



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
MECÁNICA

**“ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL FRENTE DE
MOJADO EN PROCESOS DE TEMPLE CON
CONVECCIÓN FORZADA.”**

TESIS.

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

PRESENTA :

ING. ALBERTO CERVANTES GARCÍA.

ASESOR DE TESIS

DR. GILDARDO SOLORIO DÍAZ.

COASESOR

DR. HECTOR JAVIER VERGARA HERNÁNDEZ.

MORELIA, MICH. ENERO DEL 2012.





ÍNDICE.

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABLAS	XI
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
JUSTIFICACIÓN	3
HIPÓTESIS	4
OBJETIVOS	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
CAPÍTULO I	6
INTRODUCCIÓN	6
1.1.- Ebullición.....	6
1.2.-Punto de Leidenfrost.....	7
CAPÍTULO II	11
ANTECEDENTES	11
2.1.-Tratamiento térmico.....	11
Severidad del temple.....	13
2.2.-Fenómenos de ebullición.....	14
Formación de una película de vapor estable.....	14
Ebullición nucleada.....	14
Enfriamiento por convección sin presencia de vapor.....	14
Frente de mojado.....	16
Coexistencia de los fenómenos de ebullición.....	16
2.3.- Métodos utilizados para la caracterización de las etapas del temple.....	17
2.3.1.-Grabación de video.....	18
2.3.2.-Adquisición de historias térmicas mediante termopares.....	18
2.3.3.-Adquisición de conductividad entre la probeta y el medio de temple.....	19
2.3.4.-Adquisición de sonido mediante hidrófonos.....	20
2.4.- Influencia del espesor de los termopares.....	21
2.5.-Normas utilizadas en temple.....	22
2.6.- Sistemas utilizados para el temple en baño quieto.....	24
2.6.1-Sistema de la General Motors (GM).....	24
2.6.2.-Sistema de Grossmann.....	25
2.6.3-Sistema IVF.....	25
2.6.4.-Sistema Drayton.....	26
2.6.5.-Sistema Liscic –Nanmac.....	27
2.6.6.-Sistema desarrollado por Tamura.....	28
2.7.- Sistemas utilizados para el temple con flujo en movimiento.....	29
2.7.1.-Sistemas propuestos por Narazaki.....	29
2.7.2.-Sistema propuestos por H.J. Vergara-Hernández.....	32
2.8.- Factores que intervienen en el proceso de temple.....	33



2.8.1 Efecto de la temperatura del medio de enfriamiento.....	34
2.8.2 Efecto de la velocidad de agitación del medio de enfriamiento.....	34
2.8.3 Efecto de forma de la probeta.....	35
2.8.4.- Efecto de bordes de las probetas.....	36
2.8.5 Efecto de la rugosidad y el oxido en la probeta.....	38
2.8.6 Efecto del material de la probeta.....	40
CAPÍTULO III	42
SIMULACIÓN FÍSICA.	42
3.1- Sistema utilizado.....	42
3.2.- Construcción del sistema que permite direccionar el fluido.....	46
3.2.1.-Sistema mecánico.....	46
3.2.2.-Sistema hidráulico.....	49
3.3.- Cámara de alta velocidad.....	51
3.3.1.- Características de la Cámara FASTCAM-PCI R2.....	51
3.3.2.- Pruebas para determinar en qué formato se deben de guardar las imágenes y el video.....	54
3.3.3.-Tipos de lentes con los que se cuentan.....	55
3.4.-Horno de resistencias tipo libro.....	55
3.5.-Pruebas en estado Isotérmico.....	59
3.6.-Matriz de experimentación utilizada en estado no-isotérmico.....	62
3.7.-Procedimiento experimental.....	63
3.7.1.-Preparación de las probetas.....	63
3.7.2.-Inicio de las pruebas.....	64
3.8.- Tratamiento de los datos adquiridos por los termopares.....	70
3.9.-Tratamiento de los videos.....	71
CAPÍTULO IV	73
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	73
4.1.- Reproducibilidad de las pruebas.....	73
4.2-Número de Reynolds utilizado.....	74
4.3.-Análisis de las pruebas en estado isotérmico.....	75
4.3.1-Probeta plana.....	75
4.3.2- Probeta semicircular.....	79
4.3.3.-Probeta cónica.....	81
4.4.- Análisis todos los termopares en estado no-isotérmico.....	82
4.1.1-Curvas de rapidez de enfriamiento.....	84
4.5.- Importancia del tamaño de burbuja.....	103
4.6.-Análisis Del Termopar 3.....	104
4.6.1.-Temperatura de Leidenfrost, rapidez de enfriamiento y velocidad del frente de mojado.....	104
4.6.2.- Análisis de las curvas de rapidez y aceleración de enfriamiento.....	106
4.7.-Comparación del punto de Leidenfrost con las curvas de rapidez de enfriamiento y las nuevas curvas.....	129
4.8.-Efecto de la oxidación de la probeta.....	130



4.9.-Distorsión de las probetas	131
4.10.-Efecto del espesor de la probeta.....	132
4.11.- Simulación matemática.....	134
4.11.1.-Probeta plana.....	135
4.12.2.-Probeta semicircular.....	137
4.11.3.-Probeta cónica.....	139
CONCLUSIONES.....	141
APENDICE A.....	143
APENDICE B.....	147
REFERENCIAS BIBLOGRÁFICAS.....	148
TRABAJO A FUTURO.....	155
ARTICULOS Y CONGRESO ASISTIDO.....	156



LISTA DE FIGURAS.

Figura 1.1.- Sistema de Nukiyama para demostrar la curva de ebullición.....	7
Figura 1.2.- Regímenes de ebullición que se presentan en experimentos de alambres calentados eléctricamente [3].	7
Figura 1.3.- Fotografías de un alambre en ebullición nucleada (izquierda) y	8
Figura 1.4.- Experimento de Leidenfrost de una gota de agua.....	9
Figura 2.1.- CCT diagrama de un acero no aleado conteniendo 0.45 %C. Temperatura de austenización de 880 °C. Cortesía de Verlag Stahlessen mbH Dusseldorf [8].....	12
Figura 2.2.- Esfuerzos térmicos desarrollados en un espécimen de acero. “T” es el tiempo al que ocurre el gradiente térmico máximo; “Y” es el tiempo al que se revierte el esfuerzo [10]	13
Figura 2.3.- Curva de enfriamiento y curva de rapidez de enfriamiento para una probeta metálica; muestra tres etapas características en la extracción de calor en medios de temple volátiles [IVF, Industrial Research and Development Corporation [14].	15
Figura 2.4.- Fenómenos de ebullición presentados durante el enfriamiento: a) capa de vapor, b) ebullición nucleada, c) convección forzada [15].....	15
Figura 2.5.- Avance del frente de mojado.	16
Figura 2.6.- Coexistencia de los fenómenos de ebullición.	17
Figura 2.7. – Curvas de enfriamiento y rapidez de enfriamiento.	18
Figura 2.8. – Probeta cilíndrica de punta cónica enfriada en agua con temperatura de 60 °C fluyendo a 0.2 m/s [6].....	19
Figura 2.9. – Curva tiempo-temperatura y frente de mojado asociada a la medición de conductividad [22].....	20
Figura 2.10. – a) Señal de sonido en el temple, pieza b) antes de templar, c) después de templar.....	20
Figura 2.11.- Esquema de la construcción de la junta caliente de un termopar: a) termopar con cubierta metálica y polvo de cobertura en la junta caliente; b) termopar con polvo de cobertura y junta caliente soldada a la cubierta metálica; c) termopar con alambres soldados fuera de la cubierta metálica (junta caliente descubierta) [24].	21
Figura 2.12.- Sensibilidad de la respuesta térmica de un termopar posicionado en el centro de una probeta cilíndrica de 8 mm de diámetro de acero al Cr-Ni enfriada súbitamente con agua a 25°C; 1) termopar de 0.5 mm de diámetro; 2) termopar de 1 mm de diámetro [24].	22
Figura 2.13.- Detalles de la primera probeta de Tamura	23
Figura 2.14.- Variedad de probetas investigadas por el Profesor Tamura.	23
Figura 2.15.- Sistema de templado GM y principio de operación.....	24
Figura 2.16.-Probeta Grossmann.	25
Figura 2.17.- Sistema IVF.	26
Tabla 2. 2.- Características de la probeta Drayton.	26
Figura 2.18.- Sistema Drayton.....	27
Figura 2.19.- Sistema Liscic –Nanmac.....	27
Figura 2.20.-Sistema JIS.....	28
Figura 2.21.-Probeta propuesta por a) Tamura y b) Narazaki.	29
Figura 2.22.-Sistema de Narazaki.....	29



Figura 2.23.-Baño con convección forzada agitada por una boquilla de inyección. 1: probeta ,2: tubo guía, 3: boquilla de inyección (25mm de diámetro interior), 4: tubo de acrílico de 70 mm de diámetro interior, 5: resistencia para controlar la temperatura, 6: altura del baño, 7: ventana de observación, 8: aislante, 9: caucho para evitar la vibración, 10: base, 11: bomba centrífuga (max. 40 l/min).....	30
Figura 2.24.-Baño con convección forzada en un tubo. 1: probeta ,2: tubo guía, 3: tubo de acrílico (40 mm de diámetro interior), 4: resistencia para controlar la temperatura, 5: altura del baño, 6: ventana de observación, 7: base, 8: bomba centrífuga (max. 80 l/min)	30
Figura 2.25.-Comparación de los 2 sistemas, a) por boquilla y b) por tubo.....	31
Figura 2.26.-Representación esquemática de la instalación.	32
Figura 2.27.-Mediciones con (PIV) para calcular el perfil de velocidad (en la dirección radial) para varias distancias desde el codo de 90° (ver Fig. 2.18), para agua a 25 °C, fluyendo a 0.70 m/s a través de un diámetro interno de 44 mm.	33
Figura 2.28.-Tanque con modificador tipo H utilizado para la cuantificación del efecto de la agitación [62]......	34
Figura 2.29.- Sistema para evaluar el efecto de la agitación sobre la rapidez de enfriamiento [62].	35
Figura 2.30.- Efecto de bordes en la base de la probeta. Probeta templada en polímero a 30 °C en agua quieta al 15% (PAG). El tamaño de la probeta es de 10 mm de diámetro y 30 mm de longitud. Se utilizan las probetas JIS con radios de 0 (R0), 3 (R3), 5 (R5), base plana, chaflanes de 1 mm X 45° (C1).	36
Figura 2.31.- Efecto de bordes en la base de la probeta. Probeta templada en polímero a 30 °C aceite (tipo JIS 1-1). El tamaño de la probeta es de 10 mm de diámetro y 30 mm de longitud. Se utilizan las probetas JIS con radios de 0 (R0), 3 (R3), 5 (R5), base plana, chaflanes de 1 mm X 45° (C1).	36
Figura 2.32 - Probetas de NiCr a) en probeta cilíndrica de 25 mm de diámetro por 100 mm de largo y b) probeta prismática de 15x15x45 mm templada en agua en baño quieto [69,70].	37
Figura 2.33.- Curvas de enfriamiento en baño quieto realizado a probetas con diferente geometría en la base [55]......	38
Figura 2.34.- Curvas de enfriamiento en baño quieto realizado a una probeta de forma semicircular y presenta un frente de mojado de la parte superior a la parte inferior de la probeta [66]......	38
Figura 2.35– Efecto de la rugosidad de la probeta.	39
Figura 2.36.– Conductividad térmica: a) del AISI 304 y b) la plata.	40
Figura 3.1.- Sistema experimental construido: a) tinaco, b) bomba hidráulica, c) rotámetro, d) horno tipo libro, e) servomotor, f) polea del eje, g) polea de alineación, h) carrera, i) probeta, j) caja de acrílico, k) posición de trabajo, l) caja de vidrio, m) tubos de recirculación.	42
Figura 3.2.- Sección longitudinal de las probetas de base: a) cónica, b) semicircular y c) plana; d) sección transversal. Acotación en mm.	44
Figura 3.3.- Detalle de la probeta metálica instrumentada y su posición dentro del dispositivo experimental, en la posición de trabajo.....	45
Figura 3.4.- Instalación del servomotor.....	46



