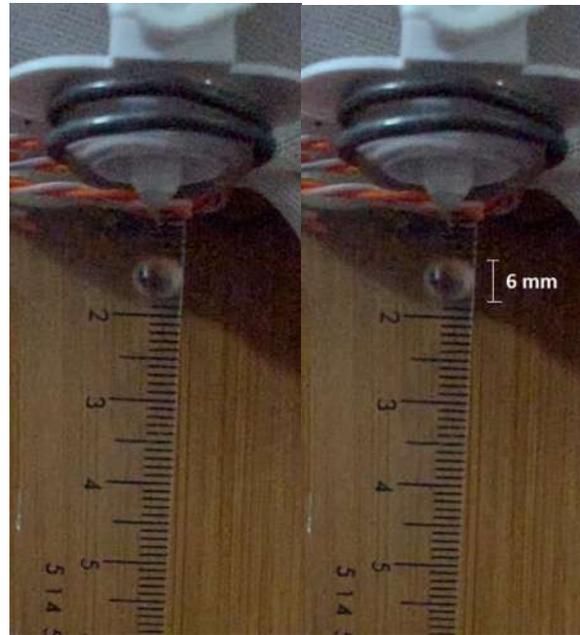


Figura 3.8. Medición de tamaño de gota.

3.6.2. Pruebas de impacto de gotas

Para finalizar la primera etapa, se trabajó en las pruebas de impacto de gotas en la placa, esto con el fin de observar el comportamiento del experimento, ya que en la siguiente etapa se estará trabajando ahora con la placa a una temperatura cercana a los 800°C, motivo por el cual fue necesario observar que se trabajara adecuadamente y sin errores. Enseguida se anexan imágenes de las pruebas de impacto de gotas en la placa.

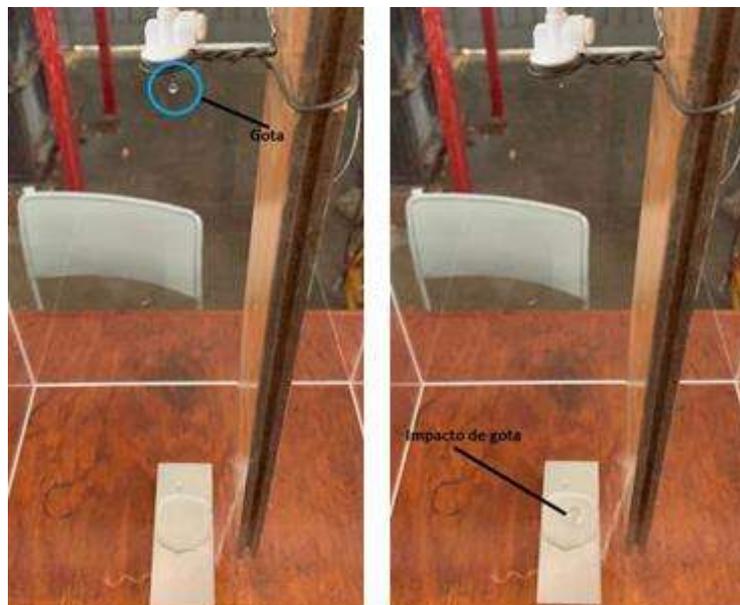


Figura 3.9. Trayectoria de la gota desde su generación, hasta su impacto.

3.7. Experimentación, segunda parte: variaciones de temperatura

En la parte complementaria de la investigación, se realizaron pruebas de impacto de gota de agua en la placa, donde, variando el amperaje que la máquina soldadora entregaba a la resistencia, se controló la temperatura que la placa emitía. A continuación, se enlistan los aspectos más importantes para la segunda etapa de la experimentación:

- Arranque de máquina soldadora
- Pruebas iniciales
- Modificación a resistencia
- Modificación a placa
- Pruebas finales
- Resultados

3.7.1. Arranque de máquina soldadora

Para calentar la placa a las temperaturas previamente seleccionadas, se utilizó una maquina soldadora como fuente de poder. El amperaje recomendado para el funcionamiento de la resistencia es de 17 A. La resistencia es la encargada de transferir el calor por radiación a la placa.

El problema inicial presentado en la máquina fue el amperaje, pues el mínimo amperaje que esta entregaba era de 26.2 A.



Figura 3.10. a) Fuente de poder, b) Corriente mínima transmitida por la fuente de poder.

Para este problema, se buscó una solución práctica y eficiente: utilizar una resistencia en paralelo en los cables de la máquina soldadora para disminuir el amperaje.

La primera resistencia utilizada fue extraída de una parrilla eléctrica (1), la cual solo redujo cerca de 4 Amperes a la corriente final, siendo descartada inmediatamente. La segunda resistencia utilizada (2) registró una corriente de 7 A, siendo aún, un amperaje elevado en la corriente final. Como tercer y última opción, se utilizó una resistencia idéntica a la usada dentro de la placa, teniendo como resultado la corriente requerida.

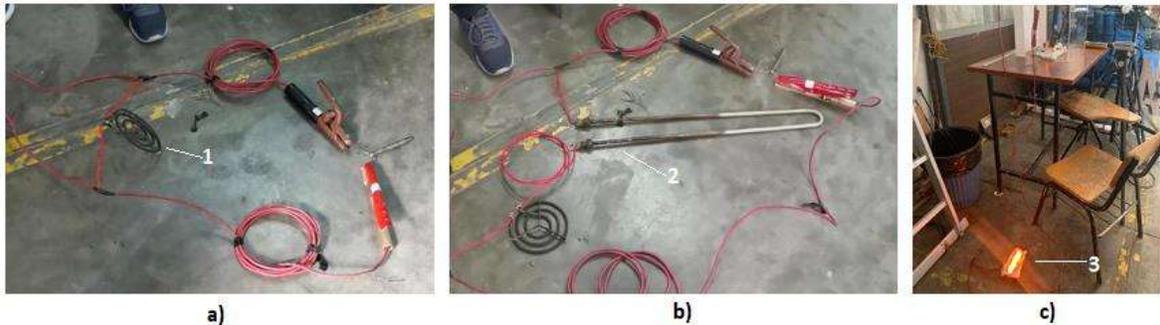


Figura 3.11. Resistencias usadas para disminuir la corriente eléctrica: a) Resistencia de parrilla eléctrica, b) Resistencia para calentar agua, c) Resistencia tipo kanthal.

3.7.2. Pruebas iniciales

Una vez solucionado el problema de la corriente entregada por la máquina para soldar, se realizaron las primeras pruebas experimentales a diferentes temperaturas.

Para guardar la información de los resultados de las pruebas, se utilizó una cámara de alta velocidad *fastcam PCI R2*, que permitió hacer grabaciones de 1000 fps y observar inicialmente el comportamiento del impacto de la gota de agua.

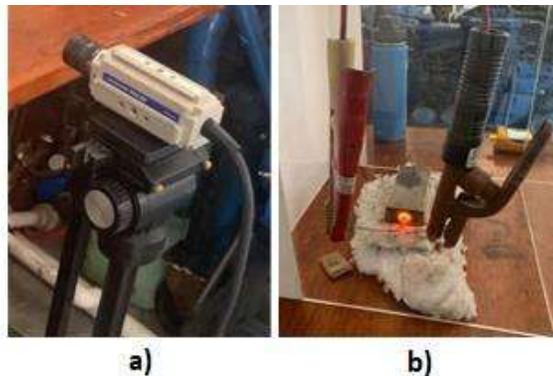


Figura 3.12. Pruebas iniciales. a) Primera grabación con cámara de alta velocidad, b) Calentamiento de placa.

Antes de realizar pruebas a diferentes temperaturas, era necesario acomodar el gotero de tal manera que, el impacto de la gota de agua fuera lo más céntrica posible a la placa, esto con la finalidad de poder tener mejores resultados al momento de grabar y revisar la secuencia de cuadros por segundo. Un ejemplo de imágenes obtenidas a través de la cámara *fastcam PCI R2* se muestra a continuación.

