



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

---

---

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
MECÁNICA

**“ESTUDIO DE LOS FENÓMENOS DE EBULLICIÓN EN LA CAPA  
LÍMITE DINÁMICA Y TÉRMICA DE UN CILINDRO VERTICAL EN  
PROCESOS DE TEMPLE CON CONVECCIÓN FORZADA.”**

**TÉSIS.**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD  
EN TERMOFLUIDOS.

PRESENTA :  
**M.C. ALBERTO CERVANTES GARCÍA.**

ASESOR DE TESIS  
**DR. GILDARDO SOLORIO DÍAZ.**

COASESOR  
**DR. HÉCTOR JAVIER VERGARA HERNÁNDEZ.**

MORELIA, MICH. MAYO DEL 2018.



## **DEDICATORIA.**

A Dios que me ha dado la fe, el coraje, el valor, el optimismo y la disciplina para compartir estos momentos con mi Familia y Amigos.

A mis padres Alberto Cervantes Chávez y Graciela García Medina que me han dado el mejor regalo que se puede dar: LA VIDA. Gracias por haberme enseñado el camino de la rectitud y haber hecho de mí un hombre de provecho.

A mi esposa Cecilia Rojas Urueta e hijos: Enya, Angelito. Por ser la fuente de motivación en mi vida.

A mis hermanos José Carlos, Edgar Cesar y Diego Cervantes García.

A mi familia, Abuelos, Tíos, Primos que han sido siempre un pilar y han estado siempre conmigo apoyándome en las decisiones importantes en la vida.

A mis amigos que en alguna etapa durante el camino hacia el aprendizaje han estado ahí conmigo en las buenas y en las malas.

## **AGRADECIMIENTOS.**

**A la Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H** la que me ha forjado el carácter para no desvanecer ante algún problema, el cual cuando lo enfrentas te das cuenta que no es tan difícil como parece.

**A la División de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica (U.M.S.N.H)** que ha sido un gran apoyo durante la estancia en el programa de Doctorado.

**A mi asesor** el Dr. Gildardo Solorio Díaz por su valiosa ayuda y tiempo que dedicó a ayudarme para concluir este proyecto el cual es muy importante para mí. Muchas gracias por darme toda su confianza. Durante el tiempo que estuve trabajando me di cuenta que además de ser un buen investigador también es una gran persona que se preocupa por sus asesorados y nos apoya en todo.

**A mi coasesor** el Dr. Héctor Javier Vergara Hernández que me apoyo durante todo el proceso de construcción del sistema y simulación física. Con el pude llevar una buena amistad y siempre me motivo a seguir trabajando.

**A la Dra.** Alicia Aguilar Corona que me dio un nuevo enfoque para iniciar mis experimentos y me ayudo con la cámara de alta velocidad y el análisis de las imágenes. Además de que me dio las bases de la técnica PIV

**Al Dr.** Crisanto Mendoza Covarrubias que fue una gran persona que me ha asesorado en cada uno de los problemas que han surgido a lo largo de la experimentación y análisis de resultados.

**Al Dr.** Carlos Rubio Maya que fue la inspiración para que me interesara en el área de termofluidos y que me ha ayudado a con sus consejos.

**Al M.I.** Hugo C. Gutiérrez Sánchez quien fue un gran apoyo durante el programa de tutorías durante toda la Licenciatura, Maestría y Doctorado me ha dado su confianza, además de darme consejos para el análisis de los resultados.

**Al M.C.** Martin Herrejón Escutia que siempre ha estado ahí apoyadándome en la experimentación y análisis de resultados.

A todos los profesores que participaron en mi formación profesional.

**¡MUCHAS GRACIAS!**

## ÍNDICE.

ÍNDICE.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABLAS.....	XV
RESUMEN.....	XVII
ABSTRACT.....	XVII
JUSTIFICACIÓN.....	XVIII
HIPÓTESIS.....	XIX
OBJETIVOS.....	XIX
Objetivo General.....	XIX
Objetivos específicos.....	XIX
CAPÍTULO I- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.-Conceptos de transferencia de calor.....	2
1.1.1.-Ebullición.....	2
1.1.2.-Fenómenos de ebullición en flujo.....	3
1.2.-Velocimetría por imágenes de partículas (PIV).....	7
1.2.1.-Partículas trazadoras.....	10
1.2.2.-Fuente de luz.....	12
1.2.3.-Captura y almacenamiento de imágenes.....	13
1.2.4.-Métodos de procesamiento de las imágenes.....	14
CAPÍTULO II- ANTECEDENTES.....	16
2.1.- Enfriamiento de piezas metálicas.....	16
2.1.1.- Frente de mojado.....	16
2.1.2. - Coexistencia de los fenómenos de ebullición.....	17
2.2.- Métodos utilizados para la caracterización de las etapas del temple.....	18
2.2.1.-Adquisición de historias térmicas mediante termopares.....	18
2.2.2.-Grabación de video.....	19
2.3.-Normas utilizadas en el proceso de temple.....	19
2.4.- Estudio de transferencia de calor realizado por Vergara <i>et al.</i> ....	22

2.5.- Estudios hidrodinámicos en probetas cilíndricas. ....	23
2.5.1. - Estudio de Narazaki <i>et al.</i> ....	23
2.5.2. - Estudios de Vergara-Hernández y Hernández-Morales. ....	24
2.6.- Estudio de fenómenos de ebullición e hidrodinámica mediante la técnica PIV realizado por Dong-Ying Ju <i>et al.</i> ....	32
2.7.- Estudio de reducción de arrastre por capa de vapor realizado por Vakarelski <i>et al.</i> ....	34
2.8.- Trabajos relacionados con la entrada de líquido a la capa de vapor. ....	35
2.9.- Mecanismos de transferencia de calor en capa de vapor. ....	38
2.10.- Dificultades en el estudio óptico en capa de vapor. ....	39
CAPÍTULO III- TRABAJO EXPERIMENTAL .....	40
3.1.- Sistema experimental. ....	40
3.2.- Probetas utilizadas. ....	43
3.2.1.-Probeta instrumentada con termopares. ....	43
3.2.2.-Probeta con generación de calor interior.....	45
3.3.- Montaje de la probeta.....	48
3.4.- Experimentación. ....	49
3.5.- Condiciones experimentales. ....	67
CAPÍTULO IV- RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	68
4.1.- Análisis de la condición de velocidad a 0.2 m/s. ....	68
4.1.1.- Velocidad del agua a 0.2 m/s, probeta en estado isotérmico. ....	68
4.1.2.- Velocidad del agua a 0.2 m/s, probeta en estado no-isotérmico. ....	79
4.2.- Análisis de la condición de velocidad a 0.4 m/s. ....	89
4.2.1.- Velocidad del agua a 0.4 m/s, probeta en estado isotérmico. ....	89
4.2.2.- Velocidad del agua a 0.4 m/s, probeta en estado no-isotérmico. ....	90
4.3.- Análisis de la condición de velocidad a 0.6 m/s. ....	97
4.3.1.- Velocidad del agua a 0.6 m/s, probeta en estado isotérmico. ....	97
4.3.2.- Velocidad del agua a 0.6 m/s, probeta en estado no isotérmico.....	98
4.4.- Comparación de los patrones de flujo en estado isotérmico y no isotérmico. ....	103
4.5.- Transferencia de calor en la capa de vapor. ....	109
CAPÍTULO V.- SIMULACIÓN MATEMÁTICA.....	112
5.1.-Simulación a 0.2 m/s en estado isotérmico. ....	114

5.2.-Simulación a 0.4 m/s en estado isotérmico.....	124
5.3.-Simulación a 0.6 m/s en estado isotérmico.....	130
CONCLUSIONES.....	136
APORTACIONES.....	138
TRABAJO FUTURO.....	141
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142
Anexo A.....	148
Anexo B.....	148

## LISTA DE FIGURAS.

Figura 1.1.- Curva de enfriamiento [9]. .....	4
Figura 1.2.- Partes identificadas de una curva de rapidez de enfriamiento [9]. .....	5
Figura 1.3.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta plana con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.2 m/s. El tiempo de referencia se toma en A [9]. .....	6
Figura 1.4.- Sistema de velocimetría por imágenes de partículas. ....	8
Figura 1.5.- Los tres tipos de densidad de partículas en las imágenes: (a) Baja (PTV), (b) Media (PIV), y (c) Alta (LSV). ....	14
Figura 2.1.- Avance del frente de mojado [9]. ....	17
Figura 2.2.- Coexistencia de los fenómenos de ebullición [9]. .....	18
Figura 2.3.- Curvas de enfriamiento y rapidez de enfriamiento. ....	19
Figura 2.4.- Probetas utilizadas por las normas. a) Probeta ISO Inconel 600 alloy, International standard, ISO 9950, b) Probeta de plata, JIS, c) Probeta de plata de la norma francesa [17]. .....	20
Figura 2.5.- Detalles de la primera probeta de Tamura .....	21
Figura 2.6.- Variedad de probetas investigadas por Tamura. ....	21
Figura 2.7. – Fotografías tomadas a: (a) 0.2 s, (b) 7.5 s, (c) 9.2 s and (d) 15 s, después de sumergir la probeta cilíndrica de cara plana en agua a 60 °C, fluyendo a 0.2 m/s [31]. ....	22
Figura 2.8. – Fotografías tomadas a: (a) 0.46 s, (b) 3.0 s, and (c) 7.4 s, después de sumergir la probeta cilíndrica de cara plana en agua a 60 °C, fluyendo a 0.6 m/s. ....	22
Figura 2.9. – Secuencia de fotografías tomadas cerca de la base de la probeta a: (a) 1.7 s, (b) 1.8 s and (c) 1.9 s, después de sumergir la probeta cilíndrica de cara plana en agua a 60 °C, fluyendo a 0.2 m/s. ....	23
Figura 2.10.- Líneas de corriente alrededor de a) probeta cilíndrica de cara plana (inyección por boquilla), b) probeta cilíndrica de cara plana (flujo por tubo), c) probeta cilíndrica de cara hemisférica y d) probeta esférica. ....	24
Figura 2.11.- Contornos de vorticidad (1/s) simulados, agua a 25 °C fluyendo a: a) 0.2 m/s y b) 0.6 m/s, alrededor de la probeta de base plana de 12.7 mm. de diámetro dentro de un tubo circular de 44 mm. de diámetro interior. ....	25
Figura 2.12.- Contornos de vorticidad (1/s) simulados, agua a 25 °C fluyendo a: a) 0.2 m/s y b) 0.6 m/s, alrededor de la probeta de base cónica de 12.7 mm. de diámetro dentro de un tubo circular de 44 mm. de diámetro interior. ....	25
Figura 2.13.- Líneas de corriente alrededor de la probeta templada en agua a 60 °C fluyendo a velocidades de: a) 0.2 m/s y b) 0.6 m/s. Las imágenes corresponden a 0.1 s después del temple. ....	26
Figura 2.14.- Contornos de presión estática alrededor de la probeta templada en agua a 60 °C fluyendo a velocidades de: a) 0.2 m/s y b) 0.6 m/s. Las imágenes corresponden a 0.1 s después del temple. ....	27

Figura 2.15.- Campo de velocidades alrededor de la probeta templada en agua a 60 °C fluyendo a velocidades de: a) 0.2 m/s y b) 0.6 m/s. Note la separación de la capa límite y el retorno de flujo. Las imágenes corresponden a 0.1 s después del temple. ....	27
Figura 2.16.- Contorno de vorticidades (1/s) alrededor de la probeta templada en agua a 60 °C fluyendo a velocidades de: a) 0.2 m/s y b) 0.6 m/s. Las imágenes corresponden a 0.1 s después del temple. ....	28
Figura 2.17.- Líneas de corriente después de 2 s de simulación, para agua fluyendo 0.6 m/s: (a) probeta plana, (b) probeta semicircular, y (c) probeta cónica.....	28
Figura 2.18.- Líneas de corriente después de 2 s de simulación, para agua fluyendo: (a) 0.2 m/s, (b) 0.4 m/s, y (c) 0.6 m/s.....	29
Figura 2.19.- Líneas de corriente computadas alrededor de una probeta de base plana colocada dentro de un ducto en el cual circula agua a 60 °C a: (a) 0.20 m/s, (b) 0.4 m/s y (c) 0.6 m/s. Del lado izquierdo se muestra la imagen correspondiente al listón de celofán. ....	30
Figura 2.20.-a) inyector del colorante, b) probeta plana, b) cónica, c) semicircular. [9].....	31
Figura 2.21.-Pruebas con papel celofán a 20 L/min. [9] .....	31
Figura 2.22.-Aire atrapado en la base de la probeta plana [9]. ....	32
Figura 2.23.- Fenómeno de ebullición en una probeta caliente y visualización del flujo con la técnica de PIV reportada por Dong-Ying Yu <i>et al.</i> ....	33
Figura 2.24. – Variación de la velocidad terminal con la temperatura de la esfera medida para una esfera de acero de 20 mm que cae a través del líquido. Los cuadros azules muestran temperaturas abajo del punto de Leidenfrost y los rojos arriba del punto de Leidenfrost.....	34
Figura 2.25. – Variación de la velocidad terminal con la temperatura de la esfera medida para una esfera de acero de 20 mm que cae a través del líquido. A medida que se aumenta la temperatura de la esfera, disminuye la fuerza de arrastre y aumenta la velocidad terminal. También se observa que a temperaturas arriba del punto de Leidenfrost disminuye el desprendimiento de la capa límite. ...	35
Figura 2.26.- Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta cónica con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: 0.2 m/s. a) instante antes de la explosión de la capa de vapor y b) explosión de la capa de vapor.[9] ...	36
Figura 2.27.-a) Ebullición en película con entrada ocasional del líquido a vapor y b) Mayor entrada de gotas en la capa de vapor.....	38
Figura 3.1.- Sistema experimental. ....	41
Figura 3.2.- Detalle de la zona de grabación de la probeta, A) caja de vidrio llena con agua para evitar distorsión de las imágenes, B) tubo de acrílico, C) probeta, D) lanza del porta probetas, E) caja de recirculación del agua. ....	41
Figura 3.3.- a) Caja de acrílico utilizada anteriormente, b) Modificación. ....	43
Figura 3.4.- Probeta de acero inoxidable AISI 304 con disposición de termopares (Probeta A). a) vista superior y b) vista lateral. Dimensiones en milímetros. ....	44
Figura 3.5.- Probeta de acero inoxidable AISI 304 con generación de calor interno (Probeta B). ....	46



Figura 3.6.- a) mejora en la calidad del embobinado, b) aislamiento eléctrico solo en los extremos de la bobina, c) funda con resistencia aislada.....	47
Figura 3.7.- Prueba en baño quieto que duró 86 segundos.....	47
Figura 3.8.- Pruebas en el sistema con la probeta a 900 °C, duración 30 segundos.....	48
Figura 3.9.- Montaje de la probeta. ....	48
Figura 3.10.- Pruebas de calentamiento de la probeta en el sistema.....	49
Figura 3.11.- Sistema con iluminación de la cámara de 300 Watts. ....	50
Figura 3.12.- Adquisidor de datos. ....	50
Figura 3.13.- Cámara de alta velocidad Photron-Fastcam-PCI-R2. ....	51
Figura 3.14.-Lente Navitar Zoom modelo 7000. ....	52
Figura 3.15.-Capa de vapor alrededor de una probeta hecha de acero inoxidable AISI 304 (Probeta A) sometida a enfriamiento por convección forzada a: a) 0.2 m/s y b) 0.4 m/s (fondo negro detrás de la probeta).....	52
Figura 3.16.- Formación del plano laser.....	53
Figura 3.17.- Curva de transmisión del filtro de paso corto de 550 nm [65]. ....	54
Figura 3.18.- Domo negro construido alrededor del sistema experimental mostrado en la Figura 3.1. ....	55
Figura 3.19. -Prueba de alta temperatura con el sistema experimental mostrado en la Figura 3.1 y acoplado al plano de luz láser. ....	55
Figura 3.20.- Utilización del código generado en Matlab para el mejoramiento de la calidad de las imágenes.....	56
Figura 3.21.- Probeta de base plana dentro del tubo con agua fluyendo a 0.2 m/s. a) Imagen original y b) Imagen con campo vectorial. Ambas imágenes con una resolución de 1632 x 1200 pixeles.....	57
Figura 3.22.- a) Imagen original y b) Imagen con detección de bordes. Ambas imágenes con una resolución de 1632 x 1200 pixeles. ....	58
Figura 3.23.- Análisis de la probeta de base plana dentro del tubo con agua fluyendo a 0.2 m/s en PIVlab. a) Imagen original, b) Imagen con detección de bordes, c) Imagen con campo vectorial, d) Imagen líneas de corriente, e) Imagen con campo de velocidades y f) Imagen con campo de vorticidades. Las imágenes tienen una resolución de 1632 x 1200 pixeles. ....	59
Figura 3.24.- Imagen: a) recortada, b) con detección de bordes y c) analizada en PIVlab (campo de velocidad). Imagen original grabada a 1000 fps y 1632 x1200. ....	60
Figura 3.25.- a) Renombramiento de imagen y cambio de formato (1632 x 1200 pixeles y grabada a 500 fps), b) detección de bordes y c) recorte de imagen. ....	60
Figura 3.26.- Modelo y tamaño de las áreas de interrogación (0.2 m/s).....	61
Figura 3.27.- Modelo y tamaño de las áreas de interrogación (0.4 m/s).....	61
Figura 3.28.- Selección de la región de interés, enmascaramiento y calibración de las imágenes (0.2 m/s). ....	62
Figura 3.29.- Selección de la región de interés, enmascaramiento y calibración de las imágenes (0.4 m/s). ....	62
Figura 3.30.- a) Campo de vectores, b) campo de velocidades, c) campo de vórtices y d) campo de líneas de corriente.....	63

Figura 3.31.- Cámara de alta velocidad Speed Sense phantom miro M310. ....	64
Figura 3.32.- Objetivo Planar 1.4/50 mm ZF. ....	65
Figura 3.33.- a) Láser que se utilizó es tipo DualPower 30-1000 y b) óptica 80X80 high power light sheet series. ....	65
Figura 3.34.- Curva de transmisión del filtro de paso corto de 450 nm [65]. ....	66
Figura 3.35.- Capa de vapor alrededor de una probeta hecha de acero inoxidable AISI 304 (Probeta A) sometida a enfriamiento por convección forzada a: 0.2 m/s.....	66
Figura 4.1.- Prueba en estado isotérmico, probeta B a temperatura ambiente y agua fluyendo a 0.2 m/s y 60 °C. ....	68
Figura 4.2.- Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo), b) líneas de corriente y c) vectores de vorticidad. Tiempo de análisis a 0.151 segundos.....	69
Figura 4.3.- Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de análisis a 0.151 segundos. ....	70
Figura 4.4.- Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo), b) líneas de corriente y c) vectores de vorticidad. Tiempo de análisis a 0.175 segundos.....	71
Figura 4.5.- Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de análisis a 0.175 segundos. ....	72
Figura 4.6.- Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo), b) líneas de corriente y c) vectores de vorticidad. Tiempo de análisis a 0.237 segundos.....	73
Figura 4.7.- Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de análisis a 0.237 segundos. ....	74
Figura 4.8.- Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo), b) líneas de corriente y c) vectores de vorticidad. Tiempo de análisis a 0.335 segundos.....	75
Figura 4.9.- Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de análisis a 0.335 segundos. ....	76
Figura 4.10.- Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo), b) líneas de corriente y c) vectores de vorticidad. Tiempo de análisis a 0.361 segundos.....	76
Figura 4.11.- Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de análisis a 0.361 segundos. ....	77

Figura 4.12- Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Líneas de corriente y trayectorias. Tiempo de análisis a 0.175 segundos .....	78
Figura 4.13.- Prueba en estado no-isotérmico sin recirculaciones cerca de la base de la probeta y enfriamiento homogéneo, probeta a temperatura de 915 °C y agua fluyendo a 0.2 m/s y 60 °C. ....	80
Figura 4.14.- Prueba en estado no-isotérmico con una zona de recirculaciones cerca de la base de la probeta después de que pasa el frente de mojado, probeta a temperatura de 915 °C y agua fluyendo a 0.2 m/s y 60 °C. ....	80
Figura 4.15- a) Campo de vectores, b) campo de velocidades, c) campo de vórtices, y d) campo de líneas de corriente. Agua a 0.2 m/s y 60 °C.....	81
Figura 4.16.- El campo de velocidad, de vorticidad y de líneas de corriente es para el mismo instante en cada columna. a) flujo paralelo a la probeta, b) desprendimiento de vapor instantáneo y c) desprendimiento del vapor aguas abajo. Agua a 0.2 m/s y 60 °C.....	83
Figura 4.17.- Curvas de rapidez de enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana, enfriada con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.2 m/s.....	85
Figura 4.18.- Curvas de rapidez de enfriamiento a 1 segundo de la probeta cilíndrica de cara plana, enfriada con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.2 m/s.....	85
Figura 4.19.- Desplazamiento del frente de mojado durante el enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.2 m/s. ....	87
Figura 4.20.- Fotografías con la cámara de alta velocidad sin la utilización de filtros de longitud de onda, que muestran la evolución del frente de mojado durante el enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana (probeta A) con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.2 m/s.....	87
Figura 4.21- Capa de vapor alrededor de una probeta hecha de acero inoxidable AISI 304 (probeta A) sometida a enfriamiento por convección forzada a: 0.2 m/s.....	88
Figura 4.22- Capa de vapor alrededor de una probeta hecha de acero inoxidable AISI 304 (probeta a) sometida a enfriamiento por convección forzada a: 0.2 m/s. Diferentes técnicas experimentales: a) lámpara de 300 W, b) utilizando filtro óptico de paso corto de 550 nm, c) técnica PIV y d) utilizando filtro óptico de paso corto de 450 nm.....	89
Figura 4.23.- Prueba en estado isotérmico, probeta B a temperatura ambiente y agua fluyendo a 0.4 m/s y 60 °C. ....	90
Figura 4.24.- Prueba en estado no-isotérmico con recirculaciones cerca de la base de la probeta y enfriamiento no-homogéneo, probeta b a temperatura de 900 °C y agua fluyendo a 0.4 m/s y 60 °C. ....	91
Figura 4.25.-. Probeta a alta temperatura (900 °C) y enfriada por convección forzada analizada en PIVlab a) Vectores de velocidad, b) líneas de corriente. Agua a 0.4 m/s y 60 °C.....	92
Figura 4.26.- Curvas de rapidez de enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana, enfriada con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.4 m/s. ....	93
Figura 4.27.- Curvas de rapidez de enfriamiento a 1 segundo de la probeta cilíndrica de cara plana, enfriada con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.4 m/s.....	94
Figura 4.28.- Fotografías con la cámara de alta velocidad sin la utilización de filtros de longitud de onda, que muestran la evolución del frente de mojado durante el enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana (probeta a) con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.4 m/s.....	95

Figura 4.29.- Capa de vapor alrededor de una probeta hecha de acero inoxidable AISI 304 (Probeta A) sometida a enfriamiento por convección forzada a: 0.4 m/s.....	96
Figura 4.30.- Capa de vapor alrededor de una probeta hecha de acero inoxidable AISI 304 (probeta a) sometida a enfriamiento por convección forzada a: 0.4 m/s. Diferentes técnicas experimentales: a) lámpara de 300 W, b) utilizando filtro óptico de paso corto de 550 nm, c) técnica PIV y d) utilizando filtro óptico de paso corto de 450 nm.....	96
Figura 4.31.- Prueba en estado isotérmico, probeta b a temperatura ambiente y agua fluyendo a 0.6 m/s y 60 °C. ....	98
Figura 4.32.- Prueba en estado no-isotérmico con recirculaciones cerca de la base de la probeta y enfriamiento no-homogéneo, probeta b a temperatura de 900 °C y agua fluyendo a 0.6 m/s y 60 °C. ....	99
Figura 4.33.- Curvas de rapidez de enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana, enfriada con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.6 m/s.....	100
Figura 4.34.- Curvas de rapidez de enfriamiento a 1 segundo de la probeta cilíndrica de cara plana, enfriada con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.6 m/s.....	101
Figura 4.35.- Fotografías con la cámara de alta velocidad sin la utilización de filtros de longitud de onda, que muestran la evolución del frente de mojado durante el enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.6 m/s. ....	102
Figura 4.36.- Líneas de corriente alrededor de la probeta cilíndrica de cara plana bajo condiciones isotérmicas y no isotérmicas, a las 3 diferentes velocidades a), b), y c) condiciones isotérmicas y d), e) y f) bajo condiciones no isotérmicas (enfriamiento de la probeta con una temperatura inicial de 900 °C). ....	104
Figura 4.37.- Visualización de la capa de vapor formada durante el enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana (900 °C) con agua a 60 °C. a) Sin la utilización de filtro de longitud de onda de la luz y a una velocidad del agua de 0.4 m/s y b) Sin la utilización de filtro de longitud de onda de la luz y a una velocidad del agua de 0.6 m/s: c) utilizando el filtro de longitud de onda de la luz y a una velocidad del agua de 0.6 m/s.....	106
Figura 4.38.- Curvas de rapidez de enfriamiento en cada una de las posiciones de los termopares durante el enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana con agua a 60 °C y a las tres diferentes velocidades. a) termopar 1 (T1), b) termopar 2 (T2) y c) termopar 3 (T3). ....	108
Figura 4.39.- Transferencia energía mediante la formación de burbujas de vapor en la interfaz vapor-liquido. a) Formación de la onda, b) Crecimiento de la onda y c) Rompimiento de la onda y formación de burbuja de vapor. Tiempo entre imágenes 2 milisegundos .....	110
Figura 4.40.- Rompimiento de la capa de vapor en la cresta de la onda (figura 4.39c) (longitud del rompimiento 0.0665 mm =66.5µm).....	111
Figura 5.1.- a) Condiciones de frontera y b) mallado alrededor de la probeta. ....	113
Figura 5.2.- Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo) y b) vectores de presión dinámica en Pa (Pascuales). Tiempo de simulación a 0.151 segundos.....	115

Figura 5.3.- Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de simulación a 0.151 segundos, mostrando división de flujo. ....	116
Figura 5.4.- Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo) y b) vectores de presión dinámica en Pa (Pascales). Tiempo de simulación a 0.175 segundos. ....	116
Figura 5.5.- Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de simulación a 0.175 segundos. ....	117
Figura 5.6.- Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo) y b) vectores de presión dinámica en Pa (Pascales). Tiempo de simulación a 0.237 segundos. ....	118
Figura 5.7.- Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de simulación a 0.237 segundos. ....	119
Figura 5.8.- Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo) y b) vectores de presión dinámica en Pa (Pascales). Tiempo de simulación a 0.335 segundos. ....	120
Figura 5.9.- Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de simulación a 0.335 segundos. ....	121
Figura 5.10.- Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo) y b) vectores de presión dinámica en Pa (Pascales). Tiempo de simulación a 0.361 segundos. ....	122
Figura 5.11.- Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de simulación a 0.361 segundos. ....	123
Figura 5.12.- Velocidad promedio en los vórtices en 3 diferentes posiciones, con una velocidad de corriente libre de 0.2 m/s.....	124
Figura 5.13.- Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.4 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Simulación diferentes tiempos.....	127
Figura 5.14.- Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.4 m/s en estado isotérmico. Vectores de presión dinámica en Pascales (Pa). Simulación diferentes tiempos.....	128
Figura 5.15.- Velocidad promedio en los vórtices en 3 diferentes posiciones, con una velocidad de corriente libre de 0.4 m/s.....	129
Figura 5.16.- Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.4 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad (m/s). Simulación diferentes tiempos. ....	131
Figura 5.17.- Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.6 m/s en estado isotérmico. Vectores de presión dinámica en Pascales (Pa). Simulación diferentes tiempos.....	132
Figura 5.18.- Velocidad promedio en los vórtices en 3 diferentes posiciones, con una velocidad de corriente libre de 0.6 m/s.....	133

Figura 5.19.- Frecuencia de desprendimiento de vórtices de la probeta cilíndrica de cara plana para cada una de las tres condiciones de flujo, obtenidas mediante la experimentación y la simulación matemática. .... 135

## LISTA DE TABLAS.

Tabla 3.1.- Duración de la capa de vapor a diferentes temperaturas de agua (Probeta A). ..... 44

Tabla 3.2.- Propiedades físicas material Kanthal A-1. .... 45

Tabla 3.3.- Propiedades físicas de partículas de poliamida. .... 55

Tabla 3.4.- Condiciones experimentales en estado isotérmico. .... 67

Tabla 3.5.- Condiciones experimentales en estado no-isotérmico. .... 67

Tabla 5.1.- Comparación experimental y matemática de la frecuencia de desprendimiento de vórtices a las diferentes condiciones. .... 135

## RESUMEN.

La forma más común de describir el complejo mecanismo de enfriamiento durante el temple es usar curvas de enfriamiento. En casi todos los procesos de tratamiento térmico, las curvas de enfriamiento en probetas metálicas instrumentadas se miden con termopares. Existen numerosas variantes de la forma de la probeta, además del tamaño y los materiales, aunque la forma preferida es cilíndrica de cara plana. Sin embargo, algunos estudios llevados a cabo en condiciones isotérmicas del comportamiento hidrodinámico del medio de temple alrededor de la probeta a cilíndrica de cara plana con modelado matemático y físico, sugieren que la probeta cilíndrica de cara plana no debería recomendarse ni para estudios de la cinemática del frente de mojado ni para estimar las condiciones de frontera de transferencia de calor.

En esta tesis se estudia la dinámica de fluidos alrededor de una probeta cilíndrica de cara plana hecha de acero inoxidable AISI 304, tanto en estado isotérmico como en estado no isotérmico. Para este propósito se han empleado técnicas experimentales y de simulación matemática utilizando agua a una temperatura de 60 °C es utilizada como medio de enfriamiento a diferentes velocidades de flujo (0.2, 0.4 y 0.6 m /s). Los resultados muestran que la dinámica de los fluidos bajo condiciones en estado no isotérmico durante el enfriamiento por convección forzada de la probeta cilíndrica de cara plana es muy diferente a las condiciones de la probeta en estado isotérmico, por lo que no es recomendable tratar de correlacionar la dinámica de fluidos alrededor de la probeta metálica en condiciones isotérmicas con el comportamiento de las curvas de rapidez de enfriamiento o para caracterizar la evolución del frente de mojado.

**Palabras clave:** Temple, convección forzada, frente de mojado, probeta cilíndrica de cara plana, técnicas de visualización, curvas de rapidez de enfriamiento, simulación matemática.

## ABSTRACT.

The most common way to describe the complex mechanism of quenching is to use cooling curves. In almost all the heat treatment processes, cooling curves are measured with metal test probes instrumented with thermocouples. There a number of variants of the specimen shape, size and materials, although the preferred shape is the flat-end cylindrical probe. However, some studies carried out under isothermal conditions of the hydrodynamic behavior of the quenchant around the flat-end cylindrical probe with mathematical and physical modeling, suggest that flat-end cylindrical probe should not be recommended neither for studies on wetting front kinematics nor for estimating the heat transfer boundary conditions.

In this thesis, the fluid dynamics around the flat-end cylindrical probe made of stainless steel AISI 304, is studied both in isothermal and in non-isothermal state. For this purpose, water used at a temperature of 60 ° C as a cooling fluid and different flow velocities (0.2, 0.4 and 0.6 m/s), as well as visualization techniques with high-speed camera, optical filters, thermal histories and mathematical simulation. The results shows that the fluid dynamics under non-isothermal conditions during forced convection quenching of flat-end cylindrical probes is very different from that under isothermal conditions, so it is not advisable to try to correlate the fluid dynamics around metal probe under isothermal conditions with the behavior of cooling rate curves or to characterize the evolution of the wetting front.

**Keywords:** Quenching; forced convection quenching, wetting front; flat-end cylindrical probe, visualization techniques, cooling rate curve, mathematical simulation.



## JUSTIFICACIÓN.

La transferencia de calor a través de una capa de vapor es considerada un mecanismo de transferencia de calor ineficiente que ocurre en muchas aplicaciones de ingeniería. La capa de vapor es encontrada en el templado de metales, enfriamiento de cohetes, enfriamiento de palanquilla en el proceso de colada continua, enfriamiento de barras en reactores nucleares, etc. En todos estos procesos es indeseable, ya que si se sobrepasa el punto de Leidenfrost, es decir cuando la superficie del sólido está totalmente cubierta por la capa de vapor, cualquier incremento de flujo térmico ocasionara que el sobrecalentamiento de la superficie alcance valores muy grandes, con la posibilidad de superar repentinamente la temperatura de fusión del sólido, especialmente en los reactores nucleares.

En el temple de los metales, principalmente los aceros, la investigación está encaminada a un nuevo proceso de tratamiento térmico denominado *Intensive Quenching* donde el objetivo es, desaparecer o disminuir hasta valores muy pequeños la duración de la capa de vapor, lo cual permite que la extracción de calor en la pieza sea más uniforme y a más rápidas velocidades de enfriamiento.

Por tal motivo, la capa de vapor debe ser estudiada y entendida para el diseño de aplicaciones en ingeniería. Las inestabilidades producidas sobre la capa de vapor por los patrones de flujo, han sido observadas sólo en curvas de rapidez de enfriamiento, sin hacer un estudio óptico de estos patrones de flujo que provocan las inestabilidades y afectan la rapidez de enfriamiento, por lo que la observación de estos patrones de flujo dará un entendimiento de cómo afectan la estabilidad de la capa de vapor y ayudara a entender de una mejor manera los mecanismos que se presentan en el *Intensive Quenching* donde se busca eliminar de una forma total la capa de vapor durante el temple. Por lo tanto, el análisis de la transferencia de calor hacia el fluido es crucial para lograr un control adecuado de la capa de vapor.

## **HIPÓTESIS.**

En la capa de vapor que se forma en el enfriamiento por convección forzada de un acero a alta temperatura (900 °C), las perturbaciones sobre esta capa de vapor originadas por la turbulencia que resulta de la separación de la capa límite dinámica debido al cuerpo romo de la probeta utilizada en las normas establecidas para cuantificar el poder enfriamiento de los líquidos, debe de jugar un papel importante en los demás fenómenos de ebullición y en la rapidez de enfriamiento al interior del sólido.

## **OBJETIVOS.**

### **Objetivo General.**

Entender el efecto de la turbulencia originada por la separación de capa límite dinámica sobre los fenómenos de ebullición, y por lo tanto sobre el coeficiente de transferencia de calor mediante simulación matemática y caracterización experimental en las interfaces solido-vapor y vapor-líquido en probetas metálicas cilíndricas utilizadas en las normas establecidas para cuantificar el poder de enfriamiento de los líquidos.

### **Objetivos específicos.**

1. Modificar la zona de salida de flujo del sistema construido en la FIM utilizado en procesos de temple con régimen de convección forzada.
2. Simular matemáticamente las probetas en estado isotérmico.
3. Estudiar la interface sólido-vapor de las probetas templadas mediante la utilización de la cámara de alta velocidad y utilizando filtros para eliminar los espectros del color amarillo intenso.
4. Estudiar la interface capa de vapor-líquido a diferentes velocidades de flujo de agua utilizando técnicas de visualización con cámara de alta velocidad.

## CAPÍTULO I.

### INTRODUCCIÓN.

Cada año se gastan millones de dólares como resultado de distorsión, fractura y variación de las propiedades mecánicas debido a problemas inesperados en el proceso de temple. La no uniformidad en la transferencia de calor de las piezas enfriadas es quizá lo que más contribuye a su fractura. Uno de los factores que afecta fuertemente la uniformidad de la transferencia de calor, es el patrón de flujo alrededor de las piezas [1-5], creando grandes gradientes de temperatura entre el centro de las piezas y la superficie [6].

La transferencia de calor a través de una capa de vapor es considerada un mecanismo de transferencia de calor ineficiente que ocurre durante el templado de las piezas metálicas y es la mayor contribuyente en la distorsión y fractura de las piezas tratadas debido a un enfriamiento no homogéneo. El enfriamiento no homogéneo proviene de patrones de flujo de fluidos no uniformes alrededor de las piezas en la interacción solido-capas de vapor-líquido. La capa de vapor formada entre la pieza siendo templada y el medio de temple disminuye la transferencia de calor y tiene un gran efecto en la rapidez de enfriamiento. La capa de vapor formada en las piezas no solo reduce la eficiencia en la transferencia de calor, sino que también al crear gradientes de temperatura modifica la microestructura de las piezas afectando sus propiedades mecánicas

En los últimos años en los procesos de templado de piezas metálicas y cuantificación de la rapidez de enfriamiento de algunos fluidos no se ha puesto atención a los patrones de flujo alrededor de las piezas metálicas. Las curvas de enfriamiento adquiridas durante los procesos de enfriamiento por convección forzada no han sido relacionadas con las inestabilidades producidas sobre la capa de vapor por flujos turbulentos en probetas enfriadas por convección forzada y se considera que es un parámetro muy importante en el control de los procesos en los que hay interacción de una pieza metálica a alta temperatura con un líquido. En la actualidad los estudios realizados por diferentes investigadores solo se han enfocado en el análisis del campo térmico en el interior del sólido evaluando los coeficientes de transferencia de calor solo en base a historias térmicas, pero se han olvidado

de estudiar los patrones de flujo alrededor de las piezas metálicas los cuales son muy importantes dentro de la cuantificación del campo térmico en el interior del sólido y en la rapidez de enfriamiento. La evaluación experimental de los patrones de flujo y la adquisición de historias térmicas ayuda a entender cómo la turbulencia afecta la estabilidad de la capa de vapor y da una referencia de como se podría controlar la capa de vapor, a través de la variación del flujo de fluidos alrededor de una probeta calentada a alta temperatura y enfriada súbitamente.

Por lo tanto para realizar un adecuado acoplamiento de los fenómenos que se producen alrededor de las probetas cuando estas se templean o cuando se cuantifica el poder de enfriamiento de algunos fluidos se debe tener un conocimiento adecuado tanto en dinámica de fluidos como de transferencia de calor.

## **1.1.-Conceptos de transferencia de calor.**

### **1.1.1.-Ebullición.**

Para poder entender los fenómenos presentes cuando se enfría un metal en un líquido (temple), se debe tener en cuenta el concepto de ebullición. La ebullición es un proceso de evaporación que ocurre en una interfaz sólido-líquido. El proceso inicia cuando la temperatura de la superficie sólida,  $T_w$ , excede la temperatura de saturación,  $T_{sat}$ , que corresponde a la presión de saturación del líquido. El calor se transfiere de la superficie sólida al líquido, por lo que la forma apropiada de la ley de Newton del enfriamiento se expresa con la siguiente ecuación:

$$q = h(T_w - T_{sat}) = h \Delta T_{sat} \quad \text{Ec.1}$$

Donde el  $\Delta T_{sat}$  se denomina exceso de temperatura o sobrecalentamiento. De acuerdo a la ecuación 1, el flujo de calor por unidad de área,  $q$ , depende del coeficiente de transferencia de calor,  $h$ , y también del sobrecalentamiento, por lo tanto, se puede delimitar diferentes regímenes de ebullición de acuerdo al valor de  $\Delta T_{sat}$ .

A juzgar por sus unidades, **el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$**  se puede definir como la velocidad de transferencia de calor en una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial por unidad de diferencia en la temperatura [7].

### **1.1.2.-Fenómenos de ebullición en flujo.**

Cuando se enfrían componentes metálicos en medios de temple volátiles como agua, aceite o soluciones poliméricas, se presentan fenómenos superficiales altamente complejos (cada uno de ellos con un coeficiente de extracción de calor característico). Por lo tanto, el análisis de la transferencia de calor es crucial para el control de los procesos de temple. En los procesos de transferencia de calor no estacionarios, como es el caso del temple, se pueden distinguir tres fenómenos de gran relevancia en el comportamiento del líquido [8]:

#### ***1.1.2.1.-Formación de una película de vapor estable.***

Este fenómeno se manifiesta por la formación de una película de vapor densa entre la superficie caliente y el líquido, debido a la ebullición del mismo, la cual impide que este último moje directamente la superficie del sólido. Este régimen de ebullición ocurre, por lo tanto, cuando existe una gran diferencia de temperatura entre la superficie caliente y el líquido. La cubierta de vapor ofrece una fuerte resistencia térmica a la extracción de calor (Figura 1.1).

#### ***1.1.2.2.-Ebullición nucleada.***

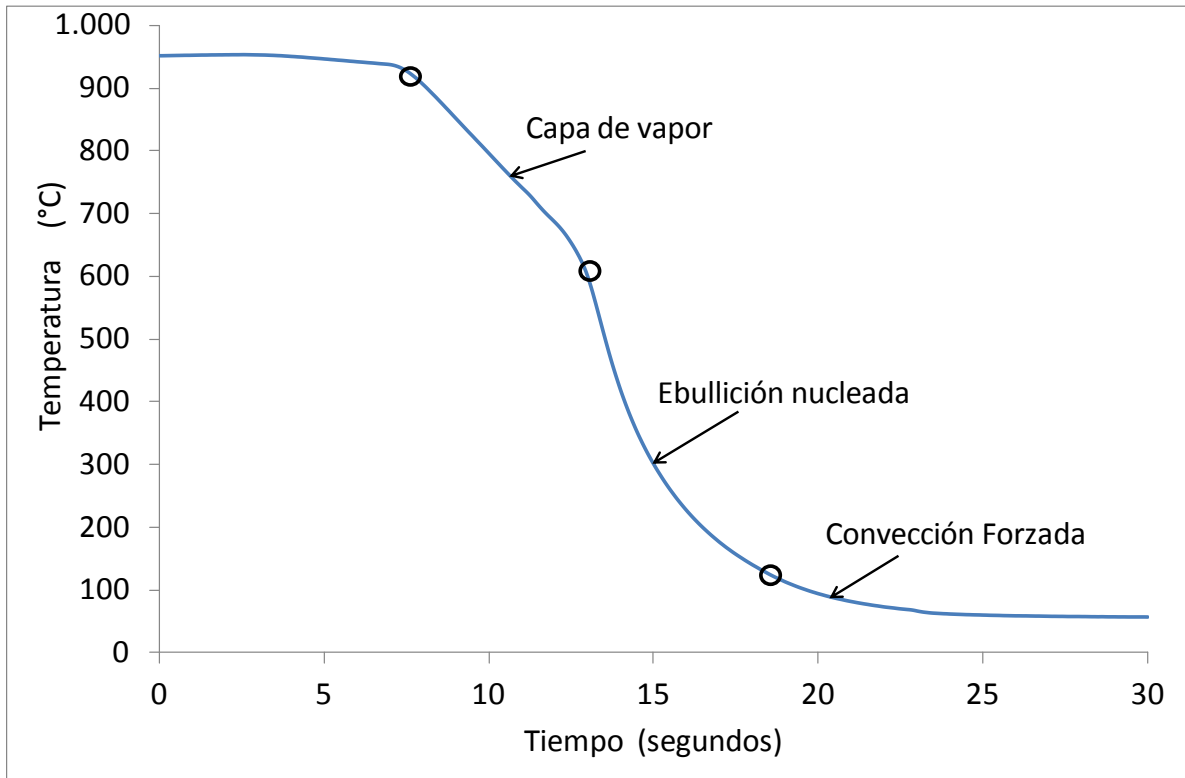
Es el fenómeno en el que se producen las más altas velocidades de extracción de calor. La etapa comienza cuando la temperatura de la superficie del metal baja y la capa de vapor estable se rompe. En este momento se produce un violento hervor del líquido y el calor se transporta rápidamente (Figura 1.1).

#### ***1.1.2.3.-Enfriamiento por convección sin presencia de vapor.***

Este fenómeno comienza cuando la temperatura de superficie del metal se reduce a un punto tal que el hervor del líquido cesa. La velocidad de enfriamiento en ésta etapa es más lenta que la etapa de ebullición nucleada (Figura 1.1).

En la Figura 1.1 se muestra la curva de enfriamiento de una prueba, pero como se puede observar es difícil identificar cada uno de los fenómenos de ebullición que se presentan en la superficie de la probeta. Éstas curvas suelen utilizarse para verificar que en los diagramas

de transformación CCT (Continuos Cooling Transformation) no toquen la nariz de transformación y se creen estructuras relativamente suaves en el interior del sólido tales como perlita, bainita o cementita. En la curva de rapidez de enfriamiento se obtiene un poco más de información de los fenómenos ebullición que se presentan en la superficie del sólido.



**Figura 1.1.-** Curva de enfriamiento [9].

El entendimiento de una curva de rapidez de enfriamiento es de gran importancia para el análisis de cada una de las condiciones experimentales. En la Figura 1.2 se observan la parte A que es cuando la probeta se encuentra en el horno, la parte B es la salida de la probeta del horno, la parte C es cuando la probeta va entrando a el tubo de acrílico y se forma la capa de vapor, el punto D es indica que antes de que rompa la capa de vapor hay una explosión, el punto E es el punto de Leidenfrost (punto donde rompe la capa de vapor), El punto F donde se da la máxima extracción de calor y el punto G es la convección forzada. El punto que delimita al fenómeno de ebullición nucleada de la convección forzada no ha sido definido exactamente en la literatura [8], en la mayoría de estos solo se hace referencia a este.

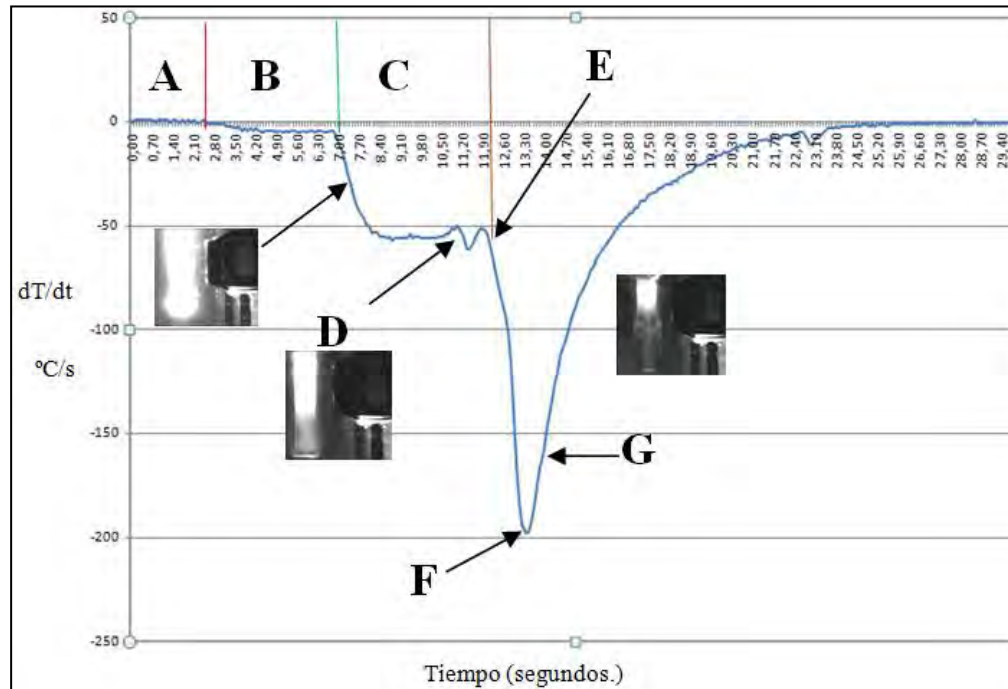
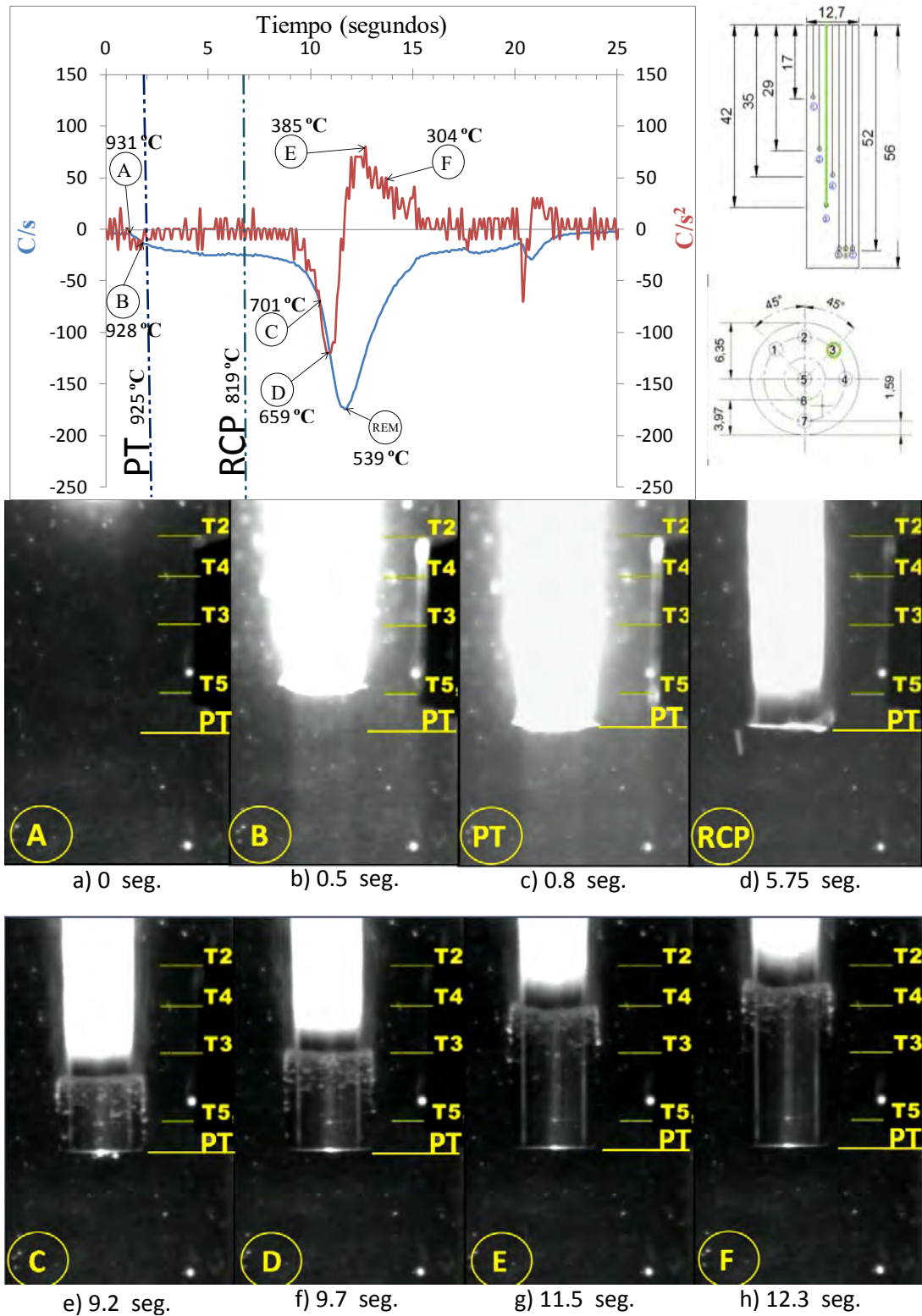


Figura 1.2.- Partes identificadas de una curva de rapidez de enfriamiento [9].

El punto E es donde algunos de los autores indican que rompe la capa de vapor, pero como se demostró Cervantes-García [9], este punto no es donde realmente rompe ésta. Con la primera y segunda derivada de la temperatura con respecto del tiempo superpuestas en una grafica se pudo delimitar exactamente cada uno de los fenómenos de ebullición.

La curva de rapidez de enfriamiento superpuesta en la curva de aceleración de enfriamiento ofrece una información muy importante para la caracterización de los procesos de temple, Figura 1.3. A continuación se muestra la nomenclatura que utilizó Cervantes-García [9] para la lectura de estas curvas: **A.-** Entrada de la probeta al medio de temple, **B.-** Flujo de calor crítico. El flujo de calor crítico se define como el incremento o decremento repentino de transferencia de calor. **C’.-** Transición en rompimiento de la capa de vapor. **C.-** Inicio de extracción en la parte delgada entre la parte del frente de mojado y la zona a alta temperatura (pre-rompimiento de la capa de vapor). **D.-** Temperatura de Leidenfrost, (Inicio de ebullición nucleada a alta frecuencia). **E.-** Inicio de ebullición nucleada a baja frecuencia. **F.-** Temperatura de inicio de convección. **PT.-** Posición de trabajo de la pieza. **RCP.-** Rompimiento de la capa de vapor en la base. **REM.-** Rapidez de enfriamiento máxima.



**Figura 1.3.-** Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta plana con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.2 m/s. El tiempo de referencia se toma en A [9].



## **1.2.-Velocimetría por imágenes de partículas (PIV).**

La velocimetría por imágenes de partículas (Particle Image Velocimetry) es una técnica basada en el procesamiento digital de imágenes, la cual permite obtener, en forma indirecta, el campo de velocidades de un fluido en movimiento.

El procesamiento digital de imágenes ha mejorado la manera en que los fluidos y sus características pueden ser estudiados. A través de este procesamiento se pueden obtener de forma automática, rápida y precisa, características importantes del fluido en cuestión, como densidad, temperatura, velocidad y estructuras que se forman cuando el fluido está en movimiento. El determinar la velocidad de un flujo de fluidos es un problema importante en diferentes áreas de la ingeniería, la industria y la ciencia. Las técnicas clásicas emplean diferentes dispositivos que se introducen al fluido, para medir la velocidad en un punto durante un intervalo de tiempo.

La velocimetría por imágenes de partículas (PIV por sus siglas en inglés) es una técnica no invasiva para obtener, mediante el procesamiento digital de imágenes, el campo de velocidades en dos dimensiones de un fluido en movimiento. Esta técnica es una herramienta útil en el estudio de flujos de fluidos en diferentes geometrías y para diferentes regímenes de flujo; desde estacionario hasta turbulento.

El punto de partida de esta técnica consiste en agregar pequeñas partículas al fluido bajo estudio. Se asume que estas partículas se mueven con la velocidad y dirección del fluido. El fluido y el recipiente que lo contenga (en caso de estar confinado), deben ser transparentes para que las partículas puedan ser visibles. Una región del fluido, donde se desea obtener el campo de velocidades, es iluminada con un plano de luz láser y una cámara digital es colocada en forma perpendicular a este plano. Las partículas que atraviesan el plano de luz son iluminadas al menos dos veces en un periodo muy corto de tiempo. El tiempo entre dos pulsos de luz dependerá de la velocidad media del flujo. La cámara y la fuente de luz son sincronizadas por medio de una computadora. Cuando el fluido es iluminado, la luz dispersada por las partículas que atraviesan el plano de luz, es capturada por la cámara en

una imagen o en una secuencia de imágenes que son almacenadas en la computadora. Las imágenes generadas son la representación bidimensional del volumen formado por la región del fluido iluminada por el plano láser. El grosor de este plano es menor a un milímetro. Para poder determinar la velocidad es necesario contar con las imágenes de al menos dos exposiciones.

En la Figura 1.4 se muestra un sistema básico de PIV. Se utiliza un láser como fuente de luz, una cámara digital para capturar las imágenes y una computadora para procesar los datos.

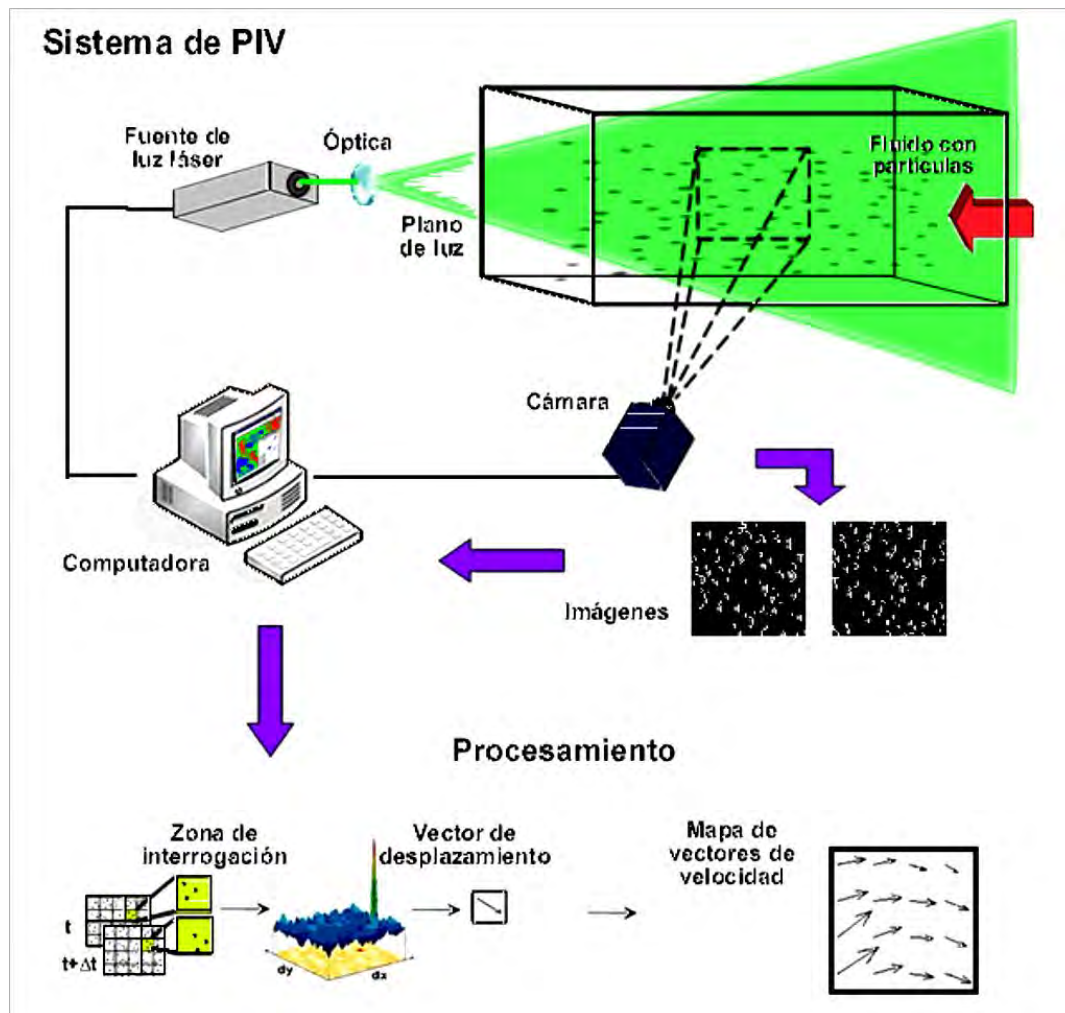


Figura 1.4.- Sistema de velocimetría por imágenes de partículas.