Figura 3.5.-Sistema de Transmisión.	47
Figura 3.6.-Polea en la viga metálica.	47
Figura 3.7.-Polea y carrera con 4 llantas.	48
Figura 3.8.-Centrado de la lanza.	48
Figura 3.9.-Centrado con la ayuda de la probeta cónica.	48
Figura 3.10.-Componentes hidráulicos del sistema.	49
Figura 3.11.-Conexión PVC y acrílico.	50
Figura 3.12.- Caja de acrílico y tubos de recirculación.	51
Figura 3.13.- Cámara de alta velocidad Photron-Fastcam-PCI-R2.	51
Figura 3.14.- Software PFV.	52
Figura 3.15.-Lectura de un lente.	55
Figura 3.16.-Zoom [74].	55
Figura 3.17.- Horno tipo libro.	56
Figura 3.18.- Carro para mover el horno.	56
Figura 3.19.- Montaje del horno.	57
Figura 3.20.- Adquisidor de datos [75].	57
Figura 3.21.- Tarjeta de adquisición.	58
Figura 3.22.- Colocación del Adquisidor.	58
Figura 3.23.-a) inyector del colorante, b) probeta plana, b) cónica, c) semicircular.	59
Figura 3.24.-Pruebas con escarcha a 20 lt/min.	59
Figura 3.25.-Pruebas con escarcha a 40 lt/min.	60
Figura 3.26.-Pruebas con escarcha a 60 lt/min.	60
Figura 3.27.-Lineas de corriente con agua a 60 °C y un flujo de: a) 20 lt/ min y b) 60 lt/ min.	60
Figura 3.28.-Vectores de velocidad con agua a 60 °C y un flujo de: a)20 lt/ min y b) 60 lt/ min.	61
Figura 3.29.-Presión estática con agua a 60 °C y un flujo de: a)20 lt/ min y b) 60 lt/ min.	61
Figura 3.30.-Colocación de los termopares en la lanza.	63
Figura 3.31.-Cemento utilizado y sellado de la probeta.	64
Figura 3.32.-Fluke y calentamiento de agua con resistencias.	64
Figura 3.33.-Calentamiento del horno.	65
Figura 3.34.-Habilitación de los canales y selección de tipo de termopar.	65
Figura 3.35.-a) tiempo de adquisición y b) ruta y formato de guardado.	66
Figura 3.36.-Posicionamiento de la cámara de alta velocidad y la luz.	66
Figura 3.37.- a) Introducción de la probeta al horno y b) monitoreo de temperatura.	67
Figura 3.38.- Apagado de la luz para comenzar la grabación.	68
Figura 3.39.-Trigger listo para presionarse.	68
Figura 3.40.- Salida de la probeta y bajada a la posición de trabajo.	68
Figura 3.41.- Adquisición de imágenes con la cámara de alta velocidad.	69
Figura 3.42.-Pulido de la probeta.	69
Figura 3.43.- Tratamiento de los datos adquiridos.	70
Figura 3.44.- Curva Temperatura-tiempo.	70
Figura 3.45.- Curva de rapidez de enfriamiento.	71
Figura 3.46.- Asignación del códec cinepak.	71
Figura 3.47.-Posición de cada termopar en el video.	72



Figura 4.1.- Reproducibilidad experimental de la probeta de punta instrumentada con termopares tipo K de 1/16 de pulgada. Tres experimentos superpuestos durante el temple de una probeta calentada a 920 °C y enfriada hasta los 60 °C. 73	
Figura 4.2.- Imágenes de listones sujetos a la base de las probetas cilíndricas de cara plana para agua circulando a una velocidad de 0.20 m/s en un ducto de 44 mm de diámetro interno.....	75
Figura 4.3. -Imágenes de listones sujetos a la base de probetas cilíndricas de cara plana para agua circulando a una velocidad de 0.40 m/s en un ducto de 44 mm de diámetro interno. .	76
Figura 4.4.- Imágenes de listones sujetos a la base de probetas cilíndricas de cara plana para agua circulando a una velocidad de 0.60 m/s en un ducto de 44 mm de diámetro interno. .	76
Figura 4.5.- Imágenes de los experimentos de inyección de tinta cerca de la base de una probeta cilíndrica de cara plana sumergida en un ducto de 44 mm de diámetro con agua, a temperatura ambiente, circulando a una velocidad de 0.40 m/s: (a) vista del capilar y la tinta; (b) detalle de la trayectoria de la tinta.	77
Figura 4.6.-Aire atrapado en la base de la probeta plana.	78
Figura 4. 7.- Imágenes de listones sujetos a la base de las probetas cilíndricas de punta semiesférica para agua circulando, en un ducto de 44 mm de diámetro interno, a una velocidad de: a) 0.20 m/s y b) 0.60 m/s.....	79
Figura 4.8.- Imágenes de los experimentos de inyección de tinta cerca de la punta semicircular de una probeta que es sumergida en un ducto de 44 mm de diámetro con agua, a temperatura ambiente, circulando a una velocidad de: (a) 0.2 m/s y (b) 0.60 m/s.	80
Figura 4. 9.- Imágenes de listones sujetos a la base de las probetas cilíndricas de punta cónica para agua circulando, en un ducto de 44 mm de diámetro interno, a una velocidad de: a) 0.20 m/s y b) 0.60 m/s.	81
Figura 4.10.- Curva de enfriamiento.	82
Figura 4. 11.- Partes identificadas de una curva de rapidez de enfriamiento.	83
Figura 4. 12.- Curvas de rapidez de enfriamiento de la probeta plana con agua a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s, c) 0.6m/s y d) posición de los termopares. El tiempo se toma en cuenta desde que la probeta entra en contacto con el medio de temple.....	84
Figura 4. 13.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta plana con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. En el momento en el que rompe la capa de vapor. El tiempo se mide desde que la probeta entra al tubo y tiene contacto con el medio de enfriamiento en todos los casos.	85
Figura 4. 14.- Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta plana con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: 0.4m/s. a) instante antes de la explosión de la capa de vapor y b) explosión de la capa de vapor.	86
Figura 4. 15.- Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta plana con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: 0.4m/s. a) instante antes de la explosión de la capa de vapor y b) explosión de la capa de vapor.	87
Figura 4. 16.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta plana con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. Mostrando la estabilidad del avance del frente de mojado cuando pasa enfrente del termopar 3.....	88



Figura 4. 17.- Graficas con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. Mostrando el punto el detalle del punto A cuando la probeta plana tiene contacto con el medio de enfriamiento.	89
Figura 4. 18.- Curvas de rapidez de enfriamiento de la probeta semicircular con agua a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s, c) 0.6m/s y d) posición de los termopares. El tiempo se toma en cuenta desde que la probeta entra en contacto con el medio de temple.....	90
Figura 4.19.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta semicircular con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. En el momento en el que rompe la capa de vapor. El tiempo es medido desde que la probeta entra a el tubo y tiene contacto con el medio de enfriamiento en todos los casos.....	91
Figura 4. 20.- Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta semicircular 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.....	92
Figura 4. 21.- Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta semicircular con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: 0.4 m/s. a) instante antes de la explosión de la capa de vapor y b) explosión de la capa de vapor.....	93
Figura 4. 22.- Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta semicircular 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.....	93
Figura 4. 23.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta semicircular con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. Mostrando la estabilidad del avance del frente de mojado, pasando enfrente del termopar T3.	94
Figura 4.24.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta semicircular con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.4m/s y b) 0.6m/s. Punta de la probeta semicircular.....	94
Figura 4. 25.- Graficas con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. Mostrando el punto el detalle del punto A cuando la probeta semicircular tiene contacto con el medio de enfriamiento.	95
Figura 4. 26.- Curvas de rapidez de enfriamiento de la probeta cónica con agua a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s, c) 0.6m/s y d) posición de los termopares. El tiempo se toma en cuenta desde que la probeta entra en contacto con el medio de temple.....	96
Figura 4. 27.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta cónica con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. En el momento en el que rompe la capa de vapor segundos. El tiempo es medido desde que la probeta entra a el tubo y tiene contacto con el medio de enfriamiento en todos los casos.	97
Figura 4. 28.- a) En la probeta de punta cónica hay un solo punto por donde puede romper la capa de vapor, b) mientras que en la cilíndrica se puede considerar que hay varios.....	98
Figura 4. 29.- 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.	99
Figura 4. 30.- 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: 0.4 m/s.	99
Figura 4. 31.- 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: 0.6 m/s. a) instante antes de la explosión de la capa de vapor y b) explosión de la capa de vapor.	100
Figura 4.32.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta cónica con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. Mostrando la estabilidad del avance del frente de mojado enfrente del termopar T3. El tiempo que se toma como referencia es desde que la probeta entra en contacto con el medio de temple.	101
Figura 4. 33.- Graficas con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. Mostrando el punto el detalle del punto A cuando la probeta cónica tiene contacto con el medio de enfriamiento.....	102
Figura 4. 34.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta cónica con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a 0.2m/s a diferentes tiempos: a) 7.13 segundos. , b) 10.44 segundos y c) 13.97 segundos. Mostrando la el efecto del tamaño de burbuja.	103
Figura 4. 35.- Efecto de la velocidad del agua sobre parámetros de las curvas de historia de rapidez de enfriamiento (en la posición del termopar T/ 3) para experimentos en agua a 60 °C.....	105
Figura 4. 36.- Velocidad del frente de mojado (en la posición del termopar T 3) para experimentos en agua a 60 °C.	106
Figura 4. 37.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento de la probeta plana con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s, d) vista superior y lateral de la probeta en milímetros.....	108
Figura 4. 38.- 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 es el punto A.	109
Figura 4. 39.- 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 0.4 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.	111
Figura 4. 40.- 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 0.6 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.	113
Figura 4. 41.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento de la probeta semicircular con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s, d) vista superior y lateral de la probeta en milímetros.....	115



Figura 4. 42.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta semicircular con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.2 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.	116
Figura 4. 43.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta semicircular con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.4 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.	118
Figura 4. 44.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta semicircular con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.6 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.	120
Figura 4. 45.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento de la probeta cónica con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s, d) vista superior y lateral de la probeta en milímetros.	122
Figura 4. 46.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta cónica con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.2 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.	123
Figura 4. 47.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta cónica con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.4 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.	125
Figura 4. 48.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta cónica con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.6 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.	127
Figura 4. 49.- Temperatura de Leidenfrost anterior.	129
Figura 4. 50.- Temperatura de Leidenfrost nueva.	129
Figura 4. 51.-Probeta sin oxidación (pc_60_20_1).	130
Figura 4. 52.-Probeta oxidada (pc_60_20_2).	131
Figura 4. 53.-Probeta cónica sin distorsión (pc_30_20_2).	131
Figura 4. 54.-Probeta plana con distorsión (pp_30_20_1).	132
Figura 4. 55.-Efecto del espesor en la probeta cónica a diferentes condiciones.	133
Figura 4. 56.-Efecto del espesor en la probeta plana a diferentes condiciones.	133
Figura 4. 57.-Mallado y condiciones de frontera de las probetas.	135
Figura 4. 58.-Probeta plana, vectores de velocidad (m/s) a: a) 0.2, b) 0.4 y c) 0.6 m/s.	136
Figura 4. 59.-Probeta semicircular, vectores de velocidad (m/s) a: a) 0.2, b) 0.4 y c) 0.6 m/s.	138
Figura 4. 60.-Probeta cónica, vectores de velocidad (m/s) a: a) 0.2, b) 0.4 y c) 0.6 m/s. ..	139
Figura A1.- Rayo refractado que atraviesa 3 medios diferentes.	144
Figura A2.-Refracción en un vaso con agua.	145
Figura A3.-Refracción en una caja y vaso de vidrio con agua.	145
Figura A4.- Caja de vidrio para disminuir la refracción.	146



LISTA DE TABLAS.