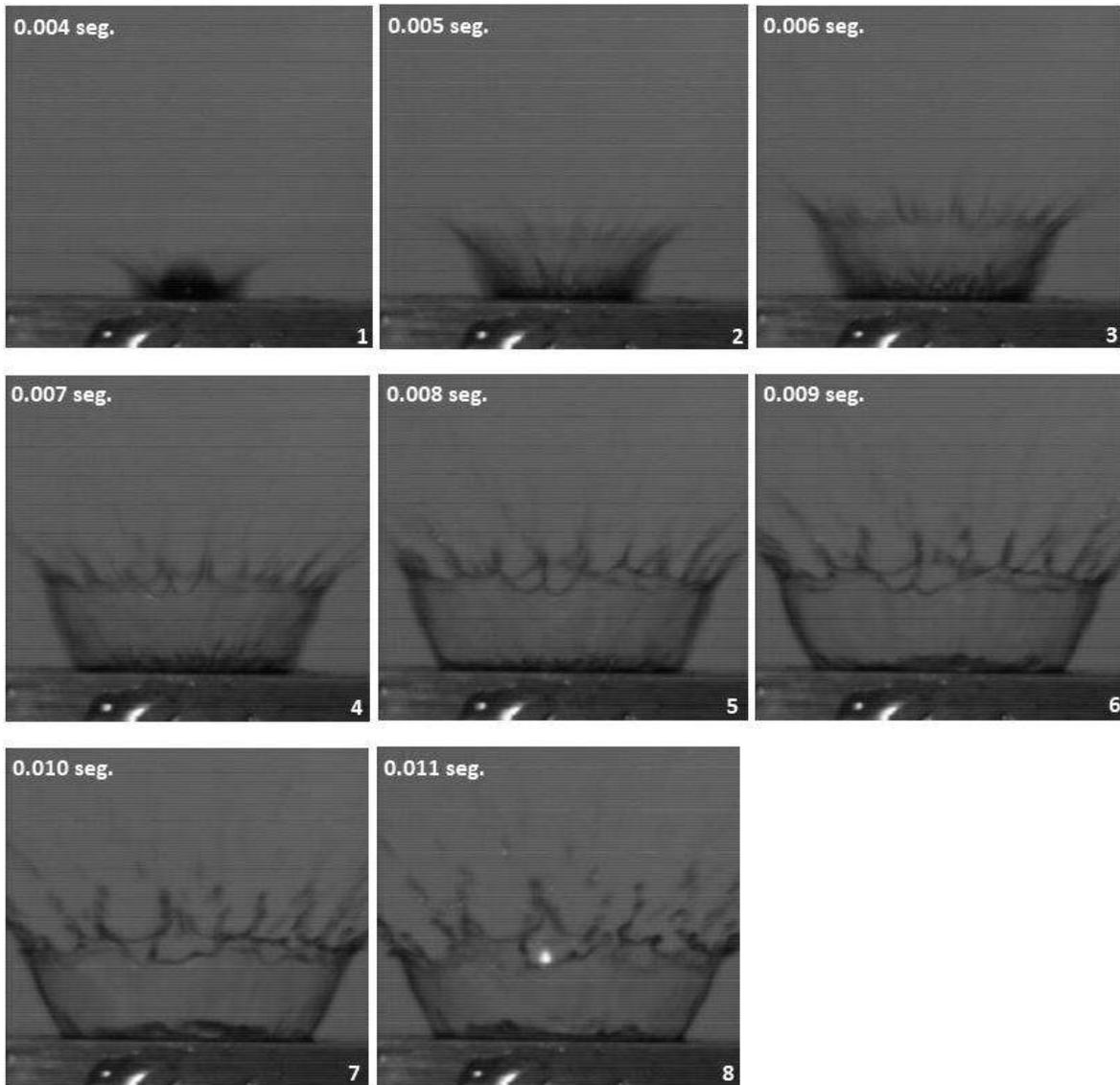


Figura 3.13. Secuencia de imágenes tomadas por la cámara fastcam PCI R2.

Debido a la gran concentración de calor en la resistencia, y a la baja tasa de transferencia de calor entre la placa y el medio ambiente, la geometría propuesta para la placa de experimentación tuvo que ser modificada, pues se registró un punto de fundición entre la resistencia y los anillos cerámicos.



Figura 3.14. Fundición de resistencia tipo kanthal.

3.7.3. Modificación a resistencia

Para evitar que sucediera de nuevo la fundición en la resistencia, se optó por cambiar su configuración física. Se removieron los anillos cerámicos que contenían axialmente uno de los extremos dentro de la resistencia y se rellenó ese espacio con lana sintética.



Figura 3.15. Imagen representativa de la configuración final de la resistencia tipo kanthal.

3.7.4. Modificación a placa experimental

Para que se pudiera utilizar la nueva configuración de la resistencia, fue necesario modificar la placa experimental. Como primera modificación, se perforó completamente la placa, así cada punta de la resistencia, sale por los extremos de la placa, evitando el punto de fundición que se presentaba anteriormente. La segunda modificación realizada fue recortar la placa experimental y así poder elevar la tasa de transferencia de calor. Las medidas de la placa modificada fueron de 25.4 mm x 25.4 mm x 120 mm.

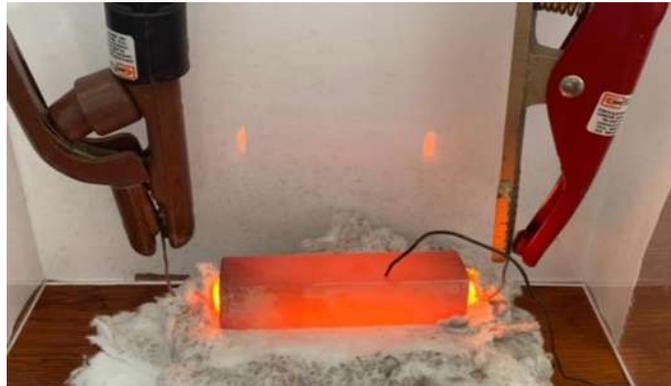


Figura 3.16. Reducción de tamaño de placa experimental.

3.7.5. Pruebas finales

Una vez resuelto los parámetros necesarios para la experimentación, se realizaron las pruebas de impacto de gota de agua en la placa a diferentes temperaturas. Para estas pruebas, se utilizó una cámara de alta velocidad *vision research phantom* modelo *miro 340*, la cual permitió tomar videos a 3000 fps, obteniendo mejores resultados a la hora de analizar las fotografías. Dado que, a mayor velocidad de captura de imágenes disminuye la luz que el obturador de la cámara recibe, se decidió utilizar un colorante para la gota de agua, pues de esta manera se pudo generar un contraste y así, poder observar satisfactoriamente la secuencia de cuadros por segundo. Asimismo, se adaptó un lente profesional marca Nikon, el cual permitió tener una imagen de mejor calidad.



Figura 3.17. Grabaciones con cámara vision research phantom.

En las primeras pruebas realizadas con el nuevo equipo y operando con una corriente de 17 A, la máxima temperatura registrada en la superficie de la placa fue de 650 °C, siendo una temperatura por debajo de la establecida como temperatura máxima de experimentación, la cual fue de 800 °C. Con esta nueva problemática, se buscaron diferentes soluciones que permitieran elevar la temperatura a los 800 °C y mantenerla constante hasta finalizar las pruebas respectivas. Para esto, se encontraron dos soluciones prácticas: La primera, calentar la placa en una mufla hasta la temperatura deseada y, consecuentemente, realizar las pruebas de impacto de gotas; la segunda, aumentar el amperaje de alimentación a la resistencia, obteniendo la temperatura deseada y así poder realizar las pruebas de impacto de gotas en la placa.

3.7.6. Pruebas de calentamiento de la placa por medio de horno refractario o mufla

Para realizar las pruebas de calentamiento de la placa, se utilizó una mufla de laboratorio de 1100 °C marca LINDBERG, la cual nos permitió elevar la temperatura de la placa hasta los 800 °C.



Figura 3.18. Mufla de laboratorio.

Al utilizar este método de calentamiento se presentaron varios problemas. El problema principal fue que, para calentar la placa hasta los 800 °C, se tomaba alrededor de 5 hrs. También se presentó que, al momento de sacar la pieza de la mufla, esta tenía un enfriamiento rápido, por lo que era necesario elevar aún más la temperatura de la placa dentro del horno refractario, teniendo como consecuencia un mayor tiempo de espera. Debido a que se tardaba demasiado tiempo en calentar y, que no se mantenía la temperatura constante lo suficiente como para realizar las pruebas, se optó por descartar esta solución.



Figura 3.19. Calentamiento de placa experimental a través de una mufia.

3.7.7. Pruebas de calentamiento de la placa por medio de resistencia tipo kanthal: modificación a corriente eléctrica

Para aumentar la corriente suministrada a la resistencia, se fue girando una manivela que la maquina soldadora tiene para hacer ajustes en el amperaje. La corriente máxima que se indujo a las resistencias fue de 20.1 A, para la primera resistencia, y 19.1 A para la segunda, la cual es la encargada de calentar la placa.



Figura 3.20. Variación de corriente por medio de la fuente de poder.