Una vez que se tienen las imágenes, en caso de ser necesario, éstas pueden ser mejoradas para optimizar su procesamiento y corregir ciertos defectos experimentales. Después estas imágenes son procesadas en una computadora mediante un algoritmo de PIV. Para su evaluación todas las imágenes son divididas de igual forma, en pequeñas áreas rectangulares llamadas “zonas de interrogación”. Se asume que todas las partículas dentro de cada una de estas zonas se mueven homogéneamente entre las tomas realizadas.

La velocidad de las partículas no se obtiene de manera individual sino en promedio. Para este propósito se emplean métodos estadísticos para determinar el desplazamiento promedio de las partículas de cada zona de interrogación. Con el desplazamiento y el tiempo transcurrido entre un par de imágenes, se estima la magnitud y dirección de la velocidad local del fluido en esa zona. Este proceso es repetido para todas las zonas de interrogación y se construye un mapa con todos los vectores de velocidad calculados.

A continuación se describen brevemente las principales características de la técnica de PIV.

- El proceso es rápido. Determina el campo de velocidades en tiempo real, lo que permite encontrar estructuras en flujos no estacionarios.
- Se pueden determinar dos componentes de velocidad debido a la iluminación por medio de un plano (dos dimensiones).
- PIV es una técnica no invasiva, es decir, no se necesita introducir ningún dispositivo en el fluido. Para medir la velocidad se utilizan pequeñas partículas, pero estas no perturban el flujo de forma significativa a diferencia de los sensores utilizados en otras técnicas.
- La medición de velocidad del flujo del fluido se hace de forma indirecta, pues realmente se calcula la velocidad de las partículas que se encuentran en el flujo. Es necesario revisar cuidadosamente las partículas a utilizar en cada experimento, con el fin de que estas tengan una distribución homogénea y sigan adecuadamente el flujo, sin perturbarlo de forma significativa.

- La resolución espacial (número de vectores por área) del mapa de vectores de velocidad obtenido con PIV depende principalmente de la densidad de partículas y del tamaño de la imagen. Las imágenes de PIV tienen una densidad de partículas y resolución espacial de resultados media. Debido a que para su procesamiento las imágenes son divididas en zonas de interrogación, la resolución del mapa de vectores es inversamente proporcional al tamaño de las zonas de interrogación. Por lo tanto, para maximizar la resolución espacial de los resultados, es necesario minimizar el tamaño de las zonas de interrogación. Sin embargo, si las zonas son muy pequeñas puede que no se encuentre ninguna partícula y no se podrá determinar la velocidad en esa región.

En los inicios de la técnica de PIV, a principios de los ochenta del siglo pasado, las imágenes de fluidos eran tomadas con cámaras analógicas para después ser procesadas y estudiadas de forma manual. Este proceso era muy lento; montar el experimento, tomar un par de fotografías y procesarlas, podía tardar hasta una semana.

El principal avance de la técnica de PIV sucedió cuando la toma analógica de datos y las técnicas de evaluación manual se reemplazaron por cámaras digitales y la evaluación realizada por computadora. Este cambio permitió reducir el tiempo de la adquisición de las imágenes y su procesamiento a segundos. Existe una gran variedad de fuentes donde se describe el desarrollo histórico de los principios básicos de PIV. En las referencias [10] y [11] se puede encontrar más información de la evolución que ha tenido esta técnica.

### **1.2.1.-Partículas trazadoras.**

La técnica de PIV es utilizada para determinar la velocidad de un fluido en forma indirecta. La velocidad es calculada mediante el procesamiento de imágenes del fluido con partículas, que con anterioridad se insertan en el fluido. Las partículas son llamadas “partículas trazadoras” y por sus características, su movimiento será muy parecido al del fluido. Por lo tanto la velocidad de una partícula será prácticamente la misma que la velocidad del fluido en cada punto.

Las partículas empleadas en PIV deben de satisfacer dos condiciones: ser capaces de seguir el movimiento del fluido sin retraso excesivo, y reflejar la suficiente luz del láser para ser capturadas adecuadamente por la cámara. Lo ideal es encontrar partículas que al ser insertadas en el fluido, sigan el movimiento del fluido de forma exacta, sin modificar el flujo, ni interactuar entre ellas. Sin embargo, es difícil satisfacer estas condiciones y en la práctica se utilizan aquellas que simplemente sigan el flujo sin perturbarlo demasiado. Las partículas y el fluido deben tener aproximadamente la misma densidad, para que al insertar las partículas, éstas permanezcan suspendidas en el fluido. Si las densidades de las partículas y del fluido son diferentes, las partículas flotarán o se hundirán y no seguirán apropiadamente el movimiento del fluido.

También es necesario que las partículas dispersen bien la luz del láser, pues de lo contrario éstas no serían captadas apropiadamente por la cámara. Sin embargo, la mejor y más económica opción, es elegir adecuadamente las partículas que utilizar un láser con mayor potencia. En general la luz dispersada por las partículas está en función de su índice de refracción y del índice del fluido que las rodea, así como del tamaño y forma de las partículas. La luz dispersada también depende del ángulo de observación, el cual generalmente es a  $90^\circ$  de la luz incidente, por ser una de las posiciones con mayor dispersión de luz.

Todas las partículas deben ser prácticamente del mismo tamaño, y su elección es un compromiso entre los beneficios y desventajas, según el tamaño y cantidad utilizados. Las partículas grandes son las que reflejan mejor la luz. Sin embargo, las partículas pequeñas siguen mejor el movimiento del fluido y distorsionan menos el flujo. La cantidad de partículas utilizada también es muy importante. Tener muchas partículas o muy pocas afectará los resultados obtenidos. Si se utilizan muchas partículas, se modifica el flujo y si se utilizan pocas partículas, no se obtiene suficiente información para calcular la velocidad en todos los puntos del área de estudio. La distribución de las partículas debe ser homogénea, para poder obtener la velocidad en todas las regiones del fluido. La elección del tipo de partículas en cada experimento depende del fluido y del tipo de flujo que se desee estudiar.

Para calcular el cambio de diferencia de velocidad debido a la densidad se calcula con la ecuación:

$$U = dp^2 \frac{(\delta p - \delta)}{18\mu} g \quad \text{Ec.2}$$

Donde :

U - diferencia de velocidad.

dp - diámetro de la partícula.

$\delta p$  - densidad de la partícula.

$\delta$  - densidad del fluido.

$\mu$  - viscosidad dinámica.

El tiempo de respuesta de la partícula mide la tendencia de una partícula para lograr la velocidad de equilibrio con el fluido:

$$\tau_s = dp^2 \frac{\delta p}{18\mu} \quad \text{Ec.3}$$

Donde:

$\tau_s$  - tiempo de respuesta de la partícula.

dp - diámetro de la partícula.

$\delta p$  - densidad de la partícula.

$\mu$  - viscosidad dinámica.

### 1.2.2.-Fuente de luz.

La técnica PIV requiere la generación de un plano de luz con características bien definidas de área, grosor, color e intensidad. Los rayos láser son muy utilizados en la técnica de PIV por ser el único tipo de luz que, por medio de lentes, puede concentrarse para formar un plano de luz. Este plano se hace incidir sobre el fluido para iluminar de manera casi

uniforme la región de interés. Otra razón por la que generalmente se utiliza un láser y no otra fuente de luz, es la posibilidad de utilizar los dispositivos que generan el rayo en pulsos. Este tipo de dispositivos generan los pulsos a diferentes frecuencias y su duración varía según el modelo. El láser emitido por pulsos es sincronizado, usualmente por medio de una computadora u otro dispositivo de hardware, con la cámara, de modo que el obturador de la cámara solo permanezca abierto por un intervalo de tiempo muy corto, mientras se tenga iluminada la región de interés del fluido. Así, la cámara solo capturará la posición de las partículas en un instante y el movimiento de las partículas se “congelará”, evitando que se pueda percibir el desenfoque de movimiento en las imágenes (motionblur).

Existen diferentes tipos de láser que cumplen con los requerimientos de la técnica de PIV. La elección del láser depende de la velocidad del fluido que se quiere estudiar y el tamaño de la región a iluminar. El tamaño de la región a iluminar en el fluido es importante, pues no todos los dispositivos tienen la misma potencia para garantizar que el plano generado sea del tamaño del área a estudiar, así como procurar que la iluminación del área sea uniforme. Además, la fuente de luz debe de ser suficientemente potente para que, sin importar su tamaño, las partículas sean iluminadas de modo tal, que reflejen la cantidad de luz necesaria para que sean visibles y puedan ser capturadas por el sensor de la cámara.

### **1.2.3.-Captura y almacenamiento de imágenes.**

Es necesario tener un sistema de captura que permita obtener imágenes del fluido con partículas. Actualmente el medio más utilizado es la cámara digital con CCD (Charge-Coupled Device o Dispositivo Acoplado por Carga), aunque estas imágenes pueden ser capturadas por otro tipo de cámaras. El CCD está formado por millones de sensores fotosensibles acomodados en una cuadrícula. Cada sensor del CCD representará un píxel en la imagen final. La resolución de una cámara es el número de sensores que tiene el CCD y por lo tanto el número de píxeles de la cual está formada la imagen.

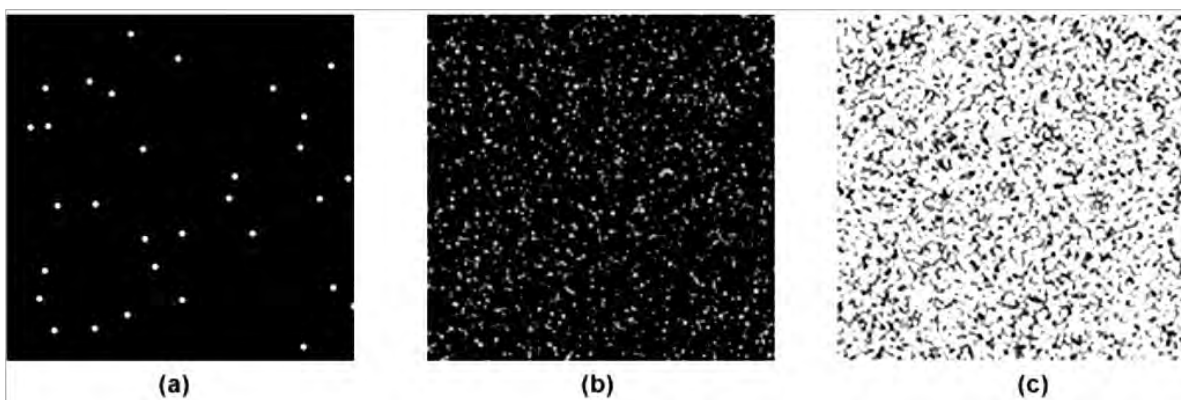
En PIV la resolución es muy importante, pues cuando las partículas son muy pequeñas solo pueden ser capturadas por cámaras de alta resolución. Sin embargo, una imagen con mayor resolución ocupa más espacio en la memoria y también involucra más tiempo de procesamiento. Las cámaras digitales con CCD convencionales necesitan pasar los datos del

CCD a memoria y después borrar los valores de los sensores, antes de poder tomar una nueva imagen. Existen unas cámaras especiales, llamadas de “correlación cruzada”, que son capaces de tomar dos imágenes en el mismo CCD sin tener que borrar ni guardar los datos entre una imagen y otra. En PIV, estas cámaras son útiles para analizar fluidos rápidos, ya que pueden tomar imágenes con una frecuencia muy alta.

El intervalo de tiempo que debe haber entre cada par de imágenes depende de la velocidad del fluido. Si el fluido es muy rápido y el intervalo entre las imágenes es muy grande, dos imágenes consecutivas no tendrán ninguna partícula en común y será imposible determinar correctamente la velocidad del fluido. Por otro lado, el intervalo de tiempo entre imágenes consecutivas debe ser lo suficientemente largo para que las partículas tengan un desplazamiento.

#### 1.2.4.-Métodos de procesamiento de las imágenes.

Una vez adquiridas y mejoradas las imágenes, éstas son procesadas para determinar la velocidad del fluido. El método de procesamiento depende de la densidad de partículas en la imagen. Se pueden distinguir tres tipos de densidad de partículas en imágenes: baja, mediana y alta densidad; como se muestra en la Figura 1.5 la densidad de las partículas en la imagen determina el método de análisis y procesamiento que debe ser utilizado para determinar la velocidad.



**Figura 1.5.-** Los tres tipos de densidad de partículas en las imágenes: (a) Baja (PTV), (b) Media (PIV), y (c) Alta (LSV).



La densidad de partículas es pequeña cuando el promedio de separación entre ellas es considerablemente mayor a su desplazamiento. Por el contrario, la densidad de partículas es alta, cuando el promedio de separación entre las partículas es menor a su desplazamiento.

En el caso de la imagen con baja densidad de partículas, Figura 1.5 (a), las partículas pueden ser detectadas de forma individual. Para la evaluación de este tipo de imágenes, se requieren métodos de seguimiento de partículas para determinar el desplazamiento individual de cada una. El desplazamiento de una partícula determina la velocidad del fluido en ese punto. Sin embargo, por la baja densidad de partículas, la información de la velocidad solo se puede obtener cuando alguna partícula está presente. Así, pueden existir regiones del flujo donde no se puede obtener una velocidad local. El método para analizar un fluido en movimiento con estas características se llama “Particle Tracking Velocimetry” o “PTV” (Velocimetría por seguimiento de partículas). PTV tiene un porcentaje de error alto en imágenes con ruido. Este problema se debe a que el ruido es confundido con partículas durante el procesamiento de la imagen.

Las imágenes con densidad media, Figura 1.5 (b), tienen partículas que también pueden ser distinguidas de forma individual, sin embargo a simple vista ya no es posible distinguir una misma partícula en las dos imágenes. Este tipo de imágenes son procesadas con la técnica convencional de PIV, la cual hace una evaluación estadística y determina el desplazamiento promedio de pequeños grupos de partículas. Al ser un promedio del desplazamiento la técnica de PIV es más tolerante al ruido que PTV.

En el caso de imágenes de alta densidad, Figura 1.5 (c), son tantas las partículas, que es imposible identificar partículas de forma individual porque éstas están encimadas en la mayoría de los casos y se forman manchas o también llamadas “speckles”. El método utilizado para éste caso es llamada “Láser Speckle Velocimetry” o “LSV” (Velocimetría de Manchas por Láser). LSV hace una aproximación estadística, que revela el desplazamiento de las manchas formadas por partículas. La principal desventaja que tiene este método es que, por la alta densidad de partículas, éstas tienden a afectar la dinámica original del fluido.

## CAPÍTULO II.

### ANTECEDENTES.

El proceso de temple es desde hace mucho tiempo un gran reto en los tratamientos térmicos debido a que es complicado poder observar los mecanismos de transferencia de calor que están presentes durante el enfriamiento en las superficies de las piezas. El conocimiento detallado de estos fenómenos de transferencia de energía podría explicar cómo se originan varios problemas durante el proceso de temple tales como distorsión, fractura y enfriamiento no uniforme.

Dada la importancia de la dinámica de fluidos en el proceso de temple por convección forzada y cuantificación del poder de enfriamiento de algunos fluidos, se han realizado esfuerzos para acoplar patrones de flujo con la transferencia de calor. La mayoría de las investigaciones han sugerido que la dinámica de fluidos alrededor de las probetas en estado isotérmico y estado no isotérmico es semejante. Esto se mostrara en las siguientes secciones.

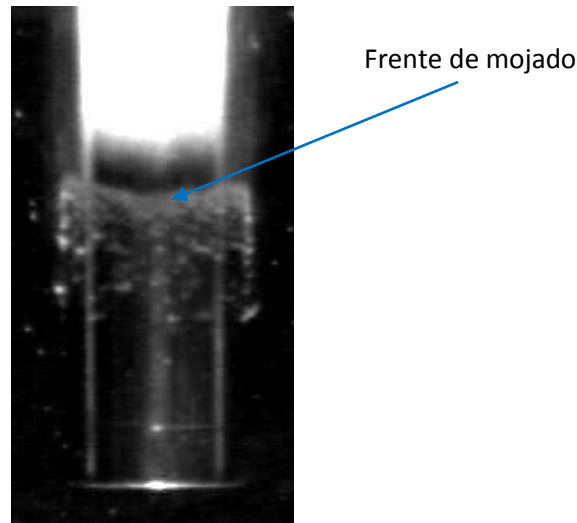
#### **2.1.- Enfriamiento de piezas metálicas.**

El enfriamiento es uno de los pasos críticos en la fabricación de piezas tratadas térmicamente de diferentes aleaciones de acero. Para aplicaciones en las que se requiere desarrollar una alta dureza y resistencia del acero se busca un enfriamiento súbito durante el tratamiento térmico. Sin embargo algunas veces se busca una baja rapidez de enfriamiento para minimizar la generación de esfuerzos residuales. Conociendo los fenómenos que intervienen en el tratamiento térmico de temple, se ha desarrollado una serie de pruebas en tanques de temple a escala de laboratorio que reproducen algunos de los eventos que controlan el proceso.

##### **2.1.1.- Frente de mojado.**

Künzel *et al.* (1986) [12] investigaron los fenómenos de ebullición en superficies cilíndricas de aleaciones Cr-Ni para procesos de temple. Reportaron que la capa de vapor inicia su colapso en la tapa inferior del cilindro. El colapso continúa ascendiendo con un patrón

específico y una velocidad constante hasta llegar a la tapa superior del cilindro. Ésta frontera móvil, donde colapsa la etapa de ebullición por película y da lugar a la ebullición por nucleación se le conoce también como *frente de mojado* (Figura 2.1).



**Figura 2.1.-** Avance del frente de mojado [9].

### **2.1.2. - Coexistencia de los fenómenos de ebullición.**

Tensi *et al.* [13] investigaron la estabilidad de las etapas de ebullición en procesos de temple con soluciones poliméricas en cilindros de Inconel de 15 mm x 100 mm. El resultado de su análisis demuestra que la complejidad de estudiar las etapas de película de vapor estable, ebullición nucleada y convección sin presencia de vapor, es que la coexistencia se presenta en la misma superficie en periodos cortos de tiempo (Figura 2.2).

Por lo tanto, caracterizar fielmente los fenómenos estableciendo una condición de frontera térmica, en términos de coeficientes de transferencia de calor, se vuelve una tarea difícil. En este sentido, la forma más empleada para el cálculo del campo térmico instantáneo, ha sido establecer una condición de frontera térmica en términos de un coeficiente de transferencia de calor instantáneo promedio actuando sobre las superficies activas de la pieza [14, 15].

Los valores reportados por Tensi [13] en templado con agua para los coeficientes de transferencia de calor en cada uno de los fenómenos de ebullición son:

- Capa de vapor:  $h=100$  a  $250 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Ebullición nucleada :  $h=10$  a  $20 \text{ kW/m}^2\text{K}$
- Convección libre:  $h= \sim 700 \text{ W/m}^2\text{K}$

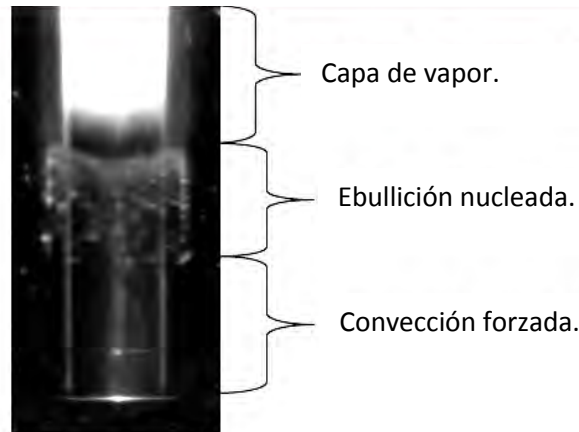


Figura 2.2.- Coexistencia de los fenómenos de ebullición [9].

## 2.2.- Métodos utilizados para la caracterización de las etapas del temple.

Para la medición de frente de mojado y los fenómenos de ebullición se utilizan varios métodos, el más empleado es el de adquisición de historias térmicas mediante la introducción de termopares en el interior del sólido, también se emplea otro método en el cual se mide la variación de conductividad térmica entre el sólido y el medio de temple, además se han utilizado hidrófonos para caracterizar el temple mediante la medición de sonido. Un método de caracterización directa que ha tomado una gran importancia es el de grabación de video.

### 2.2.1.-Adquisición de historias térmicas mediante termopares.

El proceso de temple es caracterizado mediante el análisis de curvas de enfriamiento y curvas de rapidez de enfriamiento. Los datos para obtener las respuestas térmicas se obtienen sumergiendo una probeta (con termopares en su interior) en un medio de temple, los termopares miden la variación de la temperatura con respecto al tiempo en un punto específico dentro de la probeta. Con los datos obtenidos de las respuestas térmicas se puede graficar la curva de rapidez enfriamiento calculando la primera derivada de la temperatura respecto al tiempo (Figura 2.3). Las probetas más comunes que se utilizan en este tipo de

pruebas son cilindros con una longitud de tres a cuatro veces el diámetro de la probeta con el termopar localizado en el centro geométrico [16].

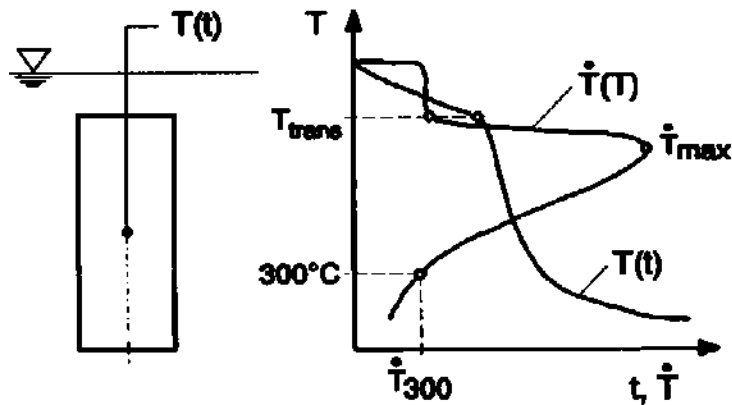


Figura 2.3.- Curvas de enfriamiento y rapidez de enfriamiento.

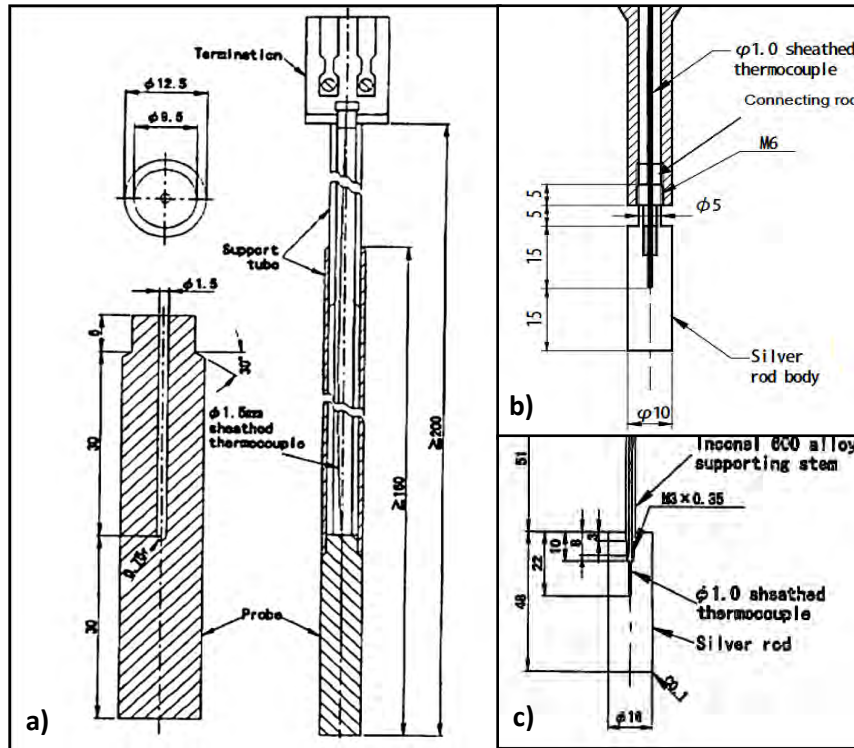
En las curvas de enfriamiento mostradas en la Figura 2.3 ésta la zona marcada como  $T_{trans}$ , la cual indica la ruptura de la capa de vapor, pero no indica realmente el punto exacto donde ocurre ésta transición. También se muestra el valor de la rapidez de enfriamiento máxima ( $\dot{T}_{max}$ ) y la rapidez de enfriamiento a  $300^{\circ}C$  ( $\dot{T}_{300}$ ) es donde comienza la convección forzada.

### 2.2.2.-Grabación de video.

Para medios de temple transparentes, la superficie del frente de mojado y los fenómenos de ebullición pueden ser observados a detalle mediante fotografías o videos. Las imágenes capturadas en video proveen una información detallada acerca del proceso de temple. Hasta ahora las cámaras utilizadas para la grabación de video son cámaras caseras (cámaras que graban entre 24 y 30 fps), pero recientemente se están utilizando cámaras de alta velocidad, las cuales dan mejor información para poder evaluar el proceso de temple.

### 2.3.-Normas utilizadas en el proceso de temple.

Hay varias normas que se utilizan en el proceso de temple, entre las que se pueden enumerar la JIS (Japanese Industrial Standart), la ASTM D 6200, ISO 9950, la ASTM D 3520, la norma francesa (CETIM), la Inconel 600® (IFHTSE e ISO) entre otras más [17], Figura 2.4.



**Figura 2.4.-** Probetas utilizadas por las normas. a) Probeta ISO Inconel 600 alloy, International standard, ISO 9950, b) Probeta de plata, JIS, c) Probeta de plata de la norma francesa [17].

La base de todas las normas es la JIS (1951), en la cual Tamura [18-21] investigó varios aspectos del proceso de temple, en donde vio que se requieren multidisciplinarios estudios, tales como termo-química, transferencia de calor, ciencia de los materiales y mecánica de fluidos, pero debido a la complejidad le fue imposible unificar todos. Basado en sus resultados en el proceso de enfriamiento logró correlacionarlos con la dureza de las piezas. Tamura desarrolló un modelo para correlacionar la dureza con la microestructura y propiedades del acero. El impacto de su investigación se observa hoy en día, ya que muchos investigadores siguen utilizando su metodología. Comparó varios métodos para evaluar el poder de enfriamiento del medio de temple así como la medición de la dureza analizando curvas de enfriamiento obtenidas por medio de termopares, resistencia eléctrica y expansión térmica [22].

El profesor Tamura decidió desarrollar un método para medir el cambio de temperatura confiablemente insertando dos termopares, uno en el centro y el otro en la superficie de una

probeta hecha de plata [23]. Este método usa una probeta de 10 milímetros maquinada en plata y se muestra en la Figura 2.5, con ésta probeta se mostró una buena combinación de sensibilidad y buena reproductibilidad en las curvas [24,25]. La probeta y el método de medición fueron mejorados posteriormente [26] e incorporados posteriormente al Estándar Industrial Japonés (JIS) en 1951 [27]. El análisis y el uso de estas curvas de enfriamiento tuvo un impacto significativo en el mejoramiento del medio de enfriamiento y tecnologías de tratamientos térmicos en Japón y otros países Asiáticos. En adición a la prueba original desarrollada por Tamura, algunas otras pruebas de varios tamaños, formas y dimensiones fueron desarrolladas y probadas. Algunos ejemplos se muestran en la Figura 2.6 [25, 26, 28, 29, 30]. Como se puede observar Tamura investigó una gran variedad de probetas, entre ellas la probeta de punta cónica (Figura 2.6).

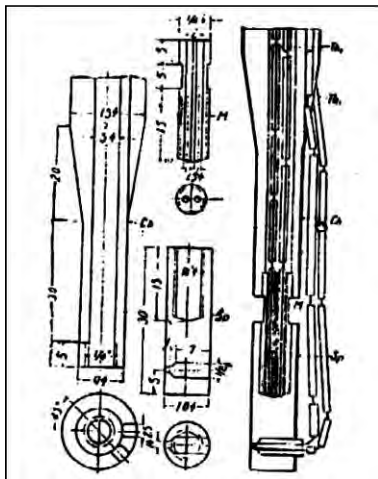


Figura 2.5.- Detalles de la primera probeta de Tamura [23].

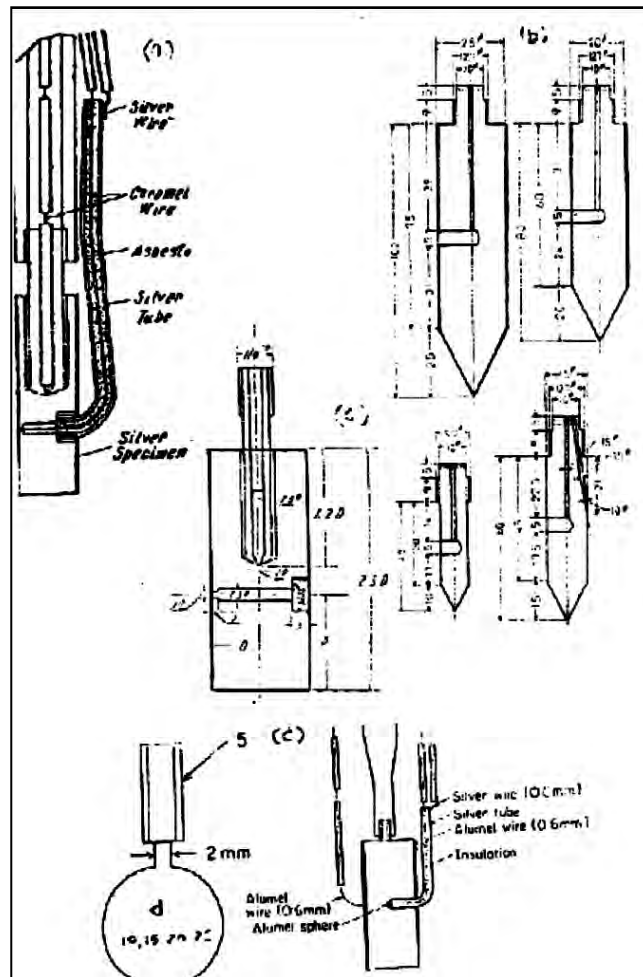
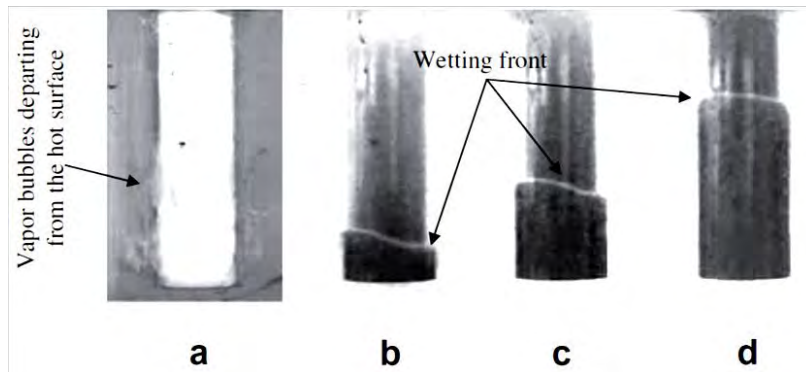


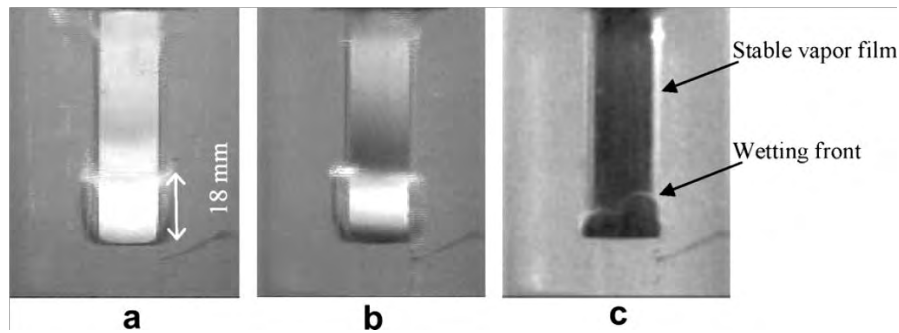
Figura 2.6.- Variedad de probetas investigadas por Tamura.

## 2.4.- Estudio de transferencia de calor realizado por Vergara *et al.*

Vergara *et al.* [31] desarrollaron un sistema para el enfriamiento por convección forzada con flujo totalmente desarrollado y una probeta cilíndrica de cara cónica para el estudio del frente de mojado, en ese estudio incluyó también una probeta cilíndrica de cara plana. Encontraron que la probeta cilíndrica de cara plana produce un colapso caótico del vapor cerca de la base de la probeta y un avance inestable del frente de mojado a cualquier condición de velocidad del flujo (Figura 2.7 y Figura 2.8). También observaron una capa de vapor no homogénea a lo largo de la probeta, particularmente un gran espesor de capa de vapor cerca de la base de la probeta. La Figura 2.9 muestra que la geometría del vapor en el vértice cerca de la base de la probeta varía durante los 2 primeros segundos lo que conlleva a un rompimiento no simétrico de la capa de vapor.

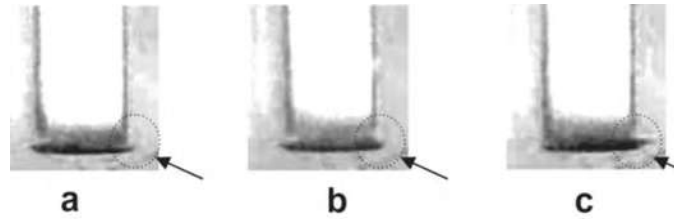


**Figura 2.7.** – Fotografías tomadas a: (a) 0.2 s, (b) 7.5 s, (c) 9.2 s and (d) 15 s, después de sumergir la probeta cilíndrica de cara plana en agua a 60 °C, fluyendo a 0.2 m/s [31].



**Figura 2.8.** – Fotografías tomadas a: (a) 0.46 s, (b) 3.0 s, and (c) 7.4 s, después de sumergir la probeta cilíndrica de cara plana en agua a 60 °C, fluyendo a 0.6 m/s.





**Figura 2.9.** – Secuencia de fotografías tomadas cerca de la base de la probeta a: (a) 1.7 s, (b) 1.8 s and (c) 1.9 s, después de sumergir la probeta cilíndrica de cara plana en agua a 60 °C, fluyendo a 0.2 m/s.

## 2.5.- Estudios hidrodinámicos en probetas cilíndricas.

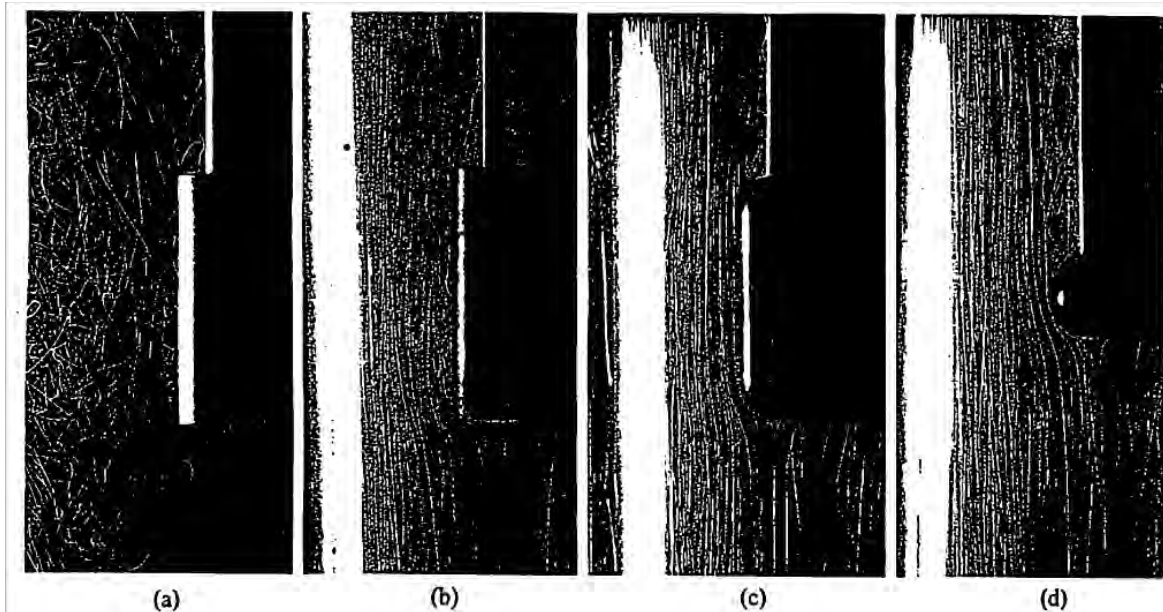
Los patrones de flujo alrededor de las piezas metálicas a templar son muy difíciles de visualizar, muchos investigadores han realizado modelos a escala construidos con acrílico y utilizando agua como medio de enfriamiento [32]. Tensi y Stitzelberg-Jacob [33] usaron listones para visualizar los patrones de flujo durante el templado por convección forzada. Sergeberg y Bodin utilizaron un análisis fotográfico para mostrar los patrones de flujo promedio en un tanque de temple sellado [34].

### 2.5.1. - Estudio de Narazaki *et al.*

Han sido pocos los trabajos enfocados al estudio de la hidrodinámica (estado isotérmico) de probetas utilizadas en las normas para establecer el poder de enfriamiento de algunos fluidos. Narazaki *et al.* (1996) [35] estudió el flujo alrededor de tres geometrías, una probeta cilíndrica de cara plana, una probeta cilíndrica de cara hemisférica y una probeta esférica (Figura 2.10). Encontró considerable variación de datos en las curvas de rapidez de enfriamiento, tal variación de datos fue atribuida a los patrones de flujo alrededor de la probeta.

Para observar los patrones de flujo generó un plano con un haz de luz y sembró partículas huecas de vidrio en un flujo de agua a una velocidad de 0.7 m/s. Encontró que sobre la probeta cilíndrica de cara hemisférica había líneas de corriente laminares, mientras que cerca de la base de la probeta cilíndrica de cara plana encontró un flujo turbulento. Concluyó que

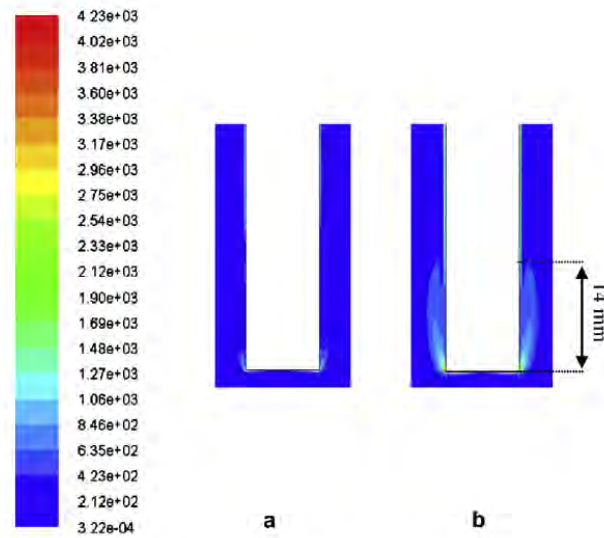
los patrones de flujo son los causantes de la variación de datos en las curvas de rapidez de enfriamiento.



**Figura 2.10.-** Líneas de corriente alrededor de a) probeta cilíndrica de cara plana (inyección por boquilla), b) probeta cilíndrica de cara plana (flujo por tubo), c) probeta cilíndrica de cara hemisférica y d) probeta esférica.

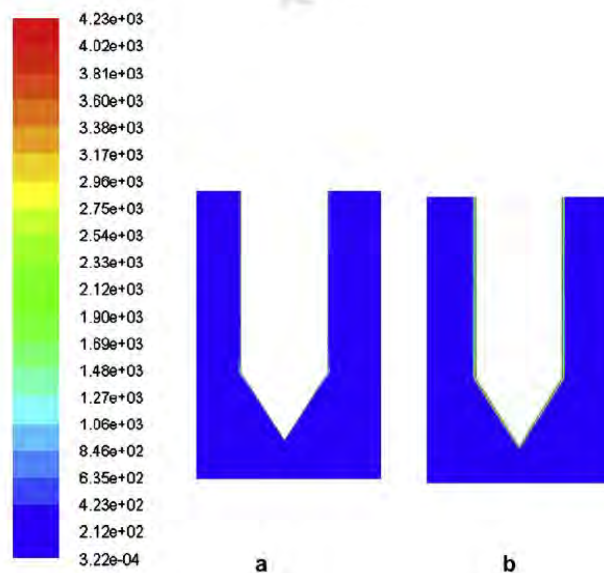
### 2.5.2. - Estudios de Vergara-Hernández y Hernández-Morales.

Vergara *et al.* [31] también mostraron interés en la hidrodinámica alrededor de las probetas utilizadas en los procesos de temple. Utilizaron el software comercial CFD (Fluent 6.3.26) para simular numéricamente (estado isotérmico) la dinámica de fluidos alrededor de una probeta cilíndrica de cara plana de 12.7 mm de diámetro y 60 mm de longitud en un tubo de acrílico de 44 mm de diámetro interior en el cual circula agua a una temperatura de 25 °C y a dos diferentes velocidades (0.2 m/s y 0.6 m/s). En la Figura 2.11 a) (velocidad del agua a 0.2 m/s) se muestra una pequeña área de gradiente de vorticidad cerca de la base de la probeta lo que sugiere que hay pequeños remolinos los cuales pueden ser responsables de la inestabilidad de la capa de vapor.



**Figura 2.11.-** Contornos de vorticidad (1/s) simulados, agua a 25 °C fluyendo a: a) 0.2 m/s y b) 0.6 m/s, alrededor de la probeta de base plana de 12.7 mm. de diámetro dentro de un tubo circular de 44 mm. de diámetro interior.

La Figura 2.11 b) muestra una mayor área de gradientes de vorticidad a una velocidad de 0.6 m/s.

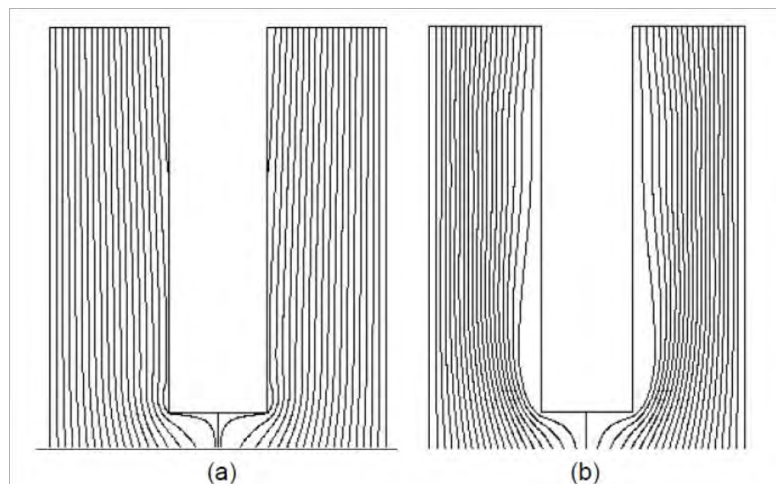


**Figura 2.12.-** Contornos de vorticidad (1/s) simulados, agua a 25 °C fluyendo a: a) 0.2 m/s y b) 0.6 m/s, alrededor de la probeta de base cónica de 12.7 mm. de diámetro dentro de un tubo circular de 44 mm. de diámetro interior.

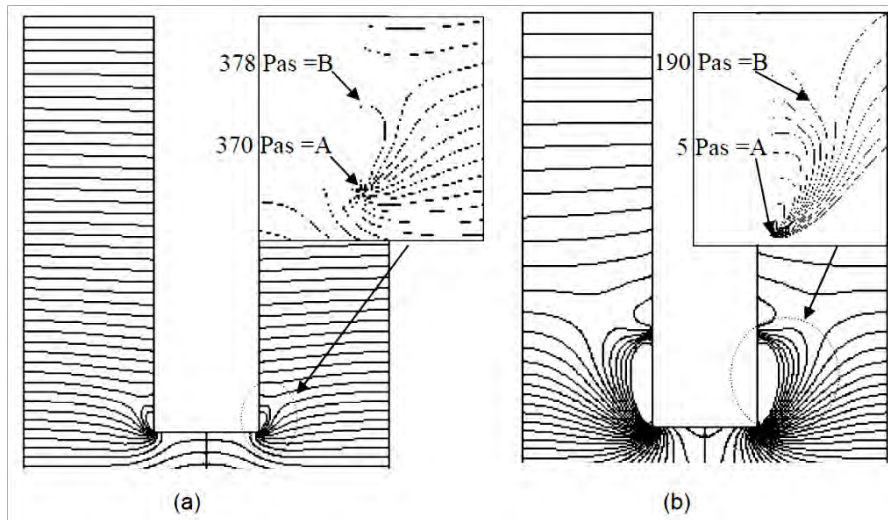
También simularon numéricamente (estado isotérmico) la dinámica de fluidos alrededor de una probeta cilíndrica de cara cónica de 12.7 mm de diámetro y 70 mm de longitud en un tubo de acrílico de 44 mm. de diámetro interior en el cual circula agua a una temperatura de 25 °C y a dos diferentes velocidades (0.2 m/s y 0.6 m/s) (Figura 2.12 a) y 2.12 b)). Encontraron que, en contraste con la probeta cilíndrica de base plana, el gradiente de vorticidad es casi inexistente y los valores de vorticidad son muy pequeños, aun para la velocidad de 0.6 m/s. Su conclusión fue que el cambio de la geometría en la probeta produce cambios significativos en el campo de vorticidades cerca de la base de la probeta y por lo tanto este cambio también es responsable de la velocidad de avance del frente de mojado.

Vergara *et al.* [36] estudiaron los patrones de alrededor de una probeta cilíndrica de cara plana, encontraron que en las esquinas agudas de las probetas templadas producen cambios en la dirección y fluido de temple lo que favorece a la pérdida de presión, separación de la capa límite y gradientes de vorticidad. En las Figuras 2.13 y 2.14 se muestran las líneas de corriente y la distribución de presión estática para velocidades de agua de 0.2 y 0.6 m/s.

En la Figura 2.13 Vergara *et al.* apreciaron que en la base de la probeta hay una región de estancamiento ( $v=0$ ). También, algunas líneas de corriente coinciden con el vértice de la base de la probeta produciendo un salto local en el campo de velocidades y consecuentemente una baja presión estática en esa zona.

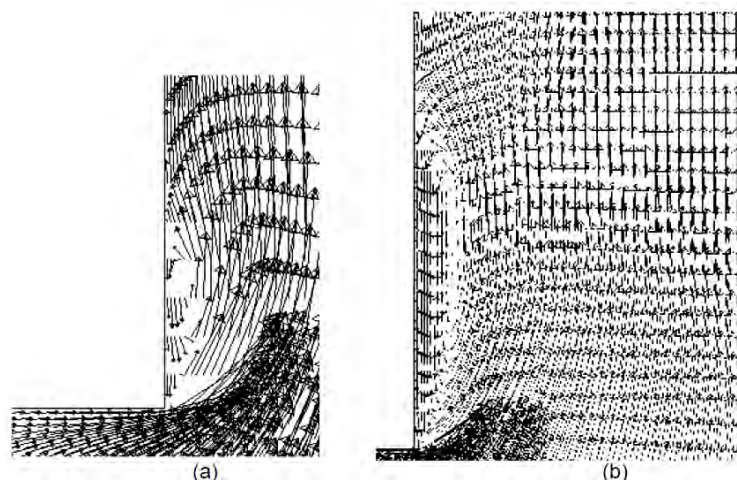


**Figura 2.13.-** Líneas de corriente alrededor de la probeta templada en agua a 60 °C fluyendo a velocidades de: a) 0.2 m/s y b) 0.6 m/s. Las imágenes corresponden a 0.1 s después del temple.



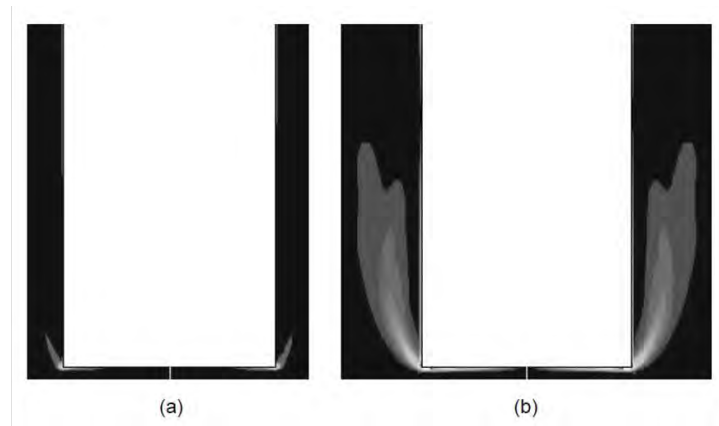
**Figura 2.14.-** Contornos de presión estática alrededor de la probeta templada en agua a 60 °C fluyendo a velocidades de: a) 0.2 m/s y b) 0.6 m/s. Las imágenes corresponden a 0.1 s después del temple.

En la Figura 2.14 se observa que la presión estática es mayor en el punto B que en el punto A, lo que produce un retorno de flujo dentro de la capa límite (Figura 2.15). Por lo tanto, la esquina de la probeta hace que haya un cambio de dirección en el fluido, lo que promueve la separación de la capa límite. Cuando el fluido tiene una velocidad de 0.6 m/s, el gradiente de presión se incrementa significativamente (Figura 2.14 b) y el vapor encuentra las condiciones necesarias para expandirse.



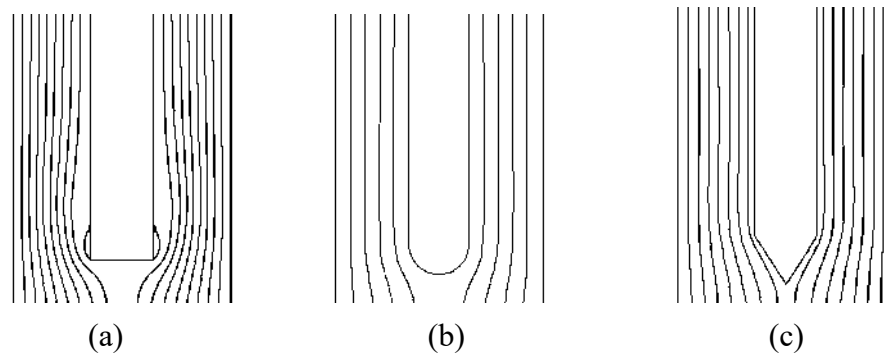
**Figura 2.15.-** Campo de velocidades alrededor de la probeta templada en agua a 60 °C fluyendo a velocidades de: a) 0.2 m/s y b) 0.6 m/s. Note la separación de la capa límite y el retorno de flujo. Las imágenes corresponden a 0.1 s después del temple.

La Figura 2.16 muestra el campo de vorticidades cerca de la base de la probeta, El gradiente de vorticidades es grande y se expande más cuando se incrementa la velocidad del fluido.



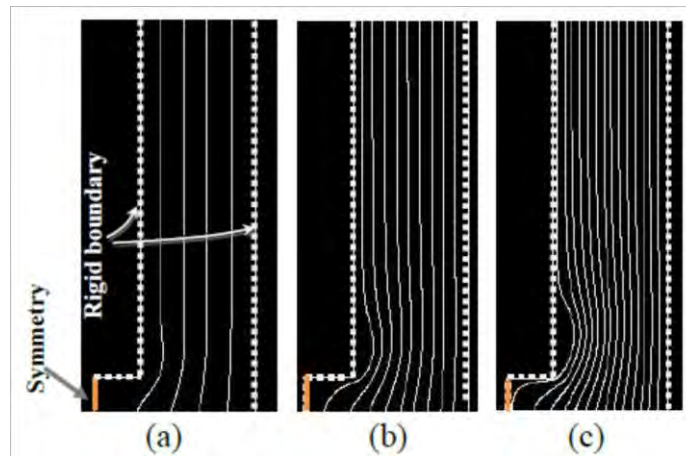
**Figura 2.16.-** Contorno de vorticidades (1/s) alrededor de la probeta templada en agua a 60 °C fluyendo a velocidades de: a) 0.2 m/s y b) 0.6 m/s. Las imágenes corresponden a 0.1 s después del temple.

Hernández Morales *et al.* [37] utilizaron el modelo de turbulencia  $\kappa-\varepsilon$  para simular las líneas de corriente alrededor de probetas cilíndricas con 3 diferentes geometrías en la base. Compararon las imágenes obtenidas mediante la experimentación y el modelo de turbulencia  $\kappa-\varepsilon$ . Concluyeron que la experimentación validó el modelo  $\kappa-\varepsilon$  (Figura 2.17).



**Figura 2.17.-** Líneas de corriente después de 2 s de simulación, para agua fluyendo 0.6 m/s: (a) probeta plana, (b) probeta semicircular, y (c) probeta cónica.

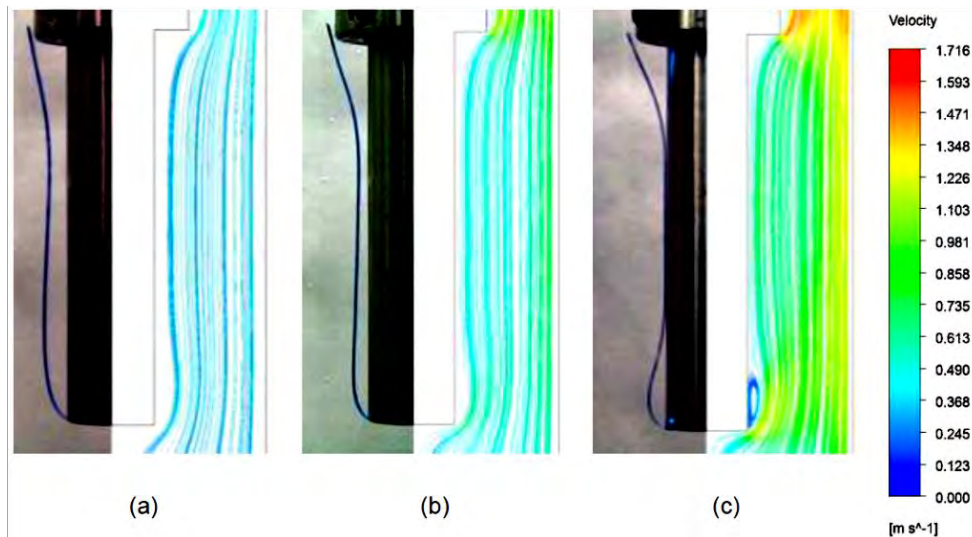
En otro de sus artículos Hernández-Morales *et al.* [38] también muestran líneas de corriente estudiadas matemáticamente (0.20 m/s, 0.40 m/s and 0.60 m/s). En donde se muestra que las líneas son casi paralelas a la superficie de la probeta a 0.2 m/s, a 0.4 m/s muestra que las líneas de corriente se despegan de la probeta cerca de la esquina y forman un ángulo de 45 ° con respecto a la vertical lo que evidencia un salto de velocidad en esa zona y a 0.6 m/s las líneas de corriente están más distorsionadas y el salto de velocidad es mayor, lo que hace evidente que la línea de corriente coincida con la base de la probeta lo que indica un gradiente de velocidad severo (Figura 2.18).



**Figura 2.18.-** Líneas de corriente después de 2 s de simulación, para agua fluyendo: (a) 0.2 m/s, (b) 0.4 m/s, y (c) 0.6 m/s.

También Cruces-Reséndez [39] en su tesis de licenciatura para estudiar con mayor detalle el comportamiento de la capa límite en la base de las probetas, recurrió al uso de la simulación matemática basada en *CFD*. La validación del modelo matemático se realizó comparando el comportamiento de las líneas de corriente computadas con la geometría de la cinta observada en el experimento realizado en el modelo físico a las condiciones correspondientes. Para ello se presenta una serie de imágenes compuestas, separadas por el eje de simetría. En un lado de cada una de ellas se muestra el mapa de líneas de corriente computado y en el otro se presenta la imagen de la cinta de celofán. En la Figura 2.19 se muestran imágenes computadas y observadas para la probeta de base plana. Comparando la respuesta de la cinta de celofán con las líneas de corriente del modelo matemático se aprecia un comportamiento muy similar para las tres velocidades estudiadas. En la Figura 2.19 (a) se

observa que a pesar del cambio brusco de dirección en la base de la probeta, las líneas de corriente que representan la dinámica del fluido, no se distorsionan significativamente.



**Figura 2.19.-** Líneas de corriente computadas alrededor de una probeta de base plana colocada dentro de un ducto en el cual circula agua a 60°C a: (a) 0.20 m/s, (b) 0.4 m/s y (c) 0.6 m/s. Del lado izquierdo se muestra la imagen correspondiente al listón de celofán.

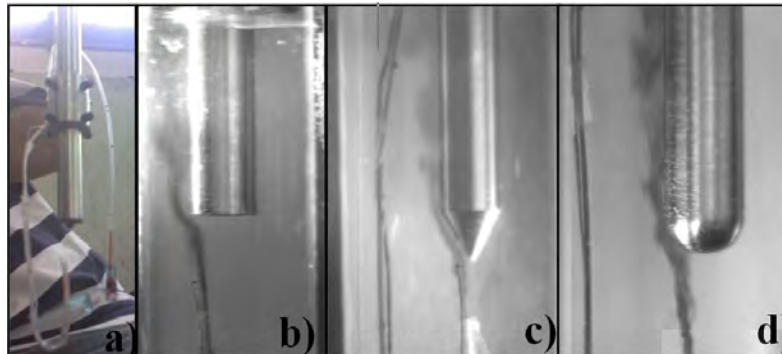
Para la velocidad de 0.6 m/s, Figura 2.19 (c) las líneas de corriente muestran una mayor distorsión del flujo cerca del vértice de la base. Además se observa que un aumento en la velocidad, desplaza las líneas de corriente hacia la superficie de la probeta. Este efecto se traduce en un aumento considerable del gradiente de velocidad en este punto, mismo que se aprecia claramente con la diferencia de colores en la simulación.