Tabla 2.1.- Valores típicos del factor de Grossman [12].....	26
Tabla 2.2.- Características de la probeta Drayton.	13
Tabla 3.1.-Velocidad de la carrera.....	49
Tabla 3.2.-Determinación del tiempo de grabado.	53
Tabla 3.3.-Resolución contra frecuencia.	53
Tabla 3.4.-Determinación de formatos a utilizar.	54
Tabla 3.5.- Tipos de termopares.	58
Tabla 3.6.-Matriz experimental.	62
Tabla 4.1.- Valores del número de Reynolds en la corriente libre del tubo de acrílico de la figura 3.1 para cada valor de velocidad del fluido estudiado.	74
Tabla 4.2. -Datos experimentales obtenidos en cada una de las condiciones en el enfriamiento (en la posición del termopar T3) para experimentos en agua a 60 °C.	1044
Tabla 4.3.- Datos experimentales obtenidos de la velocidad del frente de mojado (en la posición del termopar 3) para experimentos en agua a 60 °C.	106
Tabla 4.4.- Temperatura de Leidenfrost anterior.....	129
Tabla 4.5.- Temperatura de Leidenfrost nueva.....	129
Tabla A1.-Indices de refracción [87].....	143



RESUMEN.

En los procesos de transferencia de calor no estacionarios como es el caso del temple presentan una serie de fenómenos altamente complejos en la superficie de la probeta. Estos fenómenos se presentan primeramente por la formación de una capa de vapor, seguida por la ebullición nucleada y finalmente se presenta la convección forzada. La evolución de la frontera móvil donde rompe la capa de vapor e inicia la ebullición nucleada, también llamada frente de mojado, es una característica determinante en el control de la distorsión durante el temple de piezas metálicas. Es por esto que en este proyecto de tesis se construyó un sistema que garantiza el flujo totalmente desarrollado y estudió el comportamiento del frente de mojado para tres probetas: a) probeta cilíndrica de cara plana, b) probeta cilíndrica de punta esférica y c) probeta cilíndrica de punta cónica. Las probetas cilíndricas (fabricadas con acero inoxidable AISI 304) fueron sometidas a un análisis isotérmico con listones de celofán y posteriormente al proceso de temple en una corriente de agua a una temperatura de 30 °C, 45 °C y 60 °C, fluyendo a tres velocidades: 0.2 m/s, 0.4 m/s y 0.6 m/s.

La evolución del frente de mojado se caracterizó utilizando: 1) termopares colocados al interior de las probetas en posiciones cercanas a la superficie de la probeta y 2) analizando videos tomados con una cámara de alta velocidad durante cada experimento. De acuerdo a los resultados experimentales la temperatura de Leidenfrost no es un valor constante, sino que depende significativamente de la geometría de la probeta y de la hidrodinámica del medio de enfriamiento. Para las probetas de punta cónica y punta esférica, la temperatura de Leidenfrost aumenta a medida que la velocidad del agua se incrementa; por el contrario, para la probeta de base plana, la temperatura de Leidenfrost disminuye a medida que la velocidad del agua aumenta. Ésta diferencia en el comportamiento se debe a diferencias en estabilidad y espesor de la capa de vapor así como el tiempo que tarda ésta en romper.

Se encontró que con la superposición de la curva de rapidez de enfriamiento y la curva de aceleración de enfriamiento relacionadas con las imágenes captadas con la cámara de alta velocidad nos ayuda a caracterizar mejor los fenómenos de ebullición, ya que las curvas que se emplean actualmente no limitan de una manera definida el inicio de cada uno de los fenómenos de ebullición.

Palabras clave: Capa de vapor, ebullición nucleada, convección forzada, frente de mojado, temperatura de Leidenfrost, curva de rapidez de enfriamiento, curva de aceleración de enfriamiento.



ABSTRACT.

In the heat transfer no-stationary processes as the case of the quenching presents a sequence by of highly complex phenomena on the probe surface. These phenomena are presented firstly for the formation of vapor blanket, followed by nucleation boiling and finally the forced convection. The evolution of the moving front where the vapor film collapses and nucleate boiling starts, known as the wetting front, is a critical characteristic in controlling distortion during quenching of metallic parts. Thus, in this work of thesis was constructed system in which is introduced the term of fully developed flow and we present a comparative study of the wetting front kinematics for cylindrical probes of three different geometries: 1) flat-end, 2) spherical-end and 3) conical-end. The cylindrical probes (made with AISI304 stainless steel) were first subject to isothermal probes with cellophane ribbons and afterwards quenched in water at 30 °C, 45 °C and 60 °C flowing at: 0.2 m/s, 0.4 m/s and 0.6 m/s.

The wetting front evolution was characterized using: 1) thermocouples placed within the probe, near its surface; and 2) analyzing high-speed videos taken during the test. From the experimental results it is clear that the Leidenfrost temperature is not a constant value but depends heavily on the probe geometry and quenching medium hydrodynamics. For the conical-end and spherical-end cylindrical probes the Leidenfrost temperature increases as the water velocity increases; on the other hand, for the flat-end cylindrical probe, the Leidenfrost temperature decreases as the water velocity increases. This difference may be explained based on the stability and thickness of the vapor blanket as well as the duration of the film boiling stage.

It was found that with the overlap of the curves of speed of cooling and acceleration of cooling related with the pictures recorded with high-speed camera, we were able to characterize better the phenomena of boiling. The curves that are used nowadays do not limit in an exact way the onset of each one of the boiling phenomena.

Key words: Vapor blanket, nucleate boiling, forced convection, wetting front, Leidenfrost temperature, curve of speed of cooling and curve of acceleration of cooling.



JUSTIFICACIÓN.

La espectacular evolución del poder de cómputo y el consecuente desarrollo de métodos numéricos para la solución de las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan a los fenómenos de transporte ha resultado en un gran número de modelos matemáticos para la predicción de los campos térmico, microestructural y de esfuerzos en procesos de tratamiento térmico de componentes metálicos. Estos modelos sólo son precisos en tanto los parámetros del modelo sean conocidos. Este tipo de modelos utilizan un coeficiente de transferencia de calor promedio a lo largo de toda la superficie y se considera que el material es isotrópico (modelo Lumped), como es el caso de los materiales con un coeficiente de conductividad térmica elevado (plata =429 W/m-k).

Sin embargo, hay una gran cantidad de materiales, entre ellos el acero, donde los fenómenos de ebullición se presentan de una manera más compleja por que tienen coeficientes de conductividad térmica más pequeños (AISI 304 =14.9 W/m-k) y no se puede aplicar el modelo Lumped, por lo que es más difícil poder caracterizar el coeficiente de transferencia de calor en la interface sólido- fluido. Esto debido a que los espesores de la capa de vapor varían a lo largo de la probeta y se tiene una condición de frontera móvil la cual es drásticamente afectada por la dinámica del fluido.

En particular, las condiciones de frontera térmica son difíciles de medir debido a las altas temperaturas y al ambiente agresivo que priva en la mayoría de los procesos metalúrgicos.



HIPÓTESIS.

Los fenómenos de ebullición que se forman alrededor de la superficie de piezas metálicas sometidas a temple, se ven afectados en gran medida por el flujo y temperatura del fluido utilizado como medio de enfriamiento. Esto se verá reflejado en los tiempos de aparición de cada una de las etapas del proceso así como en la velocidad de enfriamiento de la probeta.

Además, la forma de la probeta cónica y semicircular (debido a su forma aerodinámica) estabilizará la capa límite dinámica y térmica y por consiguiente el avance del frente de mojado será más uniforme cuando colapse la capa de vapor.



OBJETIVOS.

Objetivo general

Estudiar el efecto de la capa límite dinámica y térmica sobre los fenómenos de ebullición y sobre el coeficiente de transferencia de calor, mediante la caracterización experimental del frente de mojado en probetas metálicas de geometría variable sometidas a la técnica de temple por inmersión y convección forzada.

Objetivos específicos

1. Construir un sistema que permita direccionar el fluido utilizado como medio de enfriamiento.
2. Caracterizar la capa límite dinámica en estado isotérmico para probetas de diferente geometría con agua fluyendo a diferentes velocidades con la técnica de hilo caliente.
3. Caracterizar el patrón y la velocidad del frente de mojado en probetas metálicas de diferente geometría (estado no isotérmico) mediante una cámara de alta velocidad, la técnica del hilo caliente y termopares al interior del sólido con régimen de convección forzada.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El tratamiento térmico del acero comenzó hace cerca de 3500 años [1], el principal objetivo de este es lograr la combinación deseada de propiedades mecánicas cuando son sometidas a este proceso. Desde el punto de vista ingenieril, el proceso de temple es un tratamiento térmico que se define como un ciclo de calentamiento y enfriamiento controlados. La eficacia del proceso de temple depende principalmente de la rapidez con la cual se puede extraer calor de las piezas metálicas hacia el medio de temple puesto que esto controla la evolución del campo térmico.

El temple es uno de los procesos más importantes de los tratamientos térmicos con el cual se puede mejorar el desempeño del acero en gran medida, pero también tiene una desventaja debido a la formación de esfuerzos residuales que causan distorsión de la piezas y por ende grietas en la superficie de éstas [2].

La falta de entendimiento de los principios que gobiernan los procesos de temple puede resultar en una inadecuada dureza, distorsión excesiva o demasiado material de descarte cuando se maquina para reducir la distorsión de los componentes, esto aunado a los problemas ambientales con el escape de gases cuando se templea en aceite y el inminente peligro de incendio.

Por lo anterior primeramente se debe tener en cuenta conceptos básicos como el de ebullición y entender cada uno de los fenómenos de ebullición que intervienen en la interface sólido-fluido.

1.1.- Ebullición.

Para poder entender los fenómenos que suceden cuando se enfría un metal en un líquido, 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:

$$q = h(T_w - T_{sat}) = h \Delta T_{sat} \quad (1.1)$$



Donde el ΔT_{sat} se denomina exceso de temperatura o sobrecalentamiento. De acuerdo a la ecuación 1.1, 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 ΔT_{sat} .

1.2.-Punto de Leidenfrost.

Nukiyama en 1934 [3] realizó un experimento donde, utilizando una resistencia eléctrica (alambre de cromo-níquel) sumergida en una tina de agua estancada (figura 1.1), el flujo de calor del alambre de nicromio horizontal al agua saturada se determinó mediante la medición del flujo de corriente I y de la caída de tensión V . La temperatura del alambre se determinó con la variación de su resistencia eléctrica con la temperatura. Este arreglo se denomina como *calentamiento de potencia controlada*. Nukiyama demostró que al incrementar la corriente, el agua se calentaba por convección natural si $(T_w - T_{\text{sat}}) < 4$ (figura 1.2).

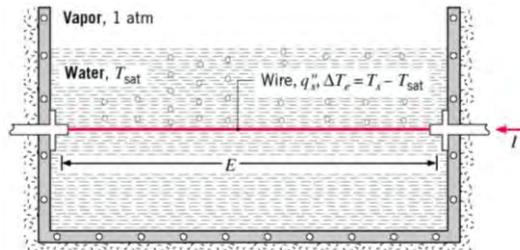


Figura 1.1.- Sistema de Nukiyama para demostrar la curva de ebullición.

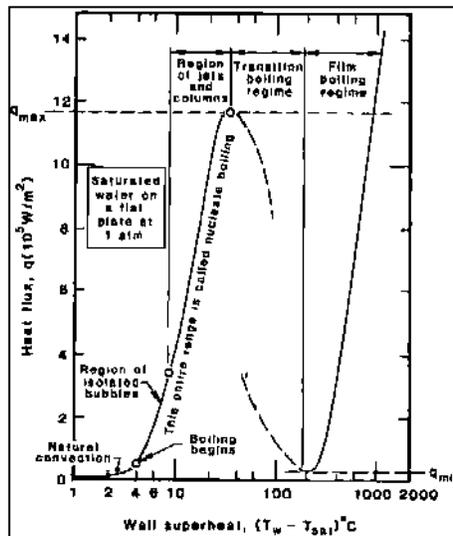


Figura 1.2.- Regímenes de ebullición que se presentan en experimentos de alambres calentados eléctricamente [3].