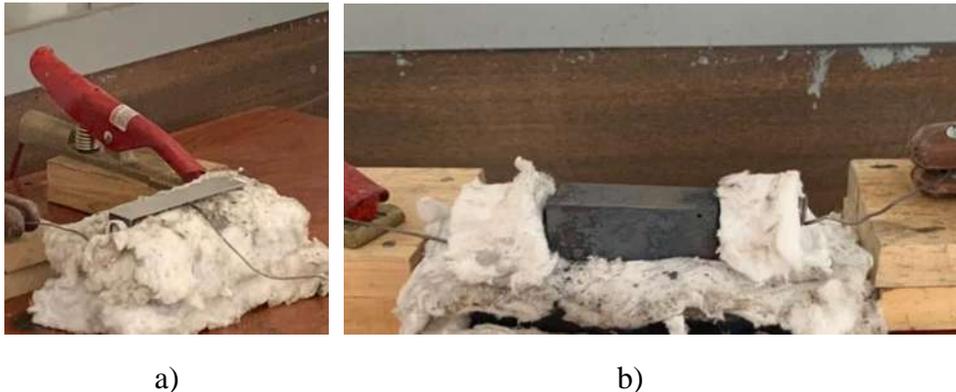
La corriente máxima que se suministró a las resistencias se basó en la temperatura máxima que esta puede soportar antes de fundirse. Se estuvo monitoreando la temperatura con un termopar tipo k, en donde se cuidó que la resistencia llegara como límite a 1100 °C. Una vez realizado el ajuste de corriente, se continuaron las pruebas de impacto de gota, en donde se alcanzó una temperatura cercana a los 780 °C en la superficie de la placa, antes de que se detectara un problema relacionado al desgaste propio del material de la resistencia. El problema se observó solamente con la resistencia que se encontraba dentro de la placa, siendo justo en los extremos de la resistencia que se encontraban aislados con lana sintética.



Figura 3.21. Desgaste de material por concentración de temperatura.

Para resolver esta situación, se decidió disminuir la corriente suministrada a las resistencias en paralelo y final, a 18.6 A y 18 A respectivamente y, optar por cubrir completamente la placa con lana sintética, de tal suerte que, la placa concentrara la máxima temperatura posible sin necesidad de llevar al límite de funcionamiento a la resistencia. Con esta modificación, fue posible alcanzar temperaturas aproximadas de 800 °C, siendo este método el elegido para realizar las pruebas finales.

Como última modificación, se redujo el tamaño de la placa para conseguir una transferencia de calor hacia la placa más rápida, y buscar concentrar una temperatura mayor a los 800 °C. Las dimensiones de la placa final fueron de 25.4 mm x 25.4 mm x 62 mm. La temperatura máxima registrada fue de 930 °C.



a)

b)

Figura 3.22. a) Primera modificación en la geometría de la placa experimental, b) Segunda y última modificación en placa experimental.

Una vez hallada la solución para el calentamiento de la placa, se hicieron diferentes pruebas de impacto de gotas a diferentes temperaturas. Las primeras pruebas se hicieron a temperatura ambiente, para observar el comportamiento de la gota al momento de impactar la placa. Después, se realizaron pruebas de impacto de gota cada 100 °C, hasta llegar a los 800 °C.

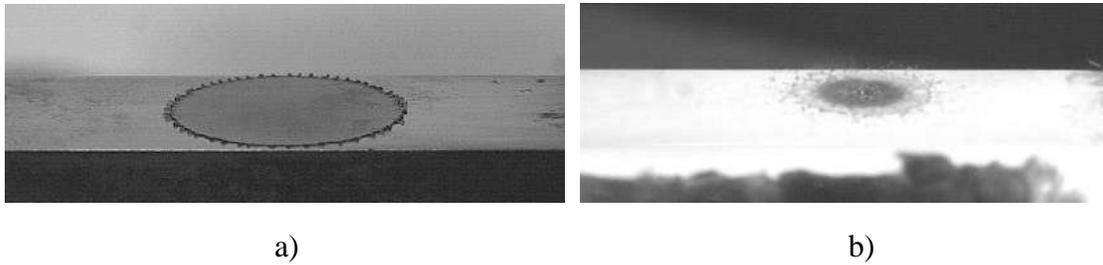


Figura 3.23. Pruebas finales. a) Imagen a temperatura ambiente, b) Imagen a 800°C.

3.7.8. Tamaños de gota

Para la investigación, se utilizaron dos tamaños de gota de agua, 5 mm y 3.5 mm de diámetro. Se decidió incluir un segundo tamaño de gota para observar cómo es que influye la transferencia de calor en función del volumen de la gota.

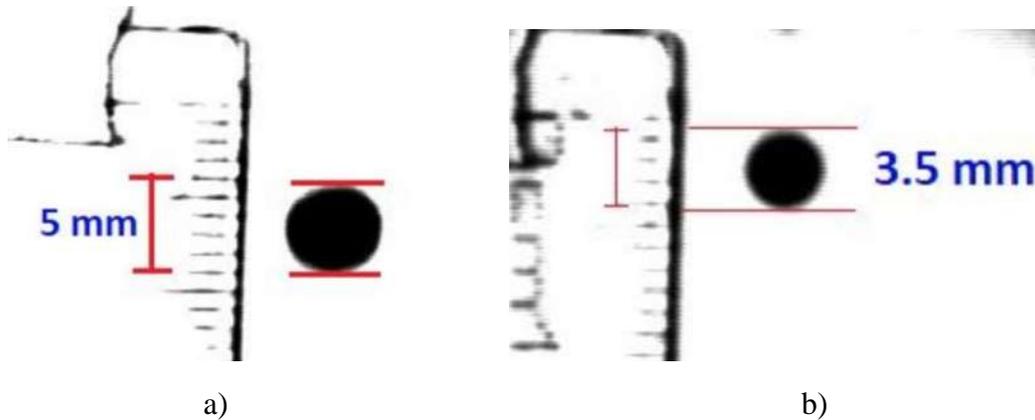


Figura 3.24. Obtención de los diámetros de gota. a) Gota generada por normogotero, b) Gota generada por microgotero.

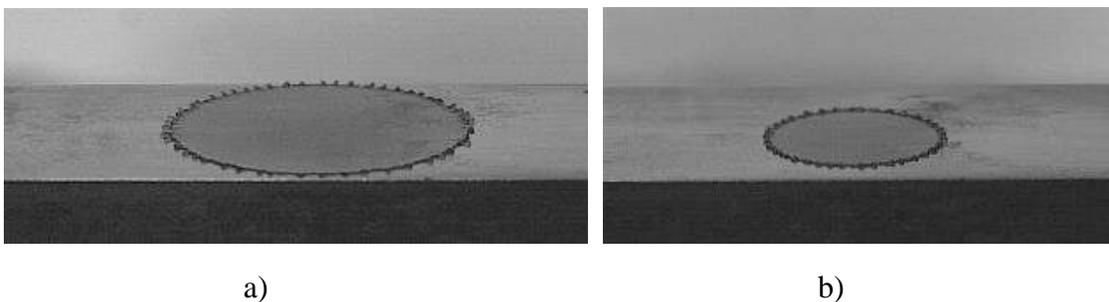


Figura 3.25. Impacto de gota en la placa experimental. a) Normogotero, b) Microgotero.

4. Resultados

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

Como primer análisis, se observa una serie de pruebas donde se muestra el impacto de gotas de un diámetro de 3.5 mm, sobre una superficie metálica caliente. La variable de interés es la temperatura, pues se observa su influencia sobre las gotas a través de su incremento (100°C – 800°C).

4.1. Visualización de gota a diferentes temperaturas

4.1.1 Temperatura ambiente o isotérmica

La experimentación partió de las pruebas isotérmicas, pues estas no necesitaban hacer uso de una fuente de poder. Se finalizó la instalación del banco experimental y se obtuvieron los primeros resultados.

El comportamiento de la gota al momento del impacto muestra un despliegue de la película de agua de manera homogénea sobre la superficie metálica, en donde hace contacto en todo momento. Este despliegue tuvo una duración de 0.03 segundos, antes de que el residuo de agua se concentrara por la acción de la presión de vacío generada por la gota. El comportamiento que se observa en la *Figura 4.1*, es la tendencia que se busca en el enfriamiento secundario, pues el despliegue observado hace contacto en todo momento con la superficie, lo que se traduce en una transferencia de calor óptima para el enfriamiento de los planchones o palanquillas en colada continua. Desafortunadamente, como se describirá más adelante, el aumento de la temperatura superficial influye directamente con el coeficiente de transferencia de calor, pues la aparición de la capa de vapor disminuye considerablemente la tasa de transferencia de calor.



Figura 4.1. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro en superficie isotérmica

4.1.2. Visualización de gota a temperatura de 100°C

Las pruebas realizadas a 100°C fueron las primeras en donde se hizo uso de la fuente de poder. La máquina de soldar fue la encargada de inducir una corriente eléctrica a una resistencia tipo kanthal, que fue utilizada para calentar la placa en donde se realizaron las pruebas de impacto de gota. Para llegar a los 100°C , se necesitó de alrededor de 25 segundos de funcionamiento de la fuente de poder. En todas las pruebas de impacto de gota en superficies calientes, se suministró una corriente de 18 A a la resistencia tipo kanthal final.

En la *Figura 4.2* se muestra el comportamiento de la gota al momento de hacer contacto con la superficie caliente a 100 °C.