### 2.5.3. - Estudios de Cervantes-García *et al.*

Para tratar de visualizar las líneas de flujo y recirculación de flujo Cervantes-García *et al.* [9] realizaron algunas pruebas en estado isotérmico. Utilizaron una manguera de las que comúnmente se utilizan para transfusión de sangre, ésta manguera se adhirió en un alambre delgado para darle soporte a la manguera y se dobló en forma de U. Posteriormente se montó en la probeta la cual ya se encontraba montada en el cople (Figura 2.20 a). La manguera conectó a una jeringa que contenía colorante vegetal rojo el cual se utilizó como trazador. Una vez estando la probeta en la posición de trabajo se inyectó el colorante y se comenzó a grabar con la cámara de alta velocidad a 125 fps y resolución de 512x480, 60 lt/

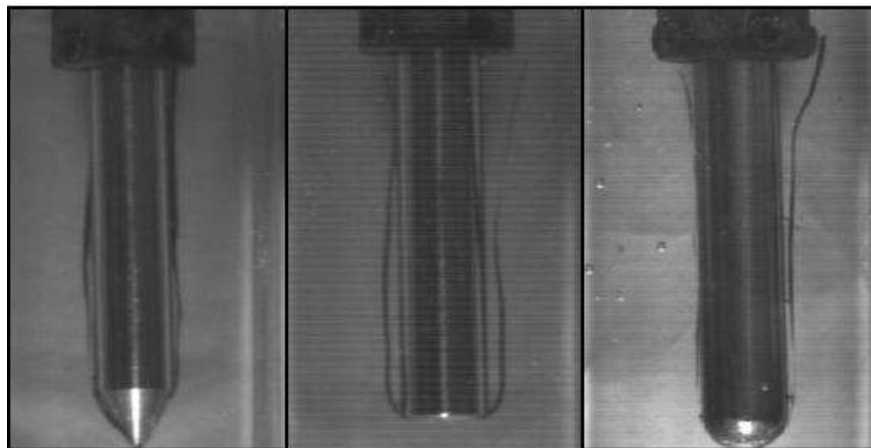


min y agua a temperatura ambiente. La Figura (2.20 b, c y d) muestra las líneas de corriente de las probetas.



**Figura 2.20.-**a) inyector del colorante, b) probeta plana, b) cónica, c) semicircular. [9]

Otra forma que ideó para visualizar las líneas de corriente fue utilizando unos hilos (papel celofán) en la parte de abajo de la probeta. Las condiciones del agua fueron a 60 °C y un flujo de 20, 40 y 60 L/min (en la Figura 2.21 se muestra la condición de 20 L/min). La grabación de estos videos se realizó a 125 fps y una resolución de 512x480. En éstas se observó de manera cualitativa cómo se comporta el flujo, se puede observar que los hilos se adhieren mejor a la superficie en los cuerpos aerodinámicos (probeta cilíndrica y semicircular) que en los cuerpos romos (probeta plana).



**Figura 2.21.-**Pruebas con papel celofán a 20 L/min. [9]

También realizó una prueba que consistió en mantener la probeta en la posición de trabajo y posteriormente encender la bomba a 60 lt/ min y temperatura ambiente (Figura 2.22).

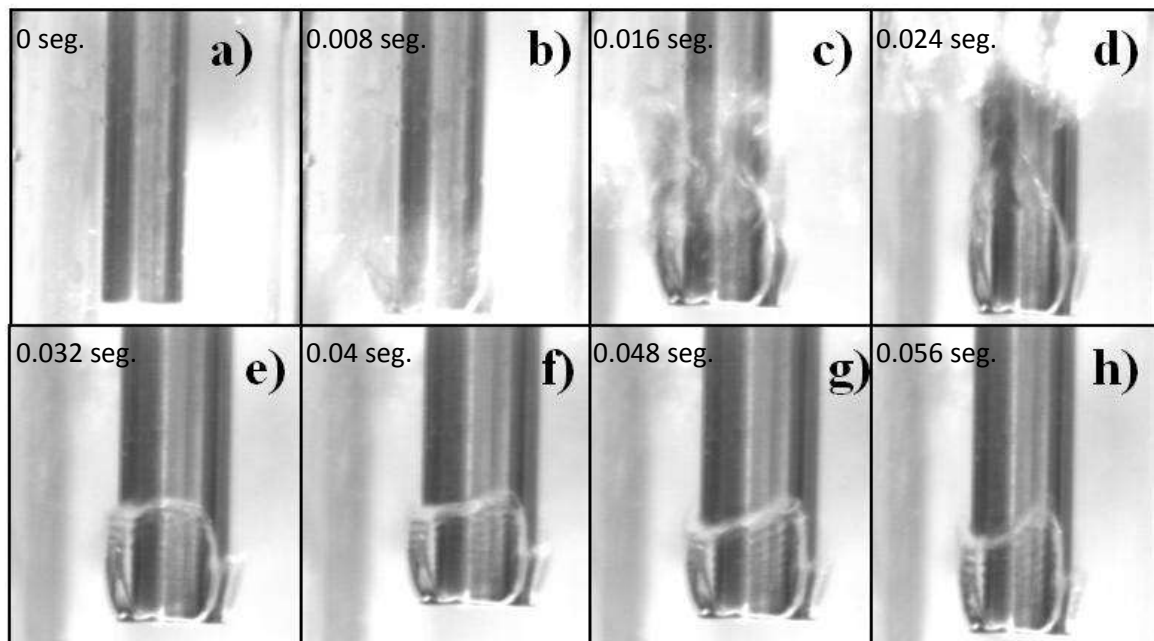


Figura 2.22.-Aire atrapado en la base de la probeta plana [9].

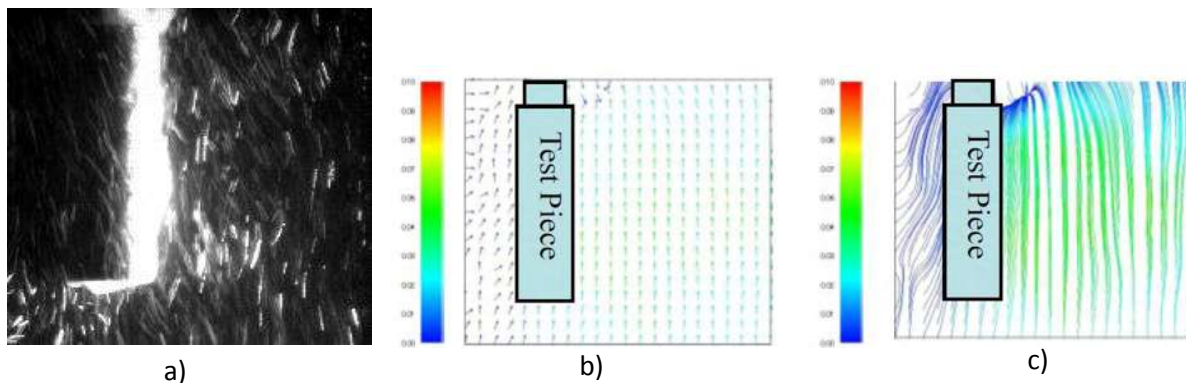
A pesar de que el fluido circula dentro del ducto a una velocidad de 0.6 m/s, el aire que choca contra la cara plana de la probeta no es arrastrado por la corriente debido a que se encuentra atrapado, en lo que parece ser un flujo re-circulatorio al interior de las líneas de corriente que se separan cerca de la base de la probeta cilíndrica (ver imágenes mostradas en la Figura 2.22). El comportamiento del aire en la base de la cara plana refuerza la evidencia de la separación de la capa límite. La prueba de la Figura 2.22 se grabó a 125 fps y una resolución de 512x 480. En la Figura 2.22 c) y d) se muestra que la probeta no es mojada instantáneamente. Puede verse también en las imágenes 2.22 e)-h) queda atrapada una burbuja de aire, en la cual se observan unas ondulaciones alrededor.

## 2.6.- Estudio de fenómenos de ebullición e hidrodinámica mediante la técnica PIV realizado por Dong-Ying Ju *et al.*

Muchos trabajos se han reportado para visualizar el frente de mojado sin considerar los efectos de dinámica de fluidos alrededor de la probeta experimental. Los trabajos

mencionados anteriormente solo analizaban la dinámica de fluidos alrededor de la probeta en estado isotérmico. El primer trabajo (en estado no-isotérmico) donde se estudian los fenómenos de ebullición y su conexión con el flujo de fluidos utilizando herramientas de PIV lo realizaron Dong-Ying Ju *et al.* [40-44].

En la Figura 2.23 a) se presenta el fenómeno de ebullición en la probeta caliente y la visualización del flujo con la técnica de PIV reportada por Dong-Ying Ju, en esta imagen no se observa que se esté enfocando el plano central de simetría de la probeta ya que no se deberían observar partículas del lado izquierdo sobre la probeta. En la Figura 2.23 b) se pueden ver los vectores de velocidad calculados a partir de las partículas trazadoras utilizando el método estadístico de correlaciones cruzadas. En la Figura 2.23 c) se muestra las líneas de corriente alrededor de la probeta cilíndrica de cara plana a alta temperatura (850°C). Sus resultados lo llevaron a concluir que para que las piezas metálicas tengan un enfriamiento más homogéneo el flujo debe ser laminar. En la Figura 2.23b y c se observa que trabajo a velocidades del fluido de aproximadamente 0.1 m/s



**Figura 2.23.-** Fenómeno de ebullición en una probeta caliente y visualización del flujo con la técnica de PIV reportada por Dong-Ying Yu *et al.*

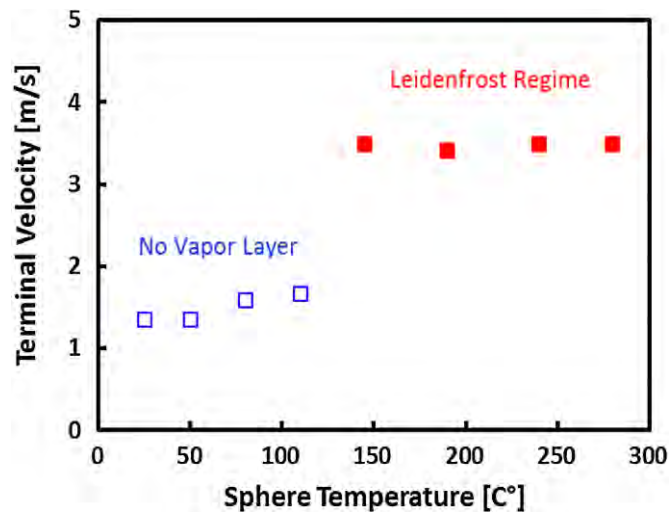
Los resultados de las líneas de corriente alrededor de la probeta metálica reportados por el Dong-Ying Ju *et al.* dejan mucho que desear si se les compara con las imágenes mostradas más adelante como resultado de nuestra experimentación.

Bergen *et al.* [45] en el templado de sus piezas obtenía una distorsión excesiva, la solución que tuvo para disminuir la distorsión fue disminuir el flujo. Con esto reafirmó el trabajo

realizado por Dong-Ying Ju [40-44], que para que haya un enfriamiento homogéneo el flujo debe haber un flujo laminar interactuando con las capa de vapor de lar probetas templadas.

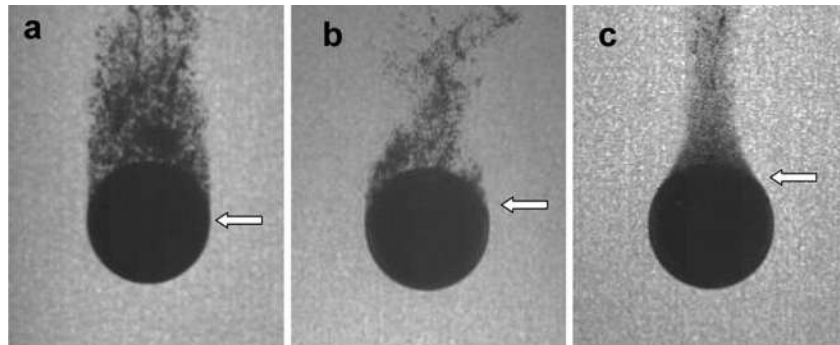
## 2.7.- Estudio de reducción de arrastre por capa de vapor realizado por Vakarelski *et al.*

En la Figura 2.24 se muestra la dependencia de la velocidad terminal de una esfera de acero de 20 mm de diámetro con temperaturas de esfera en el rango:  $25\text{ }^{\circ}\text{C} < T_s < 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ , los datos demuestran claramente el efecto dramático debido al inicio del régimen de Leidenfrost [46]. Un aumento inicial en la temperatura de la esfera de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  da lugar a un aumento moderado de la velocidad terminal de aproximadamente el 20% en el intervalo de  $1.3\text{ m/s}$  a  $1.6\text{ m/s}$ . Tales variaciones podrían ser debidas a un cambio en la viscosidad inducido por calor del fluido circundante y la cobertura parcial de la esfera con burbujas cuando la temperatura de la esfera está por encima del punto de ebullición del fluido. Sin embargo, cuando la temperatura de la esfera excede la temperatura de Leidenfrost,  $T_L = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se observa un aumento de la velocidad terminal en un factor de 2.6 a un valor casi constante de aproximadamente  $3.5\text{ m/s}$  sobre el rango de temperatura examinado ( $140\text{ }^{\circ}\text{C} < T_s < 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



**Figura 2.24.** – Variación de la velocidad terminal con la temperatura de la esfera medida para una esfera de acero de 20 mm que cae a través del líquido. Los cuadros azules muestran temperaturas abajo del punto de Leidenfrost y los rojos arriba del punto de Leidenfrost.

Por lo tanto, la presencia de la capa de vapor Leidenfrost debe haber modificado la forma de arrastre en la esfera y los efectos de la fricción de la superficie sigue siendo pequeño. De hecho, esto puede demostrarse comparando las imágenes, adquiridas con la cámara de alta velocidad, de las esferas cayendo con velocidad terminal a temperaturas justo debajo (Figura 2.25 a) o por encima de la temperatura de Leidenfrost en el caso de una reducción de arrastre totalmente desarrollado (2.25 c). Lo que demuestra que a medida cuando hay capa de vapor se reduce la fuerza de arrastre de la esfera, aumentando la velocidad terminal de esta (Figura 2.24). La velocidad terminal de la esfera con una temperatura de 110 °C de la Figura 2.25 a) es de 1.7 m/s y la velocidad terminal de la esfera con una temperatura de 200 °C de la Figura 2.25 c) es de 3.6 m/s.



**Figura 2.25.** – Variación de la velocidad terminal con la temperatura de la esfera medida para una esfera de acero de 20 mm que cae a través del líquido. A medida que se aumenta la temperatura de la esfera, disminuye la fuerza de arrastre y aumenta la velocidad terminal. También se observa que a temperaturas arriba del punto de Leidenfrost disminuye el desprendimiento de la capa límite.

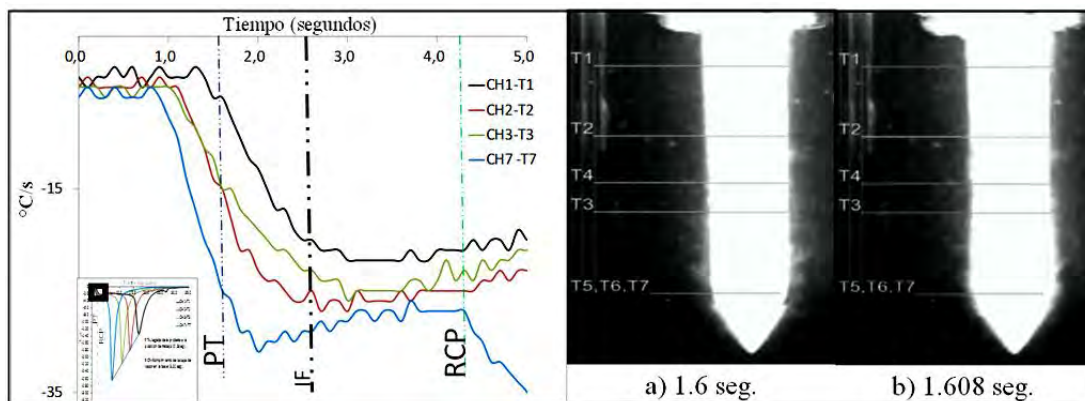
## 2.8.- Trabajos relacionados con la entrada de líquido a la capa de vapor.

La mayoría de los investigadores [47] han postulado que la capa de vapor formada en la interface sólido-fluido es laminar a lo largo de la superficie y presenta un pequeño espesor. Bradfield [48] al igual que Cumo, Ferello y Ferrari [49] mostraron que posiblemente hay entrada de líquido intermitentemente a la capa de vapor en la interface líquido-vapor. También supusieron que la entrada de líquido a la capa de vapor disminuye cuando se incrementa la diferencia de temperatura entre la superficie caliente y el medio de enfriamiento. Por lo que este fenómeno de entrada de líquido intermitente podría tener

mayor importancia sólo con diferencias de temperaturas pequeñas entre la superficie y el fluido.

Bradfield [48] reportó que el contacto intermitente entre el sólido y el líquido cuando se tiene capa de vapor se incrementa con la rugosidad del sólido, mojabilidad y porosidad del sólido. Presumiblemente este contacto entre el sólido y el líquido precede a la transición del punto de Leidenfrost. Este contacto intermitente que se podría dar con la entrada de líquido a la capa de vapor podrían ser las fluctuaciones captadas por los termopares en el interior del sólido, en los resultados obtenidos por el Cervantes-García [9] y se muestra en la Figura 2.26. Este contacto intermitente podría relacionarse con las fluctuaciones de las curvas de rapidez de enfriamiento y se pueden apreciar mejor a partir de los 2 seg.

El fenómeno de entrada de gotas de líquido en la capa de vapor toma una gran relevancia, ya que teniendo un claro entendimiento de los mecanismos de transferencia de masa, cantidad de movimiento y energía, se pueden mejorar los equipos o sistemas en los que sucede dicho fenómeno.



**Figura 2.26.-** Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta cónica con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: 0.2 m/s. a) instante antes de la explosión de la capa de vapor y b) explosión de la capa de vapor.[9]

Hsu y Westwater [50,51] notaron la presencia de un perfil de onda en la capa de vapor, lo cual invalidó la teoría de flujo laminar en la capa de vapor. Observaron que con el inicio de la onda en capa de vapor el perfil laminar no se mantenía. Ellos propusieron un modelo que supone el inicio de una capa turbulenta en base a un número de Reynolds crítico. El flujo de

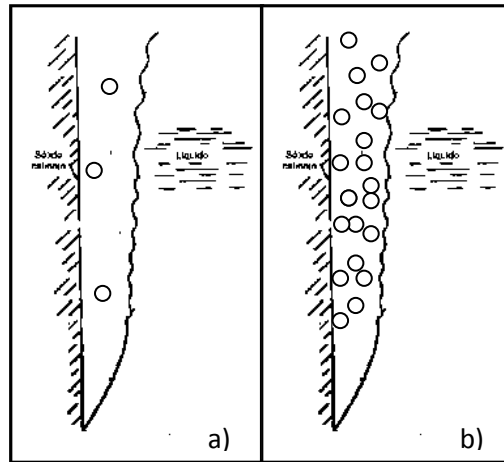
vapor se supone como una subcapa laminar con un corazón turbulento. Dougall y Rohsenow [52] incluyeron el estudio de la resistencia en la interface liquido-vapor y consideraron esta interface como una región turbulenta. Sus resultados mostraron tener un coeficiente de transferencia de calor 100 % mayor que el de Bromley y 50 % más pequeño que los reportados por Hsu y Westwater [50]. Morgan [53] trató la capa turbulenta suponiendo un perfil de velocidad y temperatura. Greitzer [54] decidió estudiar experimentalmente el flujo en un canal ondulado, encontró el mismo perfil en la interface liquido-vapor que el observado por Hsu [50]. Encontró que la onda en la cresta de la capa de vapor se presenta un gran remolino, mientras que un flujo laminar fue observado en una delgada capa de vapor adyacente a la pared con un espesor similar al presentado en el valle de la onda. Concluyó que las ondas que aparecen podría ser un factor importante en el análisis de la interface liquido-vapor.

Simon y Simoneau [55,56] también estudiaron la interface vapor-líquido utilizando una cámara de alta velocidad y midieron los máximos y mínimos espesores de capa de vapor, también observaron una onda, con lo que confirmaron los estudios de investigadores como Hsu [50].

Coury [57] observó una significativa cantidad de fluctuaciones en el termopar, con lo que también supuso que había entrada de líquido en la capa de vapor. Sus observaciones lo llevaron a concluir que cuando la amplitud de onda es grande podría haber rompimiento de la capa de vapor y contacto ocasional del líquido con la superficie caliente.

Las interfaces sólido-capas de vapor y líquido-capas de vapor se pueden estudiar de dos formas [58]:

- 1) La primera es que en la capa de vapor haya entrada ocasional de gotas líquido, esto puede ser llamado ebullición de película, Figura 2.27 a).
- 2) La segunda es que haya una mayor entrada de gotas de líquido en la capa de vapor y se forme una matriz vapor-gotas de líquido. Figura 2.27 b).



**Figura 2.27.**-a) Ebullición en película con entrada ocasional del líquido a vapor y b) Mayor entrada de gotas en la capa de vapor.

En todas las investigaciones anteriores, solo se observan dibujos o bosquejos donde se observa la entrada de líquido en la capa de vapor y el rompimiento de esta, pero no se ha encontrado evidencia física (imágenes reales) que soporte las teorías de los investigadores.

## **2.9.- Mecanismos de transferencia de calor en capa de vapor.**

La mayoría de las investigaciones actuales en el tema de transferencia de calor en la capa de vapor ocurre principalmente por radiación a través de la capa de vapor y que la transferencia de calor también se da por conducción a través de la capa de vapor. Por ejemplo Bergles *et al.* [59], Krishname *et al.* [60], Scott *et al.* [61] M. Narazaki and G.E. Totten [62] afirman que la transferencia de calor en la capa de vapor se da principalmente por radiación y conducción a través de la capa de vapor.

Los investigadores mencionados anteriormente hablaban de una posible entrada de líquido a la capa de vapor, asociaban esta posible entrada con un perfil de onda en la capa de vapor y fluctuaciones en el termopar durante la adquisición de historias térmicas, concluyendo que cuando la onda es grande podría haber rompimiento de la capa de vapor y contacto ocasional del líquido con la superficie caliente.

Como se verá más adelante en la sección 4.5 existe otro mecanismo de transferencia de calor en la capa de vapor.



## **2.10.- Dificultades en el estudio óptico en capa de vapor.**

El estudio de los fenómenos de ebullición mediante la utilización de medios ópticos es complejo debido a que el cambio de temperatura en la superficie de las probetas genera diferentes índices de refracción y por lo tanto información óptica principalmente en distorsión de imagen que debe ser evaluada minuciosamente. Los estudios ópticos proporcionan información valiosa sobre los complejos mecanismos de la transferencia de calor por ebullición, pero los grandes gradientes de temperatura (y por lo tanto del índice de refracción) desvían la luz y las múltiples reflexiones en las interfaces limitan la distancia sobre la cual se pueden hacer observaciones [63]. Las características de ebullición que hacen que los métodos ópticos sean atractivos también causan dificultades en su aplicación. La ebullición se acompaña de flujos de calor alto en los límites, causando grandes gradientes de índice de refracción en el líquido que desvían los rayos de luz, que también son absorbidos por el líquido y refractados y reflejados en las muchas interfaces líquido-vapor.

Una dificultad práctica en el estudio de capa de vapor y dinámica de fluidos es que el cerebro humano puede a menudo observar eventos de imágenes en movimiento que son difíciles de demostrar de manera convincente en una secuencia de imágenes fijas impresas. Todos los experimentos de ebullición con mediciones ópticas son difíciles de realizar. El tiempo y financiamiento pueden agotarse antes de que una técnica haya sido completamente desarrollada o explotada, limitando la gama de datos obtenidos.

## CAPÍTULO III.

### TRABAJO EXPERIMENTAL.

#### 3.1.- Sistema experimental.

Para la experimentación del enfriamiento de probetas metálicas con presencia de capa de vapor estable en la superficie y su grabación por video de alta velocidad, se construyó el sistema descrito por Vergara-Hernández *et al.* [31]. El sistema experimental fue rediseñado en este trabajo de tesis para acoplar un sistema de PIV y cámaras de alta velocidad. La relación L/D del tubo de acrílico garantiza la condición de flujo desarrollado para el rango de velocidades trabajado en esta tesis (0.2 m/s, 0.4 m/s y 0.6 m/s).

En la Figura 3.1 se muestra el dispositivo experimental utilizado, el cual consta de sistema de calentamiento de la probeta utilizada (este puede ser un horno de resistencias eléctricas tipo libro o un sistema de calentamiento interno por medio de resistencias eléctricas en el interior de la probeta) a una temperatura de 915 °C sin atmósfera protectora. La probeta es transportada a velocidad constante (170 mm/s) por un cabezal movido por un servomotor (marca Power drive de ½ hp) introducida en forma concéntrica al interior de un tubo de acrílico de 44 mm diámetro interior y 1700 mm largo, en donde hay agua a 60°C fluyendo. Una vez que la probeta está en el interior del tubo de acrílico donde se hacen grabaciones con una cámara de alta velocidad. El agua es el medio de enfriamiento utilizado en este trabajo su ciclo comienza en el depósito de 200 L (para el ahorro de agua se llena únicamente con 60 litros y se recircula en el sistema para utilizar menos energía en el calentamiento del fluido), posteriormente es bombeada (bomba hidráulica de 1.5 hp) y el flujo es regulado por un rotámetro ( marca Blue-White Industries, de la serie F420 con un rango de medida de 30 a 150 L/min), finalmente el agua entra por la parte inferior del tubo de acrílico e impacta con la probeta cilíndrica plana enfriando por convección forzada a ésta (Figura 3.2). Finalmente el agua es recirculada hacia el depósito. Una serie de tres resistencias de 127 V de alimentación y potencia de 1500 W cada una para calentamiento del agua del depósito, acumulando una potencia de 4500 W. Con estas resistencias se calienta el agua a 60°C.

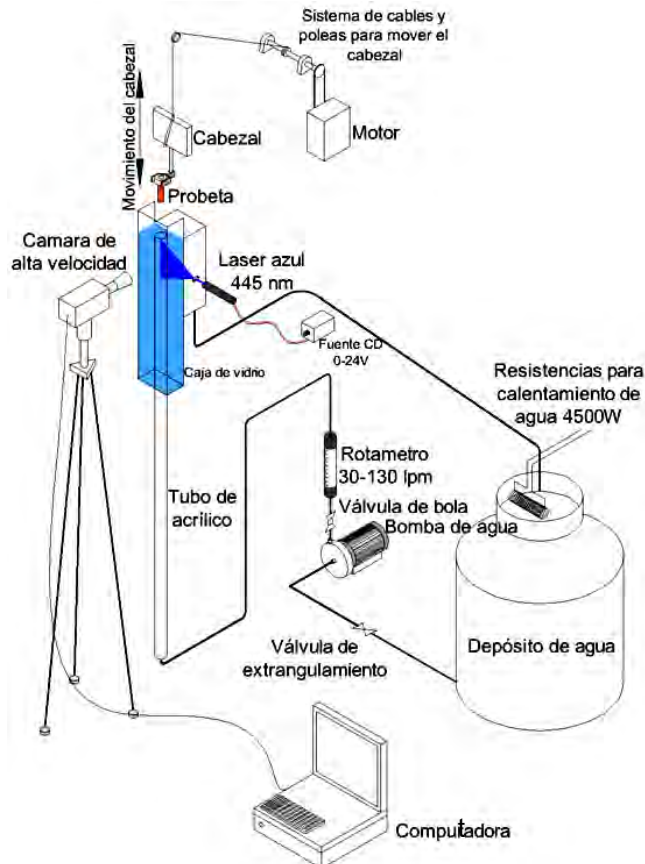


Figura 3.1.- Sistema experimental.

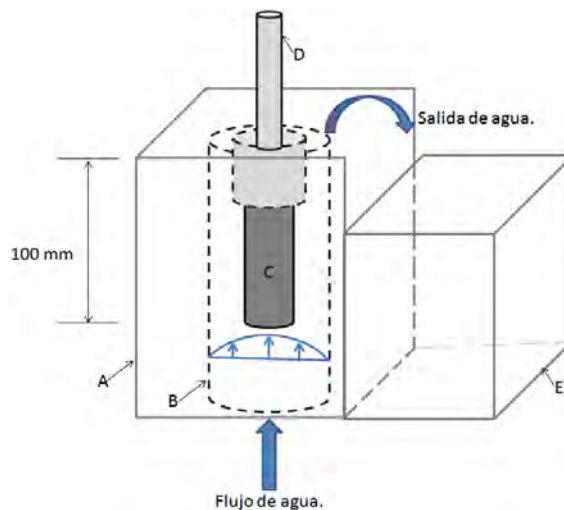


Figura 3.2.- Detalle de la zona de grabación de la probeta, A) caja de vidrio llena con agua para evitar distorsión de las imágenes, B) tubo de acrílico, C) probeta, D) lanza del porta probetas, E) caja de recirculación del agua.

La zona de grabación (Figura 3.2) de la probeta (C) cuando está siendo enfriada por el mecanismo de transferencia de calor de convección forzada está a una altura que asegura un flujo de agua totalmente desarrollado. Por el tubo de acrílico (B) circula agua en dirección contraria a la fuerza de gravedad, la cual es recirculada mediante la caja de recirculación (E) pasando por una tubería de retorno hacia el depósito. Alrededor del tubo de acrílico se dispuso una caja de vidrio (A) la cual se llena con agua, lo que disminuye la distorsión en las imágenes grabadas que causa la geometría del tubo.

Tres velocidades de corriente libre de agua fueron utilizadas: 0.2 m/s y 0.4 m/s y 0.6 m/s y la temperatura es de 60 °C. La temperatura del agua de 60 °C es debido a que en esta investigación se estudia la capa de vapor y se tiene evidencia de que cuando se aumenta la temperatura del agua la duración de la capa de vapor incrementa lo que da un mayor tiempo de duración de ésta para analizarla.

Cabe señalar que también se hicieron pruebas en estado isotérmico (es decir con la probeta sin calentarla) y también se utilizaron tres velocidades de corriente libre de agua: 0.2 m/s y 0.4m/s y 0.6 m/s y la temperatura es de 60 °C. Esto con el objetivo de observar los patrones de flujo del fluido en la probeta en estado isotérmico y compararlos con los patrones de flujo del fluido en la probeta en estado no-isotérmico.

El sistema experimental tiene un tubo de acrílico (diámetro 44 mm) para poder video grabar los fenómenos de ebullición que ocurren en las superficie metálica de las probetas durante los distintos experimentos. La longitud del tubo debe ser la correspondiente a la relación L/D que garantice flujo desarrollado (se estima una longitud de 1.7 metros).

La Figura 3.3 muestra la modificación de la zona de salida de flujo. La caja de acrílico en la salida del flujo (Figura 3.3 a) se quitó debido a que cuando aumenta la altura del agua, también aumenta la presión hidrostática y por lo que se tiene dispersión en los resultados, de la etapas, capa de vapor de ebullición nucleada, convección forzada y el avance del frente de mojado principalmente. En la Figura 3.3 b) se muestra la modificación realizada tipo vertedero (ver también la Figura 3.2).

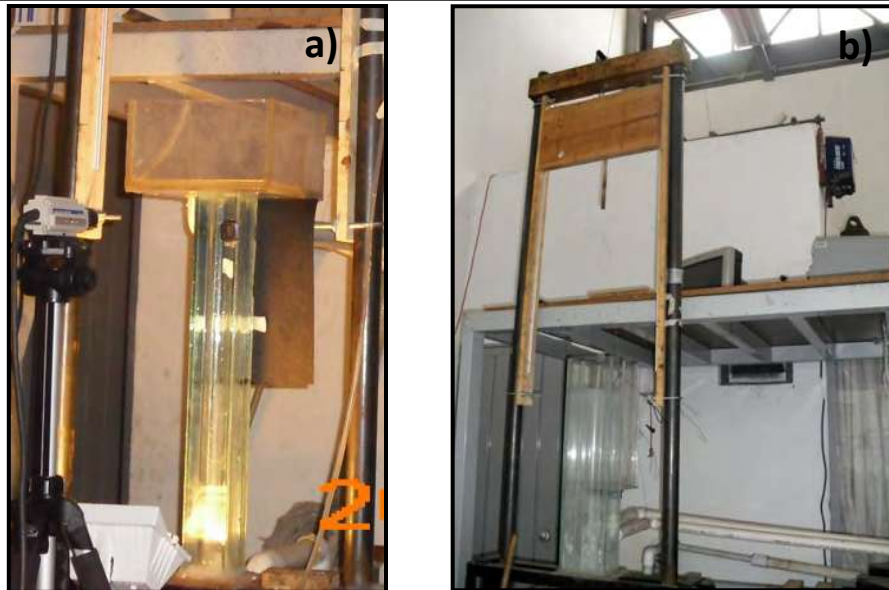


Figura 3.3.- a) Caja de acrílico utilizada anteriormente, b) Modificación.

### 3.2.- Probetas utilizadas.

Para el análisis de la capa de vapor se utilizaron dos tipos de probetas:

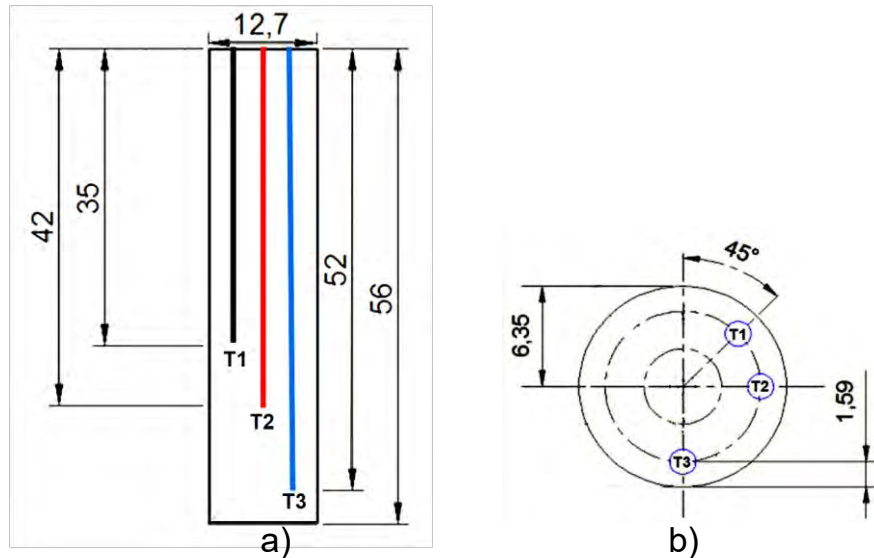
#### 3.2.1.-Probeta instrumentada con termopares.

La primera es una probeta cilíndrica de acero inoxidable AISI 304 de 12.7 mm de diámetro y 56 mm de altura (**Probeta A**) con terminación plana. La elección del material de la probeta se debe a que este tiene la propiedad de no presentar transformaciones de fase cuando se eleva a la temperatura de 915°C, por lo tanto, se evita que haya cambios de volumen en la probeta.

La probeta se calienta en un horno de resistencias tipo libro, para monitorear la temperatura en el interior de la probeta se insertan tres termopares tipo K a distancias longitudinales de: 35, 42 y 52 milímetros y distancia radial de 1.59 mm como se muestra en la Figura 3.4.

El calentamiento de la probeta en el horno se finaliza en el momento que el promedio de las temperaturas registradas por los siete termopares es de 915°C, esto debido a que la conductividad térmica de este acero es muy pequeña y se pretende que la temperatura de calentamiento de la probeta sea lo más uniforme posible. La probeta a una temperatura de

900°C entra al contacto con el medio de enfriamiento, el cual ha sido previamente calentado a una temperatura 60°C. Los termopares se colocaron cerca de la superficie lateral de la probeta para poder relacionar los datos adquiridos con los fenómenos de ebullición captados con la cámara de alta velocidad.



**Figura 3.4.-** Probeta de acero inoxidable AISI 304 con disposición de termopares (Probeta A). a) vista superior y b) vista lateral. Dimensiones en milímetros.

Con esta probeta (**Probeta A**) se realizaron pruebas para ver el tiempo de duración de capa de vapor en la probeta durante el enfriamiento por convección forzada. Las velocidades utilizadas son de 0.2, 0.4 y 0.6 m/s, mientras las temperaturas del agua son de 30, 45 y 60 °C respectivamente. La tabla 3.1 muestra claramente que al ir aumentando la temperatura del agua aumenta el tiempo de duración de la capa de vapor. Por esta razón se eligió trabajar con agua a una temperatura de 60 °C. Fue la temperatura óptima, ya que a mayores temperaturas se generan burbujas de vapor las cuales afectan la estabilidad de los fenómenos de ebullición.

**Tabla 3.1.-** Duración de la capa de vapor a diferentes temperaturas de agua (Probeta A).

	Agua a 30 °C	Agua a 45 °C	Agua a 60 °C
Velocidad(m/s)	Duración de la capa de vapor (seg.)		
0.2	1.81	4.21	5.75
0.4	1.34	1.87	4.93
0.6	0.2	0.3	3.98

### 3.2.2.-Probeta con generación de calor interior.

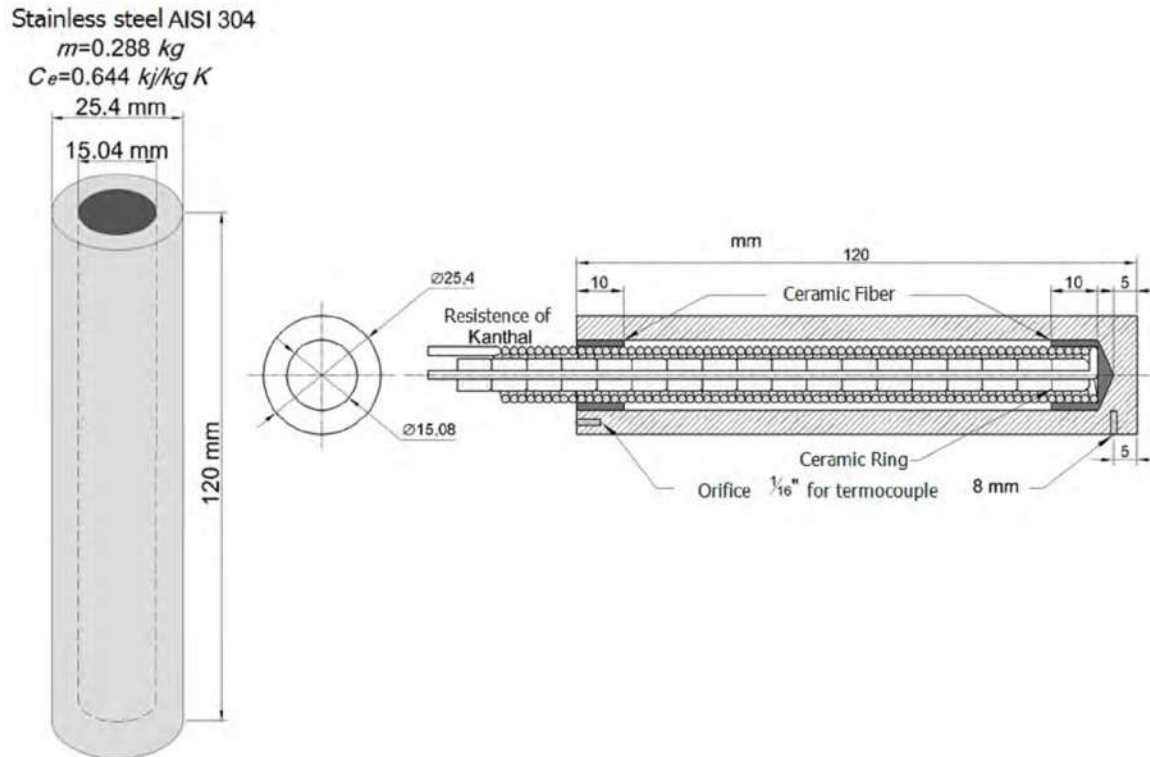
La incandescencia que despiden la probeta a 900 °C durante el proceso de temple, no permite visualizar de una manera clara la formación y el comportamiento de la capa de vapor, y si a esto agregamos que el tiempo en el que se presentan los fenómenos de ebullición es muy pequeño, resulta complicado lograr imágenes de calidad que nos permita analizar la capa de vapor y los fenómenos de ebullición. Para aumentar el tiempo de duración y perfeccionar la visualización de la capa de vapor se diseñó y construyó una segunda probeta metálica de material AISI 304 con generación de calor al interior del sólido (**Probeta B**). La generación de calor se logró a través del calentamiento eléctrico de resistencias. Las resistencias colocadas en el interior del sólido permitieron mantener una capa de vapor por un largo tiempo, lo cual permitió una mejor caracterización del fenómeno.

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), ver tabla 3.2. La resistencia eléctrica con forma de bobina fue fabricada con una herramienta especial para obtener la configuración que muestra la Figura 3.5. Es importante que las espiras de la bobina sean homogéneas para evitar la generación de puntos calientes.

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). La probeta experimental con generación de calor necesita ser alimentada con una corriente de 17 Amperes por medio de una fuente de potencia de 433 Watts.

**Tabla 3.2.-** Propiedades físicas material Kanthal A-1.

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



**Figura 3.5.-** Probeta de acero inoxidable AISI 304 con generación de calor interno (Probeta B).

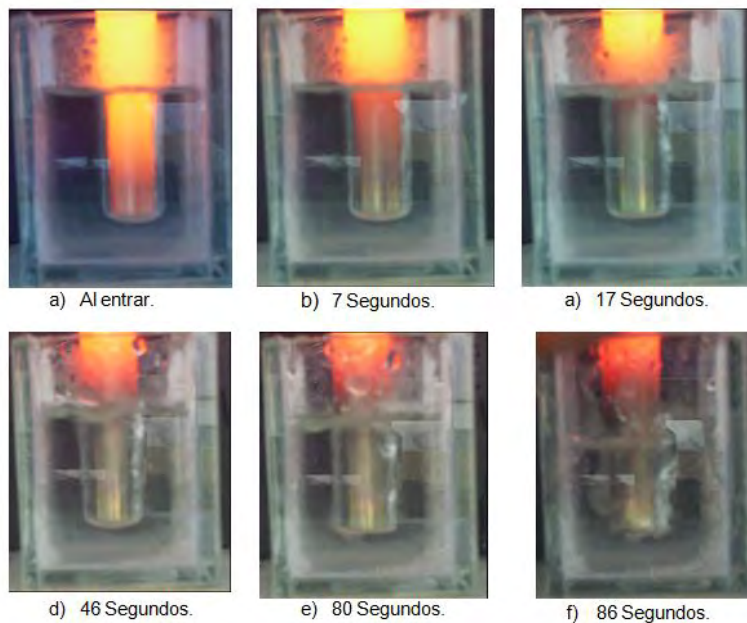
La Figura 3.6 muestra la de la bobina de la resistencia, teniendo una distribución uniforme de bobina, y con esto la eliminación de puntos calientes, mejorando la homogenización de la temperatura en la funda del cartucho). Para la realización de cada una de estas primeras pruebas en probetas cilíndricas se aseguró que la probeta de acero inoxidable AISI 304 estuviera bien pulida, una vez realizado esto, se introducen perlas de alúmina a la probeta con el fin de evitar el contacto de la resistencia con las paredes de la bobina. Se recubren los extremos de la bobina con lana aislante a base de alúmina para evitar contacto con la pared interior de la probeta y se verifica que no haya continuidad del kantal con la probeta de acero utilizando un multímetro. Con esto ya se está en condiciones para la realización de las pruebas. La probeta se conecta a las terminales una planta de soldar y comienza el calentamiento de las probetas. También se asegura que el agua este a la temperatura con la que se desea trabajar. Por último se sumerge la probeta dentro del medio de temple





**Figura 3.6.-** a) mejora en la calidad del embobinado, b) aislamiento eléctrico solo en los extremos de la bobina, c) funda con resistencia aislada.

Para medir los tiempos de duración de la capa de vapor en agua estancada se procedió a un calentamiento de la probeta a  $915^{\circ}\text{C}$ , posteriormente, se sumergió en un recipiente con agua estancada a  $60^{\circ}\text{C}$ . El tiempo de duración experimental de la capa de vapor fue de 86 segundos (Figura 3.7).



**Figura 3.7.-** Prueba en baño quieto que duró 86 segundos.

La Figura 3.8 muestra una prueba con un flujo de agua de 30 litros por minuto y agua a 60°C (enfriamiento por convección forzada) se obtuvieron tiempos de permanencia de capa de vapor de 30 segundos), corroborando con estos experimentos que con esta probeta se incrementa el tiempo de duración de la de capa de vapor para tener un mayor tiempo para analizarla.



**Figura 3.8.-** Pruebas en el sistema con la probeta a 900 °C, duración 30 segundos.

### 3.3.- Montaje de la probeta.

En la Figura 3.9 se muestra como se montó la probeta en el sistema experimental, se utilizó un sujetador con tornillo para ajustarlo al tubo y también se aisló la zona que esta alrededor de la probeta con lana a base de alúmina la cual se sujetó con una abrazadera la cual fue presionada por el sujetador con tornillo. Una vez montada la probeta en el sistema se procedió a alinear la entrada de la probeta en el sistema. Esto para tratar de tener una simetría en el flujo y las líneas de corriente.



**Figura 3.9.-** Montaje de la probeta.

Cuando ya se tuvo el sistema alineado se hicieron pruebas de calentamiento con la planta de soldar (Figura 3.10) se encontró que la corriente a la cual la probeta se calentaba de una forma más homogénea fue la de 17 A.



Figura 3.10.- Pruebas de calentamiento de la probeta en el sistema.

### 3.4.- Experimentación.

La experimentación se dividió en tres fases; la primera se utilizó como medio de iluminación una lámpara de 300 watts para iluminar la probeta A y se adquirieron imágenes con la cámara de alta velocidad e historias térmicas con el adquisidor de datos, en la segunda se iluminó la probeta B con un laser de 2 watts y se utilizó un filtro óptico de paso corto de 550 nm en el lente de la cámara de alta velocidad y en la tercera se utilizó un laser DualPower 30-1000 con salidas de energía de hasta 2 x 30 mJ y 20 kHz y un filtro óptico paso corto de 450 nm y la cámara de alta velocidad Speed Sense M Phantom Miro M-310 para iluminar y adquirir imágenes de la probeta A.

En la primera fase de experimentación se grabaron los fenómenos de ebullición y se adquirieron historias térmicas. Como fuente de iluminación se utilizó una lámpara de 300 watts (Figura 3.11), la cual se utilizó para iluminar la probeta A. Se grabaron imágenes con la cámara de alta velocidad (Photron, PCI R2), las imágenes fueron grabadas a 125 fps (con fondo negro) y una resolución de 512x480 pixeles para visualizar la capa de vapor, el lente que se utilizó fue el Navitar Zoom 7000 18-108 mm. F/2.5 1 MI C Format Macro Zoom.



**Figura 3.11.-** Sistema con iluminación de la cámara de 300 Watts.

Para la adquisición de los datos de los termopares insertados dentro de la probeta A (Figura 3.4) se utilizó una tarjeta de adquisición de datos TempScan/1100 de la marca Iotech. Este se conecta a la computadora mediante un cable al puerto serial (Figura 3.12). La frecuencia de adquisición de datos fue de 10 Hz para todas las pruebas en el software ChartView 1.02.

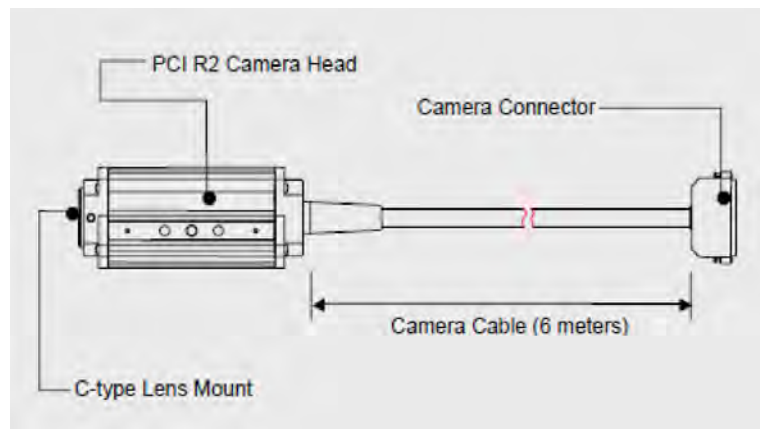


**Figura 3.12.-** Adquisidor de datos.

Se utilizó una cámara de alta velocidad monocromática de la marca Photron-Fastcam, modelo PCI-R2 CMOS, con las siguientes características (ver Figura 3.13):

- Resolución máxima 512x480 pixeles, para una velocidad de captura de 30 a 250 cuadros por segundo (fps, por sus siglas en ingles); para velocidades de captura mayores la resolución disminuye.
- Memoria de 512 MB de capacidad de almacenamiento.
- Frecuencia máxima de grabación de 1000 fps con una resolución de 256x240 pixeles; con esta resolución es posible grabar hasta 8.704 segundos reales.
- Montura tipo C para el lente de la cámara.
- Sensor tipo CMOS.
- Software para control de la cámara: Photron FASTCAM Viewer, version 2.4.5.1.

También se utilizó un lente de la marca Navitar Zoom modelo 7000 (ver Figura 3.14). Debido a que el sistema bajo estudio (capa de vapor) tiene dimensiones del orden de milímetros, fue necesario realizar acercamientos (zoom's) con el lente Navitar de hasta 10 mm x10 mm.



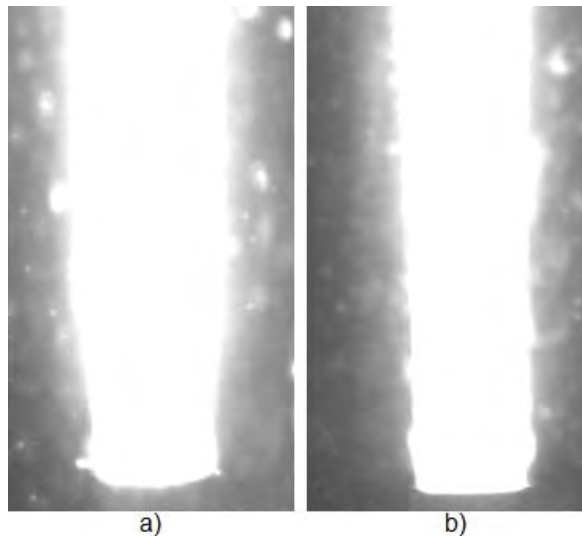
**Figura 3.13.-** Cámara de alta velocidad Photron-Fastcam-PCI-R2.

Con la iluminación de la lámpara de 300 watts, la cámara de alta velocidad (Photron, PCI R2) y el lente Navitar se realizaron algunas pruebas y la Figura 3.15 muestra que para cada una de las velocidades del agua, el vapor satura los pixeles de la cámara de alta velocidad, lo

que hace muy complicado el análisis de la capa de vapor, ya que el cambio del índice refracción producido entre el vapor de agua (1.000256) y el agua a 60 °C (1.32599) es grande y hay desviación de la luz de un medio a otro [64].



**Figura 3.14.-**Lente Navitar Zoom modelo 7000.



**Figura 3.15.-**Capa de vapor alrededor de una probeta hecha de acero inoxidable AISI 304 (Probeta A) sometida a enfriamiento por convección forzada a: a) 0.2 m/s y b) 0.4 m/s (fondo negro detrás de la probeta).

La temperatura de la pieza al entrar en contacto con el medio de enfriamiento, oscila entre 900-915 °C, por lo que la incandescencia que despiden la pieza no permite visualizar de una manera clara la formación y el comportamiento de la capa de vapor, y si a esto se agrega que el tiempo en el que se presentan los fenómenos de ebullición es muy pequeño, resulta

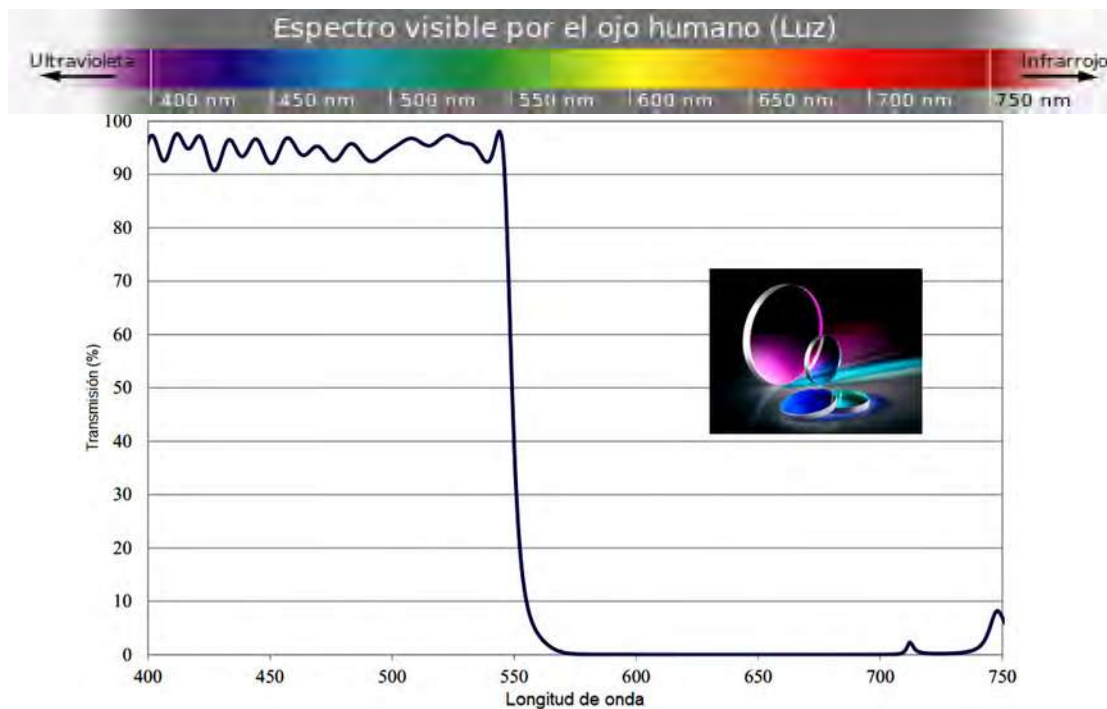
complicado lograr imágenes de calidad que nos permita analizar la capa de vapor y los fenómenos de ebullición.

En la segunda fase de la experimentación se grabaron imágenes con la cámara de alta velocidad (Photron, PCI R2) (Figura 3.13), las imágenes fueron grabadas a 60 fps y una resolución de 512x480 para visualizar la capa de vapor, el lente que se utilizó fue el Navitar Zoom 7000 18-108 mm. F/2.5 1 MI C Format Macro Zoom (Figura 3.14). El laser que se utilizó es tipo apuntador clase 3a de color azul de 2 watts de potencia y longitud de onda de 445 nm el cual se hizo incidir tangencialmente sobre una superficie cilíndrica de acero pulida con terminado espejo para formar un plano iluminado (Figura 3.16).



**Figura 3.16.-** Formación del plano laser.

Se utilizaron filtros de paso corto con longitud de onda de 550 nm para rechazar longitudes de onda grandes del rango de luz visible emanadas de la probeta a alta temperatura. Este filtro transmite todos los colores con longitudes de onda menores a 550 nm, es decir, se eliminan las longitudes de onda amarillas y rojas de la probeta a alta temperatura con capa de vapor. Este filtro transmite todos los colores con longitudes de onda más bajas que 550 nm, es decir, se eliminan las tonalidades amarillas y rojas (551 a 700 nm) de la probeta a alta temperatura con capa de vapor. La grafica de la Figura 3.17 muestra las longitudes de onda que se dejan pasar y las que son rechazadas.



**Figura 3.17.-** Curva de transmisión del filtro de paso corto de 550 nm [65].

Para capturar imágenes de alta velocidad, de calidad, es muy importante construir un domo negro para evitar capturar el ruido de las lámparas o iluminarias del laboratorio que trabajan a 60 Hertz (ver Figura 3.18).

Estos experimentos aprovechan el diseño de la probeta cilíndrica de cara plana con generación de calor interna (ver Figura 3.5), para incrementar su temperatura hasta un valor de 915°C. Las probetas, una vez calientes, se sumergen en un ducto de acrílico transparente para ser enfriadas por un flujo de agua que se encuentra a 60°C y que circula a una velocidad 0.2 m/s, 0.4 m/s y 0.6 m/s. En la Figura 3.19 se muestra una prueba a alta temperatura con el sistema experimental acoplado al plano de luz láser generado por un cilindro metálico pulido a espejo.

Para ver los patrones de flujo alrededor de la probeta, partículas de poliamida fueron sembradas en el flujo de agua. Las partículas trazadoras sembradas en el fluido fueron de poliamida de 50  $\mu\text{m}$  de diámetro.





**Figura 3.18.-** Domo negro construido alrededor del sistema experimental mostrado en la Figura 3.1.



**Figura 3.19.-** Prueba de alta temperatura con el sistema experimental mostrado en la Figura 3.1 y acoplado al plano de luz láser.

En la tabla 3.3 se presentan las propiedades de la poliamida. La selección de partículas es muy importante para obtener resultados confiables ya que estas deben seguir los movimientos del fluido fielmente, un parámetro a considerar es que estas deben tener una densidad similar a la del agua para no perturbar el flujo. Con las propiedades de la tabla 3.3 y las propiedades del agua a 60 °C es posible calcular la diferencia de velocidades entre el fluido y la partícula sembrada.

**Tabla 3.3.-** Propiedades físicas de partículas de poliamida.

Partículas de poliamida	
Tamaño de partícula	50 $\mu\text{m}$
Densidad ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	1.03
Punto de Fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )	175
Índice de refracción	1.5
Material	Poliamida 12

El criterio para seleccionar el trazador es que diferencia de velocidades y tiempo de respuesta de la partícula debe ser pequeño. Para el caso de Poliamida 12 con tamaño de partícula de  $50 \mu\text{m}$  y agua a  $60^\circ\text{C}$  diferencia de velocidades se calcula con la ecuación (2) donde las propiedades de la poliamida son:  $d_p = 50\mu\text{m}$ ,  $\delta p = 1030 \text{ kg/m}^3$  y las propiedades del agua son:  $\delta = 983.13 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0.000467 \text{ kg/ms}$  y  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ .

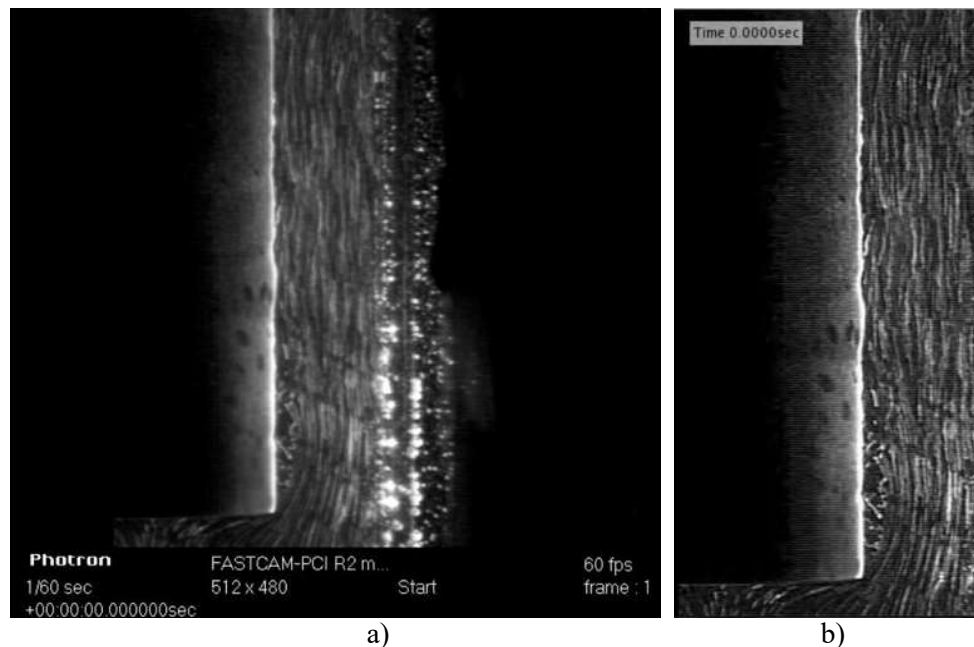
Para agua a  $60^\circ\text{C}$ , la diferencia de velocidades (ecuación 2) entre el fluido y la partícula sembrada fue:  $U_{60^\circ\text{C}} = 0.000136745 \text{ m/s}$

Para calcular el tiempo de respuesta de la partícula sembrada se utiliza la ecuación (3).

$$\tau_s = 0.000306328 \text{ seg}$$

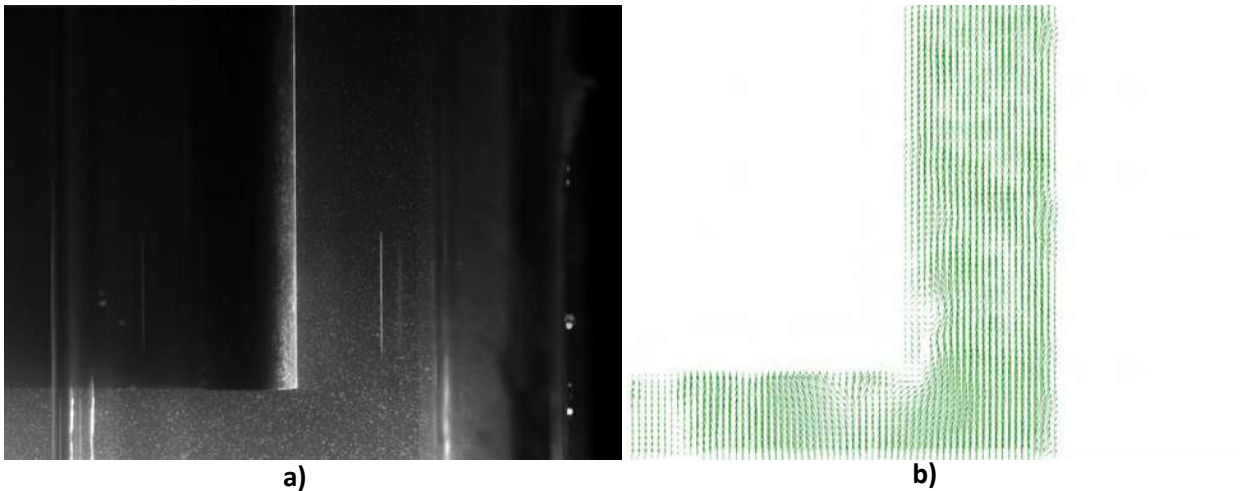
Con estos resultados de diferencia de velocidades y tiempo de respuesta que tienden a ser cero, se puede asegurar que los resultados arrojados por el análisis de las técnicas de iluminación y PIV serán confiables.

Las imágenes se grabaron a 60 fps y una resolución de  $512 \times 480$  pixeles uso del filtro óptico de paso corto de  $550 \text{ nm}$  (Figura 3.20 a)). Las imágenes se procesaron en un código que se generó en Matlab para aplicar un filtro de nitidez, recortar la imagen y adicionar un contador a la imagen (Figura 3.20 b)). El código se muestra en el anexo A.



**Figura 3.20.-** Utilización del código generado en Matlab para el mejoramiento de la calidad de las imágenes.

Anteriormente se habían realizado algunas pruebas<sup>1</sup>. En una prueba realizada solamente con agua fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s se obtuvo el campo vectorial utilizando un programa comercial de Dantec Dynamics, el DynamicStudio. Pero como se puede observar (Figura 3.21 b)) los resultados no fueron los esperados, ya que en la parte de la base de la probeta no se puede observar a detalle el retorno de flujo mediante los vectores.

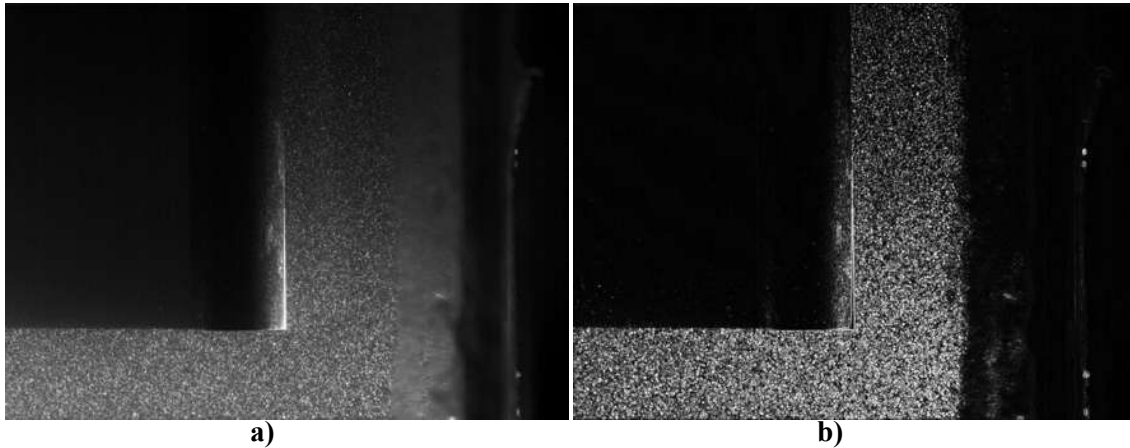


**Figura 3.21.-** Probeta de base plana dentro del tubo con agua fluyendo a 0.2 m/s. a) Imagen original y b) Imagen con campo vectorial. Ambas imágenes con una resolución de 1632 x 1200 píxeles.

Para poder procesar las imágenes y obtener los campos de velocidades, campos de vorticidad y líneas de corriente se utilizó un software libre de procesamiento de imágenes llamado PIVlab [66], esto debido a que el software comercial de procesamiento de imágenes de Dantec Dynamics (DynamicStudio) no permitió una visualización correcta del campo de velocidades.

Para poder leer las imágenes en el PIVlab lo primero que se hizo fue un código para renombrar las imágenes, ya que se necesitaba que tuvieran un número consecutivo. Una vez que se renombraron las imágenes, se procedió a mejorar la calidad de estas. Esta mejora de imágenes se realizó con una detección de bordes, aplicando operadores de gradientes. El programa PIVlab cuenta con un preprocesador de imágenes, pero cuando este se utilizó los resultados no fueron los esperados ya que lo único que hace este programa es binarizar la imagen. En la Figura 3.22 se muestra la mejora de una imagen con detección de bordes.

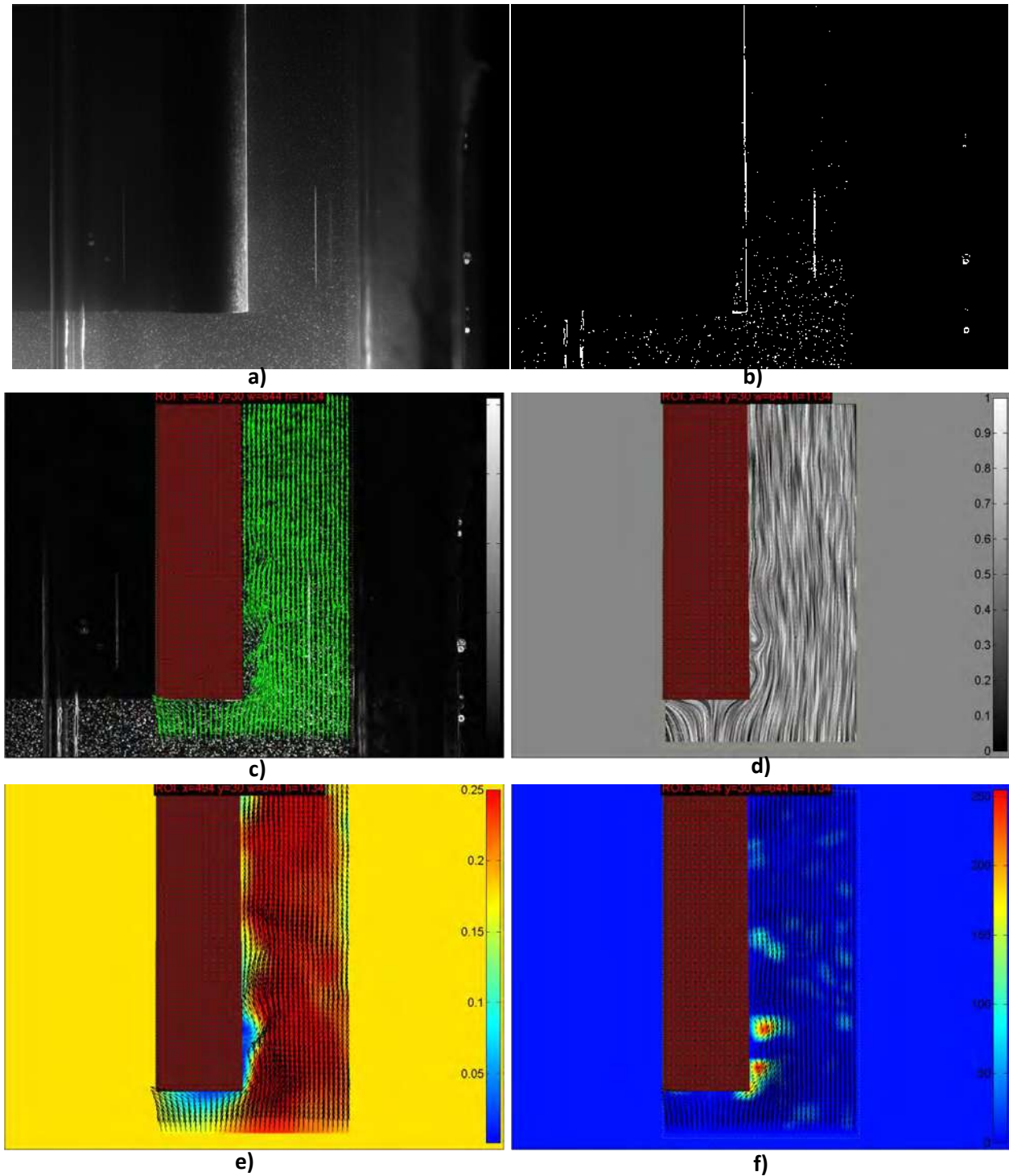
(<sup>1</sup> Con ayuda del Dr. Roberto Zenit Camacho, Profesor investigador de Universidad Nacional Autónoma de México)



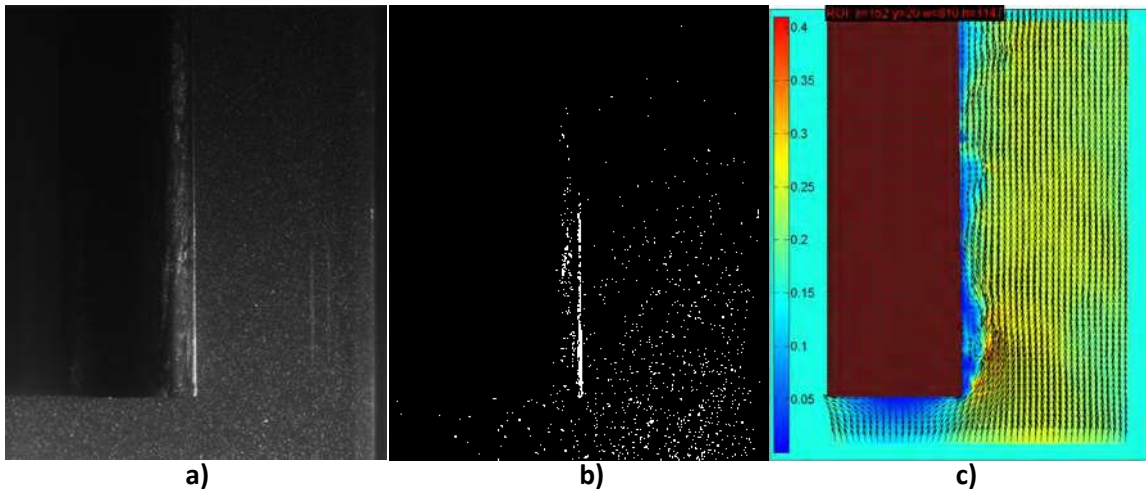
**Figura 3.22.-** a) Imagen original y b) Imagen con detección de bordes. Ambas imágenes con una resolución de 1632 x 1200 píxeles.

En la Figura 3.23 se hace un análisis en el programa PIVlab. El análisis se hace en un tubo de 44 mm de diámetro interior y dentro se encuentra la probeta de base plana con agua fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s. Se puede observar los campos vectoriales, líneas de corriente, campos de velocidades y campos de vorticidades (los cuales no se observaron con el DynamicStudio). Con esto se puede confirmar (Figura 3.23) que se obtuvieron mejores resultados con la utilización del software PIVlab que con el software comercial de Dantec Dynamics, el DynamicStudio.

En el anexo B se muestra el código y la secuencia de pre-procesamiento y procesamiento de las imágenes en Matlab y PIVlab (Figura 3.24):

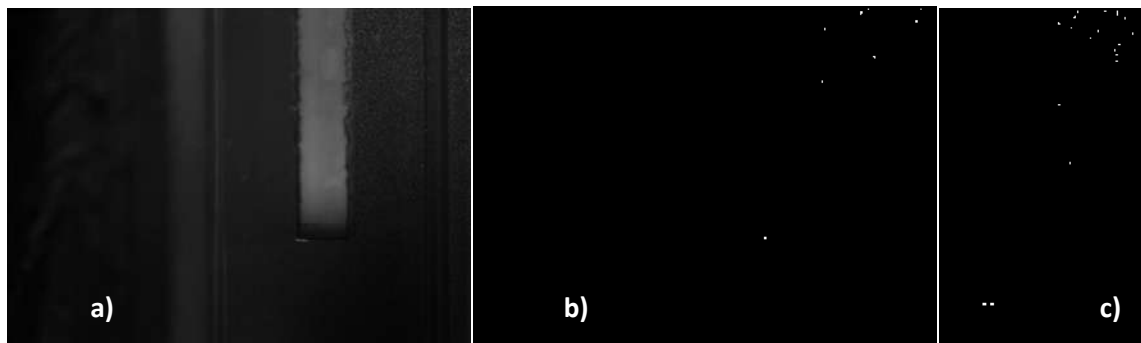


**Figura 3.23.-** Análisis de la probeta de base plana dentro del tubo con agua fluyendo a 0.2 m/s en PIVlab. a) Imagen original, b) Imagen con detección de bordes, c) Imagen con campo vectorial, d) Imagen líneas de corriente, e) Imagen con campo de velocidades y f) Imagen con campo de vorticidades. Las imágenes tienen una resolución de 1632 x 1200 píxeles.



**Figura 3.24.-** Imagen: a) recortada, b) con detección de bordes y c) analizada en PIVlab (campo de velocidad). Imagen original grabada a 1000 fps y 1632 x1200.

Para el tratamiento pre-procesamiento de las imágenes en estado no-isotérmico a velocidades del agua 0.2 m/s y 0.4 m/s (1632 x 1200 pixeles y grabada a 500 fps), se realizó un programa en Matlab para renombrar las imágenes y cambiarles el formato (Figura 3.25a)), otro programa para la detección de bordes (Figura 3.25 b)) y por último se hizo un programa para recortar las imágenes (Figura 3.28 c)) y enfocarse solamente en la zona de interés. Con este tratamiento de imágenes se logro reducir el tamaño de la carpeta que contiene las imágenes a ser analizadas, de 3.83 GB a 354 MB (con 0.2 m/s) y de 2.55 GB a 238 MB (con 0.2 m/s), lo que ahorro tiempo a la hora de analizar las imágenes con el programa PIVlab.



**Figura 3.25.-** a) Renombramiento de imagen y cambio de formato (1632 x 1200 pixeles y grabada a 500 fps), b) detección de bordes y c) recorte de imagen.

Después del pre-procesamiento de imágenes, estas se cargaron en el programa PIVlab para su procesamiento y análisis. Los settings (ajustes) que se pusieron a la condición de 0.2 m/s para el área de interrogación y el modelo a utilizar se muestran en la Figura 3.26. Aquí se dieron solo dos pasadas de área de interrogación de 50 y 30 y un algoritmo FFT (Fast Fourier Transformation). Los settings que se pusieron a la condición de 0.4 m/s para el área de interrogación y el modelo a utilizar se muestran en la Figura 3.27, estos fueron 4 pasos de área de interrogación de 50, 40, 30 y 30 y el algoritmo fue un FFT.



Figura 3.26.- Modelo y tamaño de las áreas de interrogación (0.2 m/s).

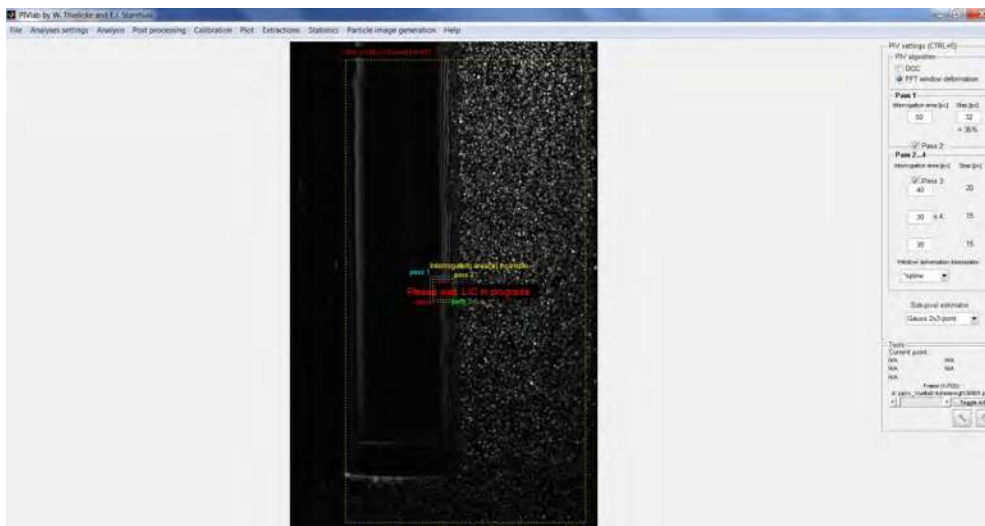
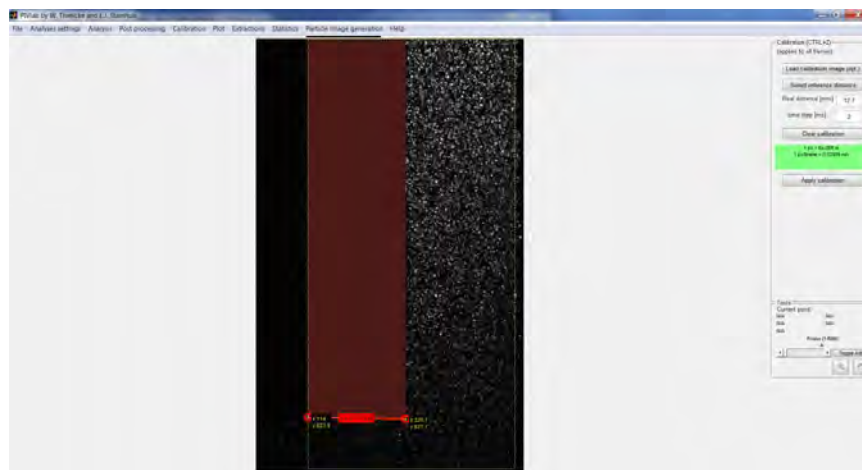


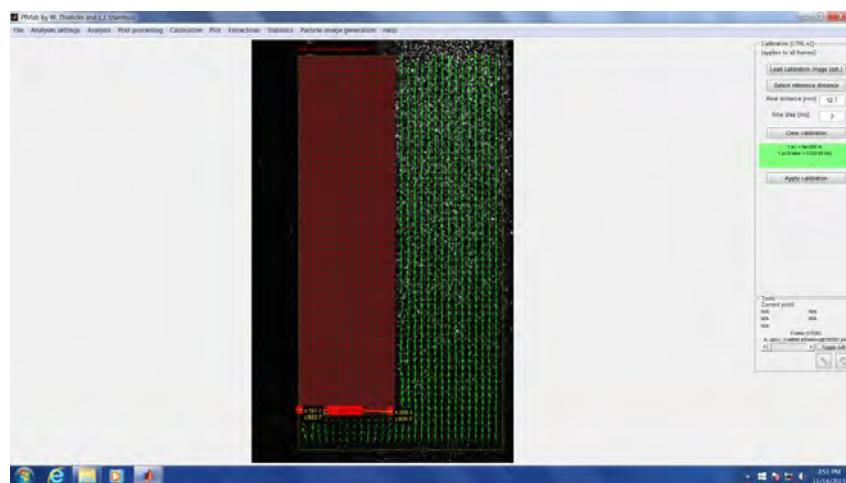
Figura 3.27.- Modelo y tamaño de las áreas de interrogación (0.4 m/s).

El modelo y el tamaño de las áreas de interrogación es la parte más crítica en el análisis de imágenes en el programa PIVlab, ya que no hay reglas para poner el tamaño de estas, se puede llevar varios días en encontrar las condiciones adecuadas (Figuras 3.26 y 3.27).

El siguiente paso es seleccionar la región de interés y enmascarar (proceso difícil debido a las fluctuaciones de la capa de vapor, no hay una condición de frontera física además de que en la capa de vapor influyen fenómenos ópticos como la reflexión y la refracción de la luz lo que complica aún más el problema) y calibrar la imagen (Figura 3.28 a 0.2 m/s y Figura 3.29 a 0.4 m/s).



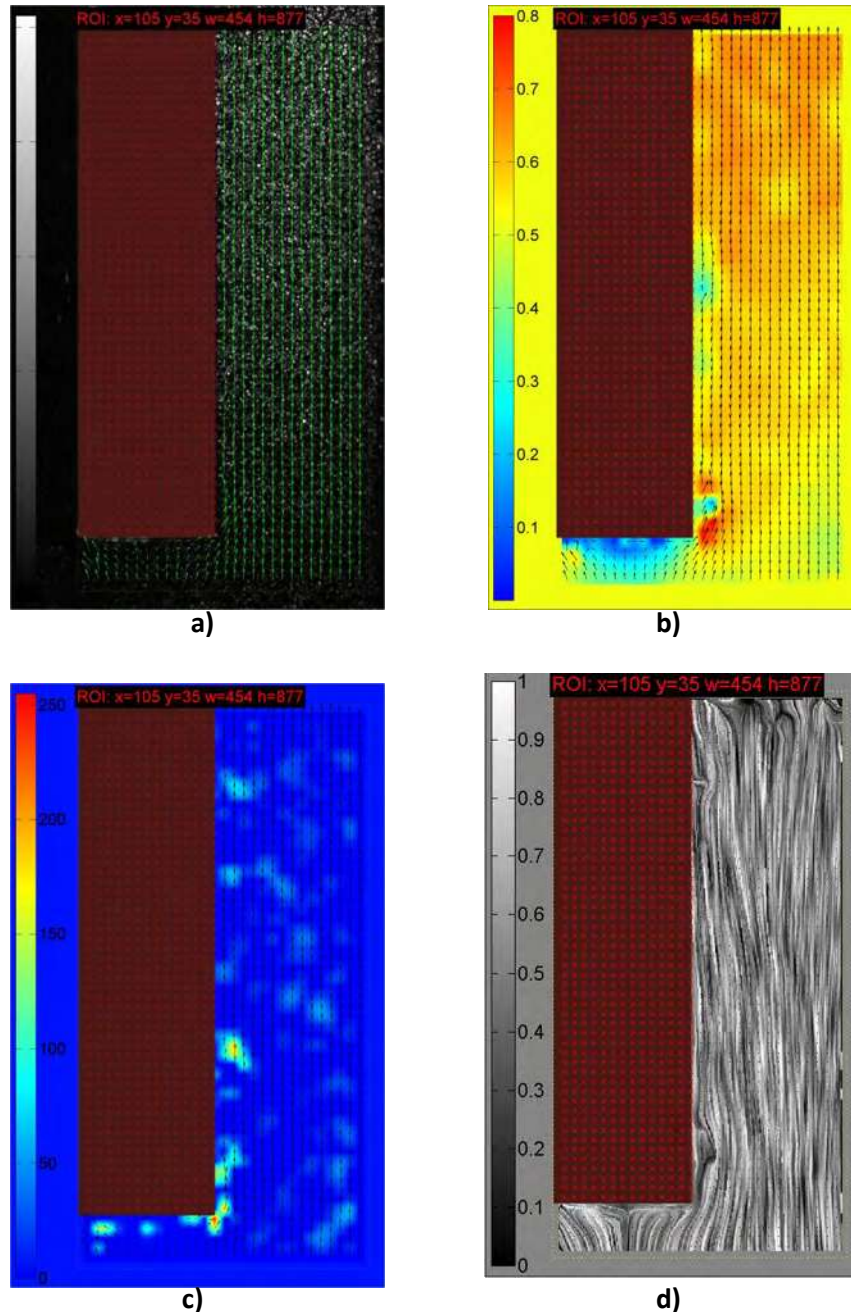
**Figura 3.28.-** Selección de la región de interés, enmascaramiento y calibración de las imágenes (0.2 m/s).



**Figura 3.29.-** Selección de la región de interés, enmascaramiento y calibración de las imágenes (0.4 m/s).



Cuando ya se tuvieron todas las condiciones necesarias, se analizaron las imágenes y los resultados que se obtuvieron concuerdan con lo esperado (0.4 m/s). Las imágenes obtenidas fueron de vectores (Figura 3.30a)), campos de velocidades (Figura 3.30 b)), campos de vorticidades (Figura 3.30 c)) y campos de líneas de corriente (Figura 3.33 d)).



**Figura 3.30.-** a) Campo de vectores, b) campo de velocidades, c) campo de vórtices y d) campo de líneas de corriente.

Para el estudio de la capa de vapor a detalle se grabaron imágenes con la cámara de alta velocidad (Speed Sense phantom miro M310), las imágenes fueron grabadas a 1000 fps y una resolución de 1280x800 para visualizar la capa de vapor, el objetivo que se utilizó fue el Planar1.4/50 mm ZF. El láser que se utilizó es tipo DualPower 30-1000 con pulsos de energía de hasta 2 x 30 mJ y 20 kHz, de la marca Dantec Dynamics, el cual utiliza la óptica 80X80 high power light sheet series para formar el plano. Además de utilizar un filtro óptico para eliminar luz del espectro visible, el filtro que se utiliza es de paso corto de 450 nm.

La cámara de alta velocidad Speed Sense Phantom Miro M310 (Figura 3.31) [67] es capaz de grabar 650000 imágenes por segundo a una resolución de 64X8 y a 3260 imágenes por segundo a una resolución de 1280X500. Utiliza un sensor CMOS con tamaño de pixel de 20  $\mu\text{m}$  y 12 bits de profundidad con una memoria máxima para grabación de 12 Gb. La montura que tiene es ZF.



**Figura 3.31.-** Cámara de alta velocidad Speed Sense phantom miro M310.

El objetivo que se montó en la cámara de alta velocidad fue el Planar 1.4/50 mm ZF (Figura 3.32). Este tipo de lente es estándar, tiene una longitud focal de 50 mm, apertura máxima F1.40, apertura mínima F16 y distancia mínima de enfoque: 0.45 m.



**Figura 3.32.-** Objetivo Planar 1.4/50 mm ZF.

El láser que se utilizó es tipo DualPower 30-1000 con pulsos de energía de hasta  $2 \times 30$  mJ y 20 kHz, de la marca Dantec Dynamics (Figura 3.33 a)). Es un láser que tiene una potencia máxima de salida de 150 watts, duración de pulso de 100 ns/CW, longitud de onda 1053, 527 nm y el medio del laser es Nd:YLF. La Figura 3.33 b) muestra la óptica 80X80 high power light sheet series para formar el plano la cual se monta en la cabeza del láser.



**a)**



**b)**

**Figura 3.33.-** a) Láser que se utilizó es tipo DualPower 30-1000 y b) óptica 80X80 high power light sheet series.

Se utilizó un filtro óptico de paso corto de 450 nm. para eliminar las tonalidades rojas , naranjas, amarillas , verdes, azules del espectro electromagnético (de 451a 700 nm) de la probeta a alta temperatura con capa de vapor. La gráfica de la Figura 3.34 muestra las longitudes de onda que se dejan pasar y las que son rechazadas.

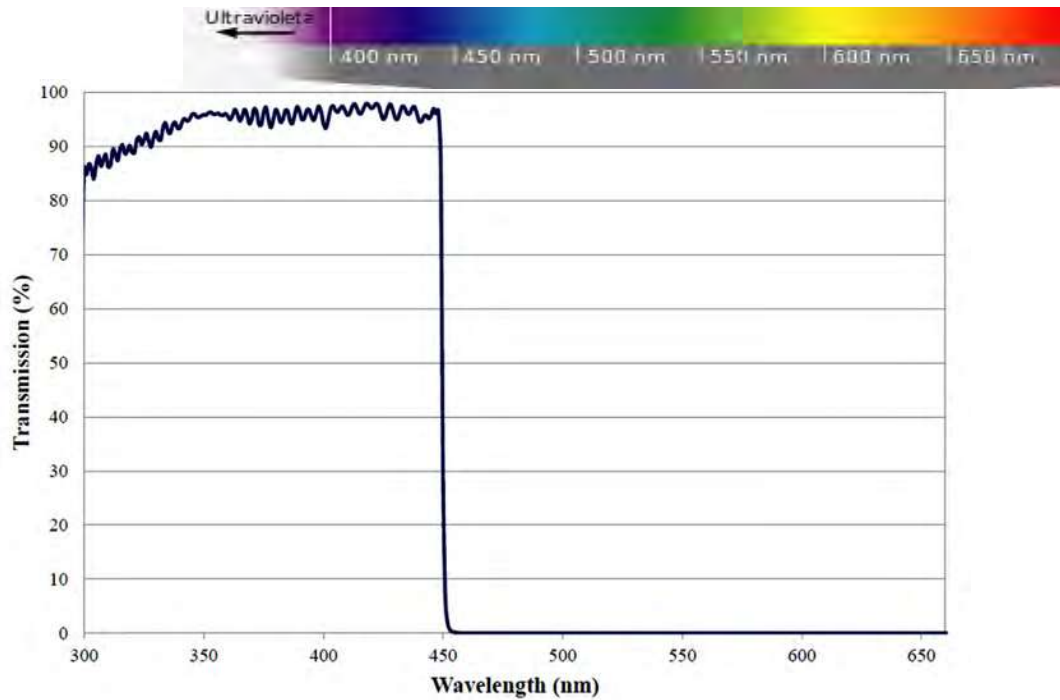


Figura 3.34.- Curva de transmisión del filtro de paso corto de 450 nm [65].

Las imágenes fueron grabadas con la cámara de alta velocidad a 1000 fps y una resolución 1280x800. En estas se puede observar de una mejor manera solo la capa de vapor (Figura 3.35), de la cual más adelante se hará un análisis.

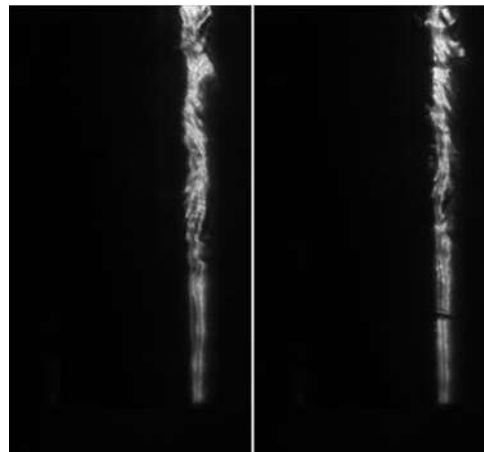


Figura 3.35.- Capa de vapor alrededor de una probeta hecha de acero inoxidable AISI 304 (Probeta A) sometida a enfriamiento por convección forzada a: 0.2 m/s.

### 3.5.- Condiciones experimentales.

Los casos de estudio analizados en estado isotérmico se presentan en la tabla 3.4. La tabla 3.5 muestra las condiciones experimentales de los casos de estudio analizados en estado no-isotérmico.

**Tabla 3.4.-** Condiciones experimentales en estado isotérmico.

Geometría de la probeta.	Probeta cilíndrica de cara plana.
Material de la probeta.	Acero inoxidable AISI 304.
Medio de temple.	Agua.
Temperatura del agua.	60°C.
Velocidades del agua.	0.2, 0.4, 0.6 m/s.
Números de Reynolds ( <i>Re</i> ).	(0.2 m/s) 18,526 (0.4 m/s) 37,052 (0.6 m/s) 55,577

**Tabla 3.5.-** Condiciones experimentales en estado no-isotérmico.

Geometría de la probeta.	Probeta cilíndrica de cara plana.
Material de la probeta.	Acero inoxidable AISI 304.
Temperatura de calentamiento.	915 °C.
Temperatura de templado.	900 °C.
Medio de temple.	Agua.
Temperatura del agua.	60°C.
Velocidades del agua.	0.2, 0.4, 0.6 m/s.
Números de Reynolds ( <i>Re</i> ).	(0.2 m/s) 18,526 (0.4 m/s) 37,052 (0.6 m/s) 55,577

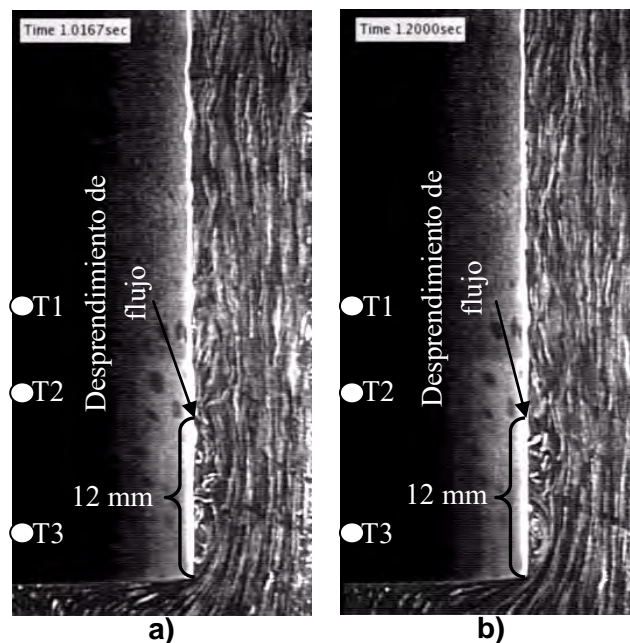
## CAPÍTULO IV.

# RESULTADOS EXPERIMENTALES.

### 4.1.- Análisis de la condición de velocidad a 0.2 m/s.

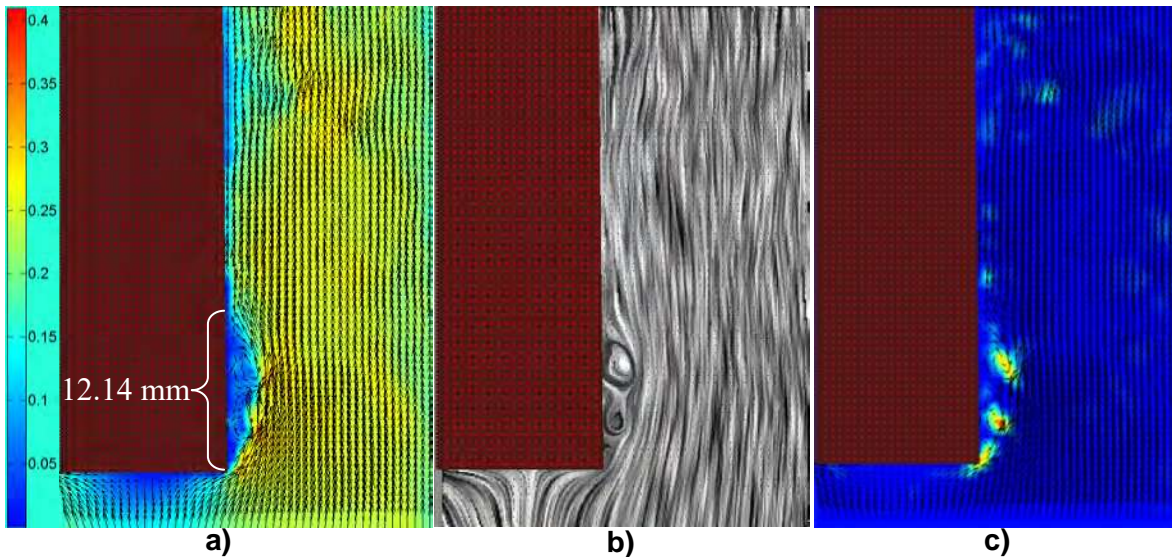
#### 4.1.1.- Velocidad del agua a 0.2 m/s, probeta en estado isotérmico.

En la Figura 4.1 alrededor de la probeta (probeta B) sin capa de vapor (a temperatura ambiente) y agua fluyendo a 0.2 m/s y 60 °C, se observa la separación de la capa límite dinámica cerca de la base de la probeta. Dentro de la separación de la capa límite dinámica se encontró que se forma una zona de recirculación de flujo la cual esta desprendiéndose a una frecuencia de 10 Hz ocasionando que el flujo tienda a afectar las trayectorias de líneas de corriente aguas abajo. La zona de recirculaciones, debido al gradiente de presión adverso, tiene una longitud de 12 mm y dentro de esta hay una generación de vórtices a pequeña escala (Figura 4.1a y 4.1b). A esta a velocidad de 0.2 m/s bajo condiciones isotérmicas existe una separación de la capa límite (en el borde de entrada) debido al vértice de la probeta de cara plana y también hay separación de vórtices o desprendimiento de flujo aguas abajo.



**Figura 4.1.-** Prueba en estado isotérmico, probeta B a temperatura ambiente y agua fluyendo a 0.2 m/s y 60 °C.

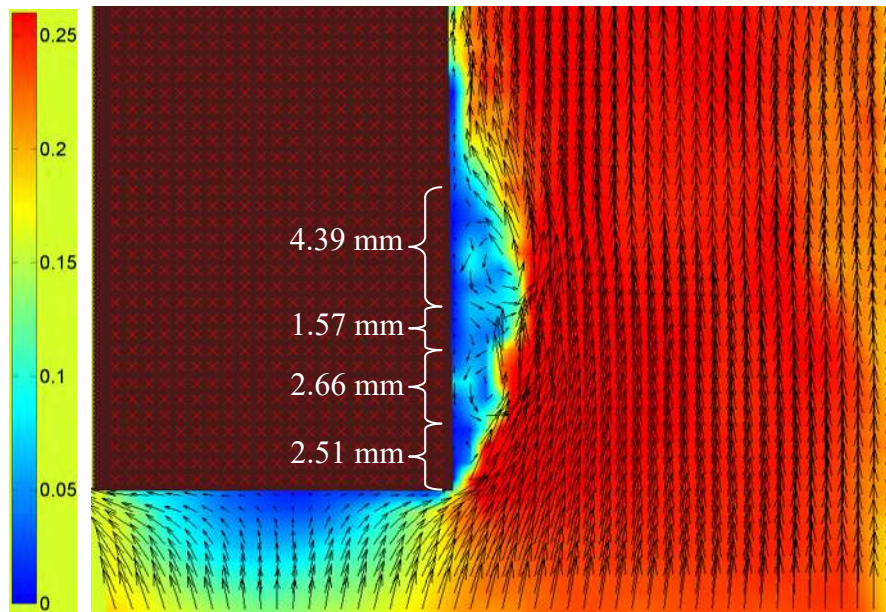
La siguiente parte del análisis se realizó en el software PIVlab (versión 1.32) con agua fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y 60 °C, ya que de la Figura 4.1 se obtienen solo datos cualitativos, con el procesamiento de las imágenes se obtienen datos cuantitativos. Las mediciones son en el plano central simétrico longitudinal de la probeta.



**Figura 4.2.-** Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo), b) líneas de corriente y c) vectores de vorticidad. Tiempo de análisis a 0.151 segundos.

En la Figura 4.2 se muestra el análisis en PIVlab en estado isotérmico para la condición de velocidad de 0.2 m/s de corriente libre (probeta A). En la Figura 4.2 a) se muestran los vectores de velocidad, en la Figura 4.2 b) líneas de corriente y en la Figura 4.2 c) vectores de vorticidad para un tiempo de 0.151 segundos. En la zona que esta justamente debajo del borde de ataque de la probeta la velocidad tiende a ser cero, es decir se tiene una zona de estancamiento de flujo. Una vez que pasa el borde de ataque el flujo se divide en dos zonas: una con un incremento de velocidad cercana a las paredes del tubo y la otra con una disminución de velocidad cercana las paredes de la probeta (gradiente de presión adverso). Se muestra claramente que el gradiente de presión adverso se debe a la separación de la capa límite en la esquina del borde de ataque (vértice de la probeta). El gradiente de presión adverso tiene una longitud de 12.14 mm.

La zona que presenta una mayor velocidad es la que se encuentra inmediatamente después de la capa límite y esta muestra valores aproximadamente de entre 0.35 y 0.4 m/s mientras que la zona del gradiente de presión adverso se encuentra en el rango de 0-0.2 m/s. La zona de re-adhesión de flujo aguas abajo de la probeta tiene un orden de magnitud de aproximadamente 0.25 m/s. En la Figura 4.2 b) las líneas de corriente muestran claramente que dentro de la zona de recirculación de flujo hay formación de vórtices en pequeña escala tal y como se corrobora en la Figura 4.2 c).

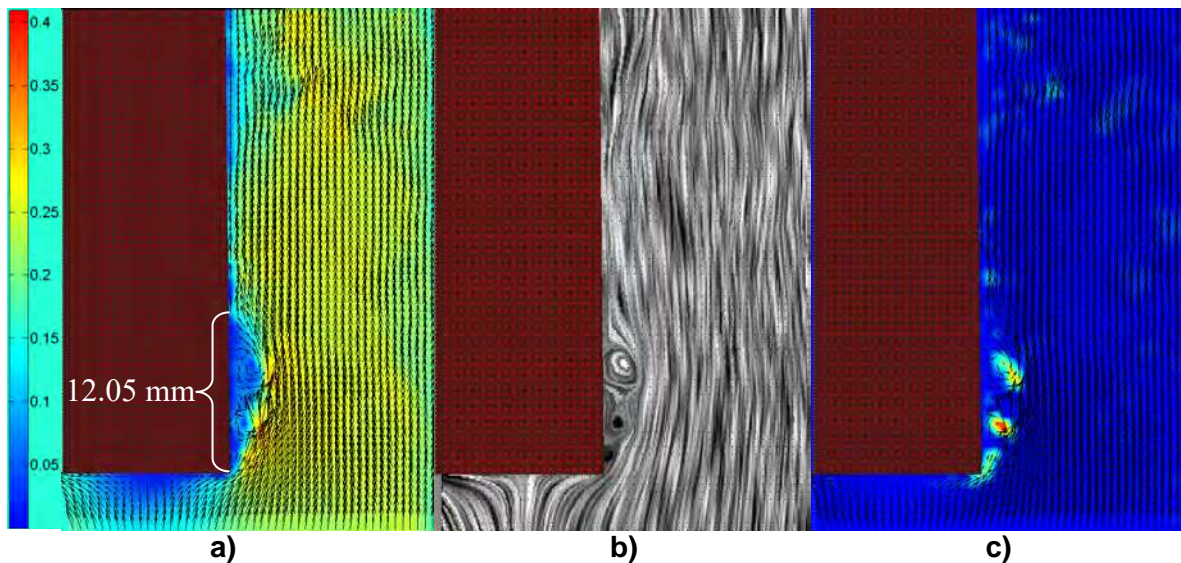


**Figura 4.3.-** Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de análisis a 0.151 segundos.

La Figura 4.3 es el mismo instante (0.151 segundos) que la Figura que la 4.2 a), pero se analiza únicamente la zona cercana al borde de ataque (cerca de la base de la probeta), en la Figura 4.3 se hizo una disminución de la escala de magnitudes de vectores para ver más a detalle los patrones de flujo en la zona de recirculaciones (véase que en la Figura 4.2 la escala es de 0-0.4 m/s, mientras que en la Figura 4.3 escala es de 0-0.25 m/s). La zona de recirculaciones se divide en dos vórtices internos girando en sentido contrario a las manecillas del reloj y 2 zonas de baja velocidad. El vórtice más cercano al borde de ataque tiene una longitud de 2.66 mm y en esta parte de la división el flujo entra a una velocidad

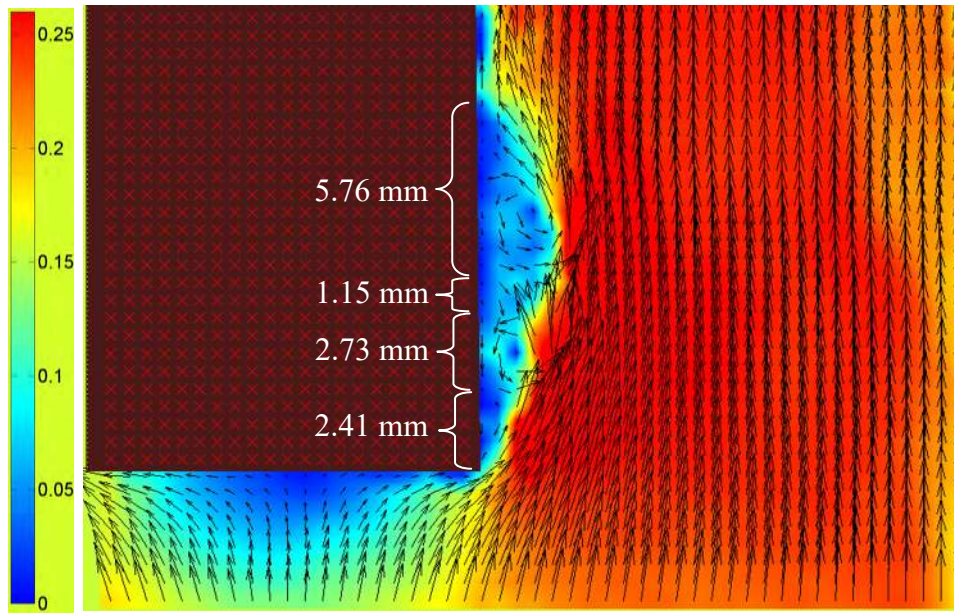


que va en un rango de 0.15-0.25 m/s. El vórtice más alejado del borde de ataque tiene una longitud de 4.39 mm, en esta parte de la división el flujo entra por la parte de arriba antes de la re-adhesión a una velocidad que va en un rango de 0.15-0.30 m/s, la mayor velocidad en este segundo vórtice se da en dirección hacia abajo con una magnitud de 0.15 m/s. La zona de baja velocidad (zona de flujo muerto) más cercana al borde de ataque (vértice de la probeta) tiene una longitud de 2.51 mm y la zona de baja velocidad más alejada del borde de ataque tiene una longitud de 1.57 mm. El mayor espesor de la capa límite dinámica es de 2.8 mm en la cresta de la zona de recirculaciones.



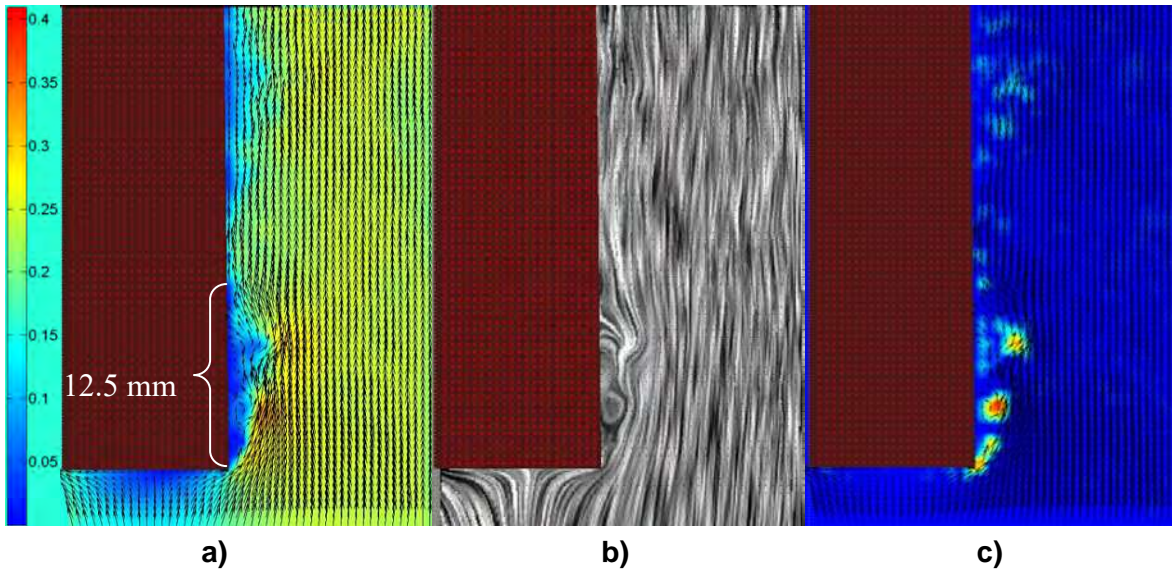
**Figura 4.4.-** Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo), b) líneas de corriente y c) vectores de vorticidad. Tiempo de análisis a 0.175 segundos.

La longitud de la zona de recirculaciones a un tiempo de análisis de 0.175 segundos es de 12.05 mm tal y como se muestra en la Figura 4.4 a). En la Figura 4.4 a), la velocidad máxima se sigue visualizando en la zona donde termina la capa límite y esta sigue teniendo valores máximos de velocidad de entre 0.35 y 0.40 m/s, mientras que en la zona de recirculaciones el rango de velocidades se encuentra en el orden de 0-0.35 m/s. En la Figura 4.4 b) las líneas de corriente muestran claramente que dentro de la zona de recirculaciones hay formación de vórtices en pequeña escala tal y como se corrobora en la Figura 4.4 c).



**Figura 4.5.-** Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de análisis a 0.175 segundos.

Haciendo un análisis en la zona de recirculaciones (gradiente de presión adverso) de la Figura 4.5, se observa que dentro de esta zona hay estructuras de vórtices y zonas de flujo que tienden a ser muertas (es decir valores de velocidad muy cercanos a cero). La primera zona dentro del gradiente de presión adverso inmediatamente después del borde de ataque es una zona de flujo muerto con longitud de 2.41 mm y con un rango de velocidades de 0-0.1 m/s, la segunda zona es un vórtice de longitud de 2.73 mm y girando en sentido contrario a las manecillas del reloj con un rango de velocidades de 0-0.2 m/s (se observa que el flujo tiende a entrar en la zona superior del vórtice de derecha a izquierda), la tercera zona es otro flujo muerto el cual tiene una dimensión de 1.15 mm y su rango de velocidades oscila entre 0-0.15 m/s, y la cuarta zona es otro vórtice con una longitud de 5.76 mm girando en sentido contrario a las manecillas del reloj y presenta un rango de velocidades de entre 0-0.3 m/s (se observa que el flujo tiende a entrar en la zona superior del vórtice de derecha a izquierda antes de la zona de re-adhesión de flujo).



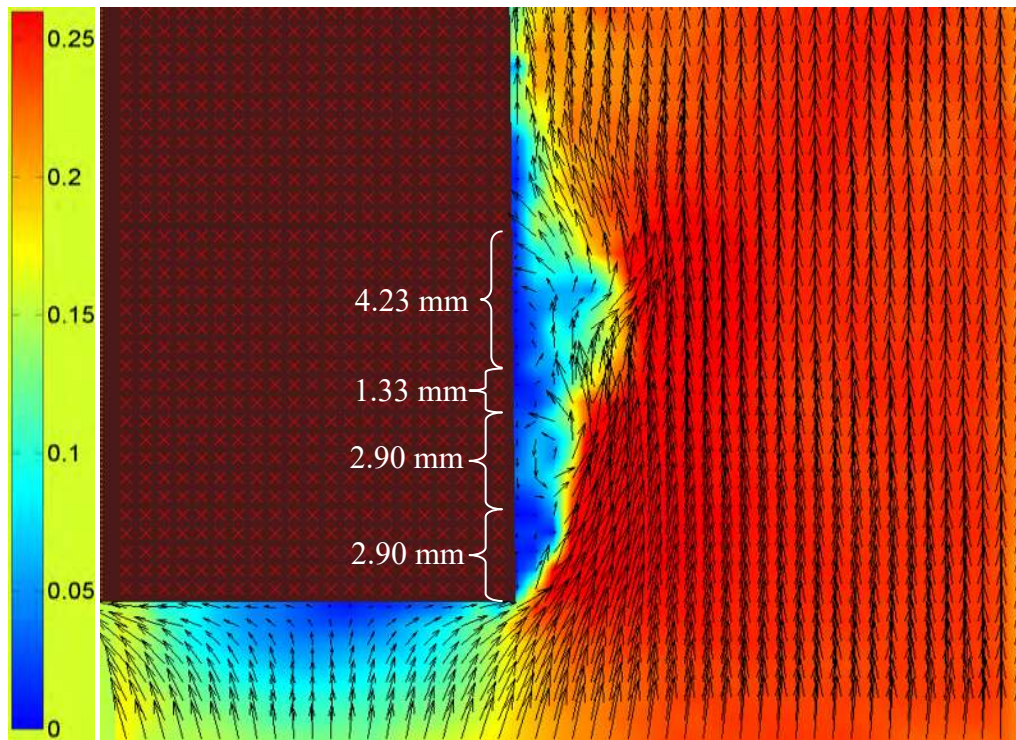
**Figura 4.6.-** Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo), b) líneas de corriente y c) vectores de vorticidad. Tiempo de análisis a 0.237 segundos.

La longitud de la zona de recirculaciones a un tiempo de análisis de 0.237 segundos es de 12.5 mm tal y como se muestra en la Figura 4.6 a). En la Figura 4.6 a), la velocidad máxima se sigue visualizando en la zona donde termina la capa límite y esta sigue teniendo valores máximos de velocidad de 0.4 m/s, mientras que en la zona de recirculaciones el rango de velocidades se encuentra en el orden de 0-0.35 m/s. En la Figura 4.6 b) las líneas de corriente muestran claramente que dentro de la zona de recirculaciones hay formación de vórtices en pequeña escala tal y como se corrobora en la Figura 4.6 c).

La Figura 4.7 muestra el instante en el que la zona de recirculaciones tiende a dividirse, es decir, el vórtice superior aguas abajo con una dimensión de 4.23 mm tiende a desprenderse debido a que ya no soporta más entrada de masa y este tiende a colapsar. La zona de recirculaciones de la Figura 4.7, muestra que dentro de esta zona hay estructuras de vórtices y zonas de flujo que tienden a ser muertas (es decir valores de velocidad muy cercanos a cero). La primer zona dentro del gradiente de presión adverso inmediatamente después del borde de ataque es una zona de flujo muerto con longitud de 2.90 mm y con un rango de velocidades de 0-0.1 m/s, la segunda zona es un vórtice de longitud de 2.90 mm girando en sentido contrario a las manecillas del reloj con un rango de velocidades de 0-0.2 m/s, se

observa que el flujo tiende a entrar en la zona superior del vórtice de derecha a izquierda, se observa que se incremento la velocidad, la tercer zona es otro flujo muerto el cual tiene una dimensión de 1.33 mm y su rango de velocidades oscila entre 0-0.1 m/s, y la cuarta zona es representa la división y tendencia de separación del vórtice con una longitud de 4.23 mm y tendencia de giro en sentido contrario a las manecillas del reloj, presenta un rango de velocidades de entre 0-0.3 m/s (se observa que el flujo tiende a separarse en la zona de re-adhesión de flujo).

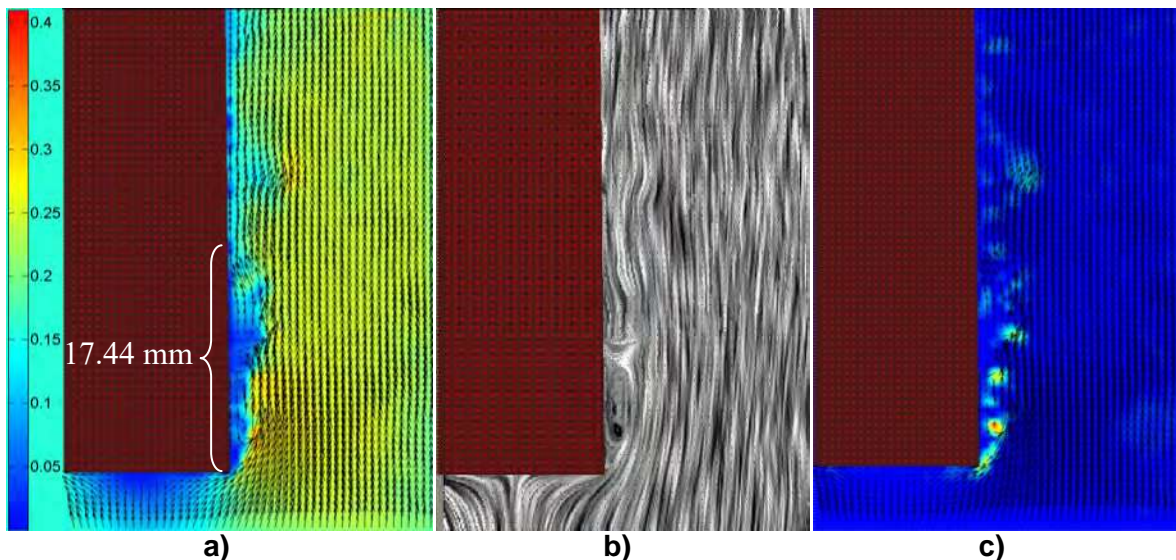
En esta última zona de longitud de 4.23 mm se observa que en la interface sólido-líquido la velocidad tiende a ser cero debido a que la zona de recirculaciones tiende a no permitir la entrada de más fluido.