Conforme ΔT_{sat} aumenta y alcanza el primer punto, ocurrirá el inicio de la ebullición nucleada, por debajo de este valor el flujo de calor, q , es proporcional a $(\Delta T_{\text{sat}})^{1/4}$.

En el intervalo donde prevalece la ebullición nucleada se pueden distinguir dos subregímenes diferentes. En la región 1 se forman burbujas aisladas en los sitios de nucleación que, al separarse de la pared, originan corrientes de movimiento de fluido que favorecen al coeficiente de transferencia de calor. En este régimen la transferencia de calor hacia el líquido es, en la mayor parte, por convección natural y una cantidad mínima de energía la transportan las burbujas como calor latente. Cuando el valor de ΔT_{sat} supera el segundo punto, se activan más sitios de nucleación que a su vez promueve la coalescencia de burbujas, por lo que se forman columnas o chorros de vapor que escapan hasta la superficie libre del fluido (figuras 1.2 y 1.3 (izquierda)).

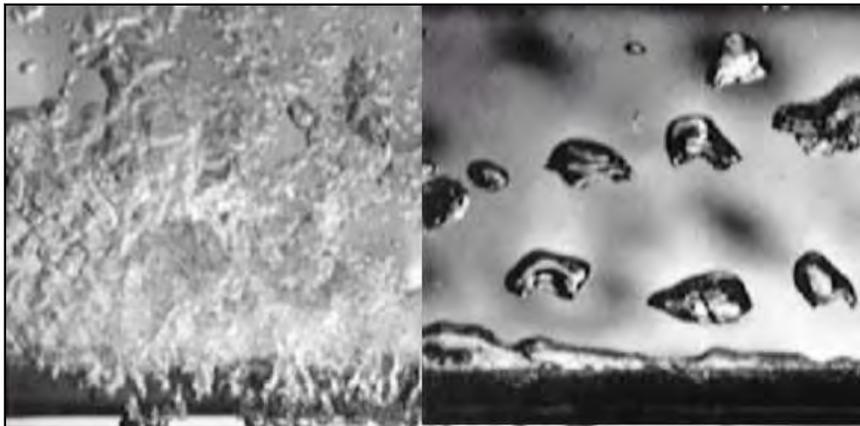


Figura 1.3.- Fotografías de un alambre en ebullición nucleada (izquierda) y película de vapor (derecha).

En el punto de inflexión de la curva de ebullición, el coeficiente de transferencia de calor es un máximo. El flujo de calor máximo, a este punto de la curva, se le denomina Flujo de Calor Crítico (FCC). Al llegar a ésta relación de transferencia de calor, se genera una gran cantidad de vapor en la interfase sólido-gas, por lo que el flujo de líquido hacia la pared se obstruye, disminuyendo la entrada de fluido a la interfase.

La región posterior al punto de inflexión se le denomina ebullición de transición, ebullición de película inestable o ebullición de película parcial. Aquí la formación de burbujas es muy rápida, lo que provoca la formación de una película de vapor que comienza a cubrir la superficie sólida. Por ésta razón, las condiciones oscilan entre la ebullición de película y ebullición nucleada. La fracción de la superficie cubierta por vapor aumenta conforme lo



hace ΔT_{sat} , a su vez, el coeficiente de transferencia de calor disminuye debido a que el vapor ofrece una mayor resistencia al flujo de calor que el líquido (figura 1.3 (derecha)). Cuando la superficie del sólido está totalmente cubierta por la película de vapor, se alcanza el punto de Leidenfrost, es decir el punto que delimita la zona de ebullición por transición y ebullición por película de vapor (Figura 1.2). En ésta etapa la transferencia de calor de la superficie al líquido ocurre por conducción a través del vapor y a medida que la temperatura de la superficie aumenta, la radiación a través de la película de vapor es considerable.

El caso más conocido de ebullición de película es el que se observa al arrojar una gota de agua sobre una plancha de metal horizontal bien caliente. Se observará que la gota de agua se mantiene suspendida sobre el metal por algunos segundos sostenida por una película de vapor (figura 1.4). Este fenómeno fue observado por Leidenfrost en 1756 y publicado en uno de los primeros trabajos sobre termodinámica que se conocen [4].

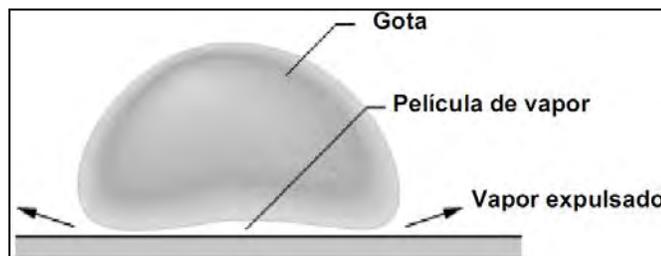


Figura 1.4.- Experimento de Leidenfrost de una gota de agua sobre un metal muy caliente.

Como puede verse en la figura 1.2, después del punto de Leidenfrost, cualquier incremento del flujo térmico ocasionara que el sobrecalentamiento de la pared alcance valores muy grandes, con la posibilidad de superar repentinamente la temperatura de fusión del sólido.

El fenómeno de ebullición es un fenómeno complejo que involucra el transporte de masa, energía y momentum en un sistema con transformaciones de fase. Los fenómenos de transporte (energía, masa y momentum) son representados por ecuaciones diferenciales parciales no lineales difíciles de resolver; para estudiar el fenómeno de ebullición éstas ecuaciones tendrían que ser acopladas. Debido a la no linealidad de las ecuaciones, inestabilidades hidrodinámicas o térmicas pueden ocurrir bajo ciertas condiciones (por ejemplo la transición de flujo laminar a turbulento). Para evitar dificultades en la solución de las ecuaciones básicas, generalmente la conexión entre la transferencia de calor de una de las fases y el campo de temperatura del flujo de fluidos es expresada por relaciones empíricas y números adimensionales.



Los temple se realizan en tanques de temple en agua quieta (sin agitación) y con agitación. En la mayoría de los procesos de temple solamente se toma en cuenta el tiempo en el que se enfrían las piezas y la rapidez de enfriamiento de éstas, pero poca atención se le ha dado a la dinámica del fluido utilizado como medio de temple y a la forma de la probeta donde impacta el flujo del agua. Es por esto que en este trabajo de tesis se toman en cuenta los conceptos de capa límite, coeficiente de arrastre (CD) y número de Reynolds.

En la literatura se han estudiado las probetas planas y las semicirculares [5], recientemente hay indicios de estudio de probetas cónicas [6]. En todos los estudios se analiza el poder de enfriamiento de los fluidos, pero en ninguno se menciona el efecto que tiene el flujo exterior alrededor de las probetas.



CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

2.1.-Tratamiento térmico.

El tratamiento térmico tiene un gran impacto global en los esfuerzos residuales y en la distorsión dimensional de las piezas tratadas. Entre la gran cantidad de procesos que envuelven a los tratamientos térmicos, el temple es uno de los más importantes. Un autor ha estimado que aproximadamente el 20 % de los problemas en los tratamientos térmicos está relacionado con el calentamiento de las piezas y el 80 % es debido al enfriamiento de éstas [7].

Los procesos de tratamiento térmico consisten de ciclos controlados de calentamiento y enfriamiento de componentes metálicos; esencialmente se utilizan para modificar la microestructura de los componentes y conferirles propiedades mecánicas deseables. Uno de los procesos de tratamiento térmico más utilizados es el temple y es considerado un proceso crítico. El temple puede definirse como el ciclo de calentamiento desde temperatura ambiente hasta la temperatura de estabilidad de una fase sólida homogénea de alta solubilidad y el enfriamiento súbito, generalmente hasta temperatura ambiente. En componentes fabricados de aleaciones de acero por ejemplo, la temperatura alcanzada en el calentamiento se encuentra en el orden de los 750 a 1100 °C y el enfriamiento hasta temperatura ambiente se alcanza en pocos segundos, dependiendo de las dimensiones de las piezas, en general, esto se logra a través de la interacción de la pieza caliente con un líquido a baja temperatura.

Propiedades tales como dureza, ductilidad, tenacidad, etc., dependen de la microestructura presente en acero. El primer paso para el proceso de transformación es calentar el acero hasta la temperatura de austenización y enfriarlo rápidamente para evitar la formación de perlita, la cual es una relativamente suave transformación del producto, a una relativamente dura transformación del producto para lograr la dureza deseada en el proceso de temple.

Las transformaciones más comunes que se pueden formar cuando se enfría una pieza metálica son, en orden de formación con el decremento de la velocidad de enfriamiento: vainita, perlita, ferrita y cementita. La formación de estos productos y las proporciones de cada una dependen de la historia térmica de enfriamiento de cada aleación y la composición elemental de ésta. La transformación de los productos formados se ilustran típicamente en las curvas temperatura-tiempo, son dos los diagramas de transformación más usados, el TTT (time-temperature-transformation) y el CCT (continuous cooling



transformation). En el caso del temple el diagrama que se usa es CCT.

En la figura 2.1 se muestran las curvas para las transformaciones de fase, la cantidad de producto transformado obtenido está en función del tiempo y la velocidad de enfriamiento para obtener martensita.

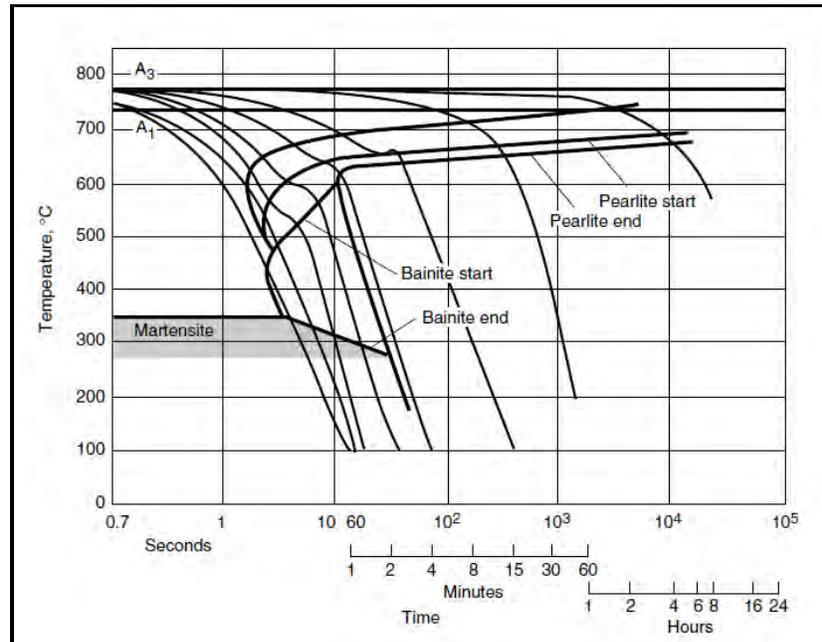


Figura 2.1.- CCT diagrama de un acero no aleado conteniendo 0.45 %C. Temperatura de austenización de 880 °C. Cortesía de Verlag Stahlessen mbH Dusseldorf [8].

Como una regla general, un fluido de temple debe producir una velocidad de enfriamiento equivalente o mayor a la indicada por la nariz de la curva para maximizar la transformación de martensita.

Cuando una pieza de acero es calentada se transforma en austenita, la cual va acompañada con una reducción en el volumen de la pieza (figura 2.2). Cuando la pieza es templada, la estructura se transforma de austenita a martensita, por lo que su volumen se incrementa. Si estos cambios de volumen se presentan, se formarán esfuerzos residuales en la pieza templada. La formación de estos esfuerzos ocasionara distorsión en la pieza, y en un caso extremo aparecerán grietas en la superficie de la pieza [9]. La expansión está relacionada con la composición del acero.