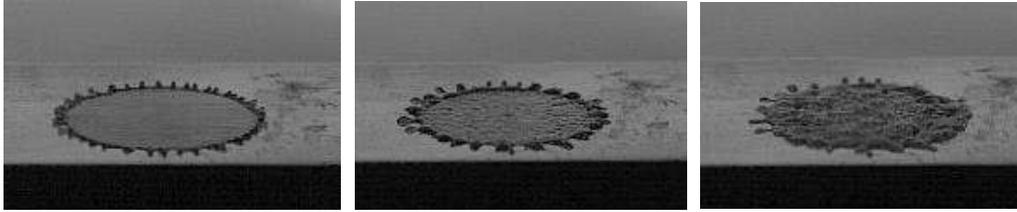


Figura 4.2. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro sobre superficie caliente a 100 °C.

Se nota claramente que, después del despliegue de la gota, ésta no se desprende de la superficie para romper y generar partículas de gotas más pequeñas. Se observa como 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 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. Finalmente se observa como la gota de agua se comienza a evaporar por nucleación en la superficie caliente. Al no existir una temperatura muy alta en comparación con la temperatura de ebullición del líquido, ésta se queda adherida y cambia de fase en su totalidad.

4.1.3. Visualización de gota a temperatura de 200 °C

La segunda prueba realizada de una gota que impacta sobre una superficie caliente, fue de 200°C. En esta ocasión, el tiempo de espera para realizar la prueba fue de alrededor de 45 segundos, pues fue el tiempo que la fuente de poder necesitó para hacer que la resistencia tipo kanthal se calentara a la temperatura indicada. Parte fundamental de la experimentación fue estar sensando la temperatura cada 5 o 10 segundos sobre la superficie de análisis por medio de un termopar. Con esto, se estuvo cerciorando que las pruebas se realizaran a la temperatura correspondiente.

En la *Figura 4.3*, se muestra el comportamiento de la gota de 3.5 mm de diámetro al momento de impactar sobre la superficie caliente a una temperatura de 200 °C.

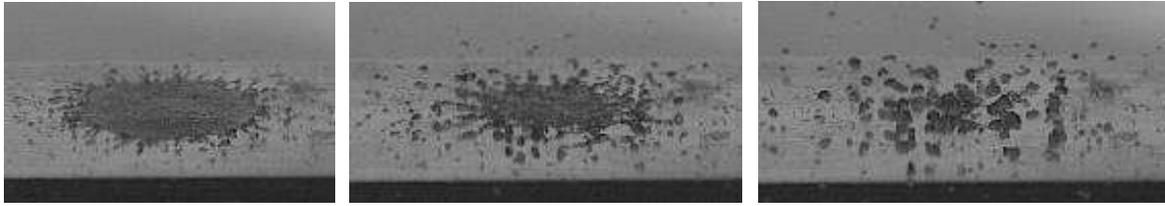


Figura 4.3. Impacto de gota de 3.5 mm de diámetro sobre superficie caliente a 200 °C.

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, si no 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.

4.1.4. Visualización de gota a temperatura de 300 °C.

Para las pruebas de impacto de gota sobre una superficie caliente a 300 °C, fue necesario calentar la placa durante 60 segundos. Este tiempo es aproximado, pues el calentamiento de la placa para llegar a una cierta temperatura varía en función de diversos factores, como, por ejemplo: temperatura ambiente, corrientes de aire o aislamiento térmico en las paredes de la pieza.

En la *Figura 4.4*, se muestra el impacto de la gota de 3.5 mm de diámetro, al momento de impactar una superficie caliente que está a 300 °C.

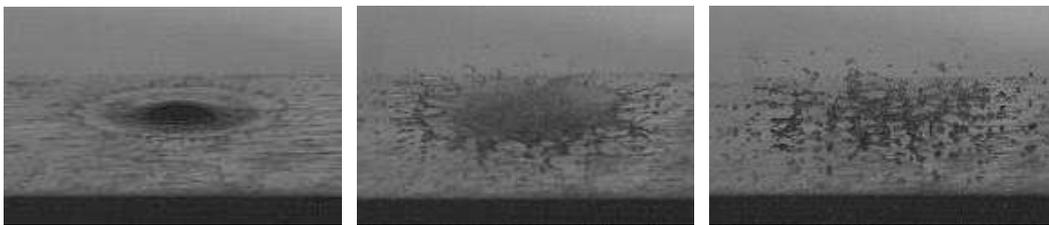


Figura 4.4. Impacto de gota de 3.5 mm de diámetro sobre superficie caliente a 300 °C.

Los resultados obtenidos muestran el comportamiento de la gota después de impactar una superficie caliente que se encuentra a 300 °C. Para esta temperatura, la capa de vapor que existe entre la superficie caliente y la gota, comienza a mostrar una tendencia estable, pues la diferencia de temperaturas cada vez es mayor y, por lo tanto, la evaporación de la gota sucede a más velocidad.

4.1.5. Visualización de gota a temperatura de 400 °C.

Para las pruebas de impacto de gota sobre una superficie caliente a 400 °C, fue necesario calentar la placa durante un tiempo aproximado de 120 segundos.

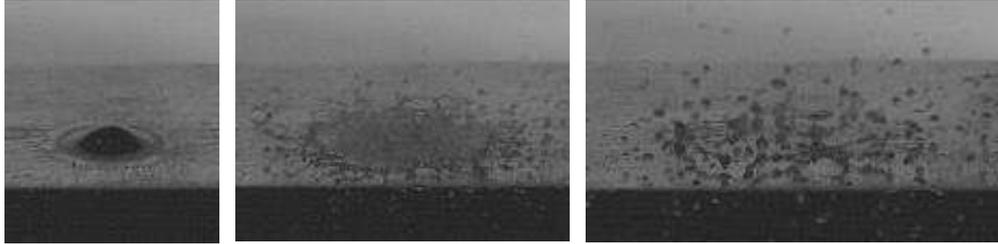


Figura 4.5. Impacto de gota de 3.5 mm de diámetro sobre superficie caliente a 400 °C.

En la *Figura 4.5*, se muestra el impacto de gota generado por un microgotero, el cual fue modificado para poder controlar el flujo de gotas en función del tiempo (*véase capítulo 3, sección 3.3*). Asimismo, se observa el comportamiento de la gota después de impactar la superficie caliente a 400 °C. Se observa que, a partir de los 300 °C, el comportamiento de la gota después de impactar la superficie caliente, presenta una tendencia similar en cuanto al despliegue, desprendimiento y movimiento de la gota. La película de vapor pasa de estar bajo un régimen en transición, a una fase estable. En esta fase, 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 gota.

4.1.6. Visualización de comportamiento de gota de 500 °C a 800 °C.

Una vez que se ha alcanzado una temperatura que permite generar una película de vapor estable, 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. Entre las variaciones que se pueden mencionar, se encuentra que la suciedad en la superficie en donde impactan las gotas produce un comportamiento distinto, pues no permite que se haga un contacto homogéneo. En la *Figura 4.6*, se observa cómo se comporta una gota que está en contacto con una superficie caliente que presenta suciedad. 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.



Figura 4.6. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro sobre superficie caliente a 500°C.

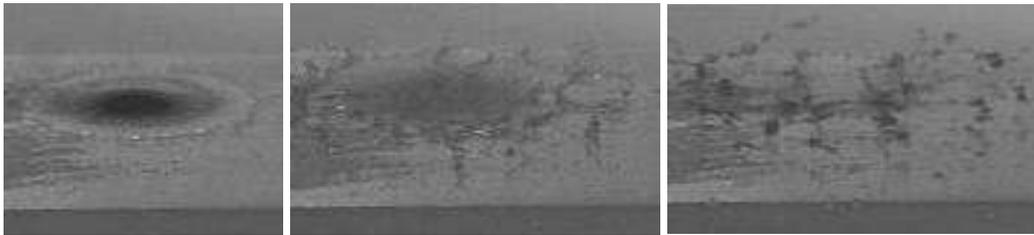


Figura 4.7. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro sobre superficie caliente a 600°C

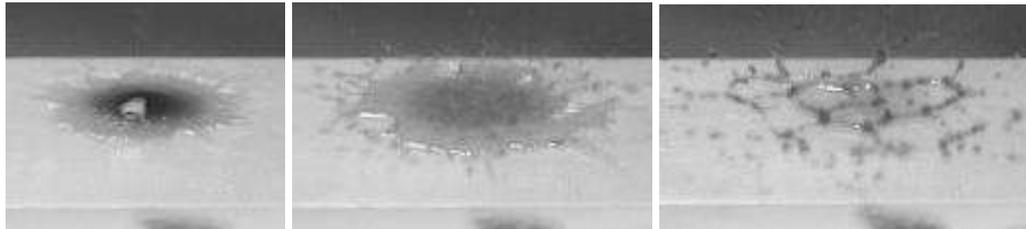


Figura 4.8. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro sobre superficie caliente a 700°C.