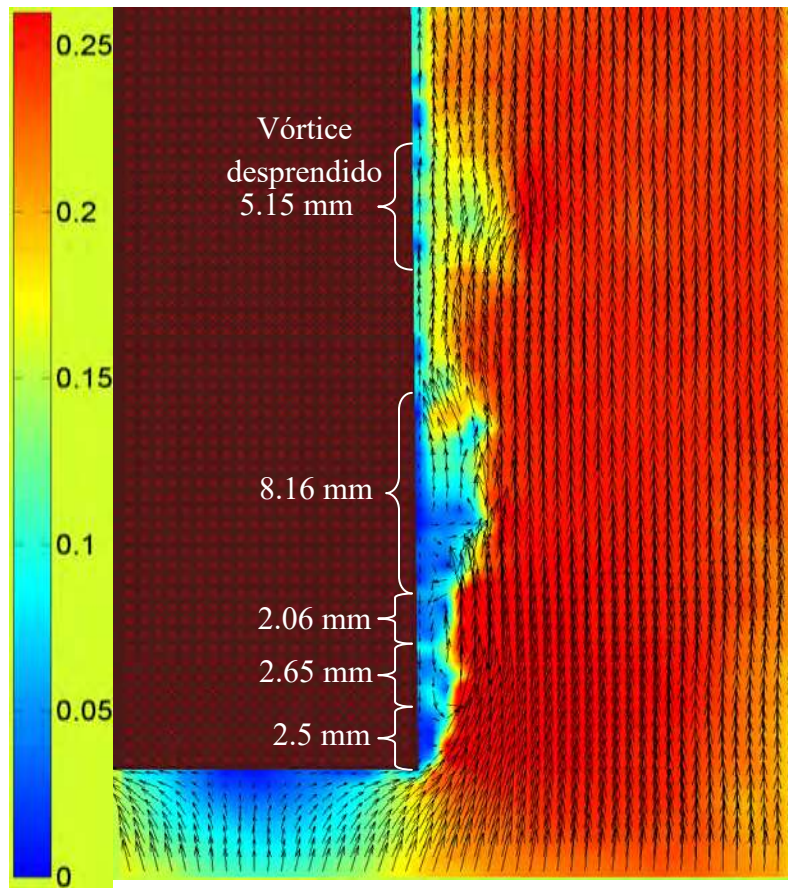
**Figura 4.7.-** Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de análisis a 0.237 segundos.

La Figura 4.8 muestra un instante en el que el vórtice se desprendió de la zona de recirculaciones y viaja aguas abajo (ver Figura 4.9). Aquí se tienen diferentes patrones de flujo como son: zona de recirculaciones dentro de la cual hay zonas con vórtices y zonas

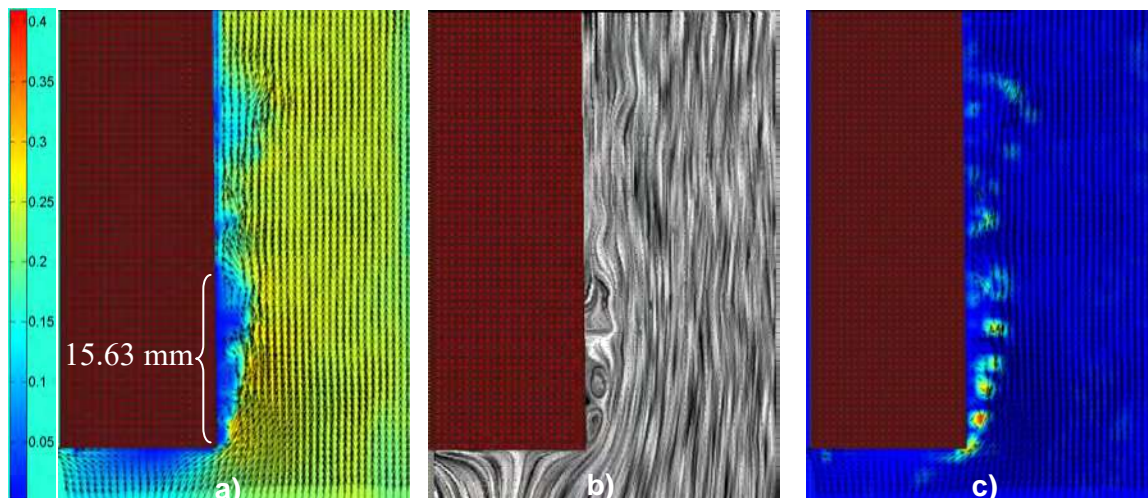
mueratas, una zona de re-adhesión de flujo y el vórtice desprendido. La zona de re-adhesión de flujo se encuentra en el orden de velocidades de 0.1-0.30 m/s como se aprecia en la Figura 4.8 a). En la Figura 4.8 b) las líneas de corriente muestra zona de recirculaciones, y en la Figura 4.8 c) claramente se puede observar que hay 5 vórtices en pequeña escala y el desprendimiento del vórtice aguas abajo alejado del borde de ataque. La Figura 4.9 a un tiempo de análisis de 0.335 segundos muestra que la longitud total de la zona de recirculaciones se incrementó a 17.44 mm. En la Figura 4.9, la zona donde se desprende la capa límite inmediatamente después del borde de ataque muestra una zona de flujo muerto con una longitud de 2.5 mm y un rango de velocidades de 0-0.05 m/s. El vórtice más cercano al borde de ataque tiene una longitud de 2.65 mm. Ahora con el vórtice desprendido hay entrada de líquido a la zona de recirculaciones en la parte donde se forma una zona de longitud de 2.06 mm. El vórtice cercano a la zona de re-adhesión de flujo tiene una longitud de 8.16 mm y su rango de velocidades se encuentra en 0-0.3 m/s. Esto evidencia que una vez que hay separación del vórtice comienza a entrar líquido a la zona de recirculaciones debido a él gradiente de presiones adverso hasta que esta no puede soportar la entrada de más líquido y se desprende aguas abajo. En cuanto a el vórtice desprendido este tiene una longitud de 5.15 mm.



**Figura 4.8.-** Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo), b) líneas de corriente y c) vectores de vorticidad. Tiempo de análisis a 0.335 segundos.

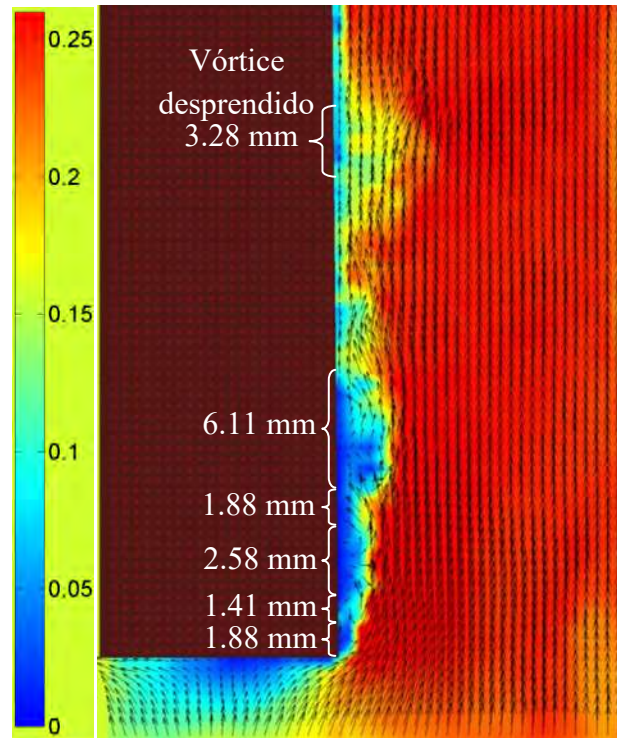


**Figura 4.9-** Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de análisis a 0.335 segundos.



**Figura 4.10.-** Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo), b) líneas de corriente y c) vectores de vorticidad. Tiempo de análisis a 0.361 segundos.

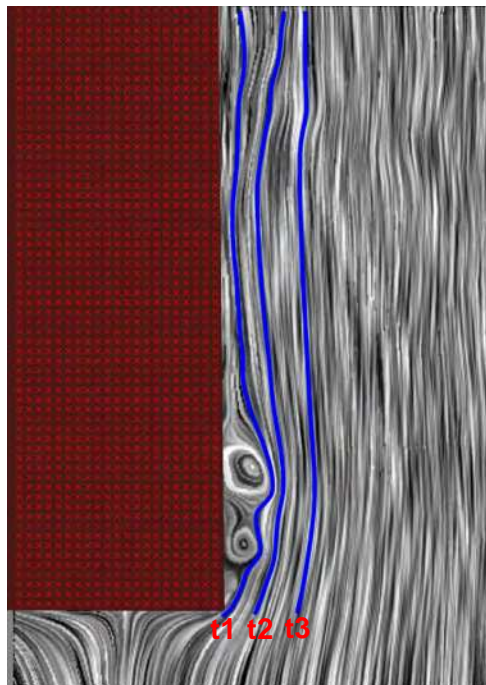
La Figura 4.10 muestra que la zona de recirculaciones tiene una longitud de 15.63 mm. En la Figura 4.10 b) las líneas de corriente muestran que en la zona de recirculaciones hay formación de vórtices, y en la Figura 4.10 c) se pueden observar seis vórtices en pequeña escala y el vórtice desprendido aguas abajo.



**Figura 4.11-** Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de análisis a 0.361 segundos.

La Figura 4.11 muestra que la primer zona de flujo muerto inmediatamente después del borde de ataque tiene una longitud de 1.88 mm y el rango de velocidades va de 0-0.05 m/s, en la segunda zona hay entrada de líquido a la zona de recirculaciones con una longitud de 1.41 mm , la tercer zona es una zona muerta combinada con un vórtice pequeño de longitud 2.58 mm y rango de velocidades de 0-0.1 m/s. En la cuarta zona también hay entrada de líquido a la zona de recirculaciones con una longitud de 1.88 mm y la última zona dentro del gradiente de presión adverso hay otro vórtice de longitud de 6.11 mm el cual tiene un rango de velocidades de 0-0.3 m/s. Como se puede observar en cada uno de los instantes analizados hay cambios de longitud en los patrones de flujo dentro de la zona de

recirculaciones. Cabe mencionar que la longitud del vórtice desprendido es de 3.28 mm (Figura 4.11), mientras que en la Figura 4.9 fue de 5.15 mm, esto debido a que como se esperaría hay una disminución de cantidad de movimiento a en el vórtice por influencia de las fuerzas viscosas a medida que se desplaza aguas abajo. El desprendimiento de vórtices con esta técnica de velocimetría pudo ser captado a una frecuencia de desprendimiento de 10 Hz. Este ciclo es repetitivo, es decir hay una acumulación de líquido en la zona de recirculaciones, una vez que en esta zona de recirculaciones no puede haber una mayor entrada de masa, se desprende un vórtice aguas abajo el cual va disipando energía debido a la interacción con fuerzas inerciales del fluido más alejado de la superficie de la probeta.



**Figura 4.12-** Análisis con PIVlab con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Líneas de corriente y trayectorias. Tiempo de análisis a 0.175 segundos

En la Figura 4.12 se muestra una imagen con líneas de corriente a un tiempo de 0.175 segundos. El agua fluye a una velocidad de 0.2 m/s y 60 °C. La trayectoria t1, la cual está más cercana al vértice (esquina) de la probeta es la que muestra las menores velocidades ya que entre más cerca esté el fluido a este vértice más posibilidades tendrá de entrar a la zona de recirculaciones. El cambio repentino de velocidad en el borde agudo de la base de la



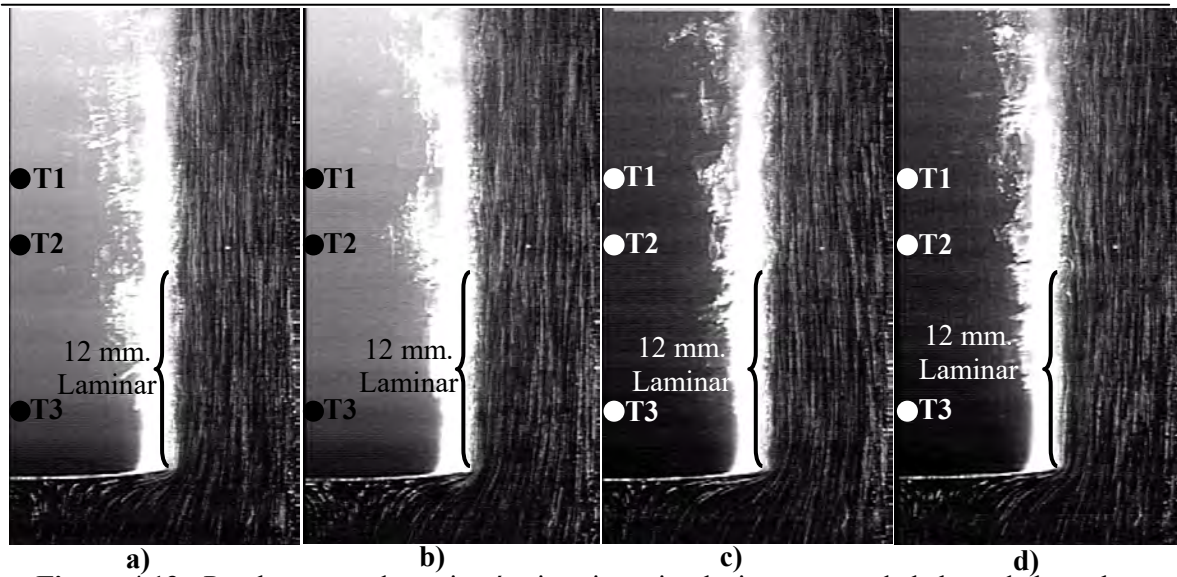
probeta (vértice) representan un flujo claramente desacelerado, situación en la que la pérdida de energía en la capa límite termina conduciendo a la separación de esta. En la trayectoria t1 se ve cómo el flujo de la capa límite no puede seguir el giro en el borde agudo de la base de la probeta (lo que requeriría una aceleración muy rápida), provocando la separación en el borde y la recirculación en la región lateral de la base de la probeta. La trayectoria t2 es la que tenderá a tener mayores velocidades y la trayectoria t3 es la que tenderá a tener velocidades promedio.

#### **4.1.2.- Velocidad del agua a 0.2 m/s, probeta en estado no-isotérmico.**

Para poder realizar un mejor análisis de cómo afecta la dinámica del fluido a la capa de vapor, también se realizaron pruebas en estado no-isotérmico. La siguiente prueba se realizó utilizando un filtro de paso corto 550 nm en el objetivo de la cámara de alta velocidad para eliminar los espectros de luz visibles mayores a 550 nm (Figura 3.17). La grabación se realizó a 60 fps y resolución de 512 x 480 píxeles. La velocidad de corriente media del agua a 60 °C antes de incidir con la probeta B (probeta en estado no isotérmico a 900°C) es de 0.2 m/s.

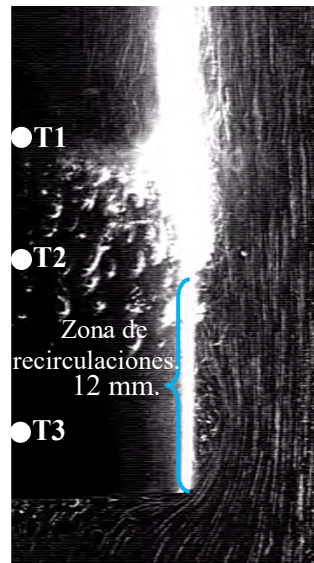
En la Figura 4.13 alrededor de la probeta con capa de vapor (probeta calentada a 900 °C) se observa que las líneas de corriente son laminares (no presentan un gradiente de presión adverso cerca de la base de la probeta) en la interface vapor-líquido, las Figuras 4.1, 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10 y 4.12 (pruebas en estado isotérmico) son turbulentas y con un gradiente de presión adverso cerca de la base de la probeta (en la interface sólido-líquido). En la probeta con capa de vapor no hay desprendimiento de la capa límite dinámica ni la zona de recirculaciones de flujo a un costado lateral de la base de la probeta, lo que significa que hay dominio de la capa límite térmica (Figuras 4.13 a, b, c y d).

El color homogéneo de la probeta indica que hay una extracción uniforme de calor en la capa de vapor (Figuras 4.13 a, b, c y d). El enfriamiento tiende a ser constante en la posición donde se colocan los termopares. La presión generada por la capa de vapor alrededor de toda la superficie de la probeta compensa el gradiente de presión que podría originar la separación de la capa límite por efecto de geometría de la pieza.



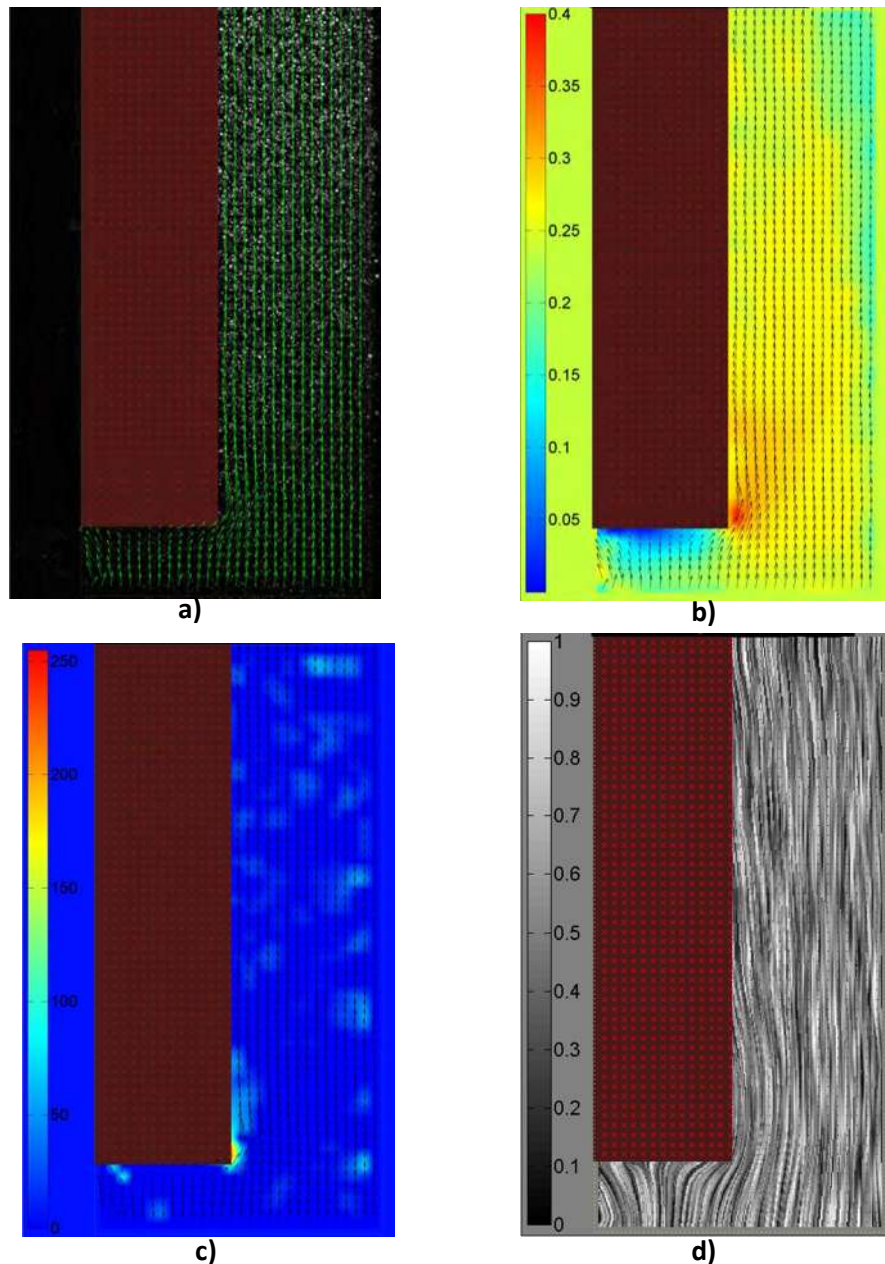
**Figura 4.13.-** Prueba en estado no-isotérmico sin recirculaciones cerca de la base de la probeta y enfriamiento homogéneo, probeta a temperatura de 915 °C y agua fluyendo a 0.2 m/s y 60 °C.

Una vez que se alcanza la temperatura de Leidenfrost, la capa de vapor rompe por la cara inferior de la probeta. Se observa el comienzo del ascenso del frente de mojado y la coexistencia de capa de vapor, la ebullición nucleada y la convección forzada. Alrededor de la zona de convección forzada se nota una zona de recirculaciones de flujo (Figura 4.14) las cuales no existían en la Figura 4.13.



**Figura 4.14.-** Prueba en estado no-isotérmico con una zona de recirculaciones cerca de la base de la probeta después de que pasa el frente de mojado, probeta a temperatura de 915 °C y agua fluyendo a 0.2 m/s y 60 °C.

También se hizo un análisis de las imágenes obtenidas de la probeta en estado no isotérmico (0.2 m/s y 60 °C) y se procesaron en el programa PIVlab para obtener resultados cuantitativos de las velocidades alrededor de la probeta. Se analizaron las imágenes y los resultados que se obtuvieron concuerdan con lo esperado después de analizar la Figura 4.13.



**Figura 4.15-** a) Campo de vectores, b) campo de velocidades, c) campo de vórtices, y d) campo de líneas de corriente. Agua a 0.2 m/s y 60 °C.

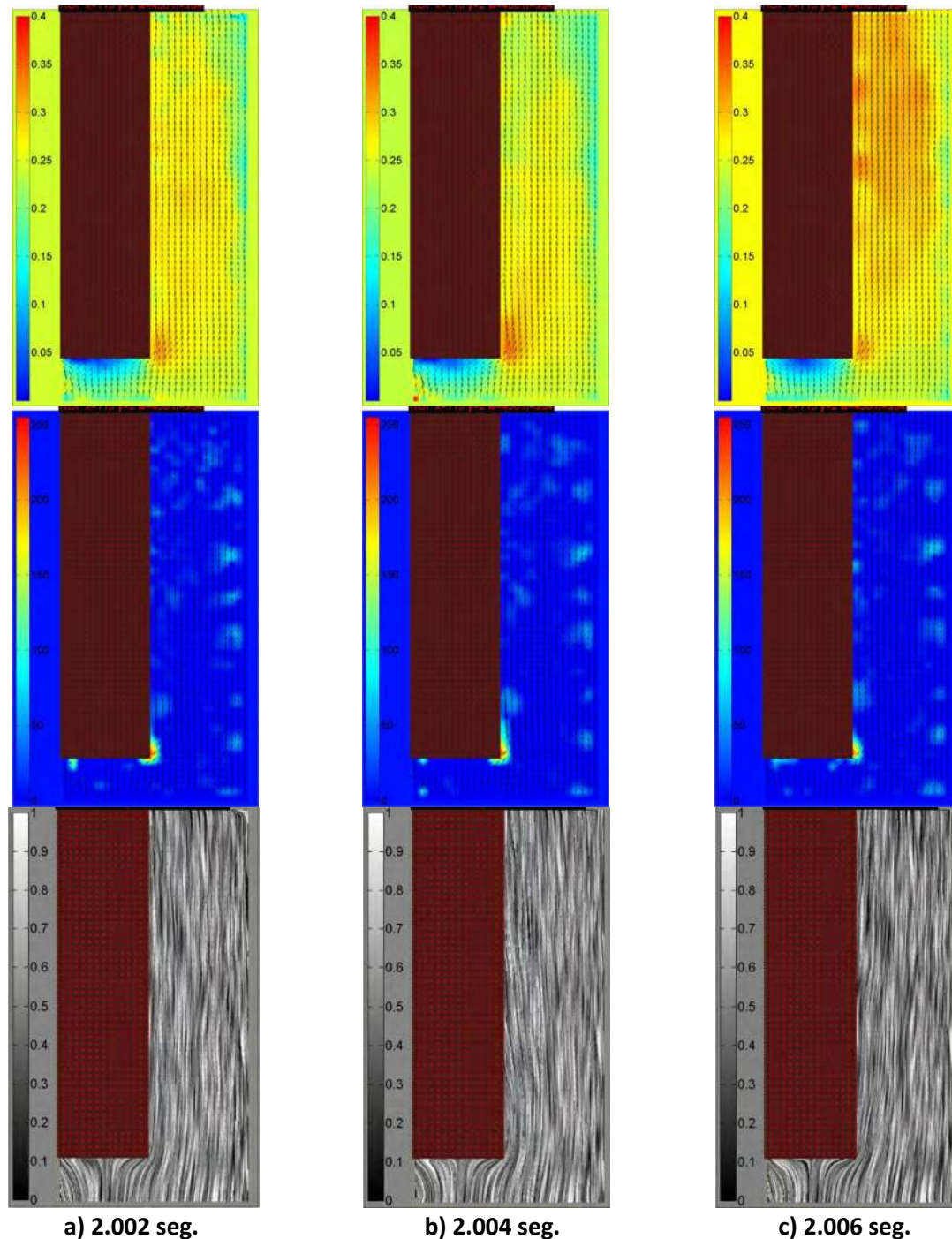
Las imágenes obtenidas fueron de vectores (Figura 4.15 a), campos de velocidades (Figura 4.15 b), campos de vorticidades (Figura 4.15 c) y campos de líneas de corriente (Figura 4.15 d). La Figura 4.15 b) concuerda con la fluctuación captada por Vergara *et. al* [31] (Figura 2.9) y en la siguiente Figura 4.16 se analiza cómo es que surge esa fluctuación.

La Figura 4.16 (al igual que la Figura 4.13) muestra que el flujo alrededor de la capa de vapor es paralelo a la probeta de cara plana. En la Figura 4.16 se muestran tres imágenes procesadas en Matlab en forma consecutiva cada 2 ms. Se encontró mediante el análisis y visualización de las imágenes con detección de bordes y análisis con PIVlab que hay una frecuencia de desprendimiento del flujo de vapor, el cual se separa en el vértice de la base de la probeta.

El conjunto de imágenes de la Figura 4.16 a) muestran que el flujo alrededor de la probeta con capa de vapor es paralelo a la probeta (2.002 segundos), la Figura 4.16 b) muestra que hay separación de vapor en la base de la probeta lo que provoca un aumento de velocidad en el vértice de esta (2.004 segundos) y la Figura 4.16 c) muestra el instante en el que se desprende el vapor y contribuye al incremento de cantidad de movimiento del líquido haciendo que este se acelere aguas abajo de la probeta y como consecuencia se incremente la magnitud de la velocidad del fluido aguas abajo (2.006 segundos). Se encontró que la frecuencia de desprendimiento de vapor es de **167 veces por segundo**. El ciclo completo del desprendimiento de vapor se da en 6 ms y se da en tres fases (imágenes) de 2 ms cada una y se muestran a 2 segundos después de que la probeta entra en contacto con la capa de vapor.

Las velocidades a las que se desprende el vapor en el vértice de la base de la probeta y viaja aguas abajo por el costado de la probeta (Figura 4.16) se encuentran en el orden de 0.35 - 0.40 m/s y las cuales son mayores a las de la Figura 4.2 a) (probeta en estado isotérmico). Las velocidades que hay alrededor de la probeta en estado isotérmico (Figura 4.2 a) en la zona de recirculaciones se encuentran en el orden de entre 0-0.3 m/s. Una de las causas que propician la ausencia de gradiente de presión adverso en la probeta con capa de vapor en esta condición (Figuras 4.13 y 4.16), es que el desprendimiento de vapor aumenta la cantidad de movimiento del fluido en la zona cercana a la base de la probeta. Pero la causa

principal que propicia la ausencia del gradiente de presión adverso, es la presión del vapor generado por la alta temperatura de la probeta.



**Figura 4.16.-** El campo de velocidad, de vorticidad y de líneas de corriente es para el mismo instante en cada columna. a) flujo paralelo a la probeta, b) desprendimiento de vapor instantáneo y c) desprendimiento del vapor aguas abajo. Agua a 0.2 m/s y 60 °C.

A la condición de 0.2 m/s en estado no-isotérmico (Figuras 4.13 y 4.16) no se encontró gradiente de presión adverso, en contraste con la condición de 0.2 m/s en estado isotérmico (Figuras 4.1, 4.2, 4.4, 4.6, 4.8 y 4.10), donde el gradiente de presión adverso desaceleró el fluido, causó la separación de la capa límite e incrementó su espesor y disminuyó el gradiente de velocidad dentro zona de recirculaciones (perdida de energía cinética), lo cual alteró seriamente los patrones de flujo. La pérdida de presión en la región de flujo separado en el costado del cuerpo causa un desequilibrio entre las fuerzas aguas abajo y aguas arriba.

Los resultados anteriores demuestran que la dinámica de fluidos alrededor de la probeta durante la existencia de la capa de vapor bajo condiciones no-isotérmicas es muy diferente a la que se presenta bajo condiciones isotérmicas.

En la Figura 4.17 se presentan las curvas de rapidez de enfriamiento de los tres termopares (ver posiciones en la Figura 3.4) para el caso donde la probeta es calentada hasta 900 °C y enfriada en un flujo de agua a una temperatura de 60°C y una velocidad medida de corriente libre de 0.2 m/s. El análisis de las curvas de rapidez de enfriamiento en cada una de las posiciones de los termopares muestra que a los de 2 segundos, la probeta se encuentra en el interior del tubo y la capa de vapor se forma y permanece horizontal debido a la estabilidad de la capa de vapor que se forma en toda la superficie de la probeta y las líneas de corriente laminares alrededor de la probeta (Figuras 4.13, 4.15 y 4.16) lo que ocasiona un enfriamiento homogéneo de la probeta; en particular los termopares T1 y T2 presentan valores de rapidez de enfriamiento muy semejantes, lo que no sucede en el termopar T3, que estando cerca de la base de la probeta, se ve afectado por la extracción de calor en la base de la probeta y por el cambio de velocidad del flujo debido al cambio de velocidad mostrado en el vértice de la probeta en la Figura 4.16. El inicio del colapso de la capa de vapor en la base de la probeta se presenta, aproximadamente a un tiempo de 5.75 segundos, para después dar inicio a la ebullición nucleada.

La gráfica de rapidez de enfriamiento analizada a 1 segundo después de que la probeta entra en contacto con el medio de enfriamiento (Figura 4.18), muestra que a esta velocidad de flujo, primero se enfría el termopar T3 (-34 °C/s), después el T2 (-15 °C/s) y por último el termopar T1 (-11 °C/s).

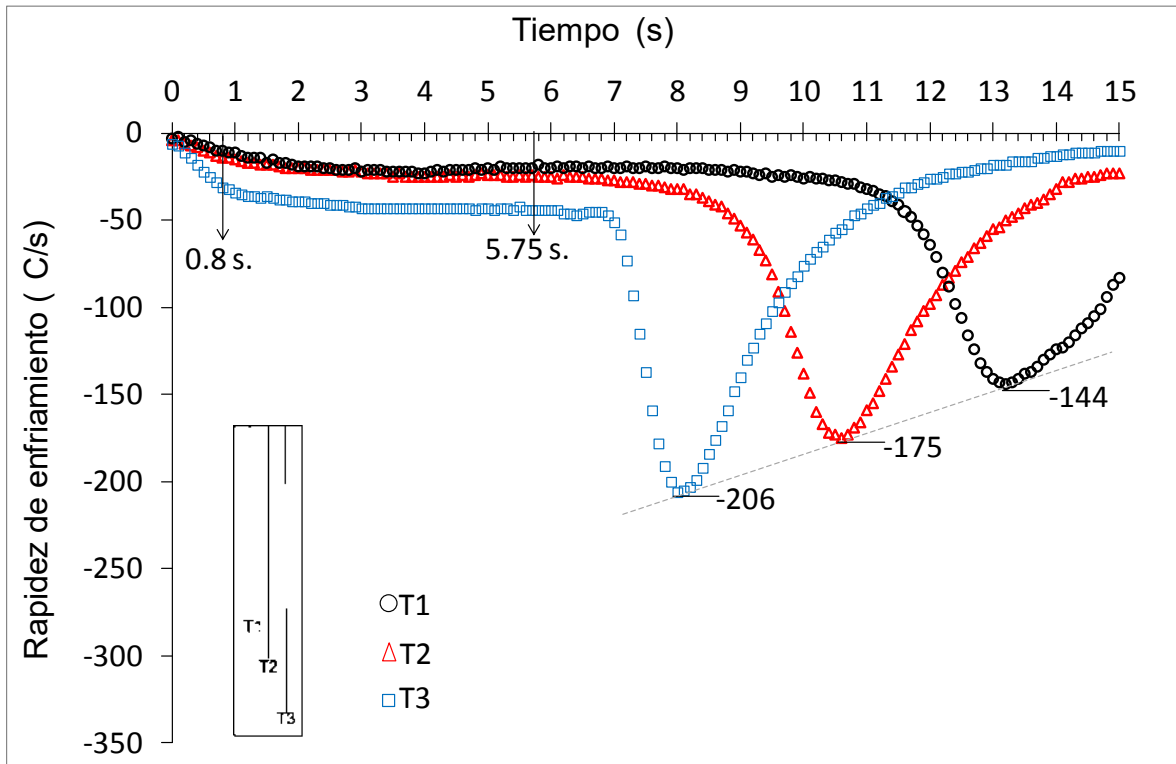


Figura 4.17.- Curvas de rapidez de enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana, enfriada con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.2 m/s.

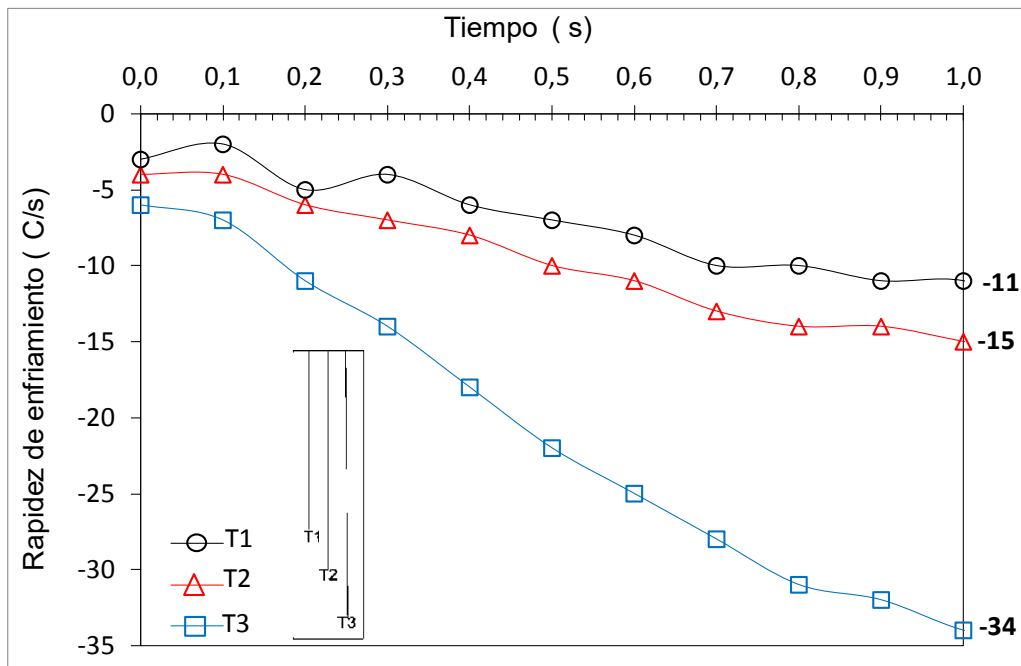


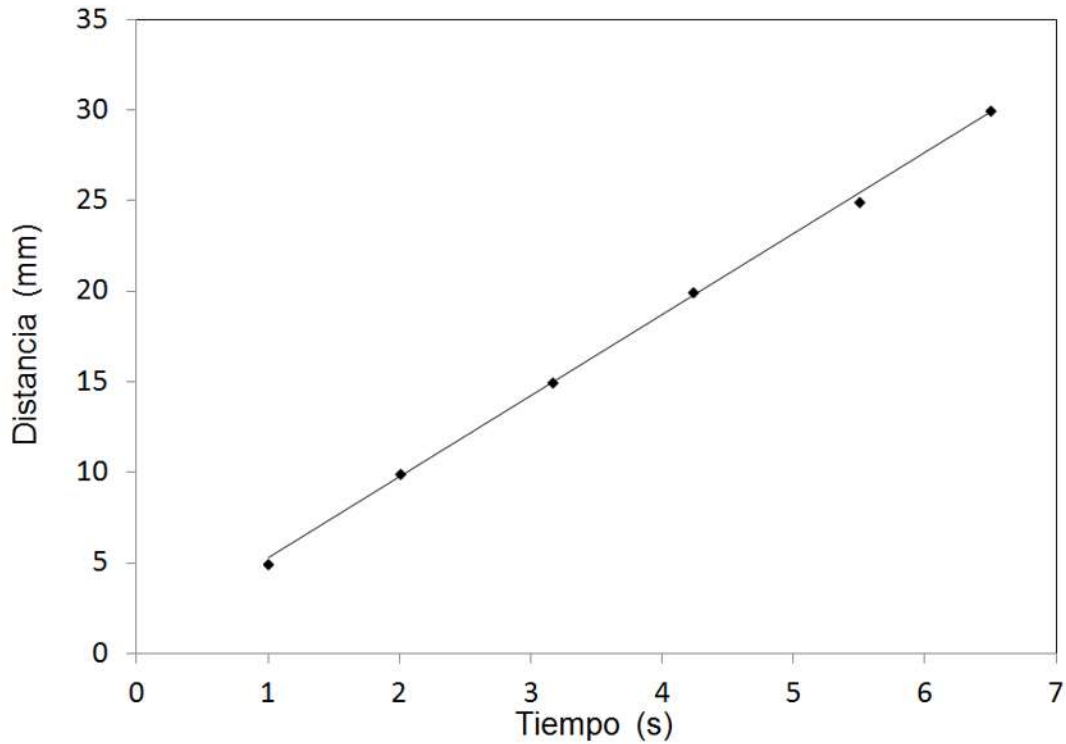
Figura 4.18.- Curvas de rapidez de enfriamiento a 1 segundo de la probeta cilíndrica de cara plana, enfriada con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.2 m/s.

Los resultados del análisis de la curva de enfriamiento para el experimento correspondiente a la Figura 4.17 muestran que las perturbaciones en el espesor de la capa de vapor son muy pequeñas, esto descarta la presencia de desprendimiento de capa límite en la base de la probeta que se observa para el caso isotérmico. También se puede observar de la Figura 4.17 que a diferentes tiempos; la formación y colapso de la capa de vapor en las curvas de rapidez de enfriamiento produce máximos de cada una de las curvas de rapidez de enfriamiento para cada termopar con un comportamiento monótonico; el cual es resultado de un frente de mojado que asciende de manera simétrica en la componente angular del cilindro y con una velocidad constante, tal y como se comprueba en la Figura 4.19, donde para el caso de una probeta cilíndrica de cara plana calentada a 900 °C y enfriada en una corriente de agua a una temperatura de 60 °C y con una velocidad 0.2 m/s, se graficó el avance del frente de mojado con respecto al tiempo en rangos de 10 mm resultando una línea con una pendiente constante. El comportamiento del frente de mojado con velocidad constante es una característica del sistema experimental mostrado en la Figura 3.1 y como se mostrará en las próximas líneas, es función del número de Reynolds ( $Re$ ).

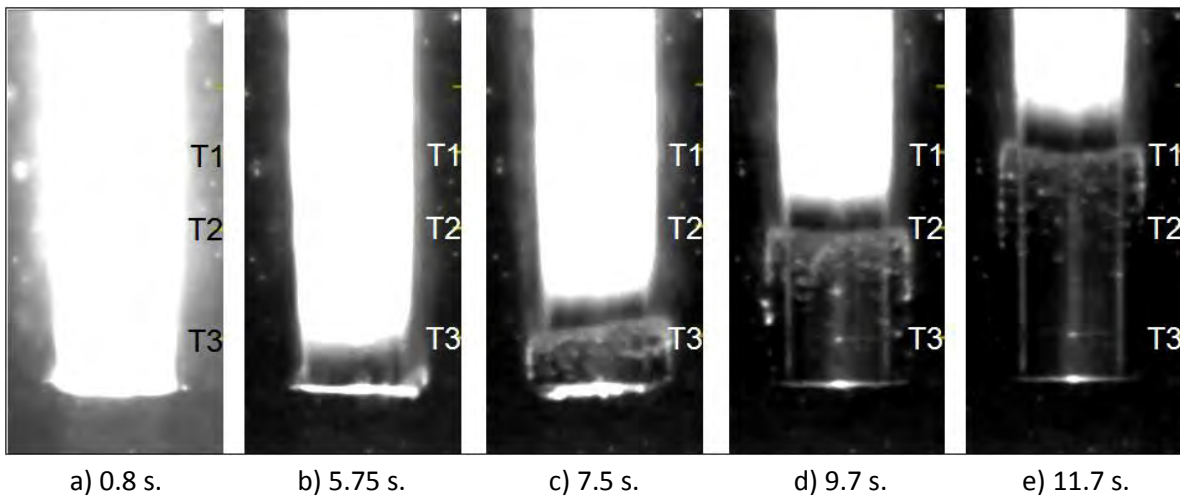
Algunos investigadores han afirmado en base a su experimentación que el frente de mojado inicia en la base de la probeta, pero no asciende con una simetría angular después de que rompe la capa de vapor (ver Figura 2.7), además, atribuyen este comportamiento a la dinámica de fluidos que se genera en la base de la probeta [31].

En la Figura 4.20, se presenta mediante fotografías a diferentes tiempos; la formación y colapso de la capa de vapor, así como el avance del frente de mojado desde la base de la probeta hasta la posición del termopar T1, y se observa que el frente de mojado se mueve con simetría en su componente angular alrededor de la probeta, lo cual puede ser verificado al obtener una gráfica de máximos de cada una de las curvas de rapidez de enfriamiento para cada termopar con un comportamiento monótonico (ver Figura 4.17); el cual es resultado de un frente de mojado que asciende de manera simétrica en la componente angular del cilindro y con una velocidad constante (como se demuestra en la Figura 4.20).



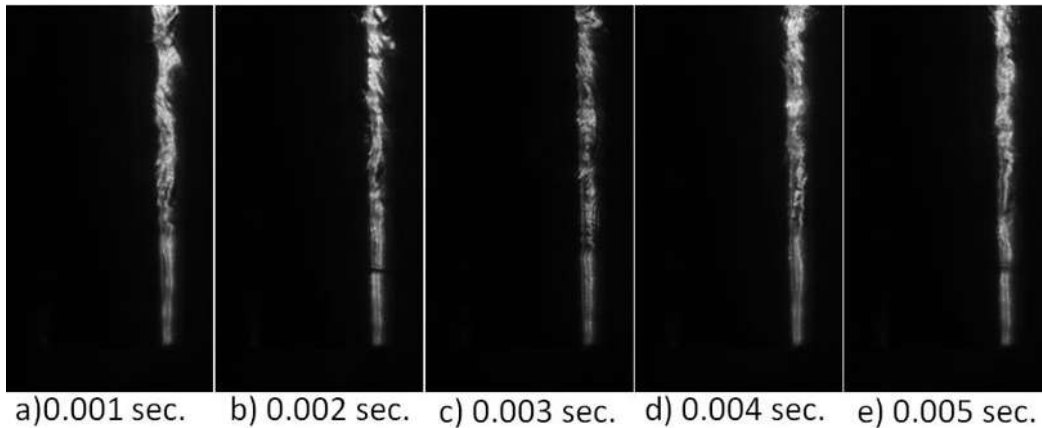


**Figura 4.19.-** Desplazamiento del frente de mojado durante el enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.2 m/s.



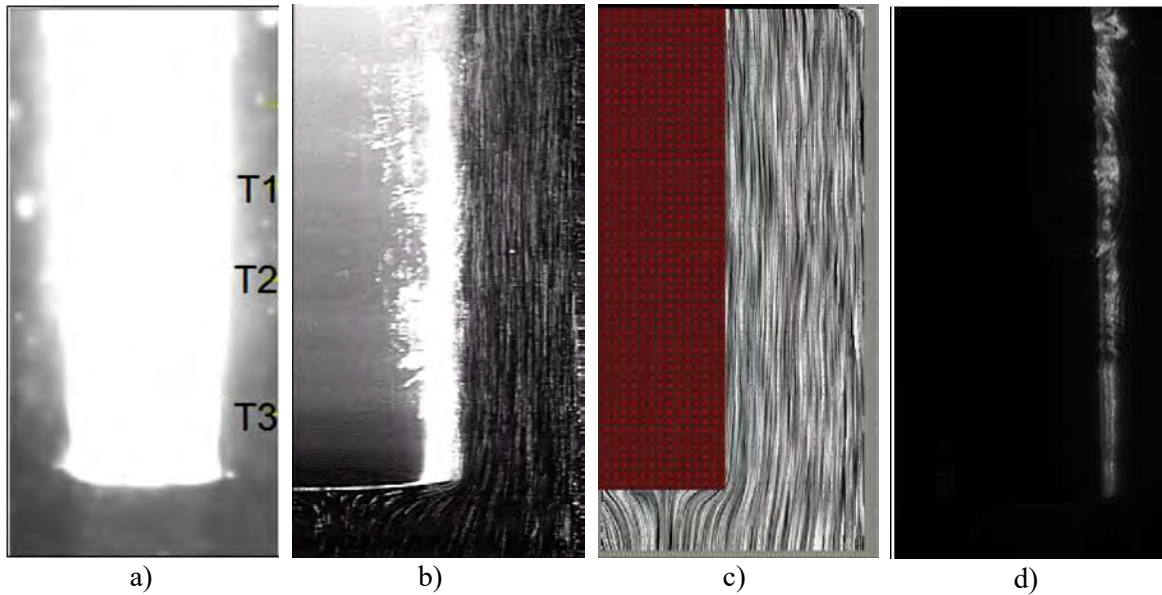
**Figura 4.20.-** Fotografías con la cámara de alta velocidad sin la utilización de filtros de longitud de onda, que muestran la evolución del frente de mojado durante el enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana (probeta A) con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.2 m/s

Con la utilización del filtro de paso corto de 450 nm (Figura 3.34), se estudió únicamente la capa de vapor en la probeta. En las imágenes de la Figura 4.21 se puede observar de una mejor manera la capa de vapor, a la condición de velocidad de 0.2 m/s y 60 °C se puede visualizar claramente el costado de la base de la probeta la capa de vapor y se demuestra que es laminar (ver Figuras 4.13, 4.15 y 4.16). En esta última fase se pudo estimar que el espesor de la capa de vapor a esta condición podría estar oscilando entre los 0.2 y 0.4 mm. Esto es novedoso ya que en los artículos consultados no hay evidencia de que se usen técnicas ópticas para el estudio de la capa de vapor. Vergara *et al.* [31] estimaron un espesor de 1.6 mm de espesor de capa de vapor, lo cual podría ser erróneo en base a la experimentación de este estudio.



**Figura 4.21-** Capa de vapor alrededor de una probeta hecha de acero inoxidable AISI 304 (probeta A) sometida a enfriamiento por convección forzada a: 0.2 m/s.

En la Figura 4.22 se muestran las imágenes de cada una de las técnicas experimentales que se utilizaron a la condición de 0.2 m/s en estado no-isotérmico. Cada una de ellas fue muy importante para la caracterización de los fenómenos de ebullición alrededor de la probeta enfriada por convección forzada. Se caracterizó la capa de vapor y el frente de mojado así como también las líneas de corriente alrededor de la probeta las cuales son muy similares en la Figuras 4.22 b) y c).

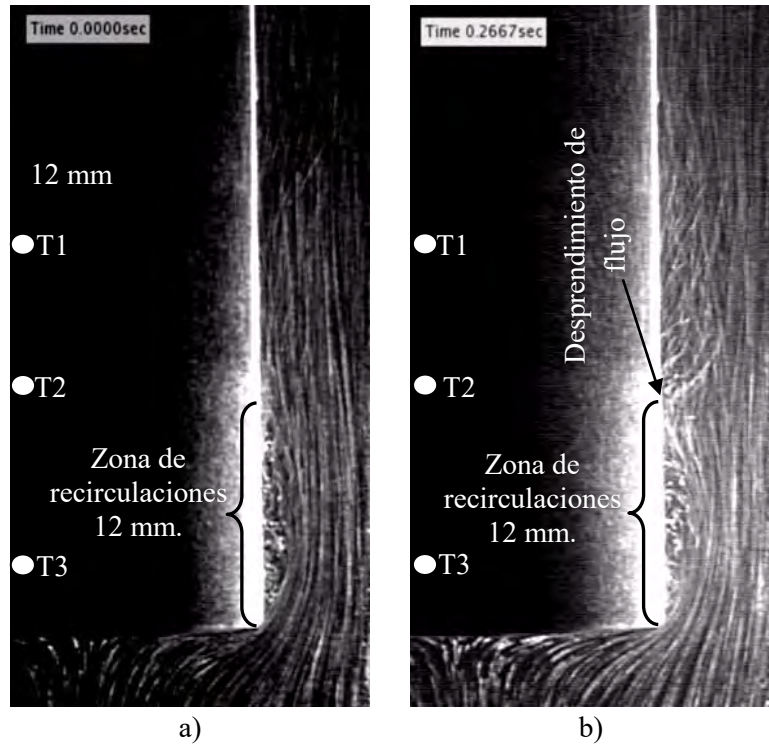


**Figura 4.22-** Capa de vapor alrededor de una probeta hecha de acero inoxidable AISI 304 (probeta a) sometida a enfriamiento por convección forzada a: 0.2 m/s. Diferentes técnicas experimentales: a) lámpara de 300 W, b) utilizando filtro óptico de paso corto de 550 nm, c) técnica PIV y d) utilizando filtro óptico de paso corto de 450 nm.

## 4.2.- Análisis de la condición de velocidad a 0.4 m/s.

### 4.2.1.- Velocidad del agua a 0.4 m/s, probeta en estado isotérmico.

Al incrementar la velocidad del agua a 0.4 m/s se observa un mayor número de líneas de corriente, además la separación de la capa límite dinámica cerca de la base de la probeta es mas turbulenta y tiene una mayor frecuencia de desprendimiento de flujo (15 Hz) que en la prueba en estado isotérmico a 0.2 m/s (10 Hz) (Figura 4.1). La longitud de la zona de separación de la capa límite dinámica cerca de la base de la probeta no cambia con respecto a la condición experimental anterior (12 mm). El proceso en el que se da el desprendimiento de flujo de la zona de separación de la capa límite dinámica es como sigue: en la Figura 4.23 a) hay una entrada de flujo (masa) a la zona de separación de la capa límite dinámica (zona de recirculaciones) creada por un gradiente de presión adverso y llega un momento que la zona de separación (zona de recirculaciones) no es capaz de soportar la entrada de masa por lo que hay un desprendimiento flujo, tal y como se muestra en la Figura 4.23 b).



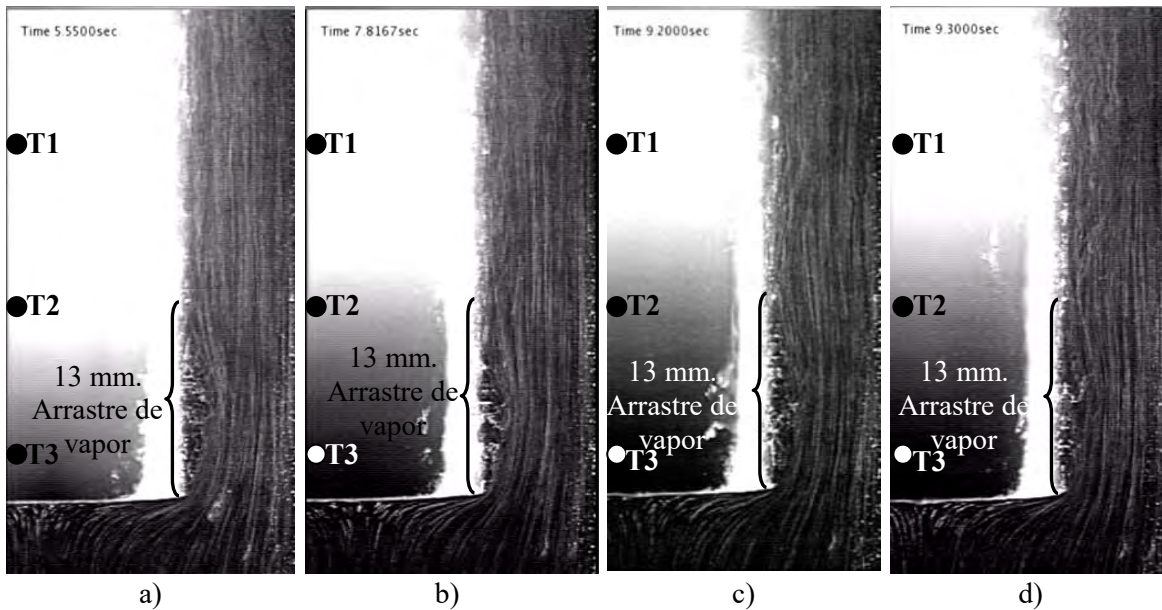
**Figura 4.23.-** Prueba en estado isotérmico, probeta B a temperatura ambiente y agua fluyendo a 0.4 m/s y 60 °C.

Este ciclo es repetitivo y se da igual que en las Figuras 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, y 4.10 pero con mayores magnitudes en la velocidad, es decir hay una acumulación de líquido en la zona de recirculaciones (aumentando la fuerza de arrastre con el aumento del número de Reynolds), una vez que en esta zona de recirculaciones no puede haber una mayor entrada de fluido, se desprende un vórtice aguas abajo el cual va disipando energía debido a la interacción de las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas.

#### **4.2.2.- Velocidad del agua a 0.4 m/s, probeta en estado no-isotérmico.**

En la condición experimental de la probeta con capa de vapor con una velocidad de 0.2 m/s (4.13) se observó que las líneas de corriente eran laminares cerca de la base de la probeta. Cuando se incrementa la velocidad del agua a 0.4 m/s se observa que hay una tendencia inminente de formación y arrastre de vapor a la zona de recirculaciones en el costado cerca de la base de la probeta de 13 mm (4.24), por lo que el análisis de transferencia de calor e hidrodinámica del flujo comienza a ser más complejo. La formación de la zona de recirculaciones podría representar una transición de flujo laminar a turbulento con una tendencia a comenzar a inhibir la transferencia de calor cerca de la base de la probeta y

tener influencia en la rapidez de enfriamiento del termopar más cercano a la base de la probeta (T3).



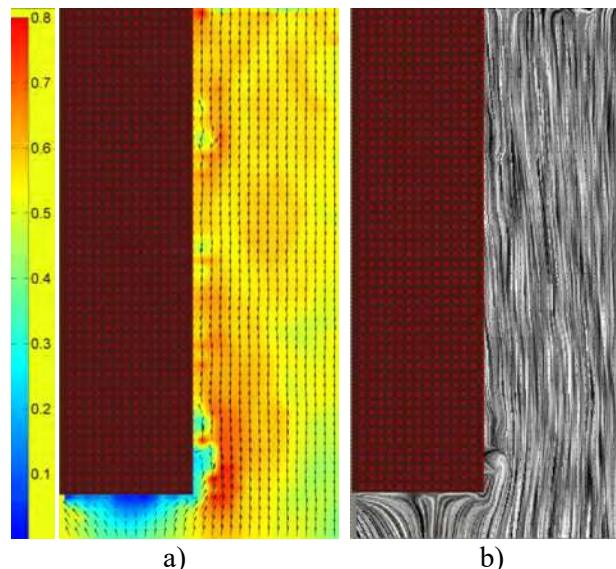
**Figura 4.24.-** Prueba en estado no-isotérmico con recirculaciones cerca de la base de la probeta y enfriamiento no-homogéneo, probeta b a temperatura de 900 °C y agua fluyendo a 0.4 m/s y 60 °C.

La inestabilidad de la Figura 4.24 puede ser confundida con el desprendimiento de capa límite, sin embargo, la inestabilidad de 13 mm de la capa de vapor en la base de la probeta es producto del arrastre de burbujas de vapor que genera el fluido a mayor número de Reynolds ( $Re$ ). Es importante hacer notar que las líneas de corriente que están alejadas de la base de la probeta son laminares; no se observa un punto de desprendimiento de vórtices, se observa una capa de estable alejada de la base de la probeta y desprendimientos de burbujas por aumento de fuerza de arrastre, es decir, mayor número de Reynolds.

Esta zona de recirculaciones de 13 mm propicia que haya una inminente aparición de gradiente de presión adverso cerca de la base de la probeta arrastrando vapor dentro de la zona de recirculaciones, el arrastre de vapor es el que origina que disminuya la transferencia de calor en la posición del termopar T3 y no alcanza a afectar las posiciones donde se encuentran los termopares T1 y T2. Se puede observar que en la Figura 4.24 a), b), c) y d) hay una extracción de calor no uniforme y se refleja por el cambio de tonalidades de color gris en la probeta.