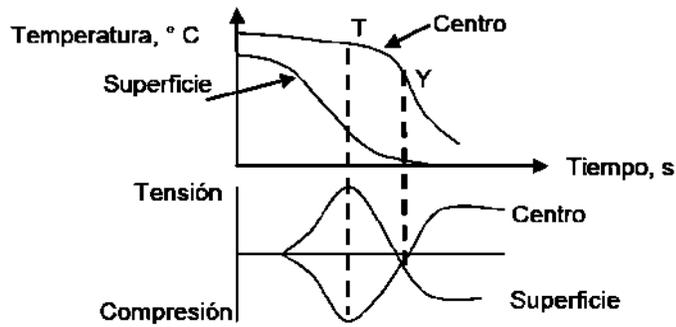


Figura 2.2.- Esfuerzos térmicos desarrollados en un espécimen de acero. “T” es el tiempo al que ocurre el gradiente térmico máximo; “Y” es el tiempo al que se revierte el esfuerzo [10]

Severidad del temple.

Los medios de temple más utilizados en los procesos de temple son el agua, aceites y soluciones poliméricas. El éxito del proceso depende de la selección del medio de temple para una situación particular. Hay un gran rango de medios de temple y por lo tanto se puede seleccionar la que más convenga según el material a tratar y la rapidez de enfriamiento. Desafortunadamente no hay un estándar que reporte confiablemente la capacidad de extracción de cada uno de los medios de temple utilizados. Por consiguiente lo que hacen muchos investigadores es comparar la severidad de temple que ofrecen los vendedores de estos con la severidad de temple reportada [11].

La severidad del temple se define como la habilidad que tiene un medio de temple para extraer calor de una pieza metálica a alta temperatura expresada en términos del número de Grossman [12]. El rango de valores comunes que se utilizan para definir el poder de enfriamiento se dan en la tabla 2.1.

Tabla 2. 1.- Valores típicos del factor de Grossman [12].

Quenching medium	Grossmann <i>H</i> value
Poor (slow) oil quench—no agitation	0.20
Good oil quench—moderate agitation	0.35
Very good oil quench—good agitation	0.50
Strong oil quench—violent agitation	0.70
Poor water quench—no agitation	1.00
Very good water quench—strong agitation	1.50
Brine quench—no agitation	2.00
Brine quench violent agitation	5.00
Ideal quench	
It is possible with high-pressure impingement to achieve <i>H</i> values greater than 5.00.	



Aunque la tabla 2.1 es útil para obtener mediciones relativas de la medición de la severidad del temple que ofrece cada uno de los fluidos, pero es difícil de aplicar en la práctica debido a que la definición de flujos moderados, intermedios o violentos no está bien definida.

Típicamente, a mayor severidad de temple, la pieza templada es más propensa a tener distorsión y fractura debido al incremento de esfuerzos térmicos.

2.2.-Fenómenos de ebullición.

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 [13]:

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 2.4 (a)).

Ebullición nucleada.

Es el fenómeno en el que se produce 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 2.4 (b)).

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 2.4 (c)).

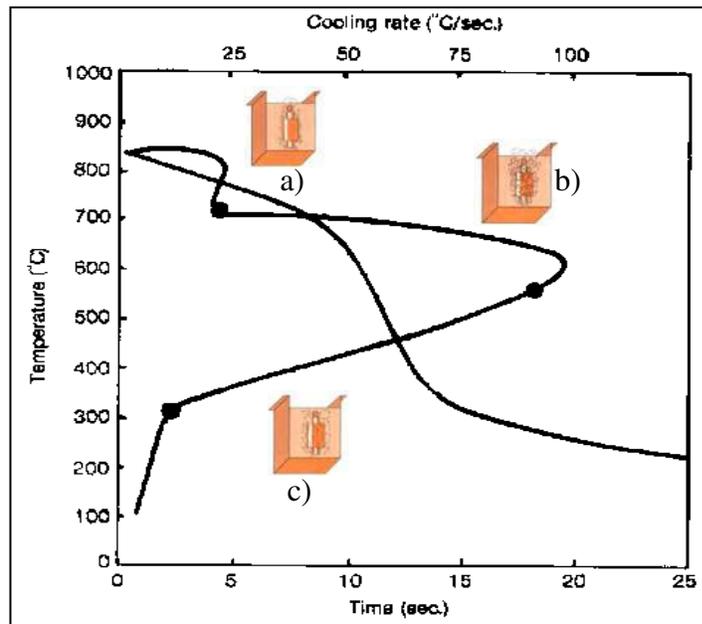


Figura 2.3.- Curva de enfriamiento y curva de rapidez de enfriamiento para una probeta metálica; muestra tres etapas características en la extracción de calor en medios de temple volátiles [IVF, Industrial Research and Development Corporation [14].

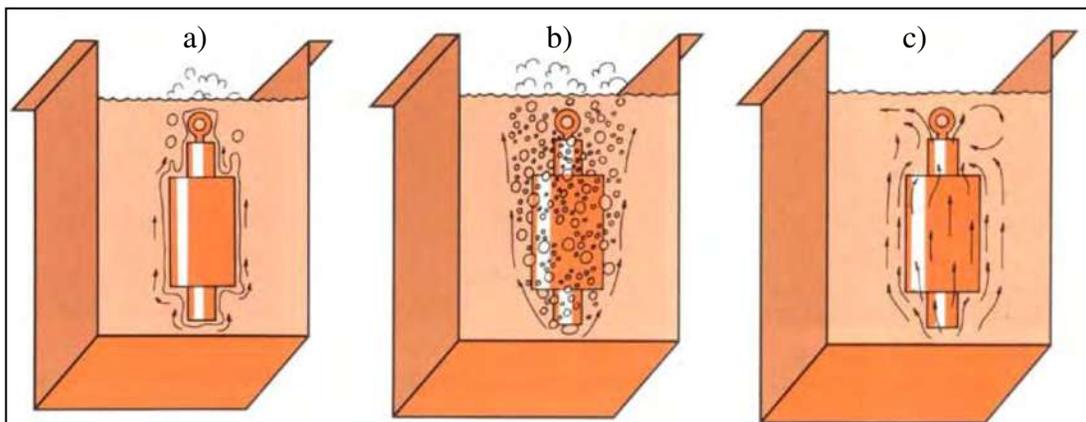


Figura 2.4.- Fenómenos de ebullición presentados durante el enfriamiento: a) capa de vapor, b) ebullición nucleada, c) convección forzada [15].

Las curvas temperatura-tiempo de estos experimentos, presentan una forma similar a la curva mostrada en la figura 2.3. Tomando la primera derivada de la temperatura con respecto al tiempo, se pueden ver con más claridad los cambios de pendientes de éstas curvas; los cambios de pendientes describen de forma indirecta la estabilidad de los diferentes regímenes de ebullición, descritos al principio de ésta propuesta. Un trabajo más



detallado sobre el uso de curvas de enfriamiento y su interpretación para el análisis de los fenómenos de ebullición en los procesos de temple ésta reportado por G.E. Totten (1988) [14].

Frente de mojado

Künzel y colaboradores (1986) [16] 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 2.5).

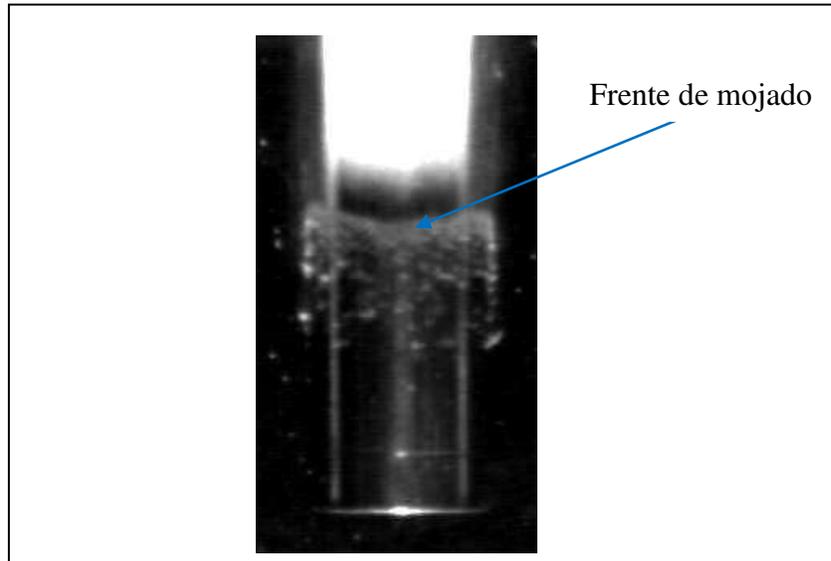


Figura 2.5.- Avance del frente de mojado.

Coexistencia de los fenómenos de ebullición.

Tensi y colaboradores [17] investigaron la estabilidad de las etapas de ebullición en procesos de temple con soluciones poliméricas de cilindros de inconel de 15 mm x 100 mm. El resultado de su análisis demuestra 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 2.6).



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 [18, 19].

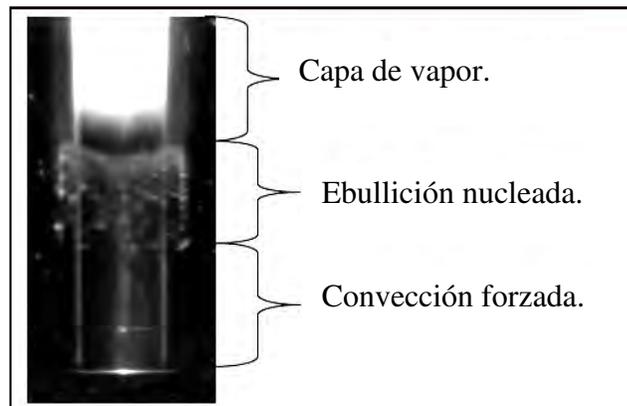


Figura 2.6.- Coexistencia de los fenómenos de ebullición.

Los valores reportados por Tensi 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: $h= \sim 700 \text{ W/m}^2\text{K}$

2.3.- 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, uno de los más empleados es introduciendo termopares en el interior del sólido para medir la historia térmica, otro método en el cual se mide la variación de conductividad térmica entre el sólido y el medio de temple, también se utilizan hidrófonos para medir el sonido durante el temple. Un método de caracterización directa que es muy utilizado es el de grabación de video.



2.3.1.-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, pero recientemente se están utilizando cámaras de alta velocidad, las cuales dan mejor información para poder evaluar el proceso de temple.

2.3.2.-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 y también se puede calcular la primera derivada obteniendo con esto la curva de rapidez de enfriamiento (figura 2.7). 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 [20].

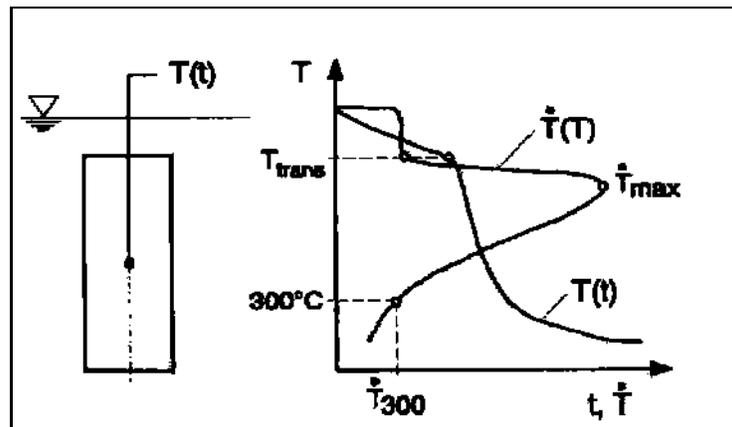


Figura 2.7. – Curvas de enfriamiento y rapidez de enfriamiento.

En las curvas de enfriamiento mostradas en la figura 2.7 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 °C (\dot{T}_{300}) es donde comienza la convección forzada.

En el artículo presentado por Vergara et-al [6] se muestran seis zonas en la curva, sin embargo los autores no mencionan el criterio de separación de esos puntos que corresponden a cada una de las zonas (figura 2.8) y las cuales llama:

- zona 1: zona de vapor estable.
- zona 2: zona de adelgazamiento de la capa de vapor sin presencia de burbujas.
- zona 3: zona de ebullición nucleada parcial con presencia de un poco de vapor.
- zona 4: zona de ebullición nucleada con alta frecuencia de formación de burbujas.
- zona 5: zona de ebullición nucleada con baja frecuencia de formación de burbujas.
- zona 6: zona de convección forzada.