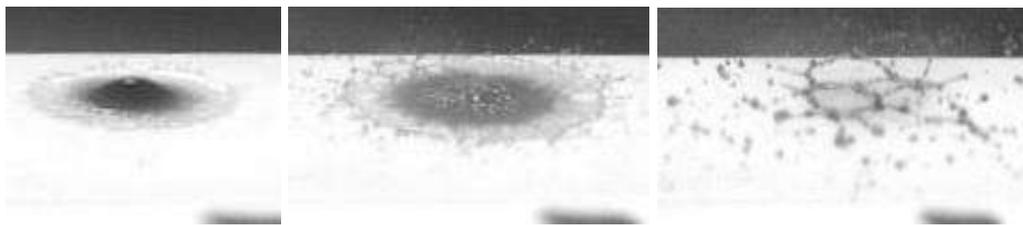


Figura 4.9. Impacto de gota de 3.5mm de diámetro sobre superficie caliente a 800°C.

También, la rugosidad superficial es de interés, pues dependiendo del acabado superficial que tenga la pieza, es posible aproximar la variación en el valor del coeficiente de transferencia de calor.

En cuanto al comportamiento general de la gota a partir de los 600 °C, se observó que la interacción entre la superficie caliente y la gota, sugiere una tendencia similar al despliegue y recorrido de las partículas de agua. Como se observa en las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9, la capa de vapor hace que la película de agua se desprenda de la superficie después de un tiempo aproximado de 5 milisegundos de haber impactado sobre la superficie metálica. También se puede observar cómo antes de salir disparadas las partículas aleatoriamente al ambiente circundante de la superficie, se generan zonas circulares donde se evapora con mayor

velocidad el agua (*Fig. 4.8 y 4.9*). Esto puede ocurrir por la inercia del despliegue de la gota, pues resulta suceder este fenómeno solo cuando existe una capa de vapor estable. Consecuentemente, se puede considerar que una vez que la superficie llega a una temperatura en específico, las irregularidades que esta presenta, pueden disminuir considerablemente el comportamiento errático de la capa de vapor, obteniendo una capa estable y, a su vez, un despliegue de mayor tamaño de gota sobre la superficie.

4.2. Diámetros máximos de despliegue

Una vez realizadas las pruebas de impacto de gotas de agua de 3.5 mm de diámetro sobre una superficie metálica caliente, se analizaron los diámetros máximos alcanzados a través de la variación de la temperatura.

Se analizaron 9 videos y se capturó el momento en donde la gota mostró el despliegue máximo de la película de agua, antes de que esta se rompiera y se dividiera en partículas de agua de menor volumen. En la *Figura 4.10* se muestra la secuencia de diámetros obtenidos a partir de una temperatura ambiente, y finalizando las pruebas con una temperatura de 800°C. Tal como lo indica la *Tabla 4.1*, se puede observar una variación considerable en los diámetros de despliegue de la gota, y nos ayuda a entender de mejor manera el fenómeno.

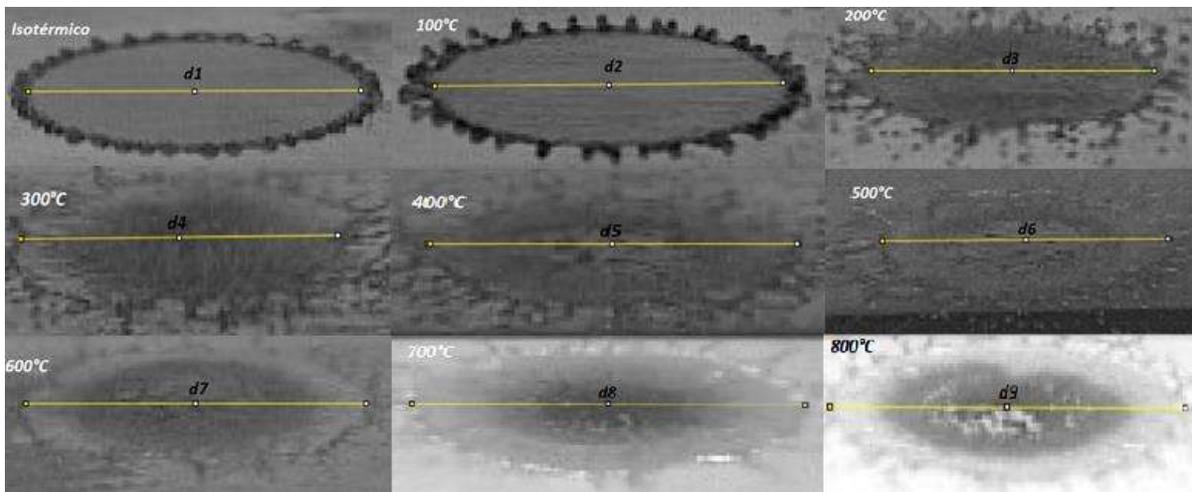


Figura 4.10. Diámetros máximos de gotas al momento de su impacto sobre una superficie caliente.

Tabla 4.1. Valores máximos de diámetros de gotas de agua en función de su temperatura.

Temperatura	Diámetro
Isotérmico	d1=25.659 mm
100°C	d2=26.840 mm
200°C	d3=23.005 mm
300°C	d4=23.771 mm
400°C	d5=21.982 mm
500°C	d6=20.619 mm
600°C	d7=25.816 mm
700°C	d8=26.968 mm
800°C	d9=26.330 mm

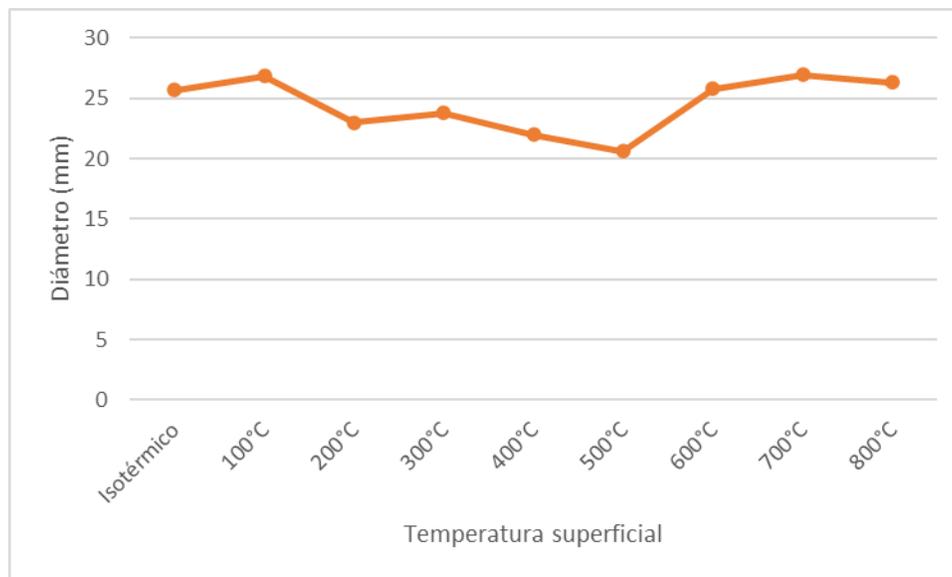


Figura 4.11. Gráfica de valores máximos de diámetros de gotas de agua que impactan una superficie metálica caliente.

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 Fig. 4.10 y 4.11). 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 d_3 hasta el d_6 (véase *Fig. 4.10* y *tabla 4.1*), 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 4.10*, los diámetros d_7 , d_8 y d_9 , 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 área de contacto, se reduce el calor que se pudiera disipar, pues el vapor evita una correcta transferencia de calor.

4.3. 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 un momento antes del impacto de la gota sobre la superficie caliente, variando la temperatura. Los resultados se recopilaron a través de un software llamado *Tracker* [52], el cual es utilizado para el análisis y modelado de videos. Este análisis se basa en el seguimiento de la trayectoria de objetos. El programa permite generar datos de posición, velocidad y aceleración de los objetos estudiados.

Para el caso de estudio, se analizaron nueve videos para un tamaño de gota de 3.5 mm de diámetro (desde temperatura isotérmica, hasta los 800 °C), y para un tamaño de gota de 5 mm de diámetro, se revisaron 10 videos (desde temperatura isotérmica, hasta los 890 °C). Los resultados de estos análisis se presentan en las *Figuras 4.12* y *4.13*, donde se engloban los resultados y se presentan en función de su diámetro. A continuación, se muestran los resultados para un tamaño de gota de 3.5 mm de diámetro.