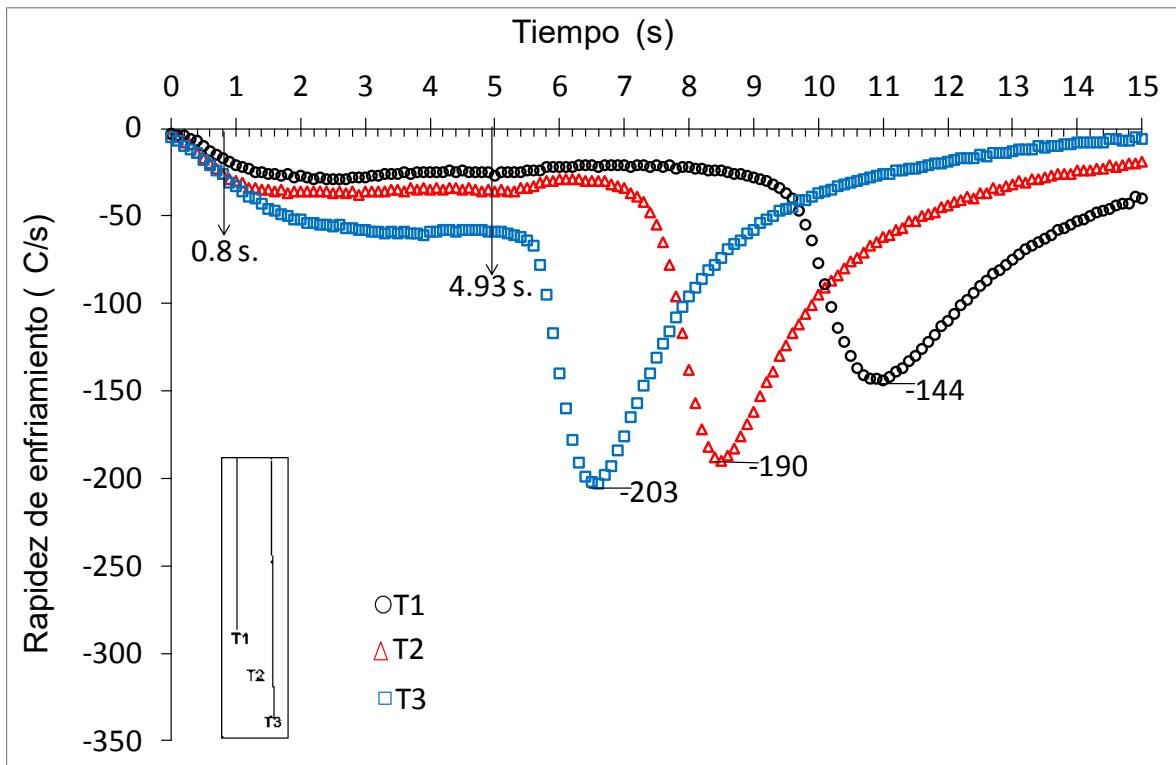
Además se hizo un análisis de las imágenes obtenidas de la probeta en estado no isotérmico (0.4 m/s y 60 °C) y se procesaron en el programa PIVlab para obtener resultados cuantitativos de las velocidades alrededor de la probeta. Se analizaron las imágenes y los resultados que se obtuvieron concuerdan con lo esperado después de analizar la Figura 4.24.

En esta condición a 0.4 m/s en la probeta con capa de vapor hay inestabilidades en la base. Hay vapor entrando y saliendo de la zona de recirculaciones continuamente, desprendiéndose este en la interfaz vapor-líquido, por lo que un análisis de la frecuencia del desprendimiento de las vorticidades se vuelve muy complicado. Esta complicación se debe a la interferencia del vapor desprendido por la superficie lateral y la superficie inferior que interactúa con las fluctuaciones de la capa de vapor y con las partículas de poliamida sembradas en el flujo. Sin embargo, la Figura 4.24 es muy similar a la Figura 4.25 analizada en PIVlab, donde se muestra una zona de baja velocidad (estancamiento) en la base de la probeta y una zona de transición de flujo laminar a turbulento en el costado lateral de la probeta cerca del vértice y tiene un rango de velocidad de entre 0.3 y 0.4 m/s. Por lo que esta zona de baja velocidad es la tendencia a aparición de un gradiente de presión adverso en el costado lateral cerca de la base de la probeta. La Figura 4.24 corresponde a la misma condición que la Figura 4.25.



**Figura 4.25.-.** Probeta a alta temperatura (900 °C) y enfriada por convección forzada analizada en PIVlab a) Vectores de velocidad, b) líneas de corriente. Agua a 0.4 m/s y 60 °C

En la Figura 4.26 se presentan las curvas de rapidez de enfriamiento de los tres termopares (ver posiciones en la Figura 3.4) para el caso donde la probeta es calentada hasta 900 °C y enfriada en un flujo de agua a una temperatura de 60 °C y una velocidad medida en el flujo libre de 0.4 m/s. El análisis de curvas de enfriamiento en la etapa de vapor estable muestra la separación de las líneas horizontales para el caso de los termopares T1 y T2 a consecuencia de un aumento en la transferencia de calor en la superficie de la probeta entre las zonas del T1 y T3 debido a una transición de flujo y la cual provoca una disminución del tiempo de colapso de la capa de vapor en la probeta enfriada con un flujo de agua a 0.2 m/s de 5.75 segundos a 4.93 segundos para el caso de la probeta enfriada con un flujo de agua de 0.4 m/s.



**Figura 4.26.-** Curvas de rapidez de enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana, enfriada con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.4 m/s.

Es importante hacer notar que el comportamiento del termopar T3 (Figura 4.26) para el caso de agua fluyendo a 0.4 m/s, sigue siendo muy similar al termopar T3 (Figura 4.17) para una velocidad de agua de 0.2 m/s, es decir el análisis de la curva de enfriamiento para el

experimento muestran que las perturbaciones en el espesor de la capa de vapor son muy pequeñas, se observa un aumento del arrastre de capa de vapor en la superficie de la probeta por el aumento en el número de Reynolds ( $Re$ ) al interior del tubo de acrílico, sin embargo se descarta la presencia de desprendimiento de capa límite después de la zona de recirculaciones (13 mm) que si se observa para el caso isotérmico bajo las mismas condiciones de velocidad y temperatura de flujo de agua.

En la Figura 4.24 se obtuvieron líneas de corriente alrededor de la probeta de acero en estado no-isotérmico inmersa en un flujo de agua con una velocidad de 0.4 m/s y se observa que en la misma zona donde se posicionó el termopar T3 (para los casos no-isotérmicos) se empieza a formar una zona de transición de flujo laminar a turbulento que puede favorecer el arrastre de vapor y el adelgazamiento de la capa de vapor, y se refleja en el comportamiento de las curvas de rapidez de enfriamiento de la Figura 4.26.

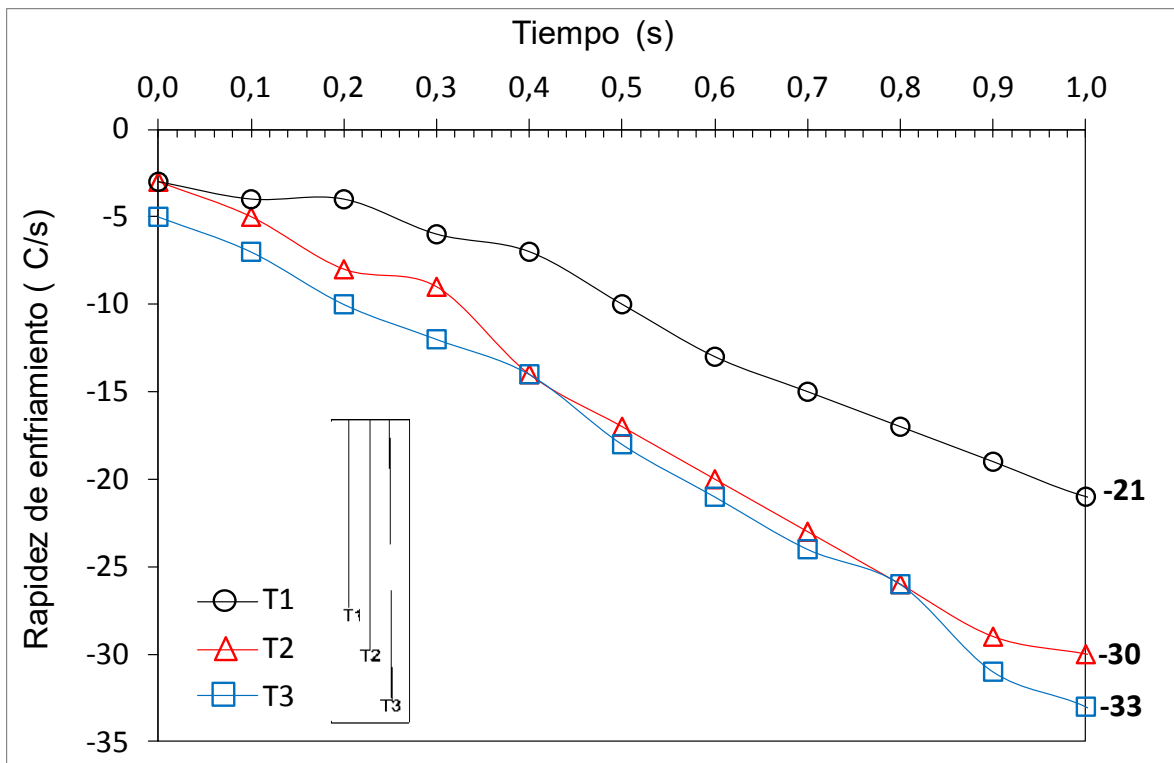


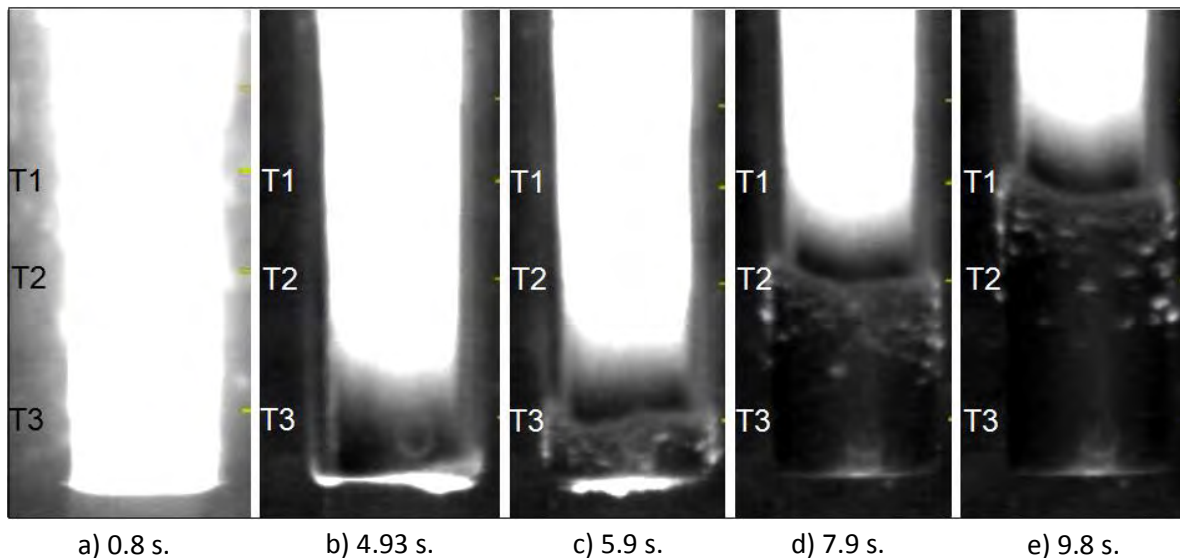
Figura 4.27.- Curvas de rapidez de enfriamiento a 1 segundo de la probeta cilíndrica de cara plana, enfriada con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.4 m/s.



La Figura 4.27 muestra la zona de capa de vapor, se observa que el termopar T3 (-33 °C/s) y el termopar T2 (-30 °C/s) tienen valores similares de rapidez de enfriamiento durante el primer segundo después de que la probeta entra en contacto con el medio de enfriamiento, lo que indica que algún fenómeno físico de cantidad de movimiento o transferencia de energía cerca de la base de la probeta comienzan a jugar un papel muy importante en la rapidez de enfriamiento, mientras que para el termopar T1 (-21 °C/s) se muestra una rapidez de enfriamiento menor a los termopares anteriormente mencionados.

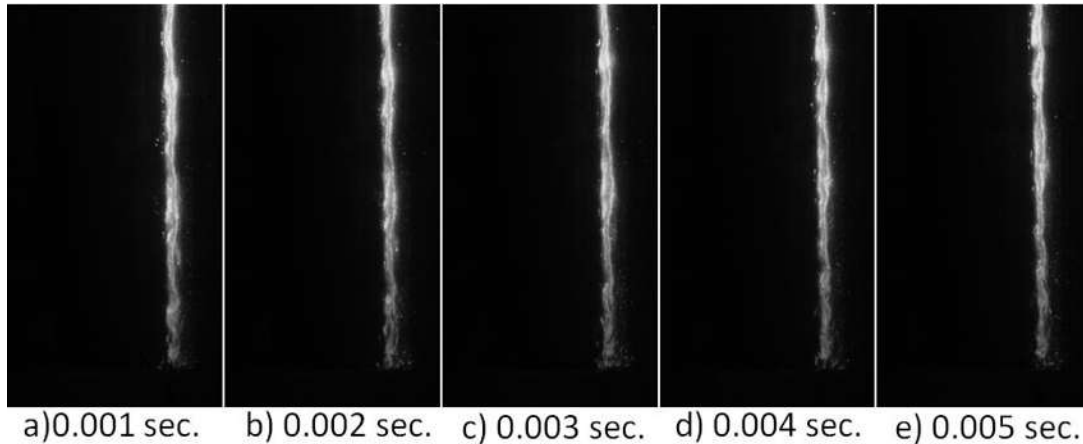
La Figura 4.27 muestra que el orden de rapidez de enfriamiento sigue teniendo el orden de transferencia de calor esperado, es decir, primero el termopar T3, después el termopar T2 y por último el termopar T1, pero con evidencia de que la transferencia de calor está siendo afectada por algún fenómeno físico cerca de la base de la probeta (transición de flujo laminar a turbulento en el costado cerca de la base de la probeta).

En la Figura 4.26 se puede observar que una vez que rompe la capa de vapor las curvas presentan valores máximos negativos de 203 °C/s, 190 °C/s y 144 °C/s escalonados a tiempos similares lo que permiten predecir un frente de mojado uniforme, tal y como se observa en la Figura 4.28.

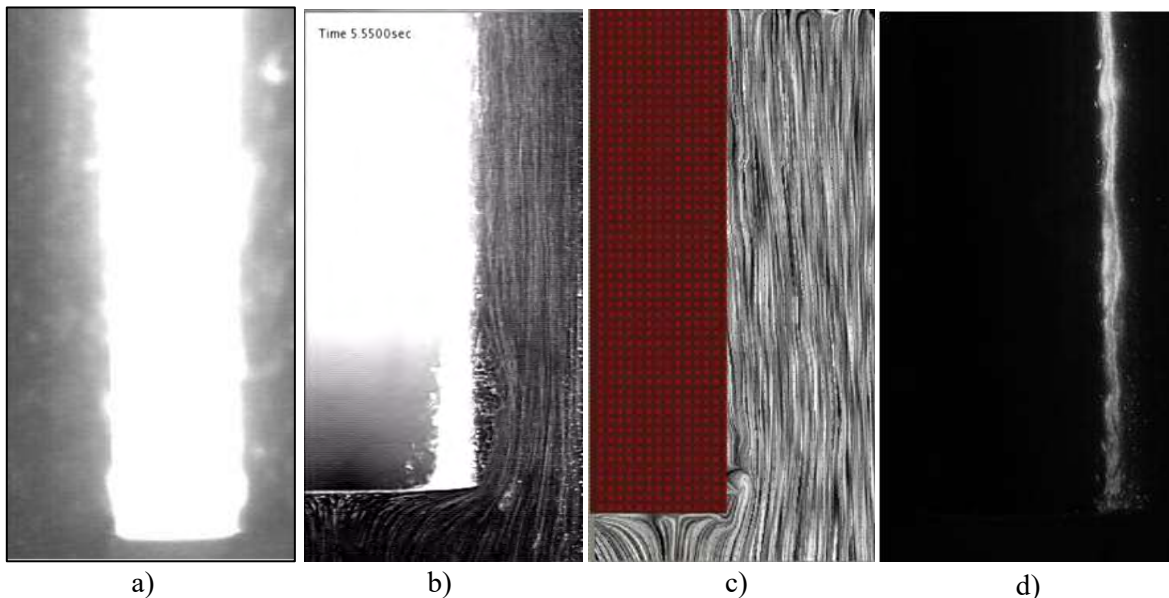


**Figura 4.28.-** Fotografías con la cámara de alta velocidad sin la utilización de filtros de longitud de onda, que muestran la evolución del frente de mojado durante el enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana (probeta a) con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.4 m/s.

En las imágenes de la Figura 4.29 se puede observar de una mejor manera la capa de vapor con la utilización de filtro óptico de paso corto de 450 nm, a la condición de velocidad de 0.2 m/s y 60 °C se puede visualizar claramente en el costado de la base de la probeta la capa de vapor y se demuestra que es similar al de las Figuras 4.24 y 4.25. En esta última fase se pudo estimar que el espesor de la capa de vapor a esta condición de 0.4 m/s podría estar oscilando entre los 0.2 y 0.4 mm (similar a la condición de 0.2 m/s).



**Figura 4.29.-** Capa de vapor alrededor de una probeta hecha de acero inoxidable AISI 304 (Probeta A) sometida a enfriamiento por convección forzada a: 0.4 m/s.



**Figura 4.30.-** Capa de vapor alrededor de una probeta hecha de acero inoxidable AISI 304 (probeta a) sometida a enfriamiento por convección forzada a: 0.4 m/s. Diferentes técnicas experimentales: a) lámpara de 300 W, b) utilizando filtro óptico de paso corto de 550 nm, c) técnica PIV y d) utilizando filtro óptico de paso corto de 450 nm.

En la Figura 4.30 se muestran las imágenes de cada una de las técnicas experimentales que se utilizaron a la condición de 0.4 m/s en estado no-isotérmico. Cada una de ellas fue muy importante para la caracterización de los fenómenos de ebullición alrededor de la probeta enfriada por convección forzada. Se caracterizó la capa de vapor y el frente de mojado así como también las líneas de corriente alrededor de la probeta las cuales son muy similares en la Figuras 4.30 b) y c).

### **4.3.- Análisis de la condición de velocidad a 0.6 m/s.**

#### **4.3.1.- Velocidad del agua a 0.6 m/s, probeta en estado isotérmico.**

Cuando la velocidad del flujo de agua se incrementa a 0.6 m/s se observa un mayor número de líneas de corriente además la separación de la capa límite dinámica cerca de la base de la probeta es mas turbulenta, aparece un crecimiento longitudinal de la zona de recirculaciones, varia constantemente y tiene una mayor frecuencia de desprendimiento de flujo (24 Hz) que en la pruebas en estado isotérmico a 0.2 m/s (10 Hz) y 0.4 m/s (15 Hz). El proceso de separación de la capa límite dinámica se sigue mostrando igual que en las Figuras 4.1 y 4.23, acumulación de fluido (masa) dentro de la zona de separación de la capa límite, máxima acumulación de fluido en la zona de recirculaciones desprendimiento de flujo se muestran en la Figura 4.31. La zona de separación de la capa límite dinámica de la Figura 4.31 a) es más pequeña (9 mm.) que en las condiciones experimentales mencionadas anteriormente, a medida que se incrementa la acumulación de flujo dentro de la zona de separación de la capa límite dinámica debido a un gradiente de presiones la longitud de esta zona se incrementa (13 mm.) hasta que no es capaz de permitir la entrada a de líquido a esta zona (Figura 4.31 b)) y por esta razón se da un desprendimiento de flujo (Figura 4.31 c)) y un evidente crecimiento de la longitud de la zona de separación de la capa límite dinámica la cual llega a medir hasta 15 mm. Dentro de la separación de la capa límite dinámica se encuentran al menos tres zonas de recirculación de flujo o vórtices (Figura 4.31c). Este ciclo es repetitivo y se da igual que en las Figuras 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, y 4.10 pero con mayores magnitudes en la velocidad. Cuando se desprende un vórtice aguas abajo, este va disipando energía debido a la interacción de las fuerzas viscosas con las fuerzas inerciales.

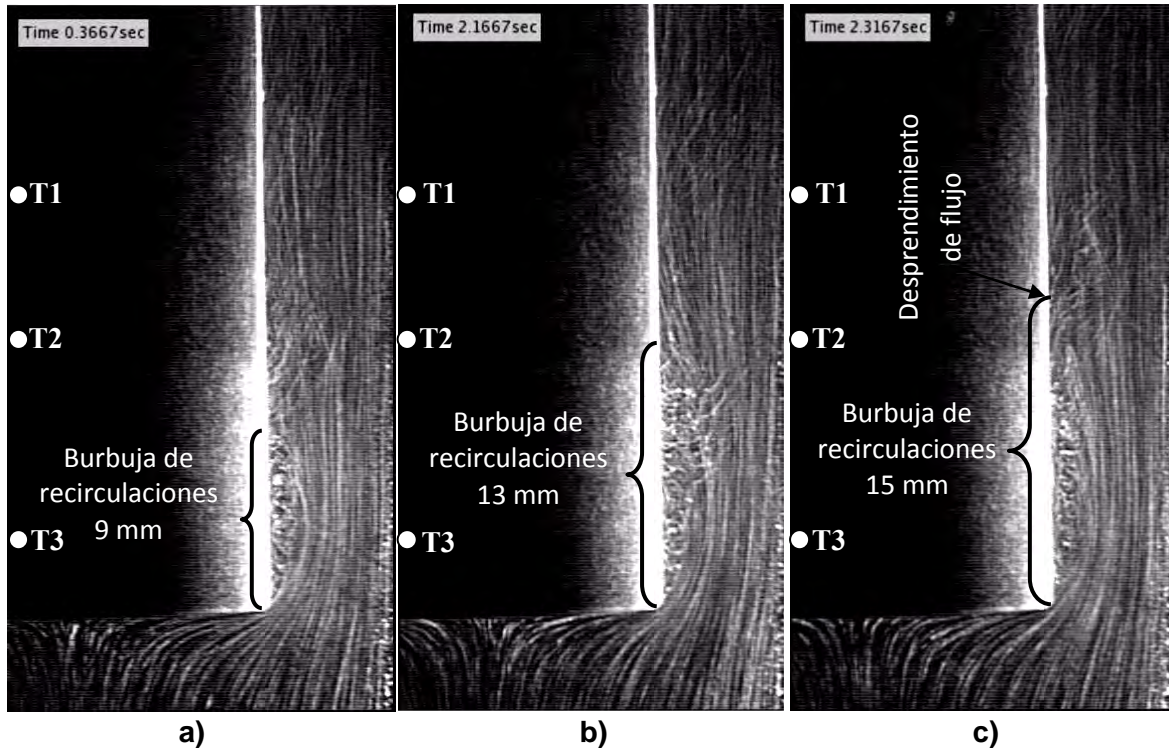
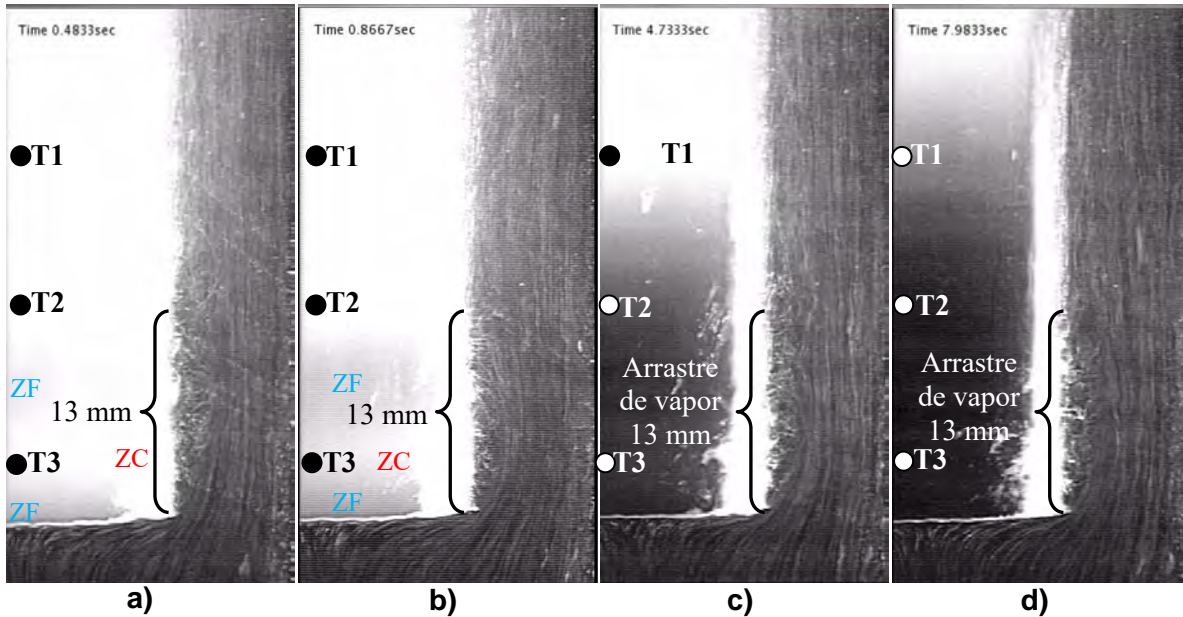


Figura 4.31.- Prueba en estado isotérmico, probeta b a temperatura ambiente y agua fluyendo a 0.6 m/s y 60 °C.

#### 4.3.2.- Velocidad del agua a 0.6 m/s, probeta en estado no isotérmico.

Con la velocidad del agua a 0.6 m/s se observa que la zona de recirculaciones sigue manteniéndose en 13 mm (Figura 4.32), y alrededor de la probeta con capa de vapor se observa que las líneas de corriente son más turbulentas. Esta zona de separación de flujo debido al cambio repentino de velocidades propicia que haya un gradiente de presión adverso cerca de la base de la probeta arrastrando vapor dentro de la zona de separación de la capa límite dinámica. El arrastre de este vapor es el que origina que se inhiba la transferencia de calor en la capa de vapor cuando recircula cerca de la base de la probeta. Se observa que en la Figura 4.32 hay una extracción de calor no uniforme y se refleja por el cambio de tonalidades de color gris en la probeta, es decir hay un gradiente severo de temperatura al interior de la probeta, este gradiente de temperaturas es indeseable cuando se está templando una pieza ya que puede sufrir afectaciones en su microestructura o incluso fractura.

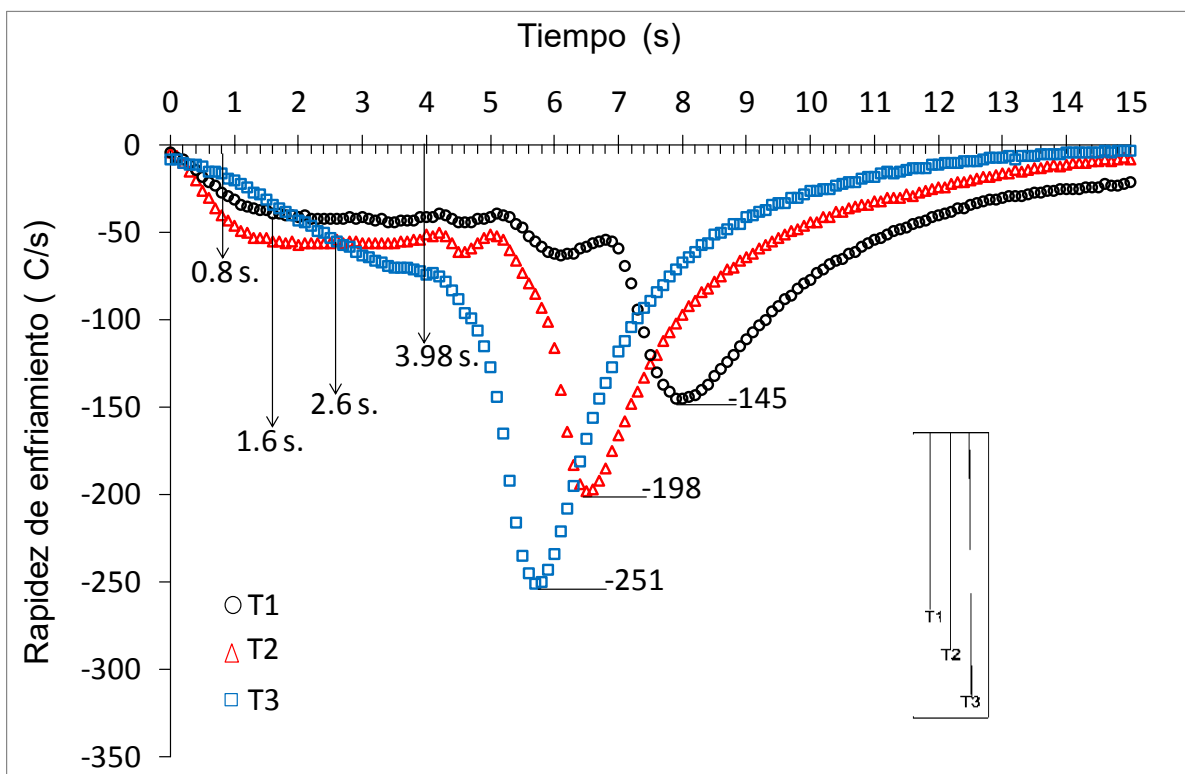


**Figura 4.32.-** Prueba en estado no-isotérmico con recirculaciones cerca de la base de la probeta y enfriamiento no-homogéneo, probeta b a temperatura de 900 °C y agua fluyendo a 0.6 m/s y 60 °C.

En la Figura 4.32 a) el termopar T3 está entre 2 zonas frías ZF (zonas con relativamente baja temperatura) y se distinguen porque en la Figura se muestran como zonas más oscuras, por lo que en la zona dónde está exactamente el termopar T3 se puede considerar como una zona caliente (ZC) a alta temperatura ya que el color en esa zona es más claro. En la Figura 4.32 b) se puede apreciar mejor este fenómeno, ya que las zonas oscuras (ZF) se aprecian mejor en la parte inmediata superior e inferior de donde se encuentra el termopar T3. Lo que impide que haya una transferencia de calor efectiva en la zona donde se encuentra el termopar T3 (ZC). Bajo condiciones no isotérmicas (ver Figura 4.32) la dinámica de fluidos alrededor de la probeta es muy turbulenta y con arrastre de vapor a la zona de recirculación en el costado cerca de la probeta debido a la aparición del gradiente de presión adverso.

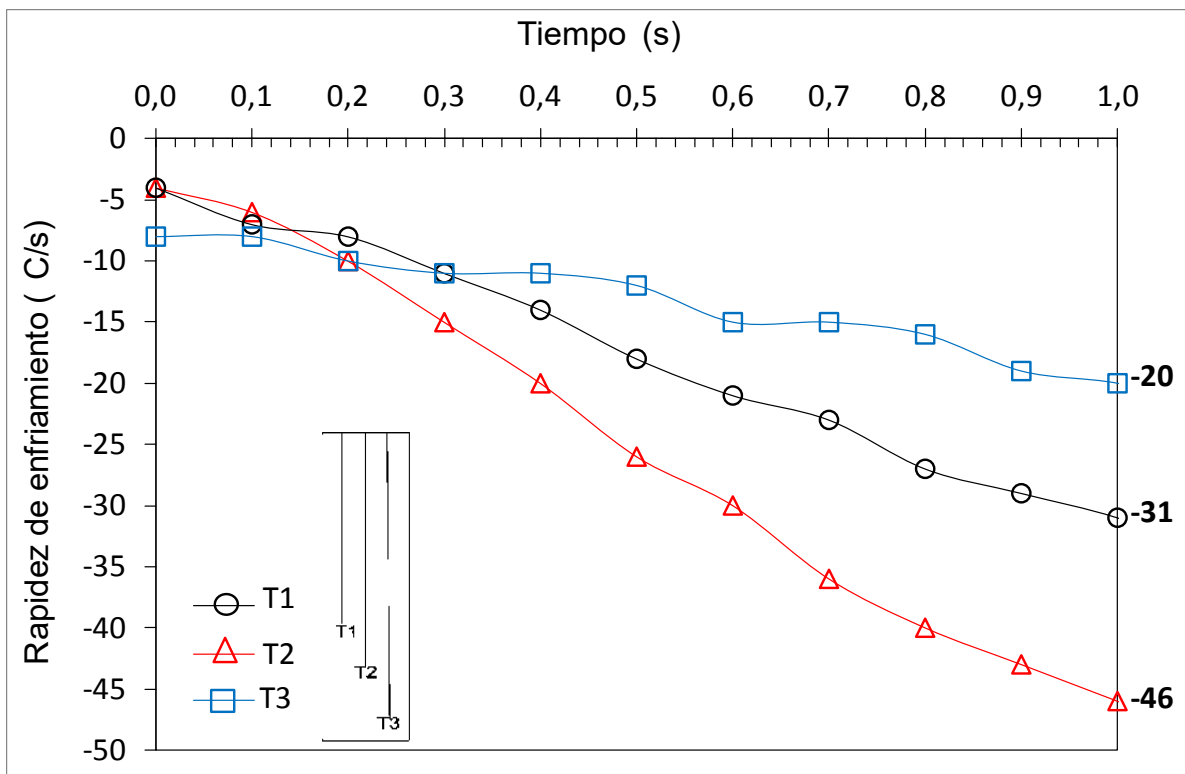
En la Figura 4.33 se presentan las curvas de rapidez de enfriamiento de los tres termopares (ver posiciones en la Figura 3.4) para el caso donde la probeta es calentada hasta 900 °C y enfriada en un flujo de agua a una temperatura de 60 °C y una velocidad medida en el flujo libre es de 0.6 m/s. Bajo estas condiciones experimentales se observa que la capa de vapor en las posiciones de los termopares T1 y T2 se comienza a estabilizar a los 0.8 segundos, mientras que la capa de vapor en la posición del termopar T3 nunca se estabiliza (ver valores

de rapidez de enfriamiento a los 0.8, 1.6 y 2.6 segundos), es decir, no se alcanza un valor de rapidez de enfriamiento constante lo que demuestra una perturbación de la capa de vapor en todo el tiempo que dura este fenómeno. La capa de vapor se colapsa en la base de cara plana del cilindro a los 3.98 segundos a diferencia del experimento con agua fluyendo a 0.4 m/s donde colapsa a los 4.93 segundos; sin embargo, durante los 3.98 segundos la capa de vapor es estable, para las posiciones de los termopares T1 y T2. Una vez colapsada la capa de vapor en la base de la probeta a los 3.98 segundo, se desprende la capa límite y se generan vórtices que desestabilizan la capa de vapor aguas abajo y provocan oscilaciones en las curvas de rapidez de enfriamiento de los termopares más alejados de la base, es decir zonas de la superficie de la probeta entre las posiciones de los termopares T1 y T2. Cuando colapsa la capa de vapor en la posición del termopar T2 la vorticidad se incrementa aumentando la inestabilidad de la capa de vapor del T1 produciendo más oscilaciones en la curva de rapidez de enfriamiento hasta los 7 segundos aproximadamente.



**Figura 4.33.-** Curvas de rapidez de enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana, enfriada con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.6 m/s.

A los 0.8 segundos hay una mayor rapidez de enfriamiento en los termopares T1 y T2 que en el termopar T3. A los 1.6 segundos hay una mayor rapidez de enfriamiento en el termopar T2 y la rapidez de enfriamiento en los termopares T1 y T3 es igual. A los 2.6 segundos hay una menor rapidez de enfriamiento en el termopar T1 y la rapidez de enfriamiento en los termopares T2 y T3 es igual. Por lo que se puede decir que el arrastre de vapor a la zona de recirculaciones es el que esta inhibiendo la transferencia de calor cerca de la base de la probeta tal y como se muestra en la Figura 4.32. Con este análisis se observa que la capa de vapor se vuelve muy inestable a estas condiciones de flujo ya que las curvas de rapidez de enfriamiento no son paralelas entre si durante los primeros segundos.

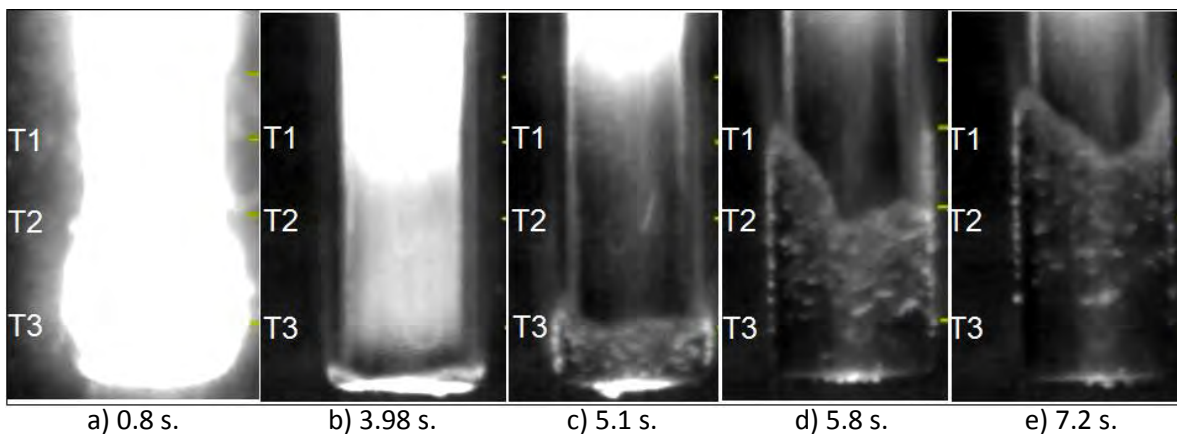


**Figura 4.34.-** Curvas de rapidez de enfriamiento a 1 segundo de la probeta cilíndrica de cara plana, enfriada con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.6 m/s.

La Figura 4.34 continúan mostrando evidencia de que cuando la probeta de cara plana se enfría con agua a 60 °C fluyendo a 0.6 m/s el enfriamiento en la capa de vapor no tiene un comportamiento lógico, aquí se muestra el análisis a 1 segundo después de que la probeta

entra en contacto con la capa de vapor, claramente se ve que el termopar T2 (-46 °C/s) es el que tiene una mayor transferencia de calor y el termopar T3 (-20 °C/s) es el que tiene una menor transferencia de calor, ocasionando fuertes gradientes térmicos en el interior de la probeta cilíndrica de cara plana. El orden esperado de extracción de calor según las Figuras 4.18 y 4.27 debería ser que el enfriamiento de la probeta desde la base hacia arriba en la fase de capa de vapor, primero debería enfriarse el termopar T3, después el T2 y por último el termopar T1. Evidentemente no se cumple lo anteriormente mencionado ya que la Figura 4.34 muestra que en la zona de capa de vapor primero se enfría el termopar T2, seguido del T1 y por último el termopar T3.

El rompimiento de la capa de vapor (3.98 segundos) en la base de la probeta provoca desprendimiento de la capa límite después de 3.98 segundos y provoca un incremento de la vorticidad que va acompañada con la velocidad del frente de mojado, es decir a los pocos segundos de colapsar la capa de vapor y formarse el frente de mojado la zona que presenta desprendiendo de capa límite es pequeña y la vorticidad no afecta la simetría angular del frente de mojado (ver Figura 4.35 c)). Sin embargo, cuando el frente de mojado ya ha recorrido una zona amplia de la probeta la vorticidad es tan grande, que el frente de mojado deja de ser simétrico en la componente angular, (ver imágenes del frente de mojado en las Figuras 4.35 d) y 4.35 e)).



**Figura 4.35.-** Fotografías con la cámara de alta velocidad sin la utilización de filtros de longitud de onda, que muestran la evolución del frente de mojado durante el enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana con agua a 60 °C y a una velocidad de 0.6 m/s.

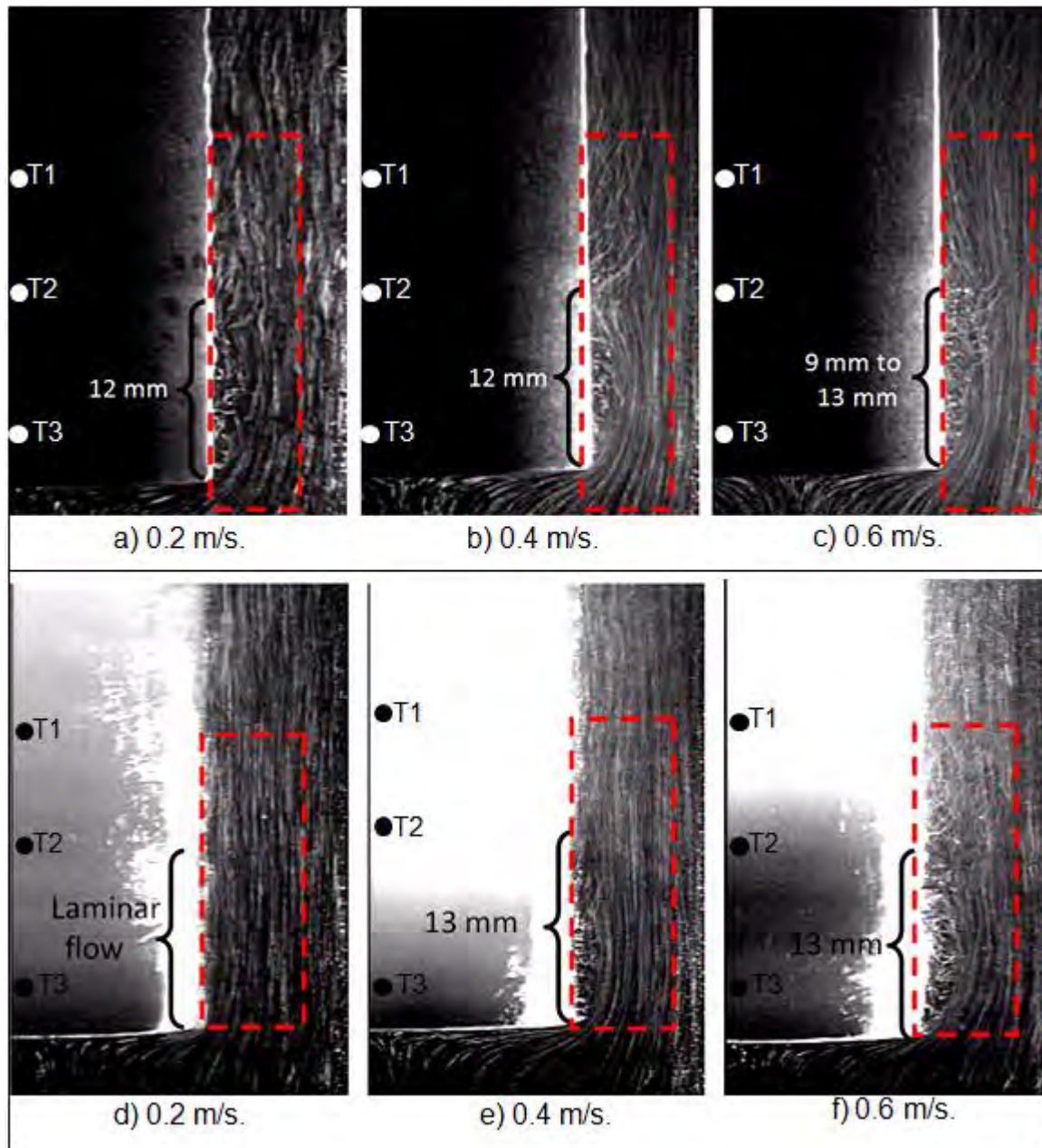


En la Figura 4.35 se presentan imágenes la dinámica del fluido alrededor de la probeta bajo condiciones no-isotérmicas y sin filtros óptico. Bajo estas condiciones de grabación se puede ver de la Figura 4.35 a) que la capa de vapor se expande en la base de la probeta por el arrastre de vapor que produce el agua a 60°C y velocidad del flujo de 0.6 m/s. La expansión de la capa de vapor en esta zona se relaciona con la alta energía térmica almacenada por la probeta en los primeros segundos del experimento y la aparición del gradiente de presión adverso, lo provoca un aislamiento térmico del vapor en la zona cercana a la base plana de la probeta, por lo que el T3 de la Figuras 4.33 y 4.34 parece disipar lentamente su temperatura y no presenta una curva horizontal en los primeros segundos ya que la capa de vapor siempre se mantiene inestable.

Cuando en el experimento han transcurrido 3.98 segundos la capa de vapor colapsa en la base de la probeta para dar origen al frente de mojado, la temperatura disminuye en la probeta de prueba (ver Figura 4.35 b)) y también la rapidez de generación de vapor, sin embargo la velocidad del fluido se mantiene y origina que la capa de vapor en esta zona del termopar T3 se adelgace más rápidamente que en las posiciones de los otros termopares T1 y T2; En la Figura 4.35 c) se puede ver que después de los 5.1 segundos la capa de vapor ha colapsado y el frente de mojado que asciende de una forma no asimétrica, irregular y caótica, tal y como se observa en las Figuras 4.35 d) y 4.35 e).

#### **4.4.- Comparación de los patrones de flujo en estado isotérmico y no isotérmico.**

En la Figura 4.36 se muestran las líneas de corriente alrededor de la probeta cilíndrica de cara plana para las tres velocidades de enfriamiento (0.2, 0.4 y 0.6 m/s) en estado isotérmico (probeta a temperatura ambiente en el interior de un tubo de acrílico con una corriente libre de agua a 60°C) y no-isotérmico (probeta calentada a 900°C y enfriada en el interior de un tubo de acrílico con una corriente libre de agua a 60°C).



**Figura 4.36.-** Líneas de corriente alrededor de la probeta cilíndrica de cara plana bajo condiciones isotérmicas y no isotérmicas, a las 3 diferentes velocidades a), b), y c) condiciones isotérmicas y d), e) y f) bajo condiciones no isotérmicas (enfriamiento de la probeta con una temperatura inicial de 900 °C).

A la velocidad de 0.2 m/s bajo condiciones isotérmicas existe una zona de recirculaciones aguas abajo del vértice de la probeta de cara plana y desprendimiento de vórtices (10 Hz) (ver Figura 4.36 a)). Hay un gradiente de presión adverso y generación de vórtices a pequeña escala dentro de la zona de recirculaciones. En estado no-isotérmico y a la misma

velocidad, no se presenta la zona de recirculaciones aguas abajo del vértice de la probeta de cara plana y tampoco se ven vórtices durante la etapa de capa de vapor estable en toda la superficie de la probeta (ver Figura 4.36 d)). También, se pueden ver líneas de corriente características de un flujo laminar; la estabilidad de una capa de vapor alrededor de toda la superficie de la probeta compensa el gradiente de presión que podría originar la separación de la capa límite por efecto de geometría de la pieza.

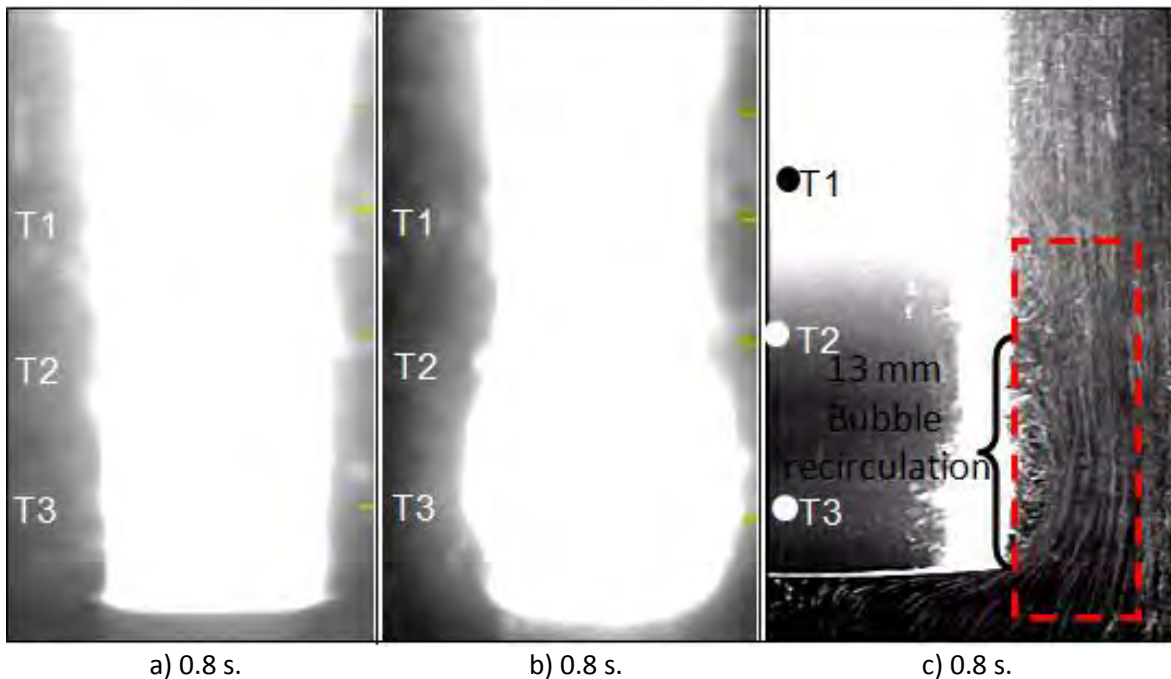
En la Figura 4.36 b) a la velocidad de 0.4 m/s bajo condiciones isotérmicas, la separación de la capa límite forma una zona de recirculaciones mayor escala que la que se observa en la Figura 4.36 a), también se observa que hay desprendimiento de vórtices. La zona de recirculaciones se genera hasta una longitud de 12 mm medidos desde la base de la probeta. La frecuencia de desprendimiento de vórtices a 0.4 m/s es de mayor frecuencia (15 Hz) en comparación con el caso de velocidad de 0.2 m/s (10 Hz) (aumentando la fuerza de arrastre con el aumento del número de Reynolds).

Para el caso de 0.4 m/s, en condiciones no isotérmicas se observa una zona de inestabilidad de la capa de vapor provocada por un aumento en la fuerza de arrastre (ver Figura 4.36 e)). Esta inestabilidad en el costado de la base de la probeta es producto del arrastre de vapor que atrapa el fluido en la zona de recirculaciones a mayor número de Reynolds ( $Re$ ). Es importante hacer notar que las líneas de corriente que están alejadas de la base de la probeta son laminares; no se observa un punto de desprendimiento de vórtices, se observa una capa de estable alejada de la base de la probeta y desprendimientos de burbujas por aumento de fuerza de arrastre, es decir, mayor número de Reynolds

En la Figura 4.36 c) a la velocidad de 0.6 m/s bajo condiciones isotérmicas, la zona de recirculación o separación de capa límite abarca todo el cuadro de línea punteada de la imagen y el punto de desprendimientos de vórtices es mayor que el que se observa en las Figuras 4.36 a) y 4.36 b); la longitud de la zona de recirculaciones fluctúa entre los 9 y 15 mm de largo. Bajo condiciones no isotérmicas (ver Figura 4.36 f)) la dinámica del fluido alrededor de la probeta es muy turbulenta y con arrastre de vapor a la zona de recirculación en el costado cerca de la probeta.

Con esta comparación experimental se reafirma que la dinámica de fluidos alrededor de la probeta durante la existencia de la capa de vapor bajo condiciones no-isotérmicas es muy diferente a la que se presenta bajo condiciones isotérmicas.

El efecto del arrastre de capa de vapor por altos números de Reynolds dentro de la zona de recirculaciones ( $Re$ ) puede ser reafirmado con la ayuda de la Figura 4.37. Cuando el flujo de agua tiene una velocidad promedio de corriente libre antes de impactar con la base de la probeta de 0.4 m/s (Figura 4.37 a) la expansión de la capa de vapor aparentemente no se presenta ya que el valor del número de Reynolds no es suficiente para producir una perturbación considerable de capa de vapor.



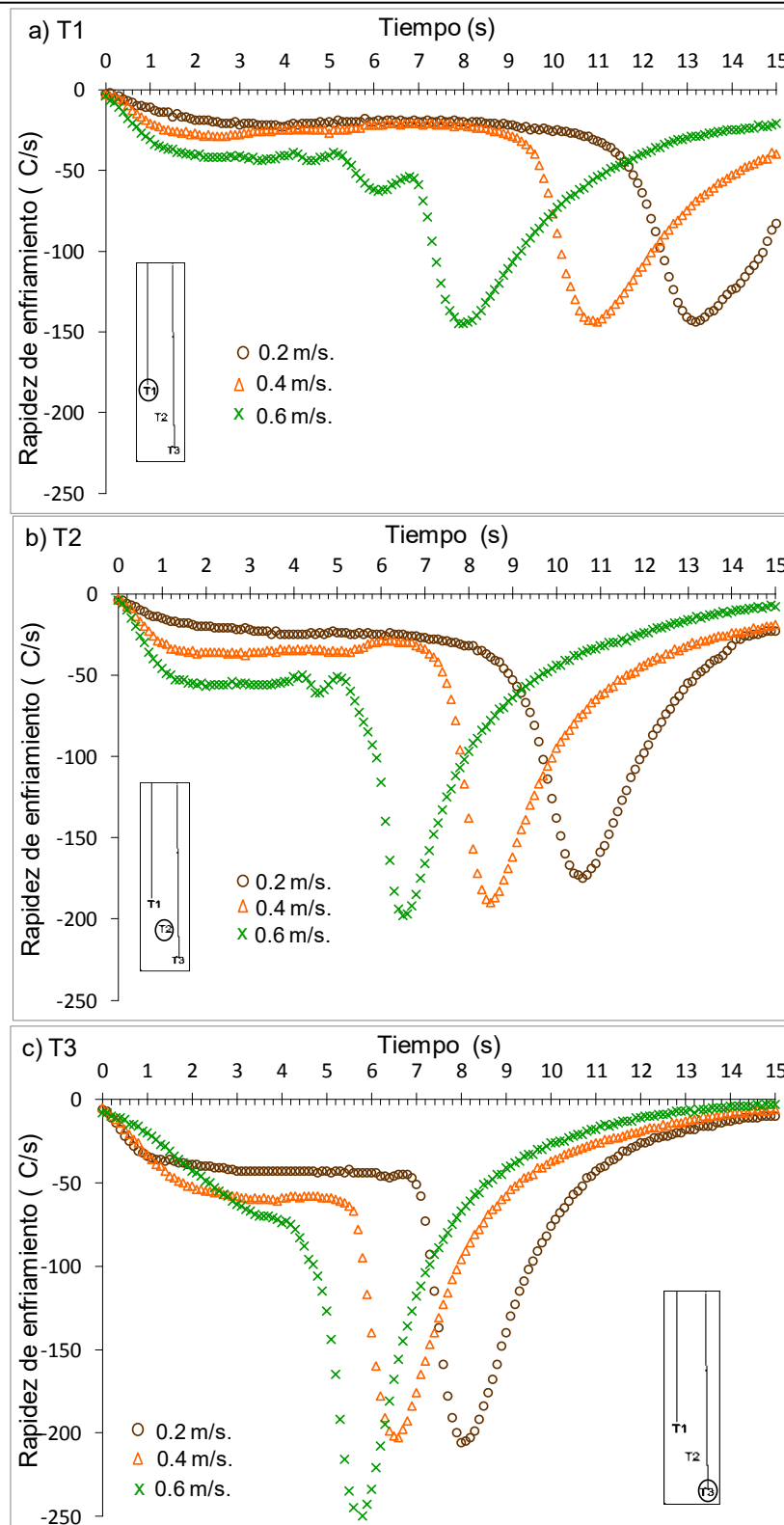
**Figura 4.37.-** Visualización de la capa de vapor formada durante el enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana (900 °C) con agua a 60 °C. a) Sin la utilización de filtro de longitud de onda de la luz y a una velocidad del agua de 0.4 m/s y b) Sin la utilización de filtro de longitud de onda de la luz y a una velocidad del agua de 0.6 m/s; c) utilizando el filtro de longitud de onda de la luz y a una velocidad del agua de 0.6 m/s

Cuando el fluido tiene una velocidad de corriente libre de 0.6 m/s (Figura 4.37 b) la expansión de la capa de vapor se produce por arrastre de vapor en la zona de recirculaciones que se genera en la base de la probeta de cara plana (ver Figura 4.37 c)). Las Figuras 4.37 b) y 4.37 c) son las mismas imágenes del fluido con la diferencia que la imagen 4.37 b) es sin

la utilización del filtro óptico y del lente fotográfico macro y la imagen 4.37 c) es con la utilización del filtro óptico de paso corto de 550 nm y del lente fotográfico macro y utilizando partículas de poliamida de 50  $\mu\text{m}$  para trazar las líneas de corriente; el filtro fue utilizado para eliminar las longitudes de onda del espectro de luz visible mayores a 550 nm, características de las probetas a alta temperatura (900°C).

En la Figura 4.38 c), se muestran las curvas de rapidez de enfriamiento a las tres diferentes velocidades para el termopar T3, observando que la rapidez de enfriamiento en la zona de capa de vapor en los primeros segundos del enfriamiento de la probeta tiende a disminuir conforme se incrementa la velocidad del agua, es decir, la zona de recirculaciones que se forma debido al gradiente de presión adverso afecta las curvas de rapidez de enfriamiento comenzando a inhibir la transferencia de calor a esta condición ya que el vapor desprendido de la base de la probeta queda atrapado en la zona de recirculaciones.

El comportamiento del termopar T3 no se presenta en las posiciones de los termopares T1 y T2, donde al incrementar la velocidad del agua, los valores en la rapidez de enfriamiento en la zona de capa de vapor se incrementan (ver Figuras 4.38 a) y 4.38 b)). Lo cual confirma que la recirculación que produce el desprendimiento de capa de vapor y que se origina en la base de la probeta afecta la evolución del frente de mojado.



**Figura 4.38.-** Curvas de rapidez de enfriamiento en cada una de las posiciones de los termopares durante el enfriamiento de la probeta cilíndrica de cara plana con agua a 60 °C y a las tres diferentes velocidades. a) termopar 1 (T1), b) termopar 2 (T2) y c) termopar 3 (T3).