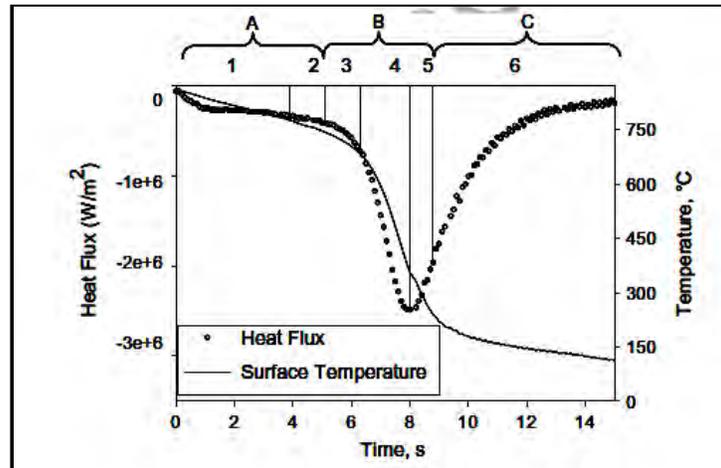


Figura 2.8. – Probeta cilíndrica de punta cónica enfriada en agua con temperatura de 60 °C fluyendo a 0.2 m/s [6].

2.3.3.-Adquisición de conductividad entre la probeta y el medio de temple.

Los experimentos de Künzel y colaboradores [21] se basaron en medir la conductividad eléctrica entre la probeta cilíndrica y el tanque de temple. Debido a los efectos aislantes de la película de vapor formada alrededor de toda la probeta, cuando ésta se encuentra a altas temperaturas (T_i) la conductividad eléctrica era muy baja. Cuando la película de vapor comenzaba a colapsarse en cualquier punto de la probeta (T_m), la conductividad se incrementaba proporcionalmente a la superficie donde la etapa de ebullición por nucleación tenía lugar (figura 2.9).

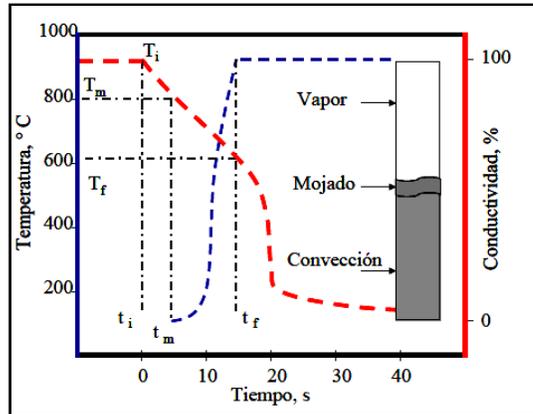


Figura 2.9. – Curva tiempo-temperatura y frente de mojado asociada a la medición de conductividad [22].

2.3.4.-Adquisición de sonido mediante hidrófonos.

F. Ravnik et-al [23] han estudiado la emisión de sonidos durante el proceso de temple. Cuando se temple una probeta metálica en un medio de temple volátil, en la etapa de ebullición nucleada es donde se detecta el mayor sonido. En el fenómeno de formación de las burbujas y finalización de burbujas ocurre sonido predominantemente en el rango audible y la intensidad disminuye ligeramente hasta que finalmente desaparece durante el proceso. El agrietamiento debido a los esfuerzos internos causa señales que difieren de la emisión de sonidos regulares en intensidad y frecuencia. Ésta investigación de emisión de sonido en el proceso de temple fue llevada a cabo con probetas cilíndricas hechas de acero termo-tratable en medio de temple severo. El análisis de las señales emitidas puede proveer información interesante del agrietamiento de la superficie de las probetas.

El espectro del sonido obtenido durante el proceso de temple comprende de la medición del sonido en función de la presión. Comparando espectrogramas y los espectros obtenidos mostraron importantes características en la intensidad del sonido y rango de frecuencia. El análisis provee una detallada información de cada uno de los fenómenos de ebullición. La figura 2.10 muestra los niveles de presión detectada con el hidrófono y la pieza agrietada.

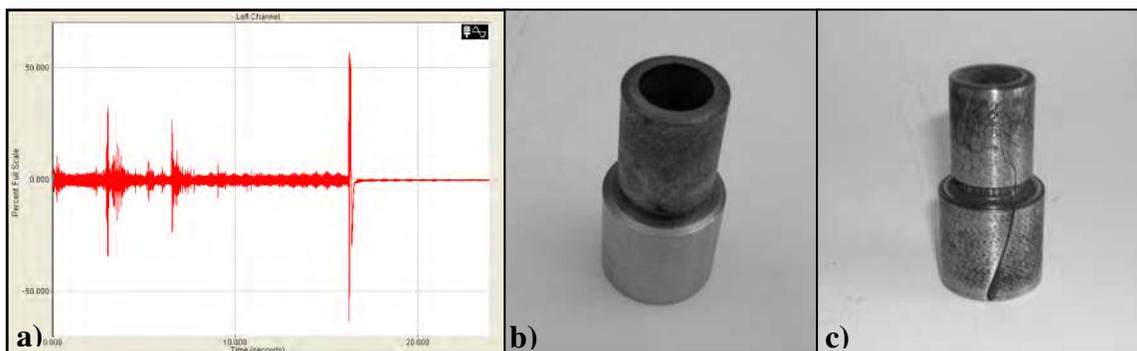


Figura 2.10. – a) Señal de sonido en el temple, pieza b) antes de templar, c) después de templar.



2.4.- Influencia del espesor de los termopares.

La manera más común de describir los tratamientos térmicos es mediante el uso de historias térmicas; éstas se miden con probetas de prueba metálicas instrumentadas con termopares [24]. Un termopar o termocople consiste de dos alambres metálicos de diferente composición química que son unidos en sus puntas usualmente por medio de soldadura. Cuando existe una diferencia de temperatura se produce una diferencia de voltaje que puede ser medida y está relacionada con la temperatura de la llamada punta caliente.

Para muchas aplicaciones, especialmente en procesos con un enfriamiento súbito, es importante identificar la rapidez de respuesta óptima del termopar. La respuesta de un termopar es principalmente función de las dimensiones, construcción y propiedades térmicas de sus materiales, así como del método de aislamiento y las condiciones de instalación.

Los termopares comerciales se unen en una de sus puntas (junta caliente) de tres formas (figura 2.11); la unión más común es una junta caliente que se encuentra totalmente aislada (figura 2.11(a)). Si el experimento bajo estudio requiere alta velocidad de respuesta del termopar se recomienda usar un termopar de diámetro pequeño y la junta de unión descubierta (figura 2.11 (b y c)).

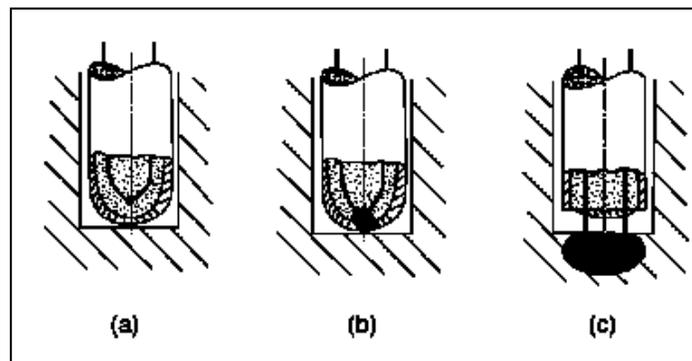


Figura 2.11.- Esquema de la construcción de la junta caliente de un termopar: a) termopar con cubierta metálica y polvo de cobertura en la junta caliente; b) termopar con polvo de cobertura y junta caliente soldada a la cubierta metálica; c) termopar con alambres soldados fuera de la cubierta metálica (junta caliente descubierta) [24].

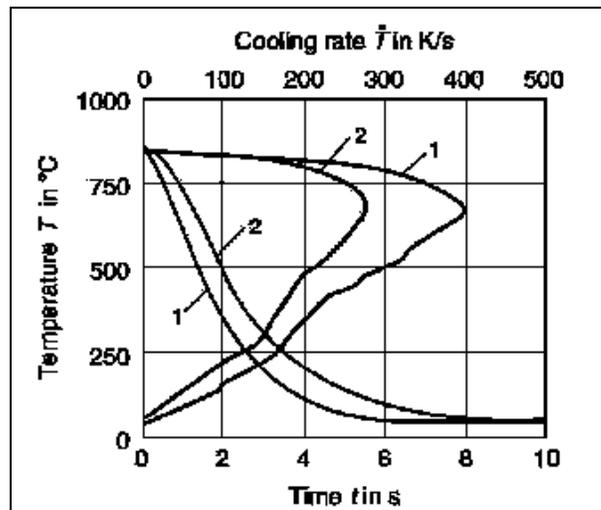


Figura 2.12.- Sensibilidad de la respuesta térmica de un termopar posicionado en el centro de una probeta cilíndrica de 8 mm de diámetro de acero al Cr-Ni enfriada súbitamente con agua a 25°C ; 1) termopar de 0.5 mm de diámetro; 2) termopar de 1 mm de diámetro [24].

La figura 2.12 muestra las rapidezces de respuesta de dos termopares con fundas de protección de 0.5 y 1 mm de diámetro [24]. Para procesos de temple bajo condiciones reproducibles, la máxima rapidez de enfriamiento y los gradientes térmicos al interior de la pieza son más significativos cuando se utiliza un termopar de dimensiones pequeñas. El tiempo de respuesta también disminuye si las puntas son soldadas con una aleación de plata.

2.5.-Normas utilizadas en 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. La base de todas las normas es la JIS (1951), en la cual el profesor Imao Tamura 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. El profesor 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 [25-28], resistencia eléctrica y expansión térmica [29].



Como se puede observar el Profesor Tamura investigó una gran variedad de probetas, entre ellas la probeta de punta cónica, pero no se sabe la causa por la que no continuo con el estudio de éstas ya que según el artículo de Vergara et-al [6] las probetas de punta cónica tienen un mejor comportamiento que las probetas de punta plana. La continuación en el estudio de probetas de punta cónica está comenzando a tener un gran auge entre la comunidad científica dedicada a los tratamientos térmicos.

2.6.- Sistemas utilizados para el temple en baño quieto.

En el templado se han utilizado una gran variedad de formas, incluyendo cilindros, esferas, barras cuadradas, anillos, placas, discos redondos y partes de producción. También se han construido sistemas en los que se utilizan materiales para templar tales como aleaciones de materiales, aceros inoxidables, plata, níquel, cobre, oro y aluminio [38].

2.6.1-Sistema de la General Motors (GM).

Las velocidades de enfriamiento que se producen al templar en aceites se clasifican básicamente en las pruebas que realiza la GM o las pruebas de bolas de níquel [39,40]. El sistema de la GM se utiliza para medir las propiedades en la transferencia de calor durante el templado, este usa la temperatura de Curie de un metal para obtener la caracterización del fluido de temple. La temperatura de Curie es la temperatura a la que el metal deja de ser magnético cuando se calienta-

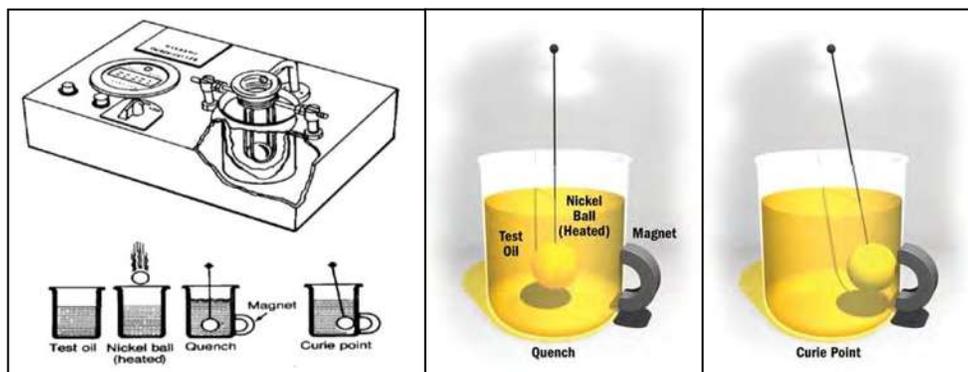


Figura 2.15.- Sistema de templado GM y principio de operación.