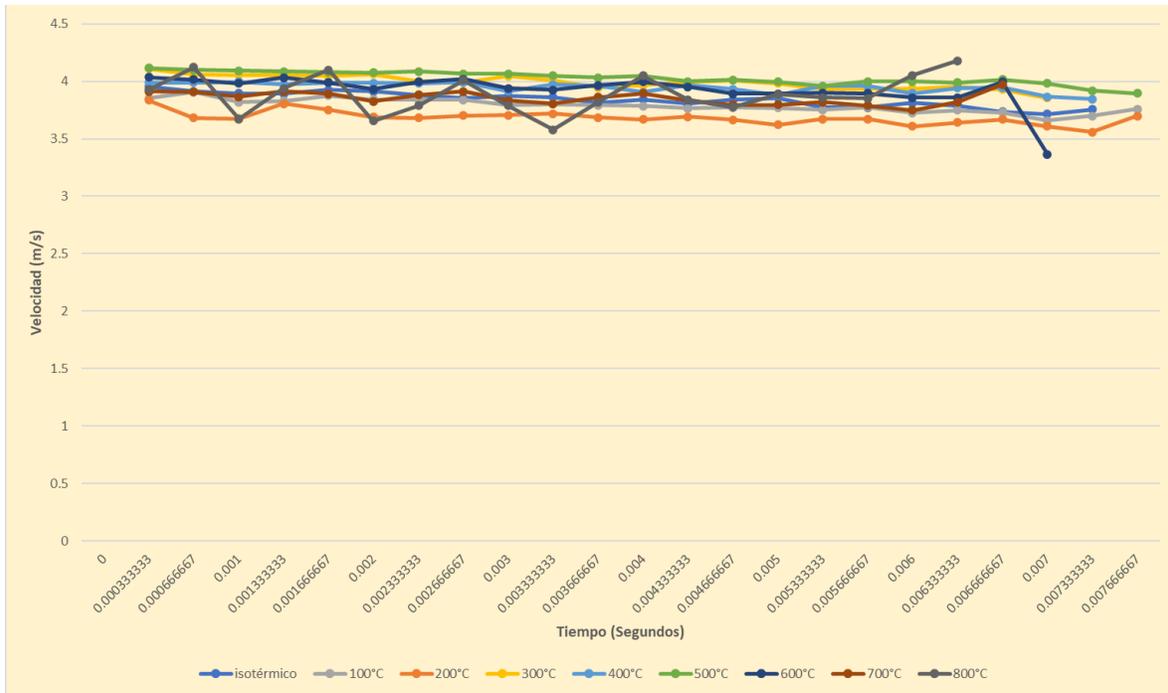


Figura 4.12. Gráfica del comportamiento de una gota de 3.5 mm de diámetro en función del tiempo.

Como se observa en la *Figura 4.12*, existe una variación en el comportamiento de la gota a través del incremento de temperatura. Las variaciones que se muestran, indican que, la gota que se encuentra cerca de impactar una superficie caliente, no sigue un aumento de velocidad en función del tiempo, ya que existe una ligera variación de su velocidad, ya sea aumento o disminución independientemente del tiempo. Esta variación o fluctuación no afecta considerablemente la trayectoria de la gota.

De igual manera, en la *Figura 4.13*, se muestra el comportamiento de la gota de 5 mm de diámetro en el umbral de impacto en una superficie caliente. Se observa que, el comportamiento sobre la trayectoria de la gota es similar a la de 3.5 mm de diámetro. Se tiene entonces, 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 (*Fig. 4.13*). 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, no entorpeció en ningún momento el propósito de esta investigación.

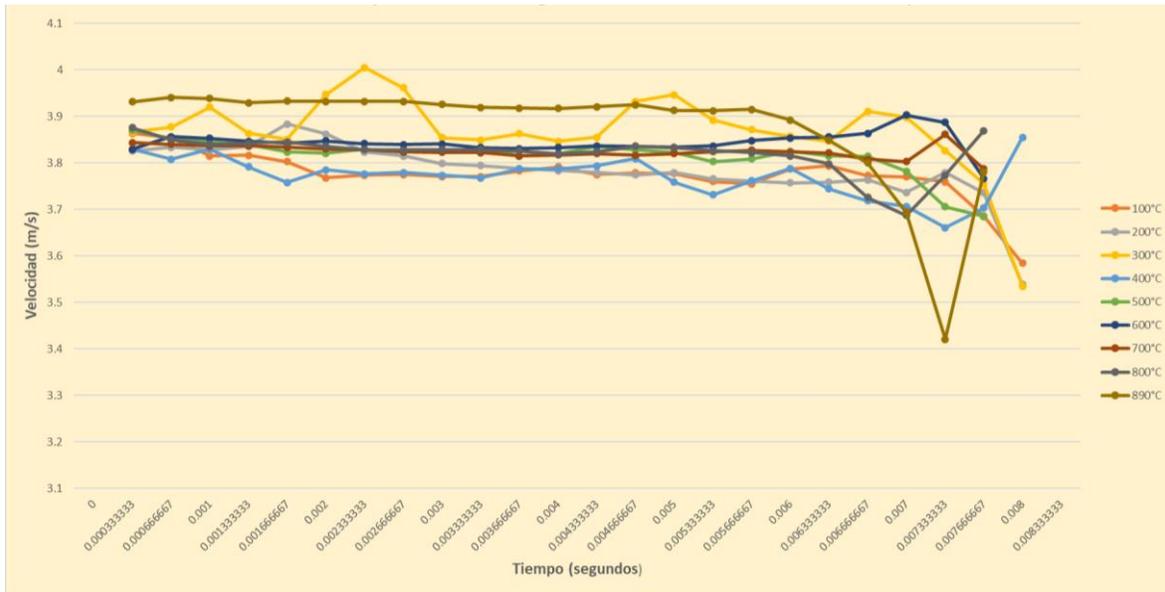


Figura 4.13. Gráfica del comportamiento de una gota de 5 mm de diámetro en función del tiempo.

Debido a un error en la adquisición de datos, la prueba isotérmica para un tamaño de gota de 5 mm de diámetro, se tuvo que descartar.

Tomando en consideración modificar la altura a la cual se realiza la adquisición de datos, es posible obtener un resultado con datos experimentales más precisos. Una prueba ideal sería tomar el valor de la velocidad de la gota desde su generación, hasta el impacto. Para obtener estos datos, es necesario contar con un equipo que permita grabar el espacio que comprende el inicio y el fin de la trayectoria de la gota, ya que solo así se podrá graficar el comportamiento general a lo largo de su caída libre, indicando si en realidad existe alguna influencia de la temperatura sobre la gota.

4.4. Comportamiento de la gota en función de la superficie de contacto.

Es bien sabido que en el comportamiento de la gota en todo su recorrido (inicia en su generación por medio de un gotero y finaliza al impactar la placa metálica), se visualiza una ligera influencia de la transferencia de calor que emite la superficie caliente (Figuras 4.12 y 4.13). La generación de calor inicia por medio de una resistencia tipo kanthal, que es alimentada por una corriente eléctrica producida en una máquina para soldar, y que llega a la placa por medio de radiación térmica. De igual manera, la transferencia de calor que se da entre la superficie caliente y el medio ambiente, es mayormente por radiación.

La **radiación** es la energía emitida por la materia en forma de *ondas electromagnéticas* (o *fotones*) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. La *radiación térmica*, es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a

su temperatura. La transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío [30].

En las pruebas realizadas en la presente investigación, se observó una variación en el comportamiento de la gota al momento de impactar la superficie caliente, pues dicha superficie presentó alteraciones y presencia de rugosidad a través de los ensayos llevados a cabo.

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

Para los casos de 200 °C y 300 °C, el comportamiento del impacto y despliegue de la gota muestra diferencias notorias en cuanto al patrón de movimiento de la película de vapor, pues en 200 °C (*ver Fig. 4.14*) se observa que la película en vez de converger en el lugar del impacto, esta se eleva, rompiendo en partículas más pequeñas, en su mayoría sobre el aire. En este caso, la capa de vapor formada debajo de la película de agua, se encuentra en la etapa inicial del efecto Leidenfrost. Esto permite que se dé el despliegue del agua, y siendo que la rugosidad es pequeña, la película se conserva y se eleva. Para el caso de los 300 °C, se tuvo que descartar la prueba debido a que esta mostraba un comportamiento irregular. Esta fue la última prueba en realizarse, y por tal motivo la superficie presentaba desprendimiento de material, lo que provocó un comportamiento que no siguió el patrón de las demás pruebas. Una posible causa sería la contaminación de la superficie metálica por medio de partículas desprendidas o suciedad.

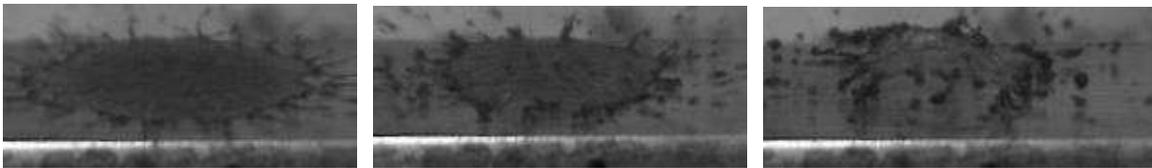


Figura 4.14. Impacto de gota de 5mm de diámetro sobre superficie pulida caliente a 200°C.

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 debida a la diferencia de presiones que se da al momento de impactar la gota, 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 (*ver Fig. 4.15*). 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, pues 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.