#### **4.5.- Transferencia de calor en la capa de vapor.**

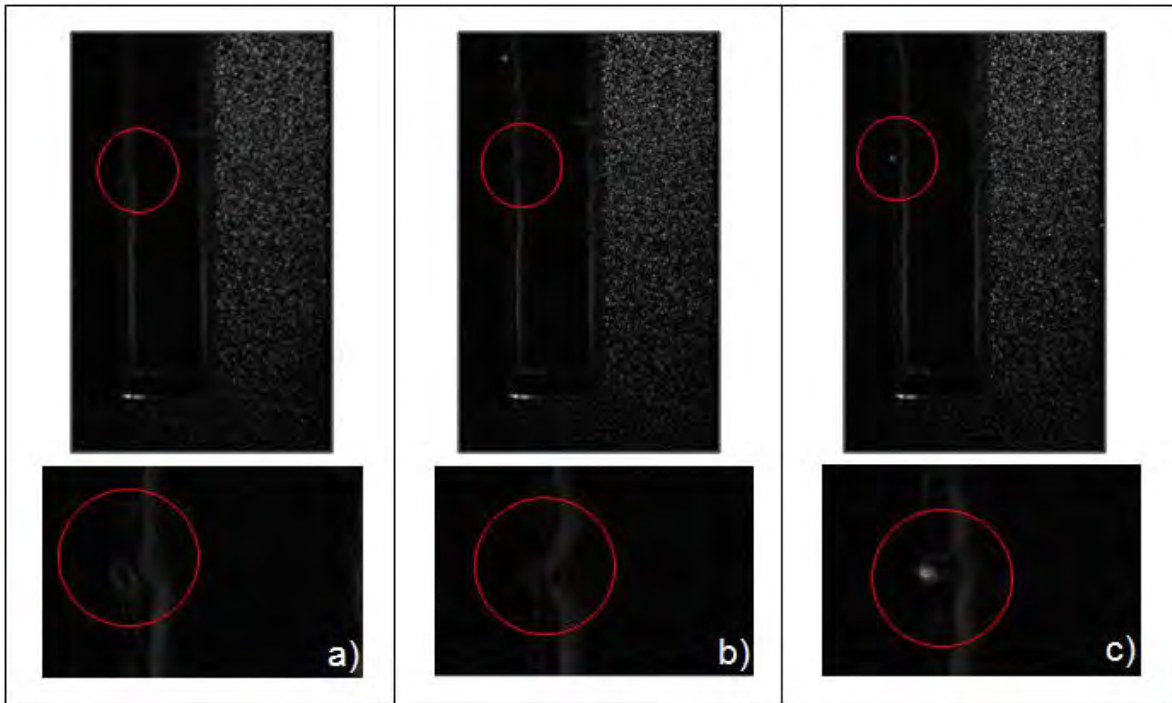
La mayoría de las investigaciones actuales en el tema de transferencia de calor en la capa de vapor mencionan que ocurre principalmente por radiación a través de la capa de vapor y que la transferencia de calor también se da por conducción a través de la capa de vapor Bergles *et. al.* [68], Krishname *et. al.* [69], Scott *et. al.* [70] M. Narazaki and G.E. Totten [71] afirman que la transferencia de calor en la capa de vapor se da principalmente por radiación y conducción a través de la capa de vapor.

Los investigadores mencionados en anteriormente hablaban de una posible entrada de líquido a la capa de vapor, asociaban esta posible entrada con un perfil de onda en la capa de vapor y fluctuaciones en el termopar durante la adquisición de historias térmicas concluyendo que cuando la onda es grande podría haber rompimiento de la capa de vapor y contacto ocasional del líquido con la superficie caliente

Para ver el o los mecanismos de transferencia de calor en la capa de vapor se trabajó con un filtro en Matlab para observar el campo de velocidades alrededor de la probeta con capa de vapor. La velocidad de flujo a la que se trabajo fue de 0.2 m/s. Las imágenes fueron grabadas en un plano central con una cámara de alta velocidad a 500 fps y una resolución 1632x1200.

En base a la experimentación y análisis de imágenes mediante aplicación de filtros en Matlab se logró captar el mecanismo de transferencia de calor por cual el líquido entra en contacto con la superficie metálica caliente (900 °C). La Figura 4.39 muestra la aparición de una onda, la cual va subiendo en la dirección del flujo.

En la en la Figura 4.39 a) se observa la aparición de una onda en la interface capa de vapor líquido, la Figura 4.39 b) se muestra como la onda sigue sube en la dirección del flujo e incrementando su tamaño hasta un tamaño máximo en la cresta en el cual está a punto de romper. Las Figuras 4.39 c) muestra el momento exacto de la ruptura de la capa de vapor, que es cuando las onda llega a un máximo el cual no puede ser soportado por la capa de vapor. Cabe mencionar que el tiempo entre cada imagen es de 2 milisegundos (lo que indica que las imágenes se grabaron a 500 fps).



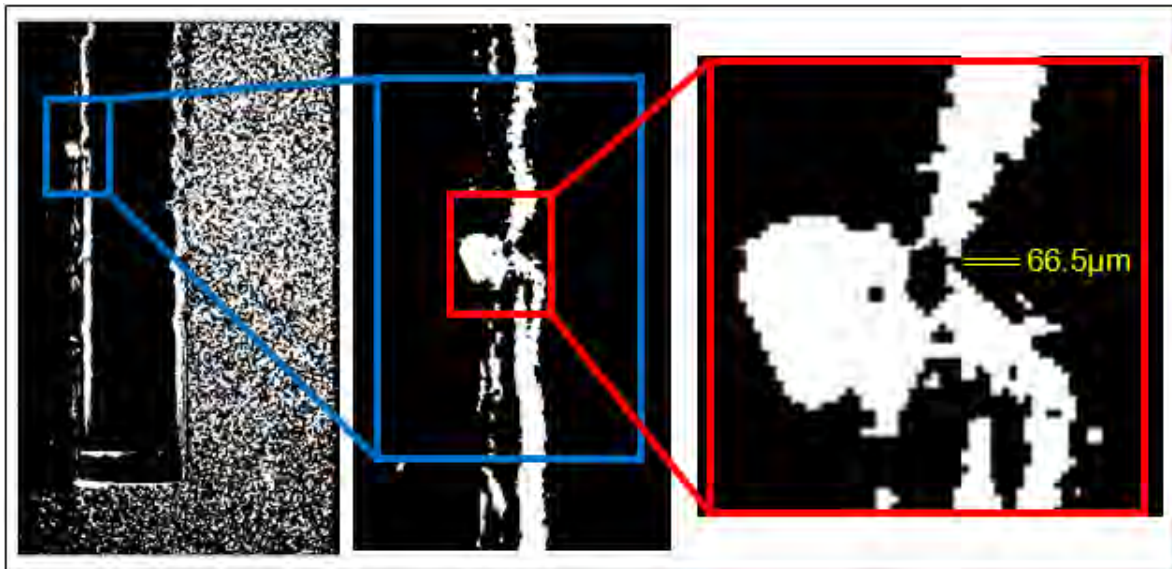
**Figura 4.39.-** Transferencia energía mediante la formación de burbujas de vapor en la interfaz vapor-liquido. a) Formación de la onda, b) Crecimiento de la onda y c) Rompimiento de la onda y formación de burbuja de vapor. Tiempo entre imágenes 2 milisegundos

En la parte de debajo de cada una de las Figuras (4.39 a, 4.39 b y 4.39 c) se hizo una amplificación (zoom), para poder ver a detalle desde la formación de la onda, crecimiento y rompimiento de esta.

La Figura 4.40 muestra un tratamiento de la imagen 4.39 c) para lograr captar el rompimiento más a detalle. En el tratamiento de la imagen se utilizó la función *im2bw*, y los filtros *fspecial* (average) y el *imfilter*. Con estos tratamientos y la calibración utilizando una relación de pixeles (*ginput*) se logró obtener que la longitud de rompimiento fue de 66.5  $\mu\text{m}$ .

Con lo anterior se corrobora lo que suponían algunos investigadores, pero no había evidencia que sustentara sus teorías. Es decir el mecanismo de transferencia de calor también se da por formación de ondas en capa de vapor las cuales colapsan cuando llegan a un tamaño máximo y probablemente haya entrada de líquido a la capa de vapor.





**Figura 4.40.-** Rompimiento de la capa de vapor en la cresta de la onda (figura 4.39c) (longitud del rompimiento  $0.0665 \text{ mm} = 66.5 \mu\text{m}$ ).

## CAPÍTULO V.

# SIMULACIÓN MATEMÁTICA.

La simulación matemática de los patrones de flujos alrededor de una probeta cilíndrica de cara plana nunca se considera una tarea trivial (intrascendente). En efecto, a pesar de la simplicidad geométrica del problema, el flujo que rodea un cilindro de cara plana mantiene un alto nivel de complejidad debido a varios factores: presencia de gradientes de presión adversos, zonas de separación y re-adhesión de flujo, zonas de recirculación, líneas de corriente altamente curvadas e interacción de vórtices.

Almeidaa et al. [72], demostraron en sus simulaciones que las simulaciones  $k-\epsilon$  no fueron capaces de predecir ni la longitud de la zona de recirculación en la parte trasera del cilindro ni la recuperación de la velocidad en la estela. En este estudio también se realizó un análisis con el modelo matemático LES (Large Eddy Simulation), pero los resultados no correspondieron a los obtenidos mediante la técnica de PIV ni a la visualización de las líneas de corriente. El desprendimiento de flujo en la probeta cilíndrica de cara plana es periódico, por lo que se analizó en forma similar a la que se analiza una esfera con desprendimiento de capa límite.

En las siguientes simulaciones se supone que el flujo es incompresible, transitorio, axi-simétrico, newtoniano, isotérmico (densidad y viscosidad constantes) y bidimensional (2D), con propiedades fluidas constantes. Los cálculos se han logrado resolviendo ecuaciones de Navier-Stokes de continuidad y dependientes del tiempo sin modelado de turbulencia, dada la naturaleza del problema se usó un modelo de flujo periódico con desprendimiento de flujo. El fluido que circula dentro del tubo de acrílico de 44 mm de diámetro interno es agua a 60 °C, dentro del tubo el agua que circula en contra de la fuerza de gravedad impacta sobre la probeta cilíndrica de cara plana de 12.7 mm de diámetro y 56 milímetros de longitud (Figura 3.4). Las velocidades de corriente libre del agua antes de impactar con la base de la probeta son 0.2, 0.4 y 0.6 m/s respectivamente.

Se utilizó la técnica CFD para las simulaciones. La discretización espacial para el análisis de patrones de flujo alrededor de la probeta fue de 102,335 celdas, donde también se realizó un mallado tipo capa límite (Figura 5.1 b). Las condiciones de flujo utilizadas fueron velocidad de entrada, presión de salida, así como condiciones de no deslizamiento en la pared de la probeta, el cople y la pared del tubo de acrílico (Figura 5.1 a).

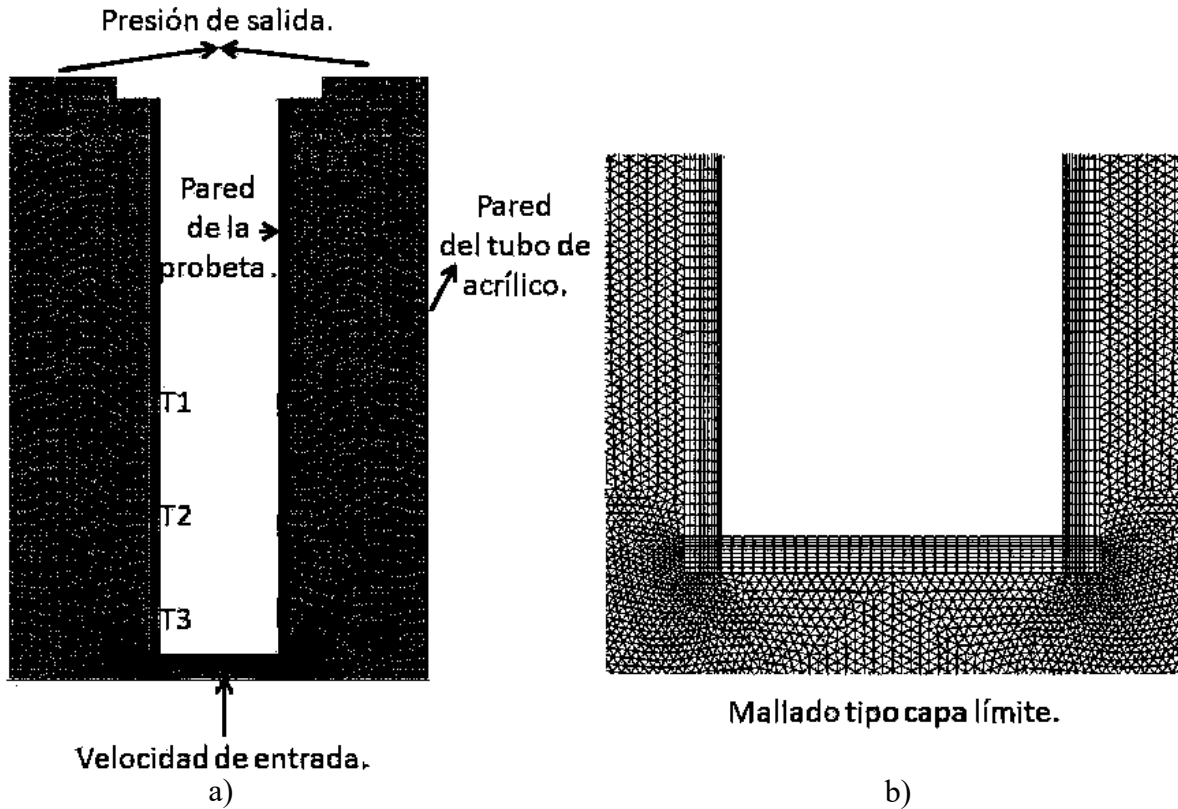


Figura 5.1.- a) Condiciones de frontera y b) mallado alrededor de la probeta.

Cabe destacar que en la zona cercana a la pared (dentro de la zona de capa límite) se colocaron 3 sensores para medir la velocidad. La medición de la frecuencia de desprendimiento de vórtices fue una medida indirecta en base a los cambios de velocidad obtenidos por los sensores. Estos 3 sensores se colocaron exactamente a la misma altura que se colocaron los termopares tipo k (de la Figura 3.4) y poder determinar cómo influyen los patrones de flujo en la zona de recirculaciones alrededor de la probeta en estado isotérmico.

Se utilizó la opción de flujo laminar está establecida por defecto, y por lo tanto las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento o ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el flujo laminar bidimensional pasando alrededor de la probeta se pueden escribir en coordenadas cartesianas. Las ecuaciones que gobiernan el flujo viscoso en la capa límite son las ecuaciones de Navier Stokes.

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{Ec.4.}$$

Cantidad de movimiento en x (Navier-Stokes en x).

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} + \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \text{Ec.5.}$$

Cantidad de movimiento en y (Navier-Stokes en y).

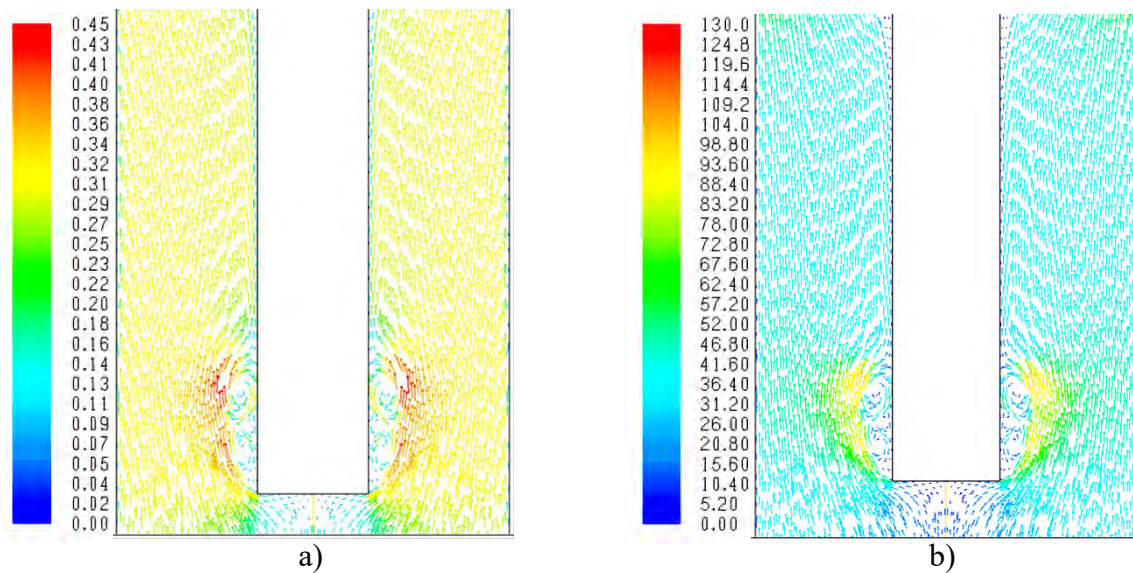
$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} + \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad \text{Ec.6.}$$

Las propiedades del fluido en este caso agua a 60 °C utilizadas fueron densidad: 983.13 kg/m<sup>3</sup> y viscosidad dinámica: 0.000467 kg/m-s.

### 5.1.-Simulación a 0.2 m/s en estado isotérmico.

En la Figura 5.2 se muestra la simulación en estado isotérmico para la condición de velocidad de 0.2 m/s de corriente libre. En la Figura 5.2 a) se muestran los vectores de velocidad para un tiempo de simulación de 0.151 segundos. En la zona que está justamente debajo del borde de ataque de la probeta la velocidad tiende a ser cero, es decir se tiene una zona de estancamiento. Una vez que pasa el borde de ataque el flujo se divide en dos zonas: una con un incremento de velocidad cercana a las paredes del tubo y la otra con una disminución de velocidad cercana a las paredes de la probeta (una zona de recirculaciones). Se muestra claramente que la zona de recirculaciones se debe a la separación de la capa límite en las esquinas del borde de ataque. La zona que presenta una mayor velocidad es la

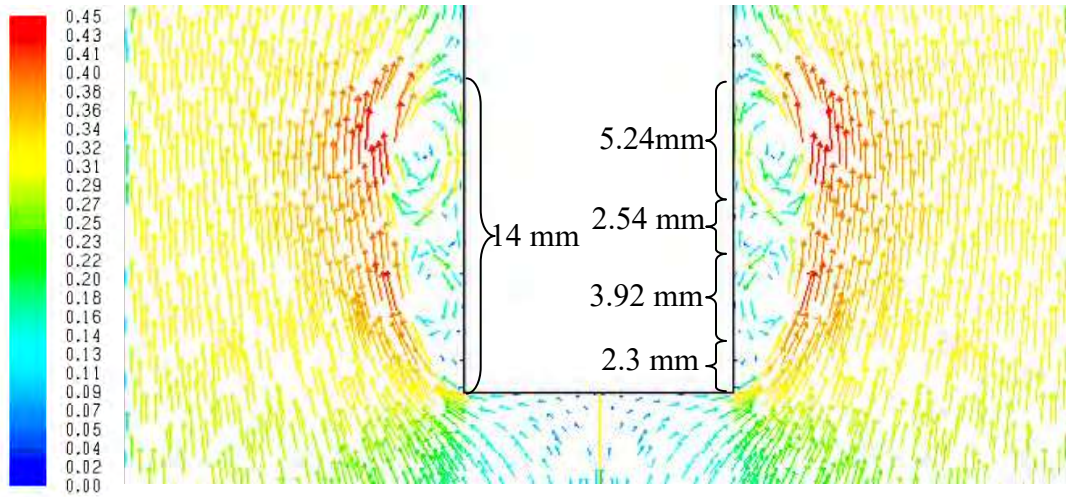
que se encuentra inmediatamente después de la capa límite y esta muestra un valor aproximadamente de 0.45 m/s mientras que la zona del gradiente de presión adverso se encuentra en el rango de 0-0.16 m/s. La zona de re-adhesión de flujo aguas abajo de la probeta tiene un orden de magnitud de aproximadamente 0.22 m/s. En cuanto a la Figura 5.2 b) la presión después de la capa límite dinámica se encuentra en un rango de 67-98 Pa y en la zona de recirculaciones formada debido al gradiente de presiones adverso se encuentra en el rango de 0-46 Pa.



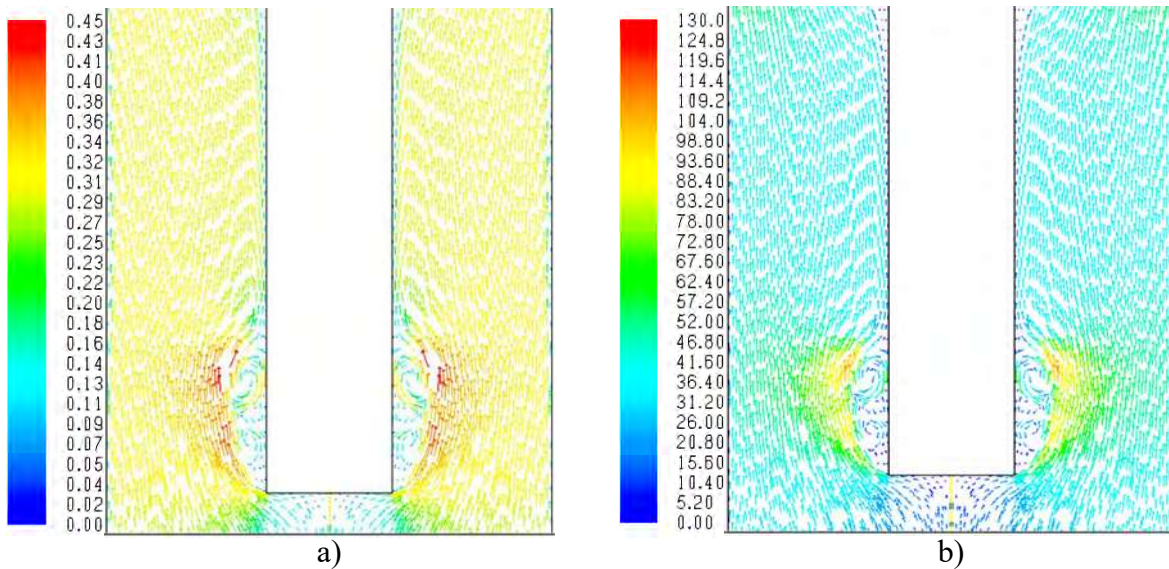
**Figura 5.2.-** Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo) y b) vectores de presión dinámica en Pa (Pascales). Tiempo de simulación a 0.151 segundos

La Figura 5.3 muestra que la longitud de la zona de recirculaciones es de 14 mm, a su vez esta zona de recirculaciones se divide en dos vórtices internos girando en sentido contrario a las manecillas del reloj y 2 zonas de baja velocidad. El vórtice más cercano al el borde de ataque tiene una longitud de 3.92 mm y en esta parte de la división el flujo entra a una velocidad que va en un rango de 0.18-0.25 m/s. El vórtice más alejado al el borde de ataque tiene una longitud de 5.24 mm, en esta parte de la división el flujo entra por la parte de arriba antes de la re-adhesión a una velocidad que va en un rango de 0.18-0.32 m/s, la mayor velocidad en este segundo vórtice se da en dirección hacia abajo con una magnitud de 0.32 m/s. El mayor espesor de la capa límite dinámica es de 3.2 mm en la cresta de la zona

de recirculaciones. La Figura 5.3 corresponde a los patrones de flujo encontrados con el análisis realizado en el programa PIVlab de la Figura 4.3.



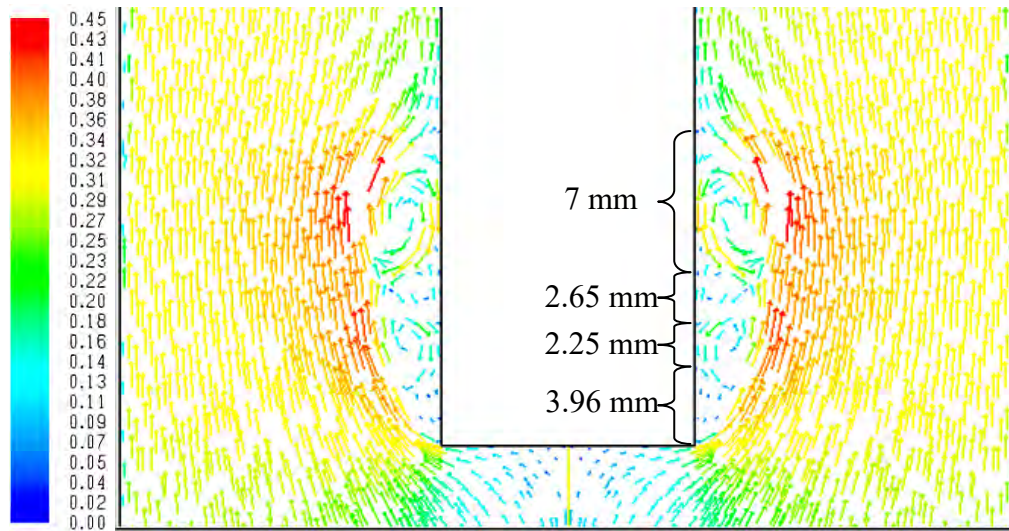
**Figura 5.3.-** Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de simulación a 0.151 segundos, mostrando división de flujo.



**Figura 5.4.-** Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo) y b) vectores de presión dinámica en Pa (Pascuales). Tiempo de simulación a 0.175 segundos.

La longitud de la zona de recirculaciones a un tiempo de simulación de 0.175 segundos es de 15.86 mm tal y como se muestra en la Figura 5.4 (a y b). En la Figura 5.4 a), la velocidad

máxima se sigue visualizando en la zona donde termina la capa límite y esta sigue teniendo valores máximos de velocidad de 0.45 m/s. Mientras que en la zona de recirculaciones el rango de velocidades se encuentra en el orden de 0-0.32 m/s. La Figura 5.4 b) muestra que el rango inmediatamente después de la capa límite se encuentra en el orden de 57.2-98.8 Pa y en la zona de recirculaciones debida al gradiente de presiones adversos esta en el rango de 0-67.6 Pa de presión dinámica.

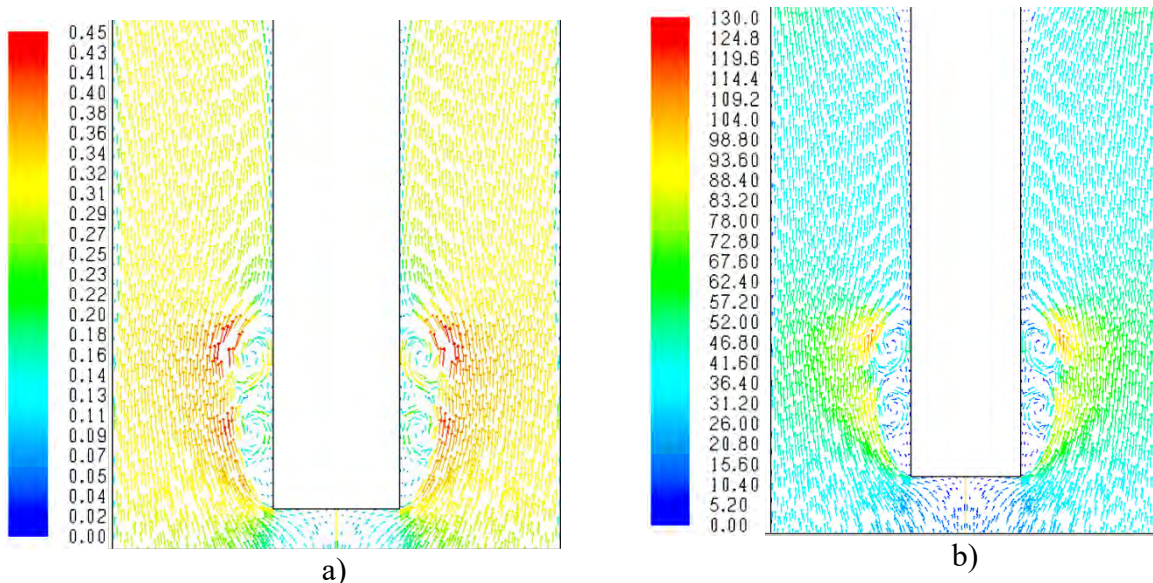


**Figura 5.5.-** Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de simulación a 0.175 segundos.

Haciendo un análisis en la zona de recirculaciones de la Figura 5.5, se observa que dentro de esta zona hay estructuras de vórtices y zonas de flujo que tienden a ser muertas (es decir valores de velocidad muy cercanos a cero). La primer zona dentro del gradiente de presión adverso inmediatamente después del borde de ataque es una zona de flujo muerto con longitud de 3.96 mm y con un rango de velocidades de 0-0.04 m/s, la segunda zona es un vórtice de longitud de 2.25 mm y girando en sentido contrario a las manecillas del reloj con un rango de velocidades de 0-0.22 m/s (se observa que el flujo tiende a entrar en la parte superior del vórtice de derecha a izquierda), la tercer zona es otro flujo muerto el cual tiene una dimensión de 2.65 mm y su rango de velocidades oscila entre 0-0.13 m/s, y la cuarta zona es otro vórtice con una longitud de 7 mm girando en sentido contrario a las manecillas del reloj y presenta un rango de velocidades de entre 0.09-0.31 m/s (se observa que el flujo tiende a entrar en la parte superior del vórtice de derecha a izquierda antes de la zona de re-

adhesión de flujo). La Figura 5.5 corresponde a los patrones de flujo encontrados con el análisis realizado en el programa PIVlab de la Figura 4.5.

La longitud de la zona de recirculaciones a un tiempo de simulación de 0.237 segundos es de 14.82 mm tal y como se muestra en la Figura 5.6 (a y b). En la Figura 5.6 a), la velocidad máxima se sigue visualizando en la zona donde termina la capa límite y esta sigue teniendo valores máximos de velocidad de 0.45 m/s. Mientras que en la zona de recirculaciones el rango de velocidades se encuentra en el orden de 0-0.36 m/s. La Figura 5.6 b) muestra que el rango inmediatamente después de la capa límite se encuentra en el orden de 57.2-98.8 Pa y en la zona de recirculaciones debida al gradiente de presiones adversos esta en el rango de 0-57.6 Pa de presión dinámica, mientras que en la Figura 5.4 b) este rango se encontró de 0-67.6 Pa de presión dinámica.

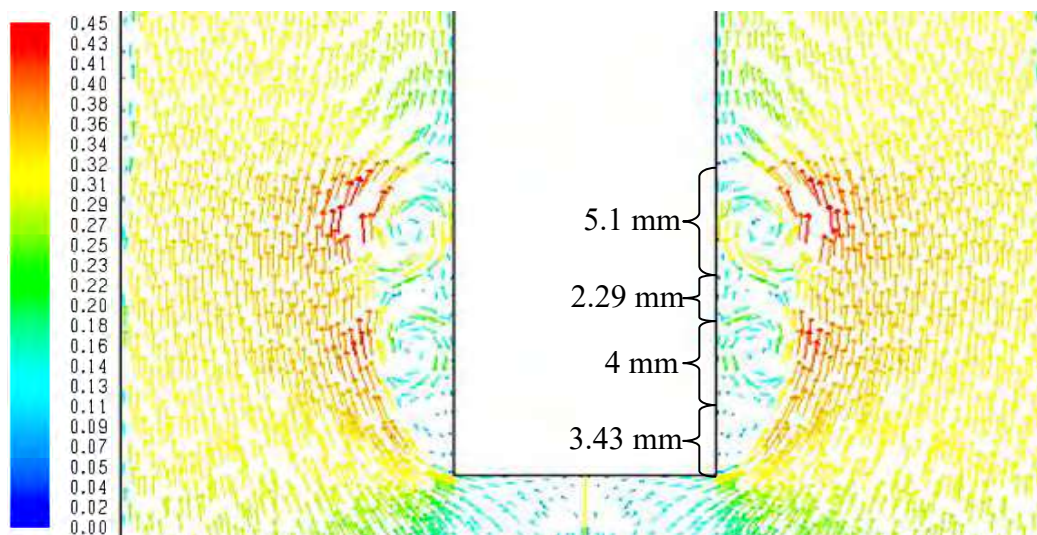


**Figura 5.6.-** Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo) y b) vectores de presión dinámica en Pa (Pascuales). Tiempo de simulación a 0.237 segundos.

La Figura 5.7 muestra el instante en el que la zona de recirculaciones tiende a dividirse, es decir, el vórtice superior aguas abajo con una dimensión de 5.1 mm tiende a desprenderse debido a que ya no soporta más entrada de masa y esta tiende a colapsar. La zona de recirculaciones de la Figura 5.7, se muestra que dentro de esta zona hay estructuras de vórtices y zonas de flujo que tienden a ser muertas (es decir valores de velocidad muy cercanos a cero). La primer zona dentro del gradiente de presión adverso inmediatamente después del borde de ataque es una zona de flujo muerto con longitud de 3.43 mm y con un

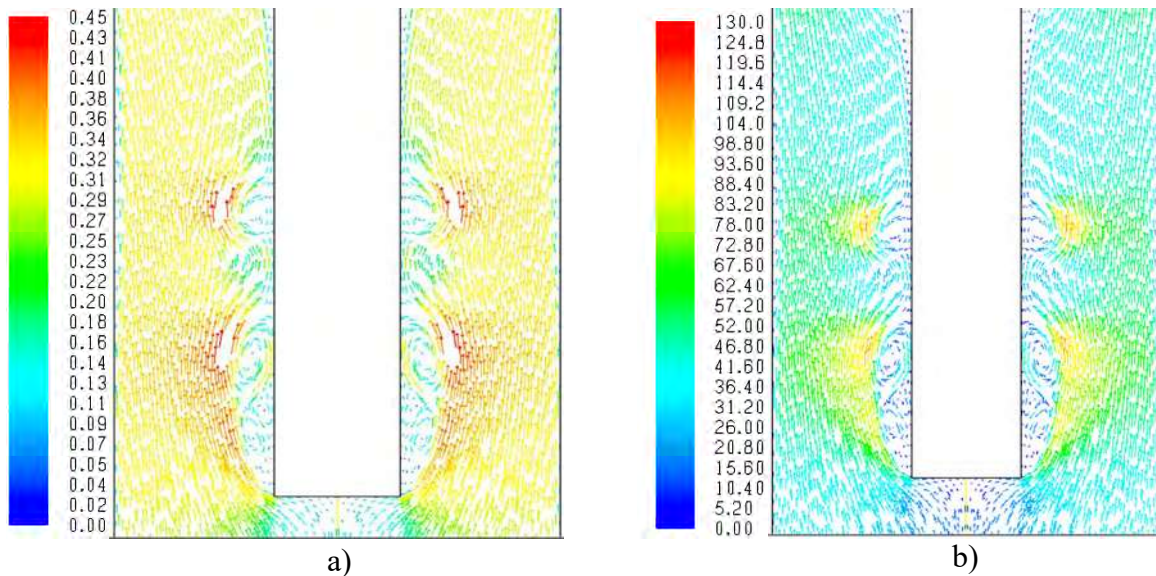


rango de velocidades de 0-0.07 m/s, la segunda zona es un vórtice de longitud de 4 mm (el de la Figura 5.5 fue de 2.25 mm) y girando en sentido contrario a las manecillas del reloj con un rango de velocidades de 0-0.25 m/s (se observa que el flujo tiende a entrar en la zona superior del vórtice de derecha a izquierda, se observa que se incremento la velocidad ya que en la Figura 5.5 el rango máximo fue de 0-0.22), la tercer zona es otro flujo muerto el cual tiene una dimensión de 2.29 (la longitud disminuyó ya que en la Figura 5.5 fue de 2.65 mm) y su rango de velocidades oscila entre 0-0.11 m/s, y la cuarta zona es otro vórtice con una longitud de 5.1 mm girando en sentido contrario a las manecillas del reloj y presenta un rango de velocidades de entre 0.09-0.34 m/s (se observa que el flujo tiende a entrar en la zona superior del vórtice de derecha a izquierda antes de la zona de re-adhesión de flujo). Las zonas de flujo muerto tienden a disminuir su longitud, mientras que en la segunda zona la longitud del vórtice creció de 2.25 a 4 mm (comparar la Figura 5.5 y 5.7). En la Figura 5.3 se encontró que el mayor espesor de la capa límite dinámica fue de 3.2 mm en la cresta de la zona de recirculaciones, mientras que en la Figura 5.7 el espesor de la capa límite en el primer vórtice es de 4.23 mm y el espesor de la capa límite en el segundo vórtice en dirección aguas abajo es de 3.43 mm. En el primer vórtice se incrementó la longitud y el espesor de la capa límite dinámica y en segundo vórtice disminuyó la longitud y se incremento el espesor de la capa límite medidos desde la base de la probeta.



**Figura 5.7.-** Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de simulación a 0.237 segundos.

La Figura 5.7 corresponde a los patrones de flujo encontrados con el análisis realizado en el programa PIVlab de la Figura 4.7

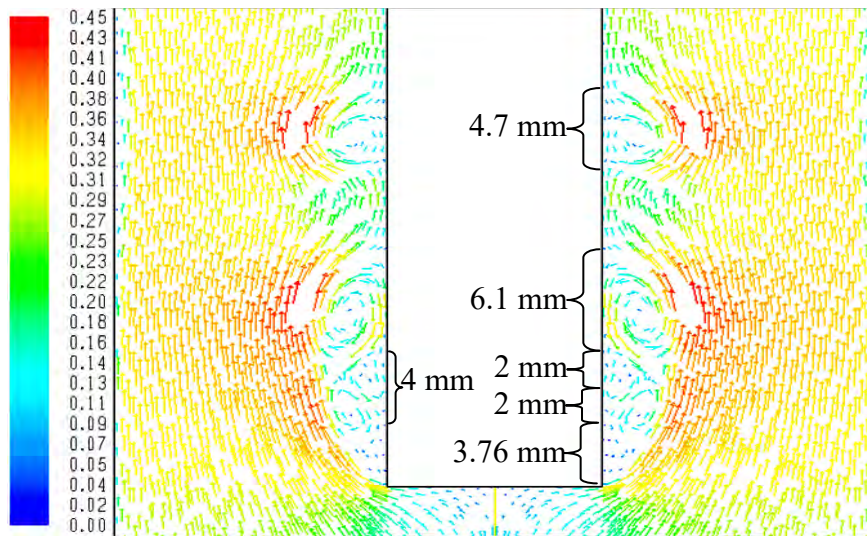


**Figura 5.8.-** Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo) y b) vectores de presión dinámica en Pa (Pascuales). Tiempo de simulación a 0.335 segundos.

La Figura 5.8 muestra un instante en el que la zona de recirculaciones se dividió, es decir hubo un desprendimiento de un vórtice aguas abajo. Aquí se tienen diferentes patrones como son: gradiente de presión adverso con vórtices y zonas muertas, zona de re-adhesión de flujo y el vórtice desprendido. La zona de re-adhesión de flujo se encuentra en el orden de velocidades de 0.16-0.27 m/s como se aprecia en la Figura 5.8 a). La zona de recirculaciones en la capa límite de la Figura 5.8 b) tiene un rango de presiones dinámicas desde 0- 46 Pa, la zona inmediata exterior a la capa límite tiene un rango de presiones de 57.2-93.6 Pa de presión dinámica. El vórtice desprendido presenta la mayor presión dinámica en la cresta de este y tiende a ser de 109.2 Pa. También el vórtice justo antes de la zona de re-adhesión de flujo presenta una presión máxima de 109.2 Pa antes de re adherirse a la pared.

La Figura 5.9 a un tiempo de simulación de 0.335 segundos muestra que la longitud total de la zona de recirculaciones se redujo de 14.82 mm (Figura 5.7) a 13.86 mm (Figura 5.9). En la Figura 5.9, la zona donde se desprende la capa límite inmediatamente después del borde

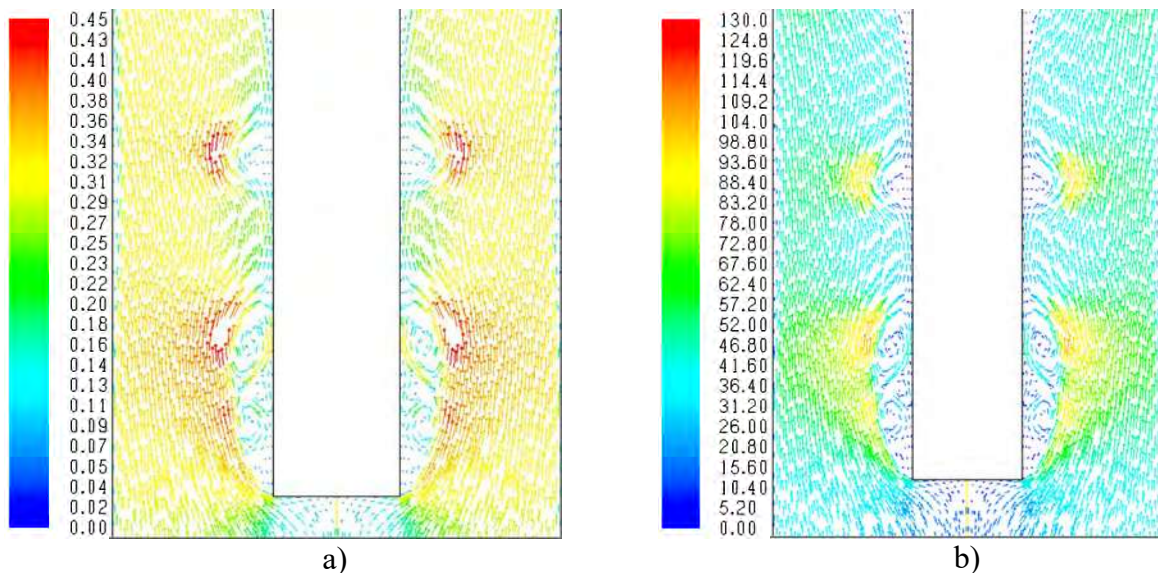
de ataque muestra una zona de flujo muerto con una longitud de 3.76 mm (muy similar a las Figuras anteriores) y un rango de velocidades de 0-0.05 m/s. Ahora con el vórtice desprendido vuelve a haber entrada de líquido al la zona del gradiente de presión adverso, en la parte donde se forma una zona de 4 mm que contiene dos pequeños vórtices de 2 mm cada uno, la entrada de líquido se lleva a cabo por la zona central donde se dividen estos dos pequeños vórtices, el vórtice más cercano a la zona muerta de 3.76 mm gira en sentido contrario a las manecillas del reloj, mientras que el más alejado gira en sentido de las manecillas del reloj, ambos con un rango de velocidades de 0-0.14 m/s. El vórtice cercano a la zona de re-adhesión de flujo tiene una longitud de 6.1 mm y su rango de velocidades se encuentra en el rango de velocidades de 0-0.34 m/s. El espesor en la cresta de la zona de recirculaciones es de 3.75 mm (Figura 5.9), mientras que en la Figura 5.7 era de 4.34 mm. Esto evidencia que una vez que hay separación del vórtice comienza a entrar líquido a la zona de recirculaciones, debido a él gradiente de presiones adverso, hasta que esta no puede soportar la entrada de más líquido y se desprende aguas abajo. En cuanto a el vórtice desprendido este tiene una longitud de 4.7 mm. La Figura 5.9 corresponde a los patrones de flujo encontrados con el análisis realizado en el programa PIVlab de la Figura 4.9.



**Figura 5.9.-** Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de simulación a 0.335 segundos.

En Figura 5.10 muestra un instante en el que la zona de recirculaciones continua con la acumulación de masa en su interior y el vórtice desprendido continua su trayectoria aguas

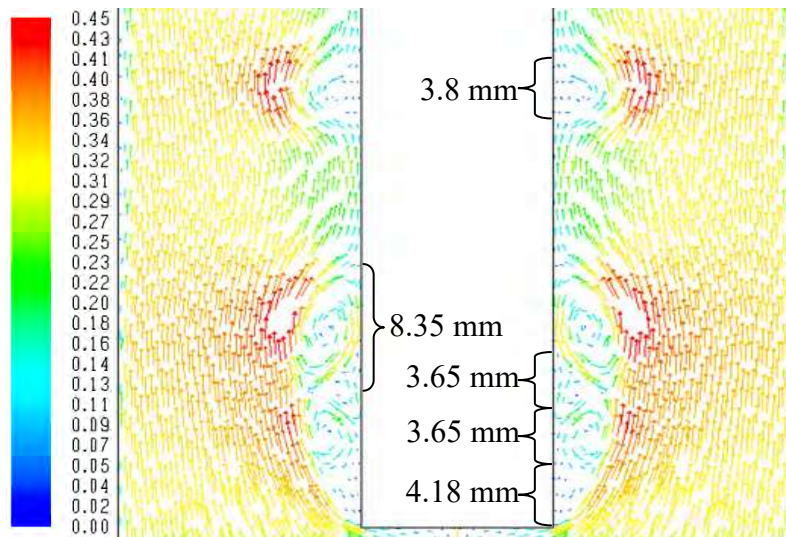
abajo. Se siguen observando los diferentes patrones de flujo: gradiente de presión adverso, con vórtices y zonas muertas, zona de re-adhesión de flujo y el vórtice desprendido. La zona de re-adhesión de flujo se encuentra en el orden de velocidades de 0.16-0.23 m/s como se aprecia en la Figura 5.10 a). La zona de recirculaciones en la capa límite de la Figura 5.10 b) tiene un rango de presiones dinámicas desde 0-46 Pa (mientras que antes del desprendimiento fue de 57.63 Pa, es decir, de la Figura 5.6 a la Figura 5.8 hubo una disminución de presión dinámica), la zona inmediata exterior a la capa límite tiene un rango de presiones de 57.2-93.6 Pa de presión dinámica. El vórtice desprendido presenta la mayor presión dinámica en la cresta de este y tiende a ser de 93.6 Pa. También el vórtice justo antes de la zona de re-adhesión de flujo presenta una presión máxima de 93.6 Pa antes de re adherirse a la pared. Hay una evidente pérdida de presión dinámica en la cresta del vórtice desprendido, en la Figura 5.8 fue de 109.2 Pa, mientras que la Figura 5.10 muestra que es de 93.6 Pa.



**Figura 5.10.-** Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. a) Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo) y b) vectores de presión dinámica en Pa (Pascuales). Tiempo de simulación a 0.361 segundos.

La Figura 5.11 vuelve a mostrar que al igual que la Figura 5.5, en la zona de recirculaciones hay cuatro zonas de flujo, es decir, dos vórtices y dos zonas de flujo muerto. La primer zona de flujo muerto inmediatamente después del borde de ataque tiene una longitud de 4.18 mm y el rango de velocidades va de 0-0.04 m/s, en la segunda zona donde hay la formación de un vórtice de 3.5 mm girando en sentido contrario a las manecillas del reloj el rango de

velocidad es de 0-0.23 m/s, la tercer zona es una zona muerta se 3.65 mm de longitud y rango de velocidades de 0-0.09 m/s y la última zona dentro del gradiente de presión adverso es otro vórtice de longitud de 8.35 mm el cual tiene un rango de velocidades de 0-0.32 m/s. Como se puede observar en cada uno de los instantes analizados hay cambios de longitud los patrones de flujo dentro de la zona de recirculaciones. Cabe mencionar que la longitud del vórtice desprendido es de 3.8 mm (Figura 5.11), mientras que en la Figura 5.9 fue de 4.7 mm, esto debido a que como se esperaría hay una disminución de cantidad de movimiento a medida que el vórtice se desplaza aguas abajo por influencia de las fuerzas viscosas.



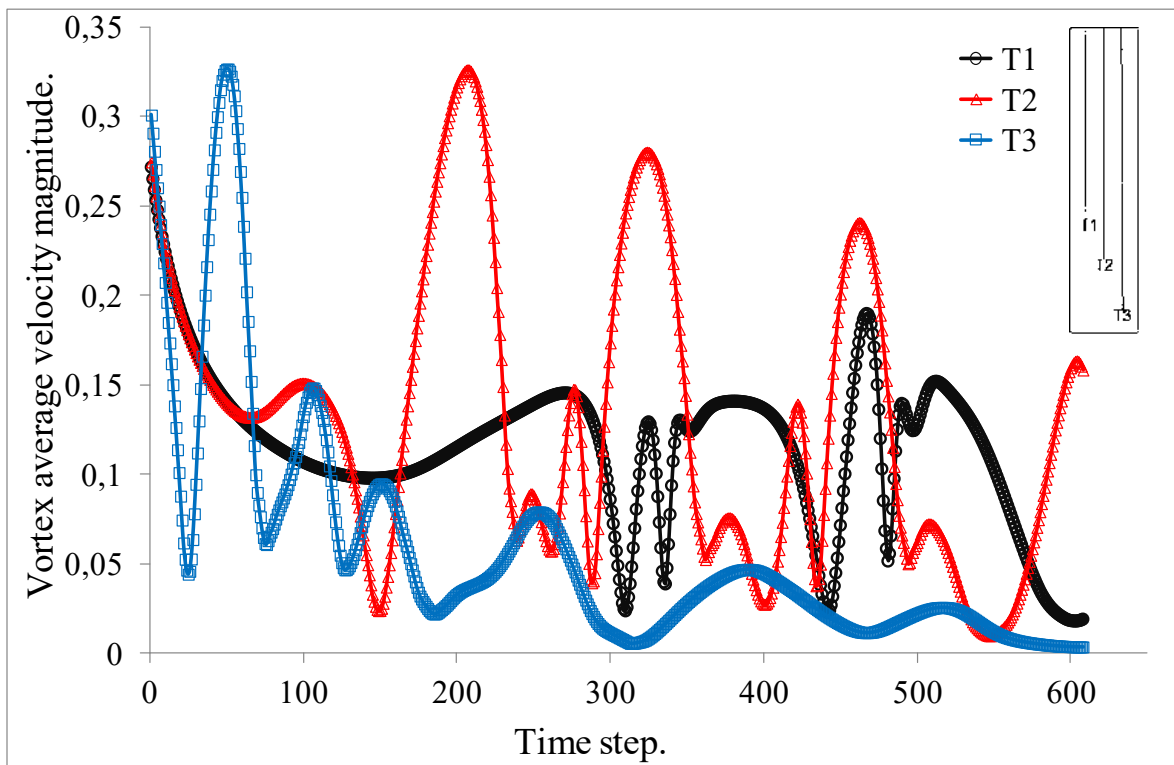
**Figura 5.11.-** Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.2 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Tiempo de simulación a 0.361 segundos.

La Figura 5.11 corresponde a los patrones de flujo encontrados con el análisis realizado en el programa PIVlab de la Figura 4.11.

Este ciclo es repetitivo, es decir hay una acumulación de líquido en la zona de recirculaciones, una vez que a esta zona de recirculaciones no puede haber una mayor entrada de masa y se desprende un vórtice aguas abajo el cual va disipando energía debido a la interacción con fuerzas viscosas.

La Figura 5.12 muestra la magnitud de la velocidad promedio en los vórtices a un incremento de tiempo de 0.001 segundos, para la condición de velocidad de agua fluyendo a 0.2 m/s y 60 °C se encontró que el desprendimiento de los vórtices es captado por la

posición del sensor T2 que tiene un rango de velocidades que van desde 0.01-0.3 m/s. Es captado entonces que hay un desprendimiento de vórtices cada 0.1 segundos (100 pasos temporales, por ejemplo el primer vórtice se capta en el incremento de pasos desde el 150 hasta el 250), es decir se tiene una frecuencia de 10 vórtices por segundo ( $f=10$  Hz). En cuanto a la posición del sensor 1 se capta que las velocidades en un rango de 0.025-0.15 m/s, este sensor nos da información principalmente de la zona de re-adhesión de flujo. El sensor 3 que es el más cercano al borde de ataque de donde se separa la capa límite nos muestra que esa zona es la que tiene velocidades muy bajas que oscilan en el rango entre 0-0.1 m/s tal y como se observa en las Figuras 5.3, 5.5, 5.7, 5.9 y 5.11.



**Figura 5.12.-** Velocidad promedio en los vórtices en 3 diferentes posiciones, con una velocidad de corriente libre de 0.2 m/s.

## 5.2.-Simulación a 0.4 m/s en estado isotérmico.

La Figura 5.13 muestra los vectores de velocidad para la simulación a la velocidad de flujo de 0.4 m/s. La Figura 5.13 a) a un tiempo de simulación de 0.1 segundos muestra los

mismos patrones de flujo en la zona de recirculaciones que la Figura 5.3, formación de una zona de flujo a baja velocidad o zona de flujo muerto de longitud de 3.11 mm inmediatamente después del borde de ataque con un rango de velocidades de 0-0.08 m/s, seguido por la formación de un vórtice girando en sentido anti-horario también de 3.11 mm con un rango de velocidades de entre 0.16-0.32 m/s, se ve también la formación de una segunda zona de flujo a baja velocidad de longitud de 2.59 mm con un rango de velocidades de entre 0.16-0.36 m/s y es por donde se da entrada de líquido a la zona de recirculaciones con dirección a la zona de flujo muerto cerca del borde de ataque, el segundo vórtice en sentido anti-horario se forma aguas abajo cercano a la zona de re-adhesión de flujo y tiene una longitud de 8.03 mm un rango de velocidades de entre 0.44-0.72 m/s.

La Figura 5.13 b) muestra que existen los mismos patrones de flujo que en la Figura 5.13 a), en la Figura 5.13 b) la zona de flujo muerto incremento su longitud a 4.92 mm y el vórtice inmediato después de la primer zona de flujo muerto incremento su longitud a 5.18 mm y su rango de velocidades y se aprecia mejor esta estructura de flujo, la tercer zona de flujo muerto de 2.07 mm define de una mejor manera la división entre los dos vórtices y el segundo vórtice aumento su longitud a 9.58 mm.

La Figura 5.13 c) muestra que se comienza a generar una nueva estructura de patrones flujo dentro de la zona de recirculaciones, inmediatamente después del borde de ataque se sigue mostrando una zona de flujo muerto de 3.11 mm, inmediatamente después comienza a formarse un vórtice pero a diferencia de las Figuras anteriores este gira en dirección del sentido horario y tiene una longitud de 3.62 mm, inmediatamente después se encuentra un vórtice de 5.70 mm girando en sentido anti-horario, una zona de flujo muerto o división de flujo de 2.33 mm y el vórtice cercano a la zona de re-adhesión de flujo el cual disminuyó su longitud a 8.55 mm pero aumento su espesor de capa límite.

En cuanto a la Figura 5.13 d) a un tiempo de 0.223 segundos se ve que se sigue conservando la zona de flujo muerto de 3.36 mm inmediatamente al borde de ataque, el vórtice nuevo encontrado en la estructura del flujo en sentido horario se ve más definido y con una longitud de 3.88 mm. El segundo vórtice en sentido anti-horario de longitud de 5.18 mm ha

disminuido su rango de velocidades ya que estas tienden a eliminarse con el vórtice anteriormente mencionado de 3.88 mm ya que este gira en sentido horario, la zona de flujo muerto de 6.73 mm comienza a dividir el flujo y el vórtice que esta por desprenderse aguas abajo cercano a la zona de re-adhesión de flujo aumenta las magnitudes de su rango de velocidades y a su vez también la longitud del vórtice aumenta drásticamente hasta 15.81 mm.

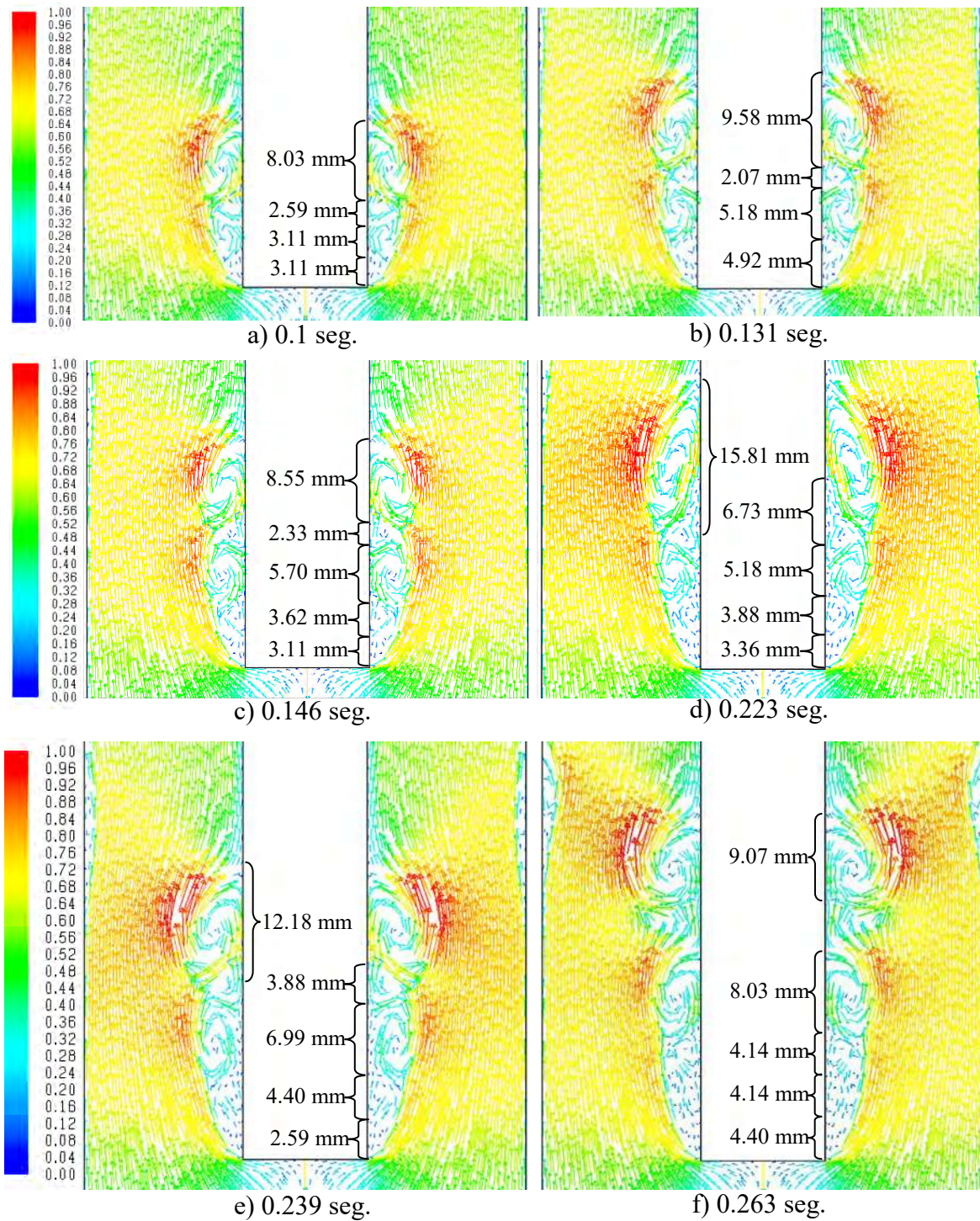
En la Figura 5.13 e) a un tiempo de 0.239 segundos de simulación la zona de flujo muerto cercana al borde de ataque se sigue manteniendo y tiene una longitud de 2.59 mm, en tanto que la nueva estructura de vórtice que había aparecido comienza a disiparse a una zona de flujo muerto con una longitud de 4.40 mm disminuyendo por consiguiente su rango de velocidades, en la longitud de 6.99 mm trata de entrar fluido en el costado de la pared lateral con dirección a la zona de flujo hacia el borde de ataque y en esta misma longitud de 6.99 mm también se encuentra un vórtice girando en sentido anti-horario, el hecho de que la zona cercana al borde de ataque tienda a tener un flujo muerto o a bajas velocidades indica que ya no puede haber más entrada de flujo a la zona de recirculaciones lo que hace que el vórtice se desprenda. La longitud de 3.88 mm es la zona de re-adhesión de flujo que divide al gradiente de presión adverso y al vórtice desprendido el cual tiene una longitud de 12.18 mm.