Los detalles de ésta prueba se dan en la el estándar de la prueba ASTM D 3520. La prueba se lleva a cabo con una bola de 22 mm de diámetro y se calienta a 885 °C. Después se suspende en la parte superior de un contenedor de aceite de 200 ml mediante un cable, la



temperatura del aceite varia de 21 a 27 °C [41]. Un cronómetro se activa cuando se introduce la bola pasa y por un sensor fotoeléctrico [38].

Una herradura magnética se localiza afuera del contenedor de aceite lo más cerca posible de la superficie (figura 2.15). Conforme la bola se enfría, pasa por el punto de Curie (354 °C), temperatura a la cual la bola se convierte magnética [38], y es atraída a la herradura magnética, activándose el sensor que desactiva el cronómetro, esto se muestra en la figura 2.7. Con esto se mide el poder de enfriamiento del aceite. Los aceites se clasifican en cuanto a su poder de extracción en lento, medio y rápido [40]. La clasificación de aceites se da en cuanto al tiempo que tardan en llegar a la temperatura de Curie, para los aceites lento es de 15-20 segundos, la del aceite medio es de 11-14 segundos y para los aceites rápidos es de 8-10 segundos [42].

2.6.2.-Sistema de Grossmann.

Ésta es una de las pruebas que se ha usado desde el inicio del estudio del temple de los aceros (figura 2.16) [43]. Aquí la probeta es construida en forma cilíndrica con dimensiones de 100x300 mm (4x12 in) de una aleación SAE 5145 (acero al bajo cromo). El termopar de alumec-cromec se introduce a la mitad de una perforación que se hace en el centro de la probeta. La perforación central es de 13 mm. Una vez introducido el termopar la parte superior se solda. La velocidad de enfriamiento se adquiere mediante un sistema llamado Speedomax manufacturado por Leeds y Northrup Company,

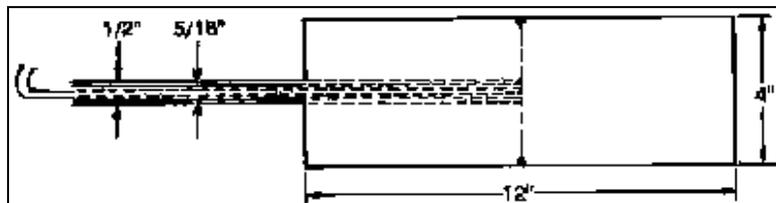


Figura 2.16.-Probeta Grossmann.

2.6.3-Sistema IVF.

El sistema IVF está basado en la norma ISO 9950 y es manufacturado por El Instituto Sueco de Investigación y Producción de Ingeniería. La probeta y el sistema se muestran en la figura 2.17 [44]. La probeta tiene un diámetro de 12.5 mm y una longitud de 60 mm. El material de la probeta es Inconel 600. El termopar va en el centro de la probeta a lo largo de



el eje longitudinal. El peso del sujetador de la probeta es de 0.45 kg y el de la probeta de 0.35 kg. El sujetador tiene un trigger para comenzar la prueba.

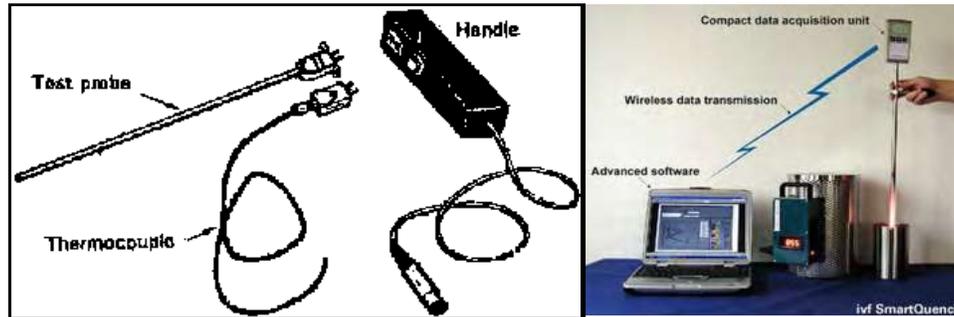


Figura 2.17.- Sistema IVF.

Debido a que el IVF es portátil tiene diferentes aplicaciones entre las cuales se encuentran [45]:

- Medición de las características del fluido directamente en el tanque a varias posiciones.
- Probar diferentes fluidos, ya sea agua, aceite o polímeros.

2.6.4.-Sistema Drayton.

Este sistema está diseñado para hacer mediciones de rutina, como pruebas de calidad, pruebas seguras, control de procesos, etc. Los datos adquiridos por este sistema se analizan mediante el software Quenchalyzer [46]. Este sistema también se basa en la ISO 9950. Las características de la probeta se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. 2.- Características de la probeta Drayton.

Drayton Probe	
Tamaño de la probeta	12.5 mm Diameter x 60 mm length
Material	Inconel 600
Localización de termopar	En el centro del eje longitudinal.

El sistema Drayton es portátil como se muestra en la figura 2.18. Este tiene características clave y beneficios en la planta de trabajo o en el laboratorio. Se puede usar para pruebas en baño quieto o para baño con agitación. Se puede usar con agua, aceites y polímeros y tiene una gran reproductibilidad. El software está basado en el sistema Windows y provee de gráficas instantáneas y comparaciones numéricas.

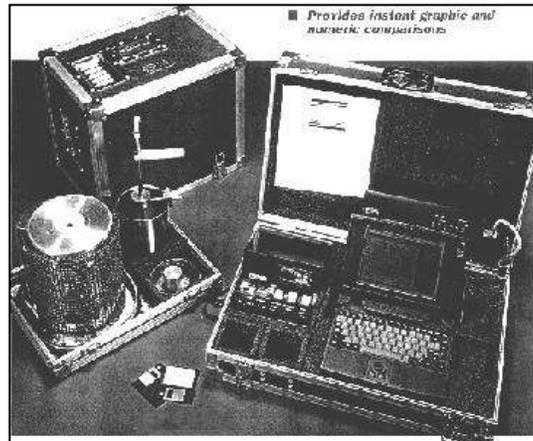


Figura 2.18.- Sistema Drayton.

2.6.5.-Sistema Liscic –Nanmac.

El sistema se muestra en la figura 2.19 [42], consta de una probeta cilíndrica de 200 mm de longitud y 50 mm de diámetro. Esta hecha de acero inoxidable AISI 304 y es instrumentada con tres termopares colocados en el mismo plano transversal en medio de la probeta. Uno de los termopares es puesto en la superficie de la probeta. Este termopar es un tipo especial de cara plana. El segundo termopar es puesto a 1.5 mm de la superficie y el tercero en el centro de la probeta. Ésta probeta fue de las primeras que reportó la peculiaridad de medir los gradientes de temperatura desde la superficie al centro de la probeta. La característica clave de este sistema es que mide y graba la temperatura a cada 1×10^{-5} segundos, por lo que es capaz de grabar cambios rápidos de temperatura. El software usado por este sistema es el TGQAS y calcula los coeficientes de transferencia de calor en la superficie gracias al termopar que se encuentra en ésta. Además con esto calcula las curvas de enfriamiento en cualquier punto de la probeta. El software también predice la microestructura y dureza de la pieza en cualquier punto de ésta. También contiene las curvas CCT de varios grados de acero.

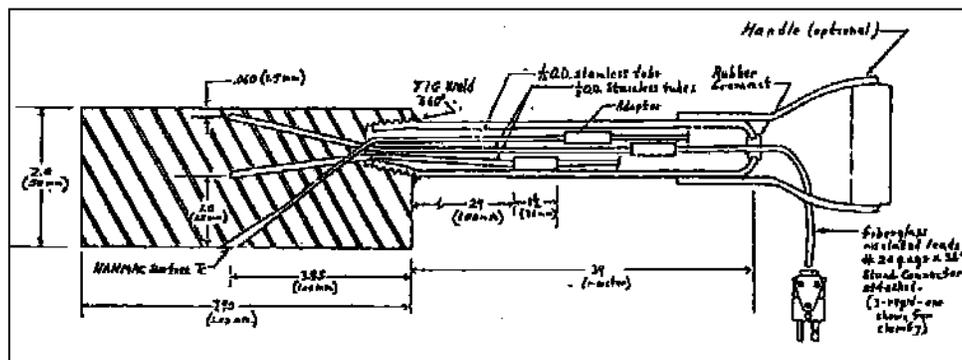


Figura 2.19.- Sistema Liscic –Nanmac.



2.6.6.-Sistema desarrollado por Tamura.

Para entender mejor el proceso de temple, se han propuesto modelos críticos importantes para modelar las propiedades en la transferencia de calor que ocurren en la superficie del metal durante el temple. En tal análisis se considera que el fluido utilizado controla la velocidad de enfriamiento del metal. Por consiguiente las propiedades del medio de templado determinan las propiedades metalúrgicas obtenidas [47].

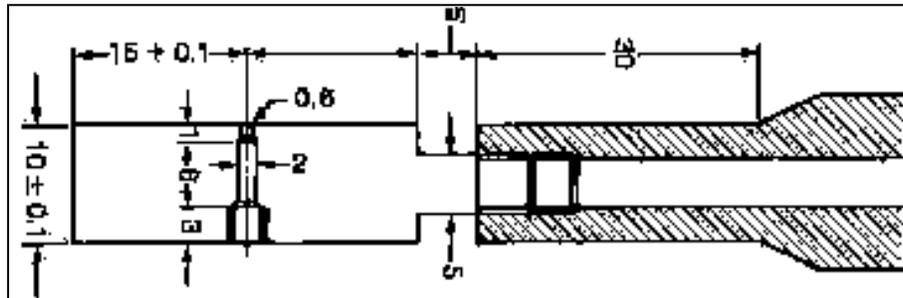


Figura 2.20.-Sistema JIS.

Tagaya y Tamura [48-55] desarrollaron el Estándar Industrial Japonés (Japanese Industrial Standard (JIS)) para la adquisición de curvas de enfriamiento que utiliza una probeta con un termopar ensamblado específicamente construido para determinar los cambios de temperatura con el tiempo durante el temple. La prueba JIS como se muestra en la figura 2.21 a), fue usada por Tamura en su trabajo clásico, describiendo el desarrollo de una curva maestra de enfriamiento y la caracterización de los aceites [56]. Al principio su trabajo no fue aceptado debido al alto costo de la plata usada en la construcción de la probeta, además de los problemas en mantenimiento de ésta y la tediosa preparación de la superficie y el difícil ensamble del termopar dentro.

Un grupo que se dedica a probar el poder de enfriamiento recientemente ha propuesto una nueva probeta para realizar las pruebas de la JIS K 2242. El grupo liderado por Narazaki [57] dice que ésta nueva probeta presenta una mejor reproductibilidad en las pruebas. Las dimensiones de la nueva probeta propuesta por Narazaki es la misma que propuso Tamura, lo único que cambia es que el termopar se inserta en medio de la probeta (figura 2.21 b).