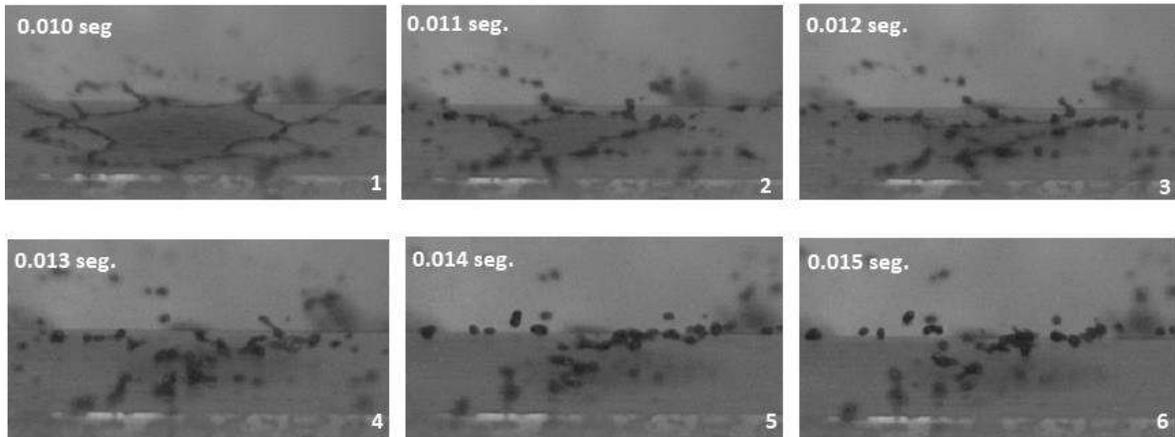


Figura 4.15. Secuencia de imágenes que presenta el comportamiento del despliegue de gotas de agua en superficies metálicas calientes a una temperatura de 500°C.

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 se observa en la *Figura 4.16*, 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 trayectoria hacia el cuadrante B. Este fenómeno es solo observado cuando la superficie metálica caliente se encuentra con una rugosidad baja, con acabado pulido.

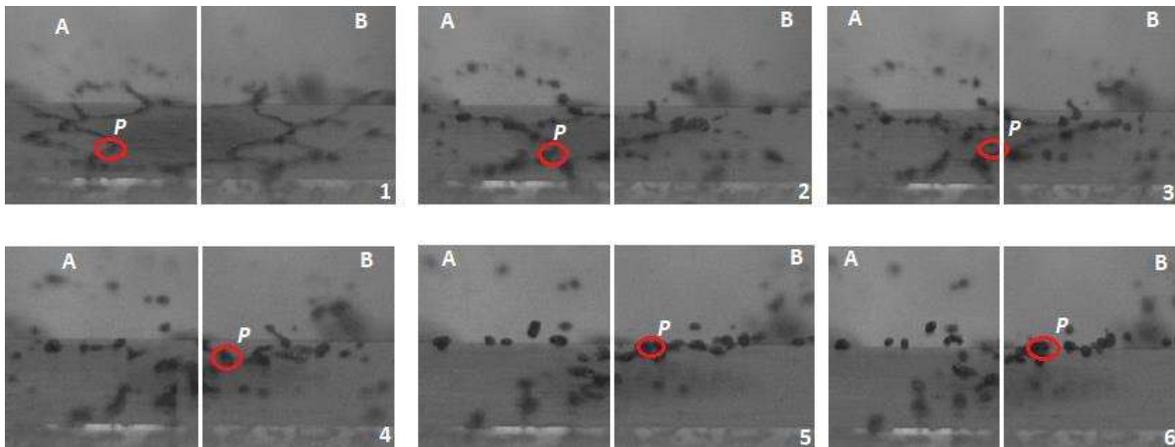


Figura 4.16. Seguimiento del recorrido de una partícula de agua.

En el caso de las temperaturas que superan los 600 °C, la capa de vapor se encuentra en la etapa estable (ver *Fig. 4.17*). Como resultado de las pruebas realizadas, se presentaron

comportamientos similares a las demás pruebas hechas con el microgotero. Una vez que se ha desarrollado por completo la capa de vapor, su estabilidad permite que la película de agua se extienda sobre la superficie caliente, independientemente de si la superficie está pulida o presenta una cierta rugosidad. Se tiene en cuenta entonces que, a temperaturas menores a 600°C , se pueden observar cambios significativos en el comportamiento de la gota de agua al impactar la superficie, siendo entonces la rugosidad una variable importante de estudio para las adaptaciones que se hagan, como es el caso del enfriamiento secundario en la colada continua.

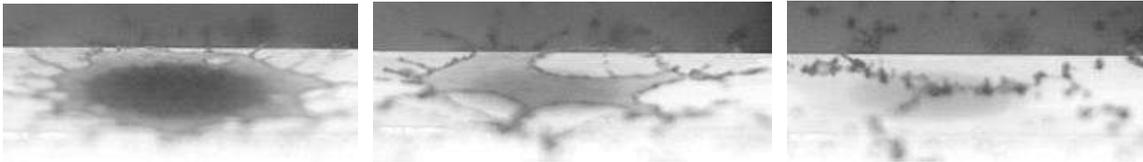


Figura 4.17. Despliegue de una gota de agua a 600°C sobre una superficie metálica caliente pulida.

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 a través 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 impactar. 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 (temp. ambiente y 100 °C), mayor es la transferencia de calor, pues 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 5 mm de diámetro que es influenciada por la acción de la gravedad sobre una superficie metálica, desde temperatura ambiente, hasta los 800°C a una altura no mayor a los 50mm, tendrán un comportamiento similar.
- Se visualizó como 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 a 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

- [1] C. Cicutti, “Transferencia de calor en la colada continua de aceros. II parte. Enfriamiento secundario,” *Rev. Metal.*, vol. 33, no. 6, pp. 393–402, 1997, doi: 10.3989/revmetalm.1997.v33.i6.835.
- [2] C. O. Pedersen, “An experimental study of the dynamic behavior and heat transfer characteristics of water droplets impinging upon a heated surface,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 13, no. 2, pp. 369–381, 1970, doi: 10.1016/0017-9310(70)90113-4.
- [3] M. Kunihide and M. Itaru, “The behavior of a water droplet on heated surfaces,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 27, no. 5, pp. 781–791, 1984, doi: 10.1016/0017-9310(84)90147-9.
- [4] A. Karl and A. Frohn, “Experimental investigation of interaction processes between droplets and hot walls,” *Phys. Fluids*, vol. 12, no. 4, pp. 785–796, 2000, doi: 10.1063/1.870335.
- [5] M. Pasandideh-Fard, S. D. Aziz, S. Chandra, and J. Mostaghimi, “Cooling effectiveness of a water drop impinging on a hot surface,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 22, no. 2, pp. 201–210, 2001, doi: 10.1016/S0142-727X(00)00086-2.
- [6] G. P. Celata, M. Cumo, A. Mariani, and G. Zummo, “Visualization of the impact of water drops on a hot surface: Effect of drop velocity and surface inclination,” *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*, vol. 42, no. 10, pp. 885–890, 2006, doi: 10.1007/s00231-006-0139-1.
- [7] J. Breitenbach, I. V. Roisman, and C. Tropea, “Heat transfer in the film boiling regime: Single drop impact and spray cooling,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 110, pp. 34–42, 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.004.
- [8] Y. S. Ko and S. H. Chung, “Experiment on the breakup of impinging droplets on a hot surface,” *Exp. Fluids*, vol. 21, no. 2, pp. 118–123, 1996, doi: 10.1007/BF00193915.
- [9] B. Richter, K. Dullenkopf, and H. J. Bauer, “Investigation of secondary droplet characteristics produced by an isooctane drop chain impact onto a heated piston surface,” *Exp. Fluids*, vol. 39, no. 2, pp. 351–363, 2005, doi: 10.1007/s00348-005-1018-0.
- [10] J. Serrato Rodríguez and A. Ruiz Marines, “Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,” *Mundo Nano. Rev. Interdiscip. en Nanociencia y Nanotecnología*, vol. 9, no. 17, p. 49, 2017, doi: 10.22201/ceiich.24485691e.2016.17.58151.
- [11] J. D. Bernardin, C. J. Stebbins, and I. Mudawar, “Effects of surface roughness on water droplet impact history and heat transfer regimes,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 40, no. 1, pp. 73–88, 1996, doi: 10.1016/S0017-

9310(96)00067-1.