En la Figura 5.13 f) a 0.263 segundos el vórtice se ha desprendido, la zonas cercanas al borde de ataque de 4.40 y 4.14 mm respectivamente continúan como zonas de baja velocidad, un vórtice pequeño de 4.14 mm y un vórtice de mayor longitud de 8.03 mm.

El vórtice desprendido en la Figura 5.13 e) tiene una longitud de 12.18 mm mientras que en la Figura 5.13 f) disminuyó a 9.07 mm, esto debido a que va disipando energía en dirección aguas abajo y la cantidad de movimiento también tiende a disminuir debido al efecto de las fuerzas viscosas.

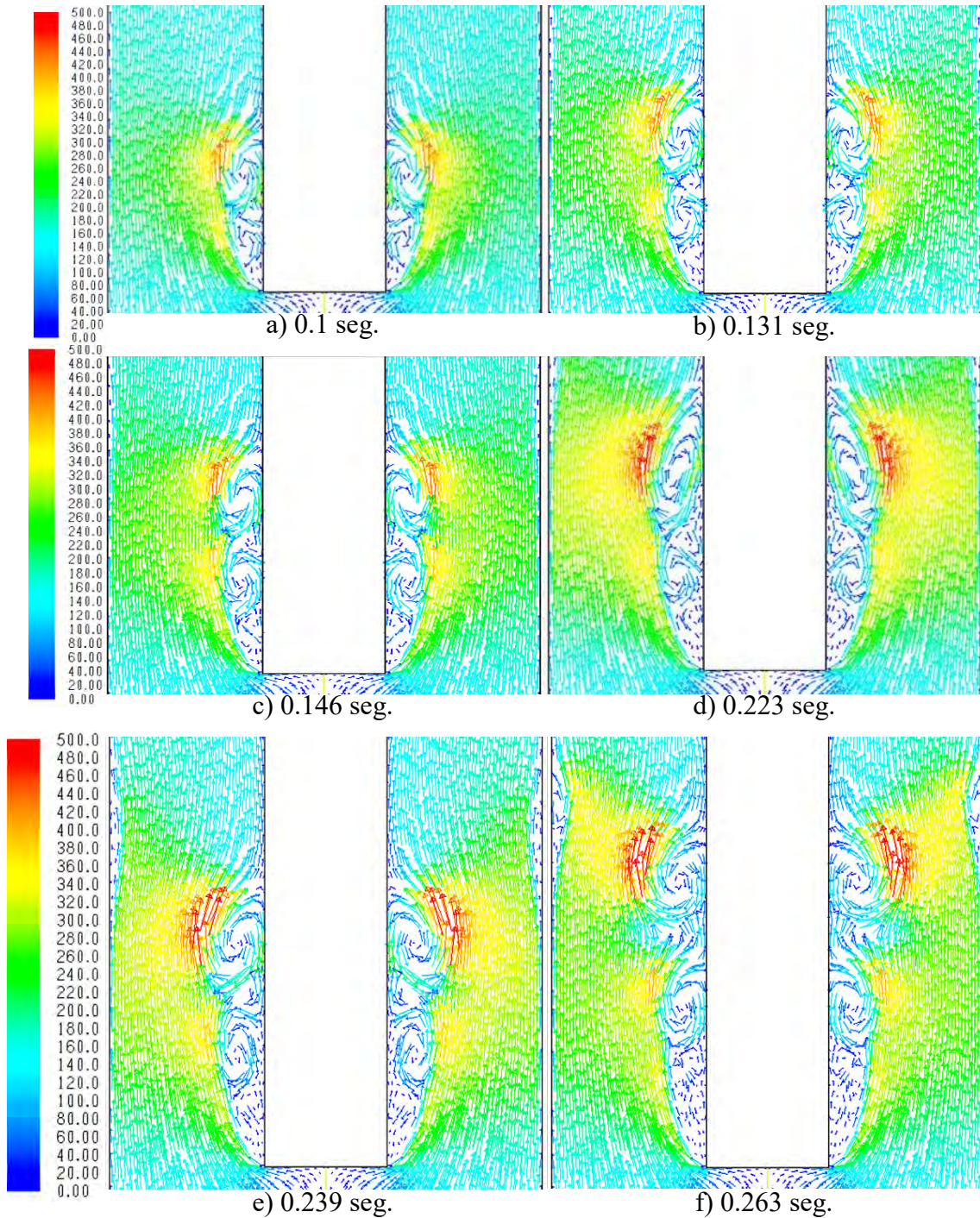
Debido a que se está trabajando con un flujo periódico, se vuelve a repetir el ciclo que comienza como se observa en la Figura 5.13 a).





**Figura 5.13.-** Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.4 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad en m/s (metros/segundo). Simulación diferentes tiempos.

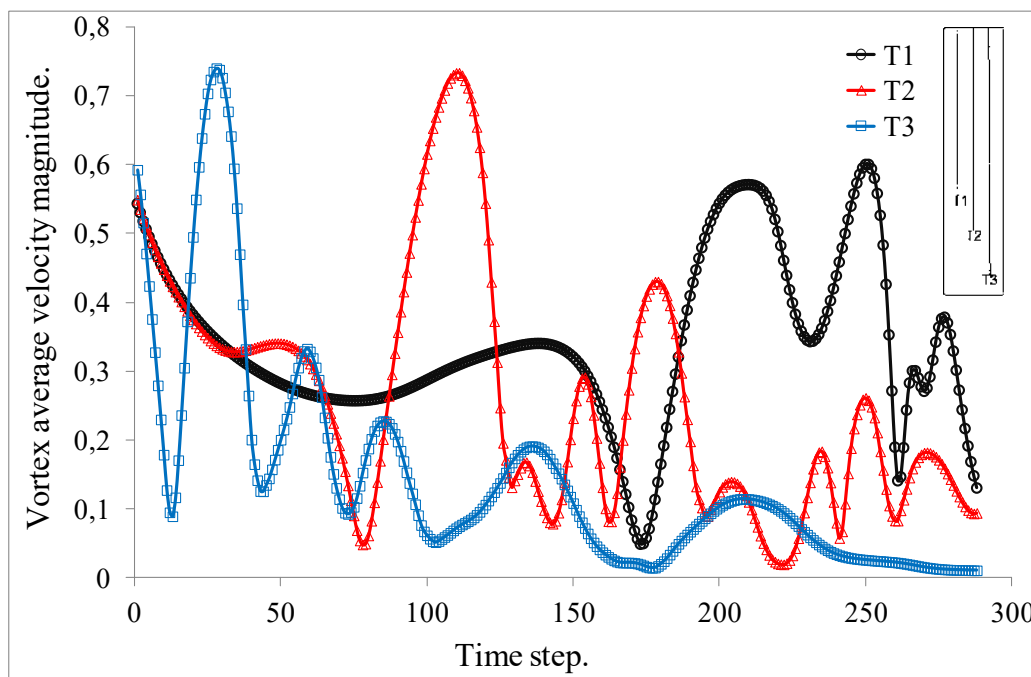
La Figura 5.14 muestra los vectores de presión dinámica del agua a la condición de velocidad de 0.4 m/s y 60 °C de corriente libre antes de que el fluido impacte con la probeta. Los tiempos son los mismos que los de la Figura 5.13.



**Figura 5.14.-** Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.4 m/s en estado isotérmico. Vectores de presión dinámica en Pascales (Pa). Simulación diferentes tiempos.

En cada una de las imágenes se observa que la presión dinámica tiende a ser cero en las zonas de flujo muerto o zonas de baja velocidad y en el centro del origen de cada uno de los vórtices formados en la zona de recirculaciones, mientras que las mayores velocidades tienden a estar en la parte inmediata posterior a el espesor de la capa límite. La máxima presión encontrada fue de 500 Pascales de presión dinámica y esta magnitud aparece principalmente en forma tangencial a los vórtices en la parte inmediata posterior al espesor de la capa límite y en la cresta de los vórtices desprendidos de la zona de recirculaciones en dirección aguas abajo.

Los gradientes de presión adversos desaceleran el fluido, incrementan el espesor o causan la separación de la capa límite y disminuyen el gradiente de velocidad dentro de la capa límite (perdida de energía cinética), lo cual altera seriamente los patrones de flujo.



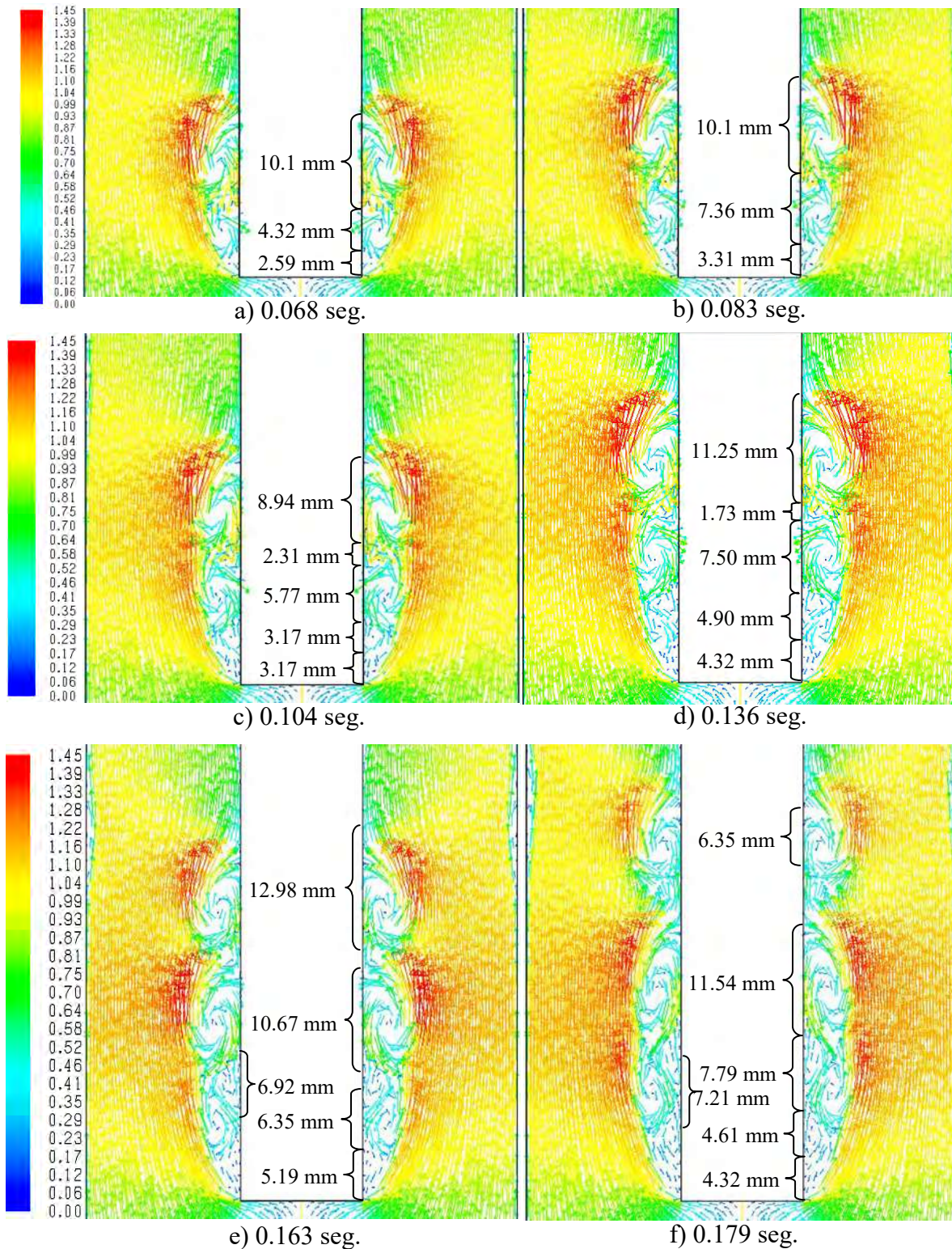
**Figura 5.15.-** Velocidad promedio en los vórtices en 3 diferentes posiciones, con una velocidad de corriente libre de 0.4 m/s.

La Figura 5.15 muestra la magnitud de la velocidad promedio en los vórtices a un incremento de tiempo de 0.001 segundos, para la condición de velocidad de agua fluyendo a 0.4 m/s y 60 °C se encontró que el desprendimiento de los vórtices es captado por la posición del sensor T2 que tiene un rango de velocidades que van desde 0.01-0.7 m/s. Es

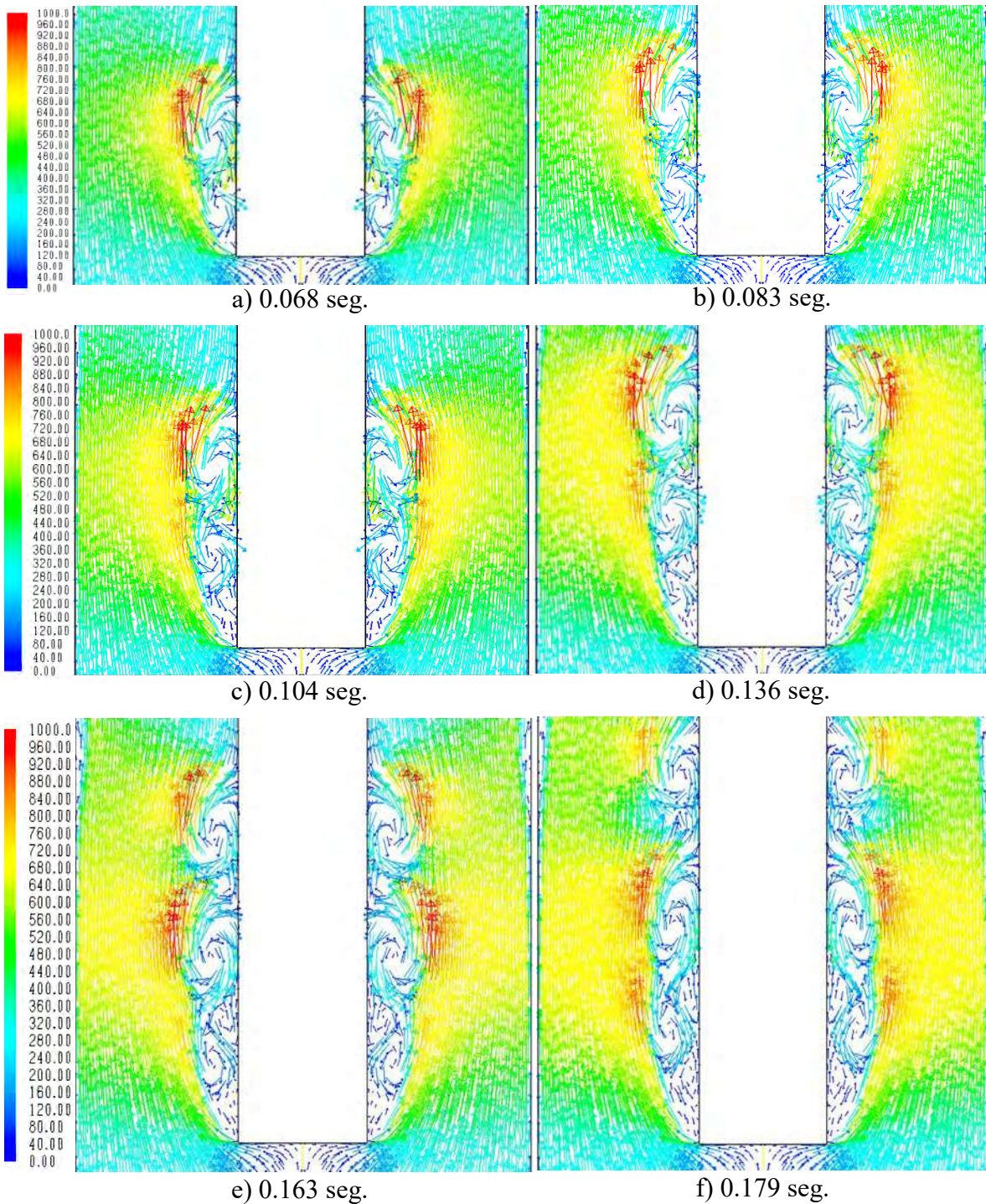
captado entonces que hay un desprendimiento de vórtices cada 0.076 segundos (76 pasos temporales, por ejemplo el se captan 2 vórtices en el incremento de pasos desde el 100 hasta el 250), es decir se tiene una frecuencia de 13 vórtices por segundo ( $f=13$  Hz). En cuanto a la posición del sensor 1 se capta que las velocidades en un rango de 0.05-0.6 m/s, este sensor da información principalmente de la zona de re-adhesión de flujo y que esta se está adhiriendo a la superficie de la probeta a una mayor velocidad. El sensor 3 que es el más cercano al borde de ataque de donde se separa la capa límite nos muestra que esa zona es la que tiene velocidades muy bajas que oscilan en el rango entre 0-0.2 m/s tal y como se observa en las Figura 5.15. El flujo desarrollado comienza a estar a aproximadamente 100 pasos temporales, es por esa razón que a partir de ahí se comienzan a contar el número de vórtices desprendidos.

### **5.3.-Simulación a 0.6 m/s en estado isotérmico.**

La Figura 5.16 muestra los vectores de velocidad para la simulación a la velocidad de flujo de 0.6 m/s. La Figura 5.16 a) a un tiempo de simulación de 0.068 segundos sigue mostrando los mismos patrones de flujo en la zona de recirculaciones que las Figuras 5.3 y 5.13, formación de una zona de flujo a baja velocidad o zona de flujo muerto, seguido por la formación de un vórtice girando en sentido anti-horario, se ve también la formación de una segunda zona de flujo a baja velocidad y la entrada de líquido a la zona de recirculaciones con dirección a la zona de flujo muerto cerca del borde de ataque, el segundo vórtice en sentido anti-horario se forma aguas abajo cercano a la zona de re-adhesión de flujo. Además de que en la Figura 5.16 c) se encontró también la formación de un vórtice en sentido horario (contrario al giro de los otros dos vórtices, como también se mostró en las Figuras 5.13 c) y 5.13 d). Básicamente la estructura del flujo interior y exterior del sigue siendo gradiente de presión adverso la misma a esta velocidad de 0.6 m/s que a las velocidades de 0.2 y 0.4 m/s, lo que cambia son las longitudes de cada una de estas estructuras, así como el incremento en las magnitudes de los vectores de velocidad y la frecuencia de desprendimiento de los vórtices.



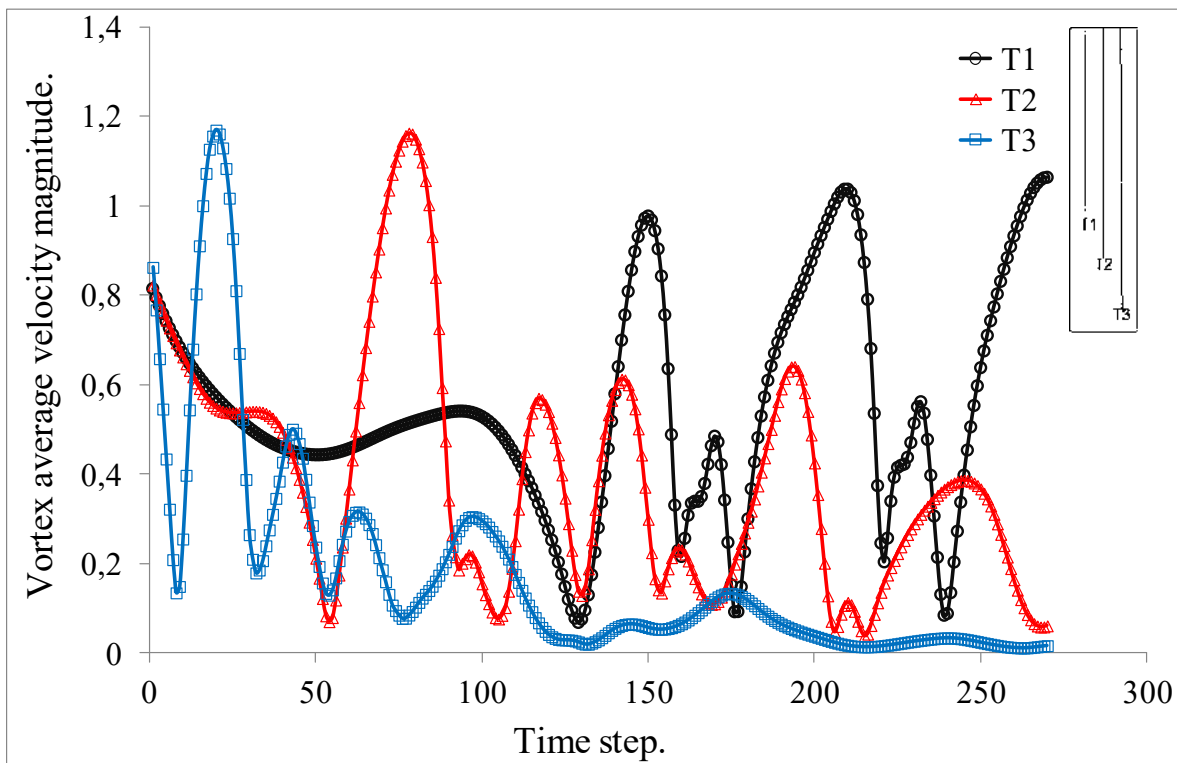
**Figura 5.16.-** Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.4 m/s en estado isotérmico. Vectores de velocidad (m/s). Simulación diferentes tiempos.



**Figura 5.17.-** Simulación con condición de velocidad de corriente libre a 0.6 m/s en estado isotérmico. Vectores de presión dinámica en Pascales (Pa). Simulación diferentes tiempos.

La Figura 5.17 muestra los vectores de presión dinámica del agua a la condición de velocidad de 0.6 m/s y 60 °C de corriente libre antes de que el fluido impacte con la probeta. Los tiempos son los mismos que los de la Figura 5.16. Al igual que en las

simulaciones a condiciones de velocidad de 0.2 y 0.4 m/s, en la evolución de las estructuras de flujo a 0.6 m/s se puede observar en cada una de las imágenes y podemos encontrar que la presión dinámica tiende a ser cero en las zonas de flujo muerto o zonas de baja velocidad y en el centro del origen de cada uno de los vórtices formados en la zona de recirculaciones, mientras que las mayores velocidades tienden a estar en la parte inmediata posterior a el espesor de la capa límite. La máxima presión encontrada fue de 1000 Pascales de presión dinámica y esta magnitud aparece principalmente en forma tangencial a los vórtices en la parte inmediata posterior al espesor de la capa límite y en la cresta de los vórtices desprendidos del gradiente de presión adverso en dirección aguas abajo.



**Figura 5.18.-** Velocidad promedio en los vórtices en 3 diferentes posiciones, con una velocidad de corriente libre de 0.6 m/s.

La Figura 5.18 muestra la magnitud de la velocidad promedio en los vórtices a un incremento de tiempo de 0.001 segundos, para la condición de velocidad de agua fluyendo a 0.6 m/s y 60 °C se encontró que el desprendimiento de los vórtices es captado por la posición del sensor T2 y el sensor de la posición T1. El sensor T2 que tiene un rango de

velocidades que van desde 0.1-1.2 m/s. Es captado entonces que hay un desprendimiento de vórtices cada 0.04125 segundos (41.25 pasos temporales, por ejemplo se captan 4 vórtices en el incremento de pasos desde el 100 hasta el 265), es decir se tiene una frecuencia de 24 vórtices por segundo ( $f=24$  Hz). En cuanto a la posición del sensor 1 se capta que las velocidades en un rango de 0.1-1 m/s, este sensor da información de que la zona de recirculaciones está cambiando de tamaño longitudinalmente, es decir tiene fluctuaciones de velocidad desde la posición del sensor T2 a el sensor T1. El sensor 3 que es el más cercano al borde de ataque de donde se separa la capa límite sigue mostrando a que esa zona es la que tiene velocidades muy bajas que oscilan en el rango entre 0-0.25 m/s tal y como se observa en las Figuras 5.16 y 5.17. El flujo desarrollado comienza a estar a aproximadamente 100 pasos temporales, es por esa razón que a partir de ahí se comienzan a contar el número de vórtices desprendidos.

En las tres condiciones de velocidad los vórtices de mayor tamaño interaccionan con el flujo principal y extraen energía de él, estos vórtices son inestables en sí mismos y, por efecto del gradiente de presión adverso o de la interacción entre ellos, tienden a dividirse en vórtices más pequeños que a su vez tienden a dividirse. Este proceso de rompimiento se produce en cascada, por lo que en un movimiento turbulento coexisten una gran variedad de escalas, correspondientes a distintos tamaños de vórtices (Figuras 4.2 c), 4.4 c), 4.6 c), 4.8 c) y 4.10 c)), los cuales son arrastrados y estirados por la acción de los gradientes de velocidad del flujo medio dominante y por su interacción con los demás vórtices. Este proceso de división continúa hasta que la escala de los vórtices es tan pequeña que el número de Reynolds de los mismos no es lo suficientemente grande como para que la inestabilidad persista. En estos vórtices pequeños, la energía cinética contenida en los vórtices se transforma en energía por disipación viscosa.

En la tabla 5.1 se muestran los resultados al calcular en base a la velocidad el número de Reynolds donde se tomaron las propiedades del agua a 60 °C, la densidad fue de 983.13 kg/m<sup>3</sup> y la viscosidad dinámica fue de 0.000467 kg/m-s, en tanto que el diámetro se sabe que es de 0.044 m. También se muestra la frecuencia de desprendimiento de vórtices

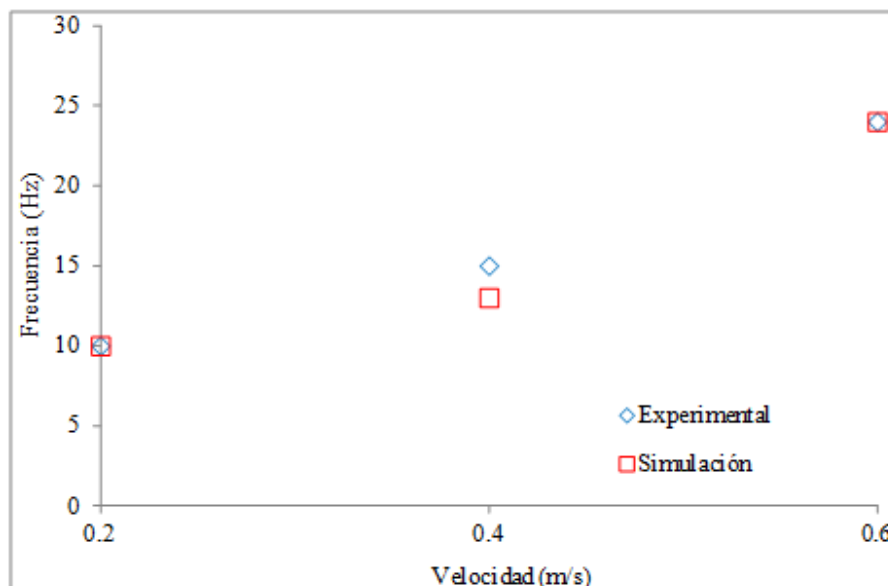


medidos directamente desde las imágenes captadas durante la experimentación y análisis mediante PIVlab y las realizadas mediante la simulación matemática.

**Tabla 5.1.-** Comparación experimental y matemática de la frecuencia de desprendimiento de vórtices a las diferentes condiciones.

Velocidad (m/s)	Reynolds	Frecuencia de desprendimiento de vórtices (Hz)	
		Experimental	Simulación
0.2	18,525.79	10	10
0.4	37,051.58	15	13
0.6	55,577.37	24	24

La Figura 5.19 muestra la comparación de la frecuencia de desprendimiento de vórtices para cada una de las condiciones experimentales. Se observa que la frecuencia de desprendimiento de vórtices tanto en la experimentación como en la simulación matemática es muy similar a 0.2 y 0.6 m/s, en la condición a 0.4 m/s hay una pequeña variación de 2 unidades de frecuencia, es decir, para la parte experimental se obtuvo una frecuencia de desprendimiento de 15 vórtices por segundo, mientras que para la simulación fueron 13 Hz. Pese a esta pequeña diferencia los resultados se pueden considerar satisfactorios y la simulación se puede considerar también válida.



**Figura 5.19.-** Frecuencia de desprendimiento de vórtices de la probeta cilíndrica de cara plana para cada una de las tres condiciones de flujo, obtenidas mediante la experimentación y la simulación matemática.

## CONCLUSIONES.

La evaluación experimental de los patrones de flujo, la simulación matemática y la adquisición de historias térmicas ayuda a entender cómo la turbulencia afecta la estabilidad de la capa de vapor. Se han analizado efectos producidos por la turbulencia sobre la capa de vapor y como afectan la rapidez de enfriamiento de una probeta plana a alta temperatura (900 °C) cuando es sometida a un proceso de convección forzada mediante técnicas de visualización con cámara de alta velocidad, iluminación láser y filtros ópticos de longitud de onda del espectro visible de la luz; llegando a las siguientes conclusiones:

- 1.- Se logró establecer una técnica de visualización para generar las líneas de corriente con una técnica de iluminación de partículas de poliamida, alrededor de una probeta plana en estado isotérmico (probeta a temperatura ambiente) y no isotérmico (probeta a 900 °C) con flujo de agua a 60 °C a tres diferentes velocidades (0.2, 0.4 y 0.6 m/s).
- 2.- Dado que la técnica de PIV es un método estadístico para medir el campo de velocidades en forma indirecta basado en procesamiento de imágenes, se estableció una metodología de pre-procesamiento de imágenes para mejorar y optimizar su procesamiento en PIVlab y corregir ciertos defectos experimentales.
- 3.- Se encontró que la dinámica de fluidos que se genera alrededor de la probeta bajo condiciones no-isotérmicas, es diferente a la que se presenta bajo condiciones isotérmicas. No es recomendable tratar de correlacionar la dinámica de fluidos alrededor de probetas metálicas bajo condiciones isotérmicas con el comportamiento de las curvas de rapidez de enfriamiento.
- 4.- El fenómeno de desprendimiento de capa límite que se genera cuando una corriente de agua a 60 °C y 0.2 m/s impacta en el borde de entrada de la probeta cilíndrica de cara plana en estado isotérmico desaparece cuando la probeta se encuentra en estado no-isotérmico debido a la formación de una capa de vapor estable que se genera cuando la probeta a 900 °C se enfría por convección forzada. No hay desprendimiento de capa límite debido a que la presión generada por el vapor compensa al gradiente de presión adverso, además el

desprendimiento del vapor cerca de la base de la probeta aumenta la cantidad de movimiento al fluido en esa zona y mantienen un flujo laminar.

5.- Cuando una probeta cilíndrica de cara plana con una temperatura de  $900^{\circ}\text{C}$  se sumerge en un flujo de agua a  $60^{\circ}\text{C}$  y una velocidad de  $0.6\text{ m/s}$ , se observa una capa de vapor perturbada por el arrastre producido por el fluido en la base de la probeta; este arrastre es producido por el cambio de dirección del líquido al impactarse con la base de la probeta, es decir, por un gradiente de presión adverso; esto afecta directamente en la transferencia de calor creando fuertes gradientes térmicos ocasionando con esto un enfriamiento no homogéneo de la probeta.

6.- Pese a la dificultad en el estudio de la dinámica de fluidos cerca de la base de la probeta, con la ayuda del procesamiento de imágenes en PIVlab se encontró como se lleva a cabo la formación del gradiente de presión adverso y la separación de los vórtices de esta zona.

7.-Se realizaron simulaciones matemáticas a las tres condiciones de velocidad del fluido en base a un modelo de flujo periódico y se validaron con el procesamiento de imágenes realizado en PIVlab.

8.- Utilizando un filtro de paso corto de  $450\text{ nm}$  de longitud de onda del espectro visible se midió espesor de la capa de vapor en las condiciones cuando no hay un gradiente de presión adverso ( $0.2$  y  $0.4\text{ m/s}$ ).

9.- Se logró captar un mecanismo de transferencia de calor por cual el líquido podría entrar en contacto con la superficie metálica caliente ( $900^{\circ}\text{C}$ ).

10.- La probeta cilíndrica de cara plana es una buena opción para la caracterización de la evolución del frente de mojado y el cálculo de coeficientes de transferencia de calor, siempre y cuando el número de Reynolds ( $Re$ ) sea inferior a  $37052$  (Reynolds correspondiente a la velocidad de  $0.4\text{ m/s}$ ).

## APORTACIONES

Las aportaciones de este trabajo de tesis se mencionan a continuación:

**-Ponencia oral** del tema “Water turbulence effects on vapor blanket present in a flat-ended cylindrical probe at high temperature and, cooled by forced convection” en la 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics November 23 – 25 ,2014 Moscone (West) Convention Center San Francisco,CA.

<http://meetings.aps.org/Meeting/DFD14/Session/G29.9>

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2014APS..DFDG29009C> .

**-Presentación** del video V0061: Boundary Layer and Recirculation of Flow Around a Vertical Cylindrical Surface at Reynolds Number of 1230 en la 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics November 23 – 25,2014, Moscone (West) Convention Center San Francisco,CA.

<http://gfm.aps.org/meetings/dfd2014/5417164e69702d585c150200>

DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/APS.DFD.2014.GFM.V0061>

**-Presentación** del video V0062: Natural Convection Film Boiling Over a Vertical Cylinder. en la 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics November 23 – 25, 2014, Moscone (West) Convention Center San Francisco,CA.

<http://gfm.aps.org/meetings/dfd2014/5417191069702d585c1e0200>.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/APS.DFD.2014.GFM.V0062>

**-Participación** en la tercera convocatoria de Reconocimiento a la Innovación y la Creatividad Video RIIT 2016, Organizado por la Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica (RIIT). Saltillo, Coahuila, México, Septiembre 2016.

**-Presentación** de cartel: “Diseño económico de un sistema de velocimetría por imágenes de partículas“. En el Congreso Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación y Quinto Encuentro de Jóvenes Investigadores del Estado de Michoacán, celebrado los días 13 y 14 de Octubre del 2016 en las instalaciones del Centro de Convenciones y Exposiciones de esta Ciudad.

**-Asesor de tesis** de la licenciatura en ingeniería mecánica del alumno Luis Flaviano Ferreyra García. Tema de tesis “Adecuación de un equipo de anemometría para realización de PIV (Particle Image Velocimetry) para medir velocidades en líquidos”

-Cervantes-García, A., Solorio-Díaz, G., Vergara-Hernández, H., & Hernández-Morales, B. (2018). FLUID DYNAMICS AROUND FLAT-END CYLINDRICAL QUENCH PROBES UNDER ISOTHERMAL AND NON-ISOTHERMAL CONDITIONS. *Revista Mexicana De Ingeniería Química*, 17(2), 707-721. Retrieved from

Retrieved from <http://www.rmiq.org/ojs311/index.php/rmiq/article/view/80>

Vol. 17, No. 2 (2018) 707-721



Revista Mexicana de Ingeniería Química

**FLUID DYNAMICS AROUND FLAT-END CYLINDRICAL QUENCH PROBES UNDER ISOTHERMAL AND NON-ISOTHERMAL CONDITIONS**

**DINÁMICA DE FLUIDOS ALREDEDOR DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE BASE PLANA, TEMPLADAS BAJO CONDICIONES ISOTÉRMICAS Y NO ISOTÉRMICAS**

A. Cervantes-García<sup>1</sup>, G. Solorio-Díaz<sup>1\*</sup>, H.J. Vergara-Hernández<sup>2</sup>, B. Hernández-Morales<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Santiago Tapia 403, Centro, Morelia, Michoacán, 58000, México.

<sup>2</sup>División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Morelia, Av. Tecnológico 1500, Lomas de Santiaguillo, Morelia, Michoacán, 58120, México.

<sup>3</sup>Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Interior s/n, México, DF 04510, México.

Received November 1, 2017; Accepted February 28, 2018

**Abstract**

The most common methodology to describe the complex phenomena occurring during quenching operations is based on measuring cooling curves inside metal test probes instrumented with thermocouples. There are many variants regarding specimen shape, although the preferred shape is a flat-end cylindrical probe. However, mathematical and physical modeling studies, carried out under isothermal conditions, regarding the hydrodynamic behavior of the quenchant around flat-end cylindrical probes suggest that this type of probe should not be recommended for studies quenching. In this paper, we study fluid dynamics around an instrumented flat-end cylindrical probe, both under isothermal (un-heated probe) and non-isothermal conditions (probe heated to 900 °C and cooled in water at 60 °C). For this purpose, water at 60 °C was used as cooling fluid; three free-stream water velocities (0.2, 0.4 and 0.6 m/s) were studied. Visualization techniques using a high-speed camera and optical filters were applied to characterize the flow around the probe and, at the same time, thermal histories were measured within the probe. The results show that fluid dynamics under non-isothermal conditions is very different from that under isothermal conditions; therefore, it is not advisable to directly correlate fluid dynamics around metal probes characterized under isothermal conditions with cooling curves or the evolution of the wetting front during an actual quench.

**Keywords:** quenching, cooling curves, flat-end cylindrical probe, wetting front, fluid dynamics.

**Resumen**

La metodología más común para describir los fenómenos complejos que ocurren durante las operaciones de temple se basa en la medición de curvas de enfriamiento. Existen variantes de la forma de la probeta, aunque la forma preferida es cilíndrica de base plana. Sin embargo, estudios de modelado físico y matemático realizados en condiciones isotérmicas respecto al comportamiento hidrodinámico del fluido de temple alrededor de las probetas cilíndricas de base plana, sugieren que este tipo de probetas no es recomendable para estudios de temple. En este artículo, se estudia la dinámica de fluidos alrededor de una probeta cilíndrica de base plana bajo condiciones isotérmicas (probeta sin calentar) y no-isotérmicas (probeta calentada a 900 °C y enfriada en agua a 60 °C). Para este propósito, se usó agua a 60 °C como fluido de enfriamiento; se estudiaron tres valores de velocidad de corriente libre (0.2, 0.4 y 0.6 m/s). Se utilizó una cámara de alta velocidad y filtros ópticos para caracterizar el flujo alrededor de la probeta y, al mismo tiempo, se midieron historias térmicas al interior de la misma. Los resultados muestran que la dinámica de fluidos en condiciones no-isotérmicas es muy diferente a la que ocurre en condiciones isotérmicas; por consiguiente, no es aconsejable correlacionar la dinámica de fluidos en condiciones isotérmicas, con curvas de enfriamiento o con el frente de mojado en un temple real.

**Palabras clave:** temple, curvas de enfriamiento, probeta cilíndrica de cara plana, frente de mojado, dinámica de fluidos.

Con las técnicas de visualización establecidas en este trabajo de tesis también se ayudó a validar modelos matemáticos de turbinas eólicas, a cargo del M.C. Víctor López Garza.

**-Artículo:** “Validación de modelo computacional para turbinas eolicas de eje horizontal de baja capacidad. En el Concurso Nacional de Proyectos Académicos en Diseño y Simulación 2016. XV ANSYS Convergence – México 2016. Mayo 24, San Miguel de Allende, Guanajuato, México.

**-Artículo:** “Propuesta de diseño aerodinámico para reducción de turbulencia en la estela de rotación en turbinas eólicas de baja apacidad. Aceptado para el Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables, Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática. CIERMMI 2016, del 19 al 21 de Octubre en San Juan del Río, Qro. Revista de Sistemas Experimentales. ISSN: 24103950 .

[http://ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas\\_Experimentales/vol3num8/Revista\\_de\\_Sistemas\\_Experimentales\\_V3\\_N8.pdf](http://ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas_Experimentales/vol3num8/Revista_de_Sistemas_Experimentales_V3_N8.pdf)

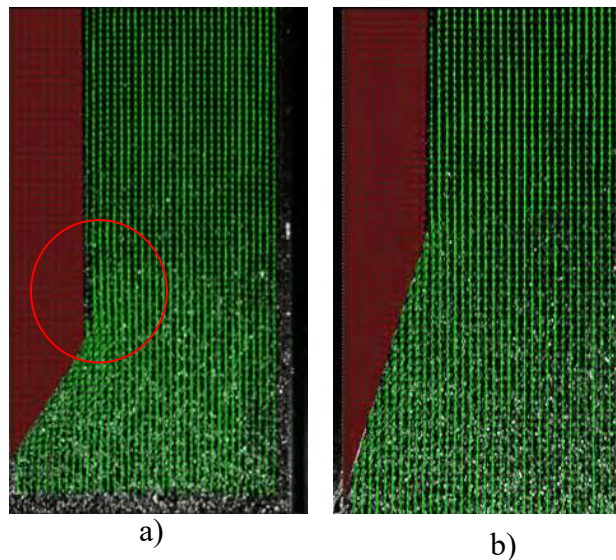
[http://ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas\\_Experimentales/vol3num8/Revista\\_de\\_Sistemas\\_Experimentales\\_V3\\_N8\\_11.pdf](http://ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas_Experimentales/vol3num8/Revista_de_Sistemas_Experimentales_V3_N8_11.pdf)

**-Presentación:** “Propuesta de diseño aerodinámico para reducción de turbulencia en la estela de rotación en turbinas eólicas de baja capacidad HAWT “. Conference: Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables -Mantenimiento Industrial –Mecatrónica e Informática. *Editorial label ECORFAN: 607-8324. BCIERMIMI Control Number: 2016-01. RNA: 03-2010-032610115700-14. BCIERMIMI Classification(2016): 191016-0101. http://www.ecorfan.org/booklets/Revista%20de%20Sistemas%20Experimentales\_23%20PDF/Daniel%20Molinero,%20V%C3%ADctor%20L%C3%B3pez,%20Alberto%20Cervantes.pdf*

## TRABAJO FUTURO.

Dada la importancia de los procesos de temple y la cuantificación del poder de enfriamiento de los fluidos, se ha pretendido crear una base de datos global utilizando la probeta cilíndrica de cara plana, pero a la fecha no se han logrado avances significativos debido a que no se ha puesto la atención debida a la dinámica de fluidos.

Con este trabajo de tesis se ha puesto de manifiesto que la probeta cilíndrica de cara plana tiene sus limitaciones debido a los gradientes de presión adversos que presenta. Se debe encontrar entonces una probeta experimental que no presente gradientes de presión adversos y que tenga una buena disipación de calor. Vergara *et al.* han propuesto un sistema de enfriamiento con flujo totalmente desarrollado y una probeta cilíndrica de cara cónica. El diseño de la probeta cilíndrica de cara cónica puede mejorarse aun más en base a un diseño más aerodinámico con la ayuda de las técnicas aquí presentadas tal y como se muestra en la siguiente Figura. Esto con el objetivo de contribuir a la creación de la base de datos global proponiendo la metodología aquí presentada.



**Figura TF.-** a) probeta propuesta por Vergara *et al.* , b) probeta para estudio de trabajo futuro.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] S. Owaku. Quench Distortion of Steel parts. Netsu Shori (J. Jpn. Soc. Heat Treat.), Vol 32 (No. 4), 1992, p 198-202.
- [2] R. Kern. Distortion and Cracking. II: Distortion from Quenching. Heat Treat, March 1985, p 41-45.
- [3] H.M. Tensi, G.E. Totten, and G.M. Webster. Proposal to Monitor Agitation of Production Quench Tanks. Heat Treating: Including the 1997 International Induction Heat Treating Symposium-Proceed. 17<sup>th</sup> Conf., D.I. Milam, D.A. Poteet, G.D. Pfaffmann, V. Rudnev, A Muehlbauer, and W.B. Albert, Ed., ASM International 1997, p 423-441.
- [4] G.F. Long. Control of Quenching Distortion in Gears. Jinshu Rechuli, No. 5,1994, p 39-40.
- [5] H.M. Tensi, A Stich, and G.E. Totten. Fundamentals of Quenching. Metal Heat Treat., March/April 1995, p 275-282.
- [6] M. Narazaki, G.E. Totten, and G.M. Webster. Hardening by Reheating and Quenching. Handbook of Residual Strees and Deformation of Steel. p.11-12.
- [7] Y. A. Çengel. Transferencia de Calor. McGraw-Hill 2<sup>a</sup> Edicion.
- [8] G.E. Totten, C.E. Bates and N.A. Clinton. Handbook of Quenchants and Quenching Technology, ASM International 1993.
- [9] A. Cervantes-García. Tesis: *Estudio de la dinámica del frente de mojado en procesos de temple con conveccion forzada.*UMSNH. Enero del 2012.
- [10] M.Raffel, C.Willert, and J.Kompehans. PIV: A Practical Guide. Springer, 1st edition edition,2002.
- [11] R.J.Adrian. Twenty years of particle image velocimetry. 12th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, 2004.
- [12] Th. Künzel, H.M. Tensi and G. Welzel, “Rewetting Rate – The Decisive Characteristic of a Quenchant”, Tagungsband 5th Intern. Congress on Heat Treatment of Materials, Budapest, 20-24 October 1986, p. 1806-1813.



- [13] H.M. Tensi and M. Schwalm, Wirkung von Abschreckflüssigkeiten unter Berücksichtigung spezieller wässriger Kunststofflösungen (Polyäthylenoxide), HTM 34: 122–131 (1980).
- [14] H.M. Tensi and A. Stich, “Possibilities and Limits to Predict the Quench Hardening of Steel”, Proceedings of the First International Conference on Quenching & Control of Distortion, Chicago, Illinois, USA, 22-25 September, 1992, pp. 27-32.
- [15] H.M. Tensi; G. Welzel, T.H. Kunzel, E. Steffen, “Controlled Heat Treatment Using Quenching Characteristics of Fluids”, 5th International Congress on Heat Treatment of Materials, Vol. III; 1986, Budapest-Hungary; pp. 1784-1791.
- [16] G.E.Totten. Polymer Quenchants For Induction Heat Treating Applications: The Basics.
- [17] K. Funatani, M. Narazaki, M. Tanaka. " Evaluation of Testing Methods of Cooling Power of Liquid Quenchants".
- [18] H.J. French, Trans. A.S.S.T., V 17 (1930).646.796.
- [19] K. G. Speith and H. Lange, Mitt. Kai. Wilh. Inst. Eisenforschung. 17 (1935), s.175.
- [20] A. Rose, Arch. Eisenhuettenwes., V13 (1939/1940), s.345.
- [21] W. Peter. Arch. Eisenhuettenwes., V20 (1949), Heft 7/8, s.263.
- [22] S. Sato: Kinzoku Kenkyu, V10 (1933) , p. 63.
- [23] M. Tagaya and I. Tamura; J. JIM B-V15 (1951), N11. P. 535-537.
- [24] M. Tagaya and I. Tamura; Technology Report of Osaka University. V4 (1954). N123, p.305-319.
- [25] M. Tagaya and I. Tamura; J. Jim V20 (1956), N3, p.124-128.
- [26] M. Tagaya and I. Tamura; J. Jim V16 (1952), N12, p.652-656.
- [27] JIS K2242. Heat Treat Oil. 1986.
- [28] M. Tagaya and I. Tamura; J. JIM V22 (1958), N12. P. 631-636.

- [29] Y. Tokihiro and I. Tamura; T anH. V60 (19-74). N6. P. 661-670.
- [30] M. Tagaya and I. Tamura; J. JIM V24, N10. P. 676-679.
- [31] H.J. Vergara-Hernández , B. Hernández-Morales. A novel probe design to study wetting front kinematics during forced convective quenching. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Elsevier, 33 (2009) 797–807.
- [32] J. Szekely, J.W. Evans and J.K. Brimacombe. *The Mathematical and Physical Modeling of Primary Metals Processing Operations*. Chapter 3, John Wiley and Sons, New York, 1988, p 69-99.
- [33] H.M. Tensi and P. Stitzelberger-Jacob. Evaluation of Apparatus for Assessing Effect of Forced Convection on Quenching Characteristics, *Mat. Sci. Tech.*, Vol 5, 1989, p 718-724.
- [34] S. Serberger and J. Bodin. Controlling the Quench Process for More Consistent Hardening. *Heat Treat*, 1988, Vol. 20 (5), p 26-28
- [35] M. Narazaki, M. Kogawara, A. Shirayori, S. Fuchizawa. Laboratory Test of Cooling Power of Polymer Quenchants. *Proceedings of the Second International Conference on Quenching and Control of Distortion*. 4-7 November, 1996, Cleveland, Ohio. pp 101-109
- [36] H.J. Vergara-Hernández , B. Hernández-Morales, G. Solorio Diaz and G. Gutiérrez-Gnechi. Effect of the hydrodynamic conditions on the vapor film during forced convective quenching. 18th IFHTSE Congress - International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering, 2010 July 26-30th, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- [37] B. Hernández Morales, H.J. Vergara Hernández, G. Solorio Díaz. *Experimental and Computational Study of Heat Transfer During Quenching of Metallic Probes*. Intechopen. Evaporation, condensation and heat transfer. ISBN 978-953-307-583-9. September 2011.
- [38] B. Hernández Morales, H.J. Vergara Hernández A y G. Solorio-Díaz. Fluid dynamics during forced convective quenching of flat-end cylindrical probes. *Recent Advances in Fluid Mechanics, Heat & Mass Transfer and Biology*. 2011.
- [39] R. Cruces Reséndez. Tesis *Modelación matemática de las condiciones hidrodinámicas resultantes de la interacción entre una corriente de agua y una probeta de temple*. Octubre del 2012.

- [40] D. Ying Ju, K. Tajima and T. Yano. "The Visualization of Heat Fluid and Steam Film in Quenching Process of Carbon Steel by PIV". Journal of the Visualization Society of Japan. [Vol. 23](#) (2003) [No. Supplement2](#), pp 9-12.
- [41] D. Ying JU, T. Suzuki, Y. Watanabe and T. Sugimoto. "Visualization of thermal flow and surface temperature field of quenched material in gas-quenching process". Journal of the Visualization Society of Japan. Vol. [27](#) (2007) [No. Supplement2](#). pp 79-82.
- [42] D. Ying Ju, Z. Zhang, H. Yokota, W. Sasaki and K. Fujikake. "Visualization and measurement of heat transmission behavior of quenchants under string mixing conditions". Journal of the Visualization Society of Japan Vol. 27 (2007) No. Supplement2. pp 83-86.
- [43] D. Ying Ju, K. IchitanI and H. Saito. "Observation of thermal flow behavior and steam film destruction of bright-quech oil in quenching process". Journal of the Visualization Society of Japan Vol. 27 (2007) No. Supplement2. pp 75-78.
- [44] H. Yahagi, D. Ying Ju, and H. Yokota. "Thermal Flow Simulation and Visualization of PAG Quenchants in Cooling Evaluation Equipment with Twin Stir". International Heat Treatment and Surface Engineering. Volume 5, Issue 2 (June 2011), pp. 61-64
- [45] R.T. Von Bergen. The Effects of Quenchant Media Selection on the Distortion of Engineered Steel Parts. Quenching and Distortion Control. G. E Totten, Ed., ASM International, 1992, p 275-282.
- [46] U. Vakarelski\*, O. Marston, Y. C. Chan and T. Thoroddsen. Drag Reduction by Leidenfrost Vapor Layers. PRL 106, 214501 (2011). 2011 American Physical Society. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.214501
- [47] L. B. Wachters; H. Bonne; and €IJ. Van Nouchuis: The Heat Transfer from a Hot Horizontal Plate to Sessile Water Drops in the Spheroidal State. Chem. Erg. Sci., -21: 923 (1966).
- [48] W. S. Bradfield: Liquid-Solid Contact in Stable Film Boiling, Tnd. Eng.Chem. , Fundamentals 9 - 5: 200-204 (1966).
- [49] M. Cumo; G. E. Farello; and G. Farrari: Notes on Droplet Heat Transfer. Chem. Eng. Prog. Symp. 92, vol. -65: 175, 1969
- [50] Y. Y. Hsu; and J. W. Westwater: Film Boiling from Vertical Tubes, AIChE J. 9 -4: 58 (1958).
- [51] Y. Y. Hsu; and J. W. Westwater: Approximate Theory for Film Boiling on Vertical Surfaces. Chem. Eng. Progr., Symp. Ser. 30, -56: 15 (1960).

- [52] R. S. Dougall; and W. M. Rohsenow: Film Boiling on the Inside of Vertical Tubes with Upward Flow of the Fluid at Low @alities. MTT Rept. No. 9019-26 (1963).
- [53] C. D. Morgan: A Study of Film Boiling from Vertical Surfaces, Ph. D. Dissertation, Lehigh University, Bethlehem, Penna. (1965).
- [54] E. M. Greitzer: Film Boiling on Vertical Surfaces. Ph. ID. Thesis, Harvard Univ. (1969).
- [55] F. F. Simon; S. J. Papell; and R. J. Simoneau: Min. Film Boiling Heat Flux in Vertical Flow of Liquid Nitrogen. NASA TN D-4307 (1968).
- [56] F. F. Simon; and R. J. Simoneau: Transition from Film to Nucleate Boiling in Vertical Forced Flow. ASME Paper no. 69-HT-26 (1969).
- [57] G. Coury: A Study of Vertical Turbulent Film Boiling and Interfacial Effects. Ph. D. Thesis, Univ. of Houston (1968).
- [58] Y.Y. Hsu. A review on film boiling. Nasa technical memorandum 1970.
- [59] A.E. Bergles, 1992, Elements of Boiling Heat Transfer, *Boiling Heat Transfer*, R.T. Lahey, Jr. (Editor), Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- [60] M. V. Krishnameti and A. Ramakhandran. Effect of radiation on boundary-layer film boiling. Bangalore, India. Translated from Inzhenerno-Fizicheski Zhurnal, Vol. 17, No. 5, pp. 805-818, November, 1969.
- [61] D. Scott MacKenzie. The chemistry of oil quenchants. Houghton International Inc. Valley Forge, Pa.
- [62] M. Narazaki, G.E. Totten and G.M. Webster. Hardening by Reheating and Quenching. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. 2002.
- [63] B.R. David Kenning. Optical studies of boiling heat transfer: insights and limitations. Elsevier. International Journal of Heat and Fluid Flow 25 (2004) 209–222.
- [64] [http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/fis/inrefraccion.pdf](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/fis/inrefraccion.pdf)
- [65] [www.edmundOptics.com](http://www.edmundOptics.com)
- [66] W. Thielicke and E.J. Stamhuis. (2014): PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB. <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1092508>

[67] <https://www.phantomhighspeed.com/Products/Miro-Midsize-Cameras/Miro-310-311-Cameras->

[68] A.E. Bergles, 1992, Elements of Boiling Heat Transfer, *Boiling Heat Transfer*, R.T. Lahey, Jr. (Editor), Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

[69] M. V. Krishnameti and A. Ramakhandran. Effect of radiation on boundary-layer film boiling. Bangalore, India. Translated from *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, Vol. 17, No. 5, pp. 805-818, November, 1969.

[70] D. Scott MacKenzie. The chemistry of oil quenchants. Houghton International Inc. Valley Forge, Pa.

[71] M. Narazaki, G.E. Totten and G.M. Webster. Hardening by Reheating and Quenching. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. 2002.

[72] O. Almeida, S. S. Mansurb and A. Silveira-Neto. On the flow past rectangular cylinders: physical aspects and numerical simulation. *Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*, Vol. 7 • No 01 • June 2008 • p. 55-64.

## Anexo A

Código que se generó en Matlab para aplicar un filtro de nitidez, recortar la imagen y adicionar un contador a la imagen (ver Figura 3.20).

```
cr=-1/60
for h= 2000001:1:2002176%numero de imágenes que se van a leer, y se van a leer de una
en una
cr=cr+(1/60)
[a,map]=imread(strcat('pp__fdes_60fps_grab30fps_iso_c001s000',strcat(int2str(h),'.png')));
%lectura de imagen
c= imsharpen(a,'Radius',1,'Amount',4); % Filtro nitidez
conf_val = cr;
text_str= ['Time ' num2str(conf_val,'%0.4f') 'sec'];
R = insertText(c,[10 10],text_str, 'FontSize', 25, 'BoxColor','white', 'BoxOpacity',0.6);
imwrite(R,['pn',num2str(h),'.png']);
end

%recortar imágenes
for h= 1000001:1:1001525%número de imágenes que se van a leer, y se van a leer de una
en una
cr=cr+(1/60)
[a,map]=imread(strcat('fil',strcat(int2str(h),'.png'))); %lectura de imagen
I2 = imcrop(a,[0 0 243 480]);
imwrite(I2,['fil2',num2str(h),'.png']);
end
```

## Anexo B

A continuación se muestra el código y la secuencia de pre-procesamiento y procesamiento de las imágenes en Matlab y PIVlab:

1.- Se renombran.

```
dirData = dir('*.*.bmp');      %# Obtiene los datos del archivo seleccionado
fileNames = {dirData.name};   %# Crea una matriz de celdas de nombres de archivos
for iFile = 1:numel(fileNames) %# Bucle para el número de imágenes
    newName = sprintf('Vuelta0.2rxuhgu1.000001%05d.png',iFile); %# Renombra imagen
    movefile(fileNames{iFile},newName); %# Mueve la imagen
end
```

2.-Se recortan (Figura 3.24 a).

```
%Recortar imágenes
clc;
clear all;
for h= 100001:1:100999 %número de imagenes que se van a leer, y se van a leer de una en
una
    [a,map]=imread(strcat('Vuelta0.2rxuhgu1.00000',strcat(int2str(h),'.png'))); %lectura de
imagen
    I2 = imcrop(a,[400 0 1010 1195]); %Recorta imágenes [xmin ymin width height]
    imwrite(I2,['pc_iso_Vuelta0.2rxuhgu1.00000',num2str(h),'.png']); %Guarda imágenes
recortadas
end
```

3.- Se aplica el filtro de bordes (Figura 3.24 b).

```
for h=100001:1:100999 %numero de imagenes que se van a leer, y se van a leer de una en
una
    [A, map]=imread(strcat('pc_iso_Vuelta0.2rxuhgu1.00000',strcat(int2str(h),'.png')));
    %Pre-asignar matrices con ceros
    M =zeros(size(A));
    %Máscara del filtro, el cual se asigna al azar
    F1=[-1 0 1;-2 0 2; -1 0 1];
    F2=[-1 -2 -1;0 0 0; 1 2 1];
    A=double(A);
    for i=1:size(A,1)-2
        for j=1:size(A,2)-2
            %Operaciones de gradiente
            Gx=sum(sum(F1.*A(i:i+2,j:j+2)));
            Gy=sum(sum(F2.*A(i:i+2,j:j+2)));
            %Magnitud del vector
            M(i+1,j+1)=sqrt(Gx.^2+Gy.^2);
        end
    end
end
M=uint8(M);
%figure,imshow(M);title('Imagen con filtro');
imwrite(M,['bd_pc_iso_Vuelta0.2rxuhgu1.00000',num2str(h),'.png']);%guardado de
imagenes
end
```

4.- Se analizan en PIVlab [66] (Figura 3.24 c).