- [12] A. L. N. Moreira, A. S. Moita, E. Cossali, M. Marengo, and M. Santini, “Secondary atomization of water and isooctane drops impinging on tilted heated surfaces,” *Exp. Fluids*, vol. 43, no. 2–3, pp. 297–313, 2007, doi: 10.1007/s00348-007-0330-2.
- [13] V. G. Labeish and A. G. Pimenov, “Experimental study of heat transfer between a hot wall and impinging drops,” *J. Eng. Phys.*, vol. 47, no. 6, pp. 1400–1406, 1984, doi: 10.1007/BF00870055.
- [14] P. Tartarini, G. Lorenzini, and M. R. Randi, “Experimental study of water droplet boiling on hot, non-porous surfaces,” *Warme- und Stoffubertragung Zeitschrift*, vol. 34, no. 6, pp. 437–447, 1999, doi: 10.1007/s002310050280.
- [15] T. Tran, H. J. J. Staat, A. Prosperetti, C. Sun, and D. Lohse, “Drop impact on superheated surfaces,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 108, no. 3, pp. 1–5, 2012, doi: 10.1103/PhysRevLett.108.036101.
- [16] V. Bertola, “An impact regime map for water drops impacting on heated surfaces,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 85, pp. 430–437, 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.084.
- [17] L. H. J. Wachters, L. Smulders, J. R. Vermeulen, and H. C. Kleiweg, “The heat transfer from a hot wall to impinging mist droplets in the spheroidal state,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 21, no. 12, pp. 1231–1238, 1966, doi: 10.1016/0009-2509(66)85042-X.
- [18] F. K. McGinnis and J. P. Holman, “Individual droplet heat-transfer rates for splattering on hot surfaces,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 12, no. 1, pp. 95–108, 1969, doi: 10.1016/0017-9310(69)90081-7.
- [19] L. Xu, W. W. Zhang, and S. R. Nagel, “Drop splashing on a dry smooth surface,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 94, no. 18, pp. 1–4, 2005, doi: 10.1103/PhysRevLett.94.184505.
- [20] A. Gonor and V. Yakovlev, “Dynamics of the impact on a drop on a solid surface,” *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, vol. 1, no. 1, pp. 36–43, 1977.
- [21] J. Schmidt and H. Boye, “Influence of velocity and size of the droplets on the heat transfer in spray cooling,” *Chem. Eng. Technol.*, vol. 24, no. 3, pp. 255–260, 2001, doi: 10.1002/1521-4125(200103)24:3<255::aid-ceat255>3.0.co;2-8.
- [22] C. Cicutti, “Transferencia de calor en la colada continua de aceros. I parte. El molde,” *Rev. Metal.*, vol. 33, no. 5, pp. 333–344, 1997, doi: 10.3989/revmetalm.1997.v33.i5.846.
- [23] J. L. E. Berciano, E. T. Guerra, S. de E. de Bengy, and D. F. Segovia, “Monografías sobre tecnología del acero. Parte I: Acería eléctrica,” p. 230, 2009.
- [24] World Steel Association, “Major steel-producing countries 2018 and 2019 million,” *2020 World steel Fig.*, no. 30 April, pp. 1–8, 2020, [Online]. Available:

<http://www.worldsteel.org/wsif.php>.

- [25] “Radiografía_de_la_Industria_del_Acero_en_Mexico_2020.pdf.” .
- [26] World Steel Association, “March 2020 crude steel production,” no. April, pp. 32–33, 2020.
- [27] J. P. Pulgar Hormazábal, “Perfil de solidificación de acero bajo distintas condiciones operacionales en colada continua de palanquillas,” *Dep. Ing. Met.*, pp. 9–11, 2017.
- [28] Lechler, “No Title,” 2019.
- [29] Y. Díaz Hernández, A. Fiol Zulueta, and J. Arzola Ruiz, “Simulación del vaciado continuo de perfiles de aceros al carbono de baja aleación,” *Ing. Mecánica*, vol. 16, no. 1, pp. 22–34, 2013.
- [30] Cengel - McGrown Hill, “Tranferencia de calor y masa,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, p. 287, 2008.
- [31] J. Sengupta, B. G. Thomas, and M. A. Wells, “The use of water cooling during the continuous casting of steel and aluminum alloys,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 36 A, no. 1, pp. 187–204, 2005, doi: 10.1007/s11661-005-0151-y.
- [32] K. A. Estes and I. Mudawar, “Correlation of sauter mean diameter and critical heat flux for spray cooling of small surfaces,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 38, no. 16, pp. 2985–2996, 1995, doi: 10.1016/0017-9310(95)00046-C.
- [33] H. Holl., R.Scheidl., & K. Schwaha. "A mathematical model for the calculation of cooling criteria for round bloom". *Proceedings of the Fourth European Conference on Mathematics in Industry*, 1, 97-108. 2021, Teubner Stuttgart and Kluwer Academic Publisher.
- [34] Z. Ji and J. Yang, “Online dynamic control of secondary cooling for the continuous casting process,” *Proc. - 3rd Int. Conf. Intell. Networks Intell. Syst. ICINIS 2010*, no. April 2015, pp. 269–272, 2010, doi: 10.1109/ICINIS.2010.21.
- [35] Z. Wang, G. You, Q. Wu, and Z. Yu, “Casting,” pp. 7694–7697, 2017.
- [36] Y. Yu, X. Luo, H. (Yulin) Zhang, and Q. Zhang, “Dynamic optimization method of secondary cooling water quantity in continuous casting based on three-dimensional transient nonlinear convective heat transfer equation,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 160, no. May, p. 113988, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113988.
- [37] L. Klimeš, M. Březina, T. Mauder, P. Charvát, J. J. Klemeš, and J. Štětina, “Dry cooling as a way toward minimisation of water consumption in the steel industry: A case study for continuous steel casting,” *J. Clean. Prod.*, vol. 275, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123109.
- [38] Z. Wang, M. Yao, X. Zhang, and X. Wang, “Optimization control for solidification process of secondary cooling in continuous casting steel,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 263–266, no. PART 1, pp. 822–827, 2013, doi:

10.4028/www.scientific.net/AMM.263-266.822.

- [39] P. Kotrbacek, H. Bellerova, T. Luks, and M. Raudensky, “Heat Transfer Correlations for Secondary Cooling in Continuous Casting,” *Steel Res. Int.*, vol. 92, no. 3, 2021, doi: 10.1002/srin.202000465.
- [40] M. Hnizdil, J. Kominek, T.-W. Lee, M. Raudensky, M. Carnogurska, and M. Chabicovsky, “Prediction of Leidenfrost Temperature in Spray Cooling for Continuous Casting and Heat Treatment Processes,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 11, p. 1551, 2020, doi: 10.3390/met10111551.
- [41] J. D. Bernardin and I. Mudawar, “The leidenfrost point: Experimental study and assessment of existing models,” *J. Heat Transfer*, vol. 121, no. 4, pp. 894–903, 1999, doi: 10.1115/1.2826080.
- [42] M. Raudensky and J. Horsky, “Secondary cooling in continuous casting and Leidenfrost temperature effects,” *Ironmak. Steelmak.*, vol. 32, no. 2, pp. 159–164, 2005, doi: 10.1179/174328105X15913.
- [43] J. D. Bernardin and I. Mudawar, “A Leidenfrost point model for impinging droplets and sprays,” *J. Heat Transfer*, vol. 126, no. 2, pp. 272–278, 2004, doi: 10.1115/1.1652045.
- [44] L. Changyong, D. Yajie, W. Hua, X. Jinping, S. Pang, and C. Xu, “The cooling techniques on the continuous casting process,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 770, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/770/1/012015.
- [45] J. J. M. R., A. H. C. E., F. A. A. G., E. P. G. M., and M. A. H. G., “Effect of the Operating Conditions of Air-Mist Nozzles on the Thermal Evolution of Continuously Cast Thin Slabs,” *Can. Metall. Q.*, vol. 47, no. 2, pp. 187–204, 2012, doi: 10.1179/000844308794408416.
- [46] J. Wendelstorf, K. H. Spitzer, and R. Wendelstorf, “Spray water cooling heat transfer at high temperatures and liquid mass fluxes,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 51, no. 19–20, pp. 4902–4910, 2008, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.01.032.
- [47] J. Zhang, D. F. Chen, C. Q. Zhang, S. G. Wang, W. S. Hwang, and M. R. Han, “Effects of an even secondary cooling mode on the temperature and stress fields of round billet continuous casting steel,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 222, pp. 315–326, 2015, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.03.022.
- [48] H. Transfer, “MEASUREMENT OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS Jaroslav Horský a,” *Test*, no. 1, pp. 1–8, 2005.
- [49] J. Zhang, D. F. Chen, C. Q. Zhang, S. G. Wang, and W. S. Hwang, “Dynamic spray cooling control model based on the tracking of velocity and superheat for the continuous casting steel,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 229, pp. 651–658, 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.10.015.
- [50] Y. Zhang, Z. Wen, Z. Zhao, C. Bi, Y. Guo, and J. Huang, “Laboratory experimental

setup and research on heat transfer characteristics during secondary cooling in continuous casting,” *Metals (Basel)*., vol. 9, no. 1, 2019, doi: 10.3390/met9010061.

- [51] D. Metal-mecánica, “Instituto Tecnológico de Morelia ‘ José María Morelos y Pavón ,” 2015.
- [52] Brown, W. Christian, and R. Hanson, (2020). Tracker video analysis and modeling tool (Version 5.9) [computer software]. Open source physics. <https://tracker.physlets.org/trackerJS/>