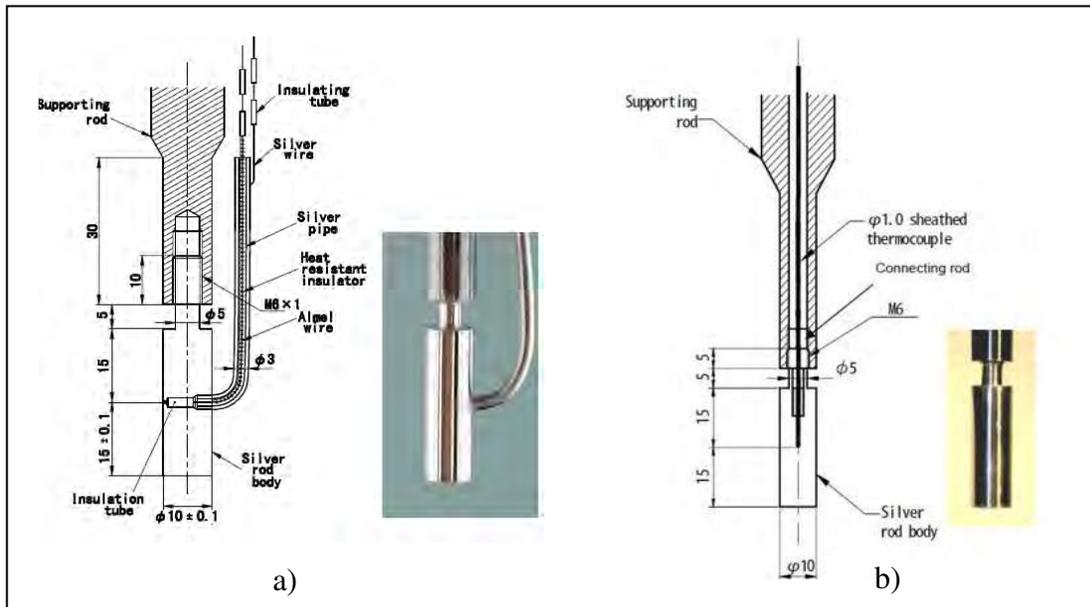


Figura 2.21.-Probeta propuesta por a) Tamura y b) Narazaki.

2.7.- Sistemas utilizados para el temple con flujo en movimiento.

2.7.1.-Sistemas propuestos por Narazaki.

En la figura 2.22 se muestra el sistema propuesto por Narazaki [57] en el que se puede observar el ensamble el cual cuenta con una bomba y un rotámetro, y se muestra funcionamiento del sistema. Debido a que Narazaki está más enfocado a la forma de la probeta, no toma en cuenta la longitud de flujo desarrollado. Motivo por el cual la reproductibilidad de las pruebas no es muy buena.

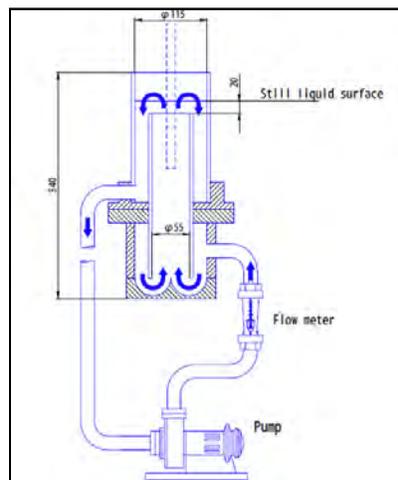


Figura 2.22.-Sistema de Narazaki.



Otros de los sistemas [58] con los que ha estado experimentando Narazaki se muestran en las siguientes figuras.

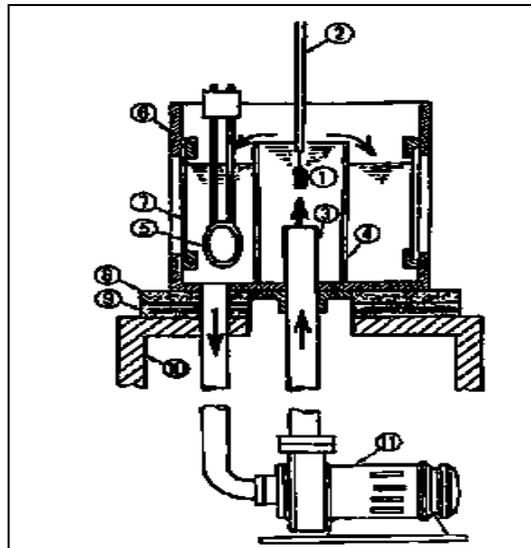


Figura 2.23.-Baño con convección forzada agitada por una boquilla de inyección. 1: probeta ,2: tubo guía, 3: boquilla de inyección (25mm de diámetro interior), 4: tubo de acrílico de 70 mm de diámetro interior, 5: resistencia para controlar la temperatura, 6: altura del baño, 7: ventana de observación, 8: aislante, 9: caucho para evitar la vibración, 10: base, 11: bomba centrífuga (max. 40 l/min)

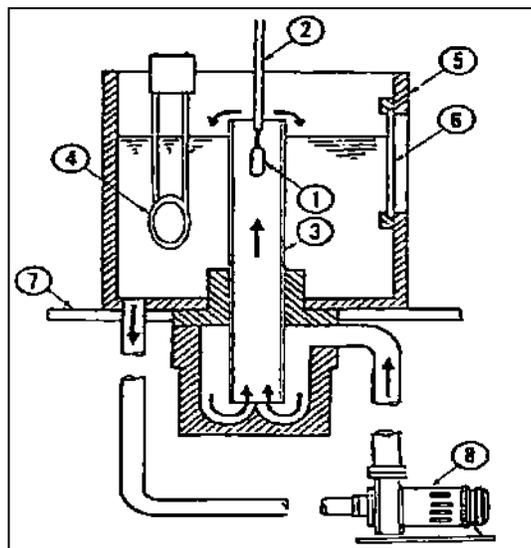


Figura 2.24.-Baño con convección forzada en un tubo. 1: probeta ,2: tubo guía, 3: tubo de acrílico (40 mm de diámetro interior), 4: resistencia para controlar la temperatura, 5: altura del baño, 6: ventana de observación, 7: base, 8: bomba centrífuga (max. 80 l/min)



Comparó los dos sistemas de agitación mediante convección forzada introduciendo al fluido pequeñas partículas de vidrio (figura 2.25) para la visualización del flujo.

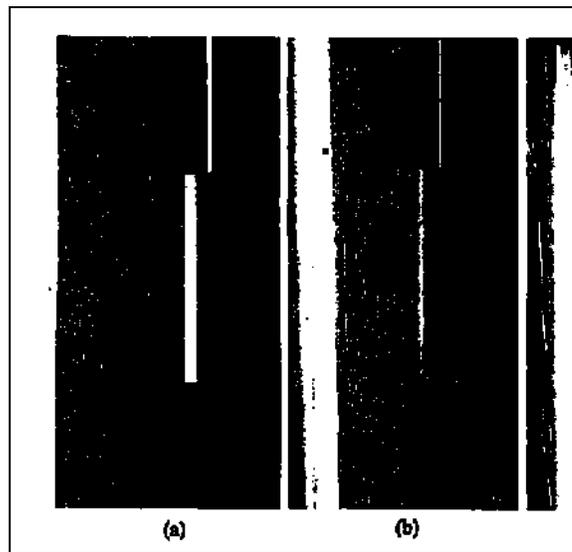


Figura 2.25.-Comparación de los 2 sistemas, a) por boquilla y b) por tubo.

En la figura 2.25 se puede observar que el flujo es más inestable y caótico en el sistema de inyección por boquilla y que debido a que podrían presentarse más gradientes de temperatura en el agua y por consiguiente las curvas enfriamiento de la pieza son irreproducibles en este sistema. En cuanto a la inyección por tubo se puede observar que el flujo es más estable que el anterior, aquí se pueden distinguir mejor las líneas de corriente.



2.7.2.-Sistema propuestos por H.J. Vergara-Hernández.

En un artículo presentado por H.J. Vergara-Hernández [6] propone un nuevo sistema (figura 2.26) en el cual introduce el término de flujo desarrollado y abre un panorama más amplio para el estudio del temple, no sólo analizarlo desde un punto de vista de transferencia de calor, sino que también se debe analizar desde un punto de vista de la mecánica de fluidos.

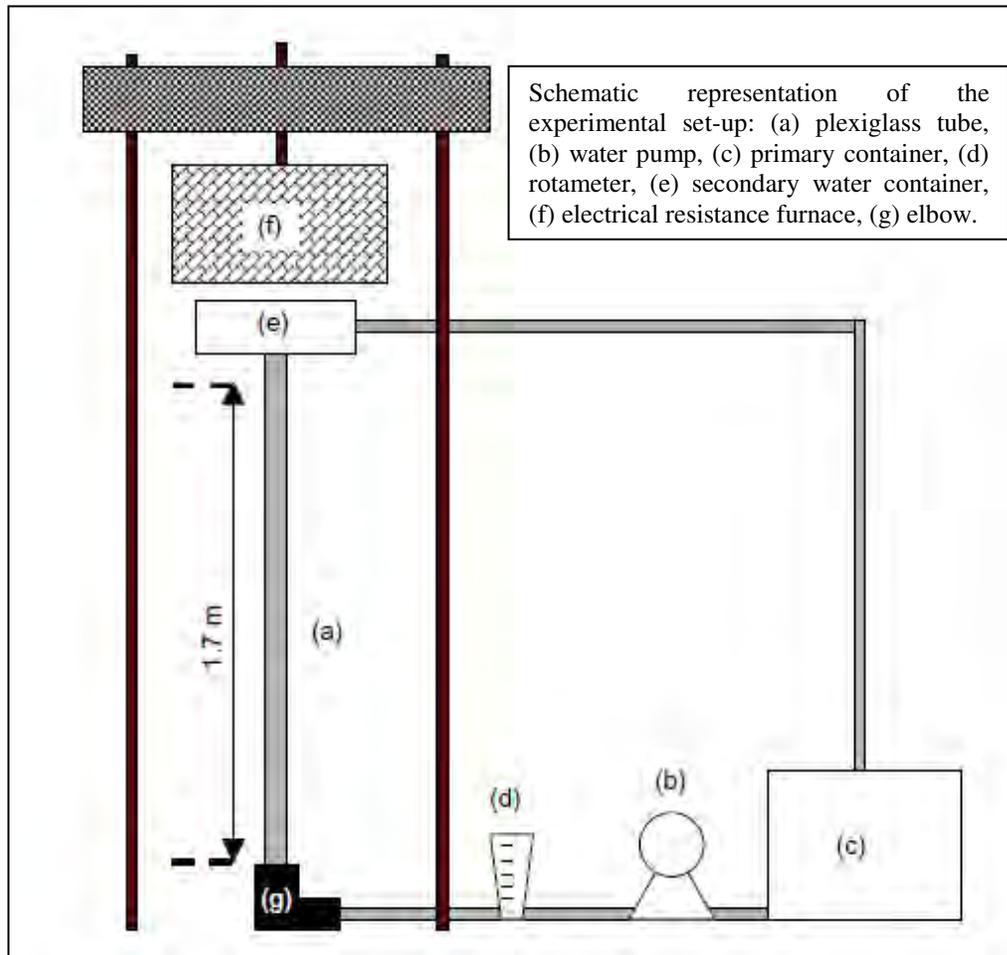


Figura 2.26.-Representación esquemática de la instalación.

En el artículo de H.J. Vergara-Hernández [6] verificó la condición de flujo desarrollado mediante mediciones con un PIV usando una cámara CCD (detector que actúa como cámara electrónica, detecta y registran la radiación que llega al punto focal), una fuente laser, un control de imagen, un sistema de adquisición y procesamiento Dantec Dynamics's FlowMap PIV system. Para evitar la distorsión en la imagen introdujo en la parte exterior del tubo una caja en forma rectangular fabricadas con plexiglass. La cámara CCD fue



cuidadosamente posicionada a 90° con respecto a la hoja del laser. El tamaño de las partículas de poliamida fue de $20 \mu\text{m}$. La velocidad del fluido se midió a varias distancias desde el codo de PVC que conecta al tubo de acrílico. Las condiciones de medición fueron a temperatura ambiente fluyendo a 0.7 m/s . Los resultados se graficaron (figura 2.27). A una distancia de 0.30 m de el codo, la velocidad del perfil es marcadamente asimétrico, es hasta una distancia de 1.20 m que el perfil de velocidad comienza a comportarse simétricamente.

Finalmente a una distancia de 1.50 m hay un evidentemente flujo desarrollado. Por consiguiente se determinó que una longitud de 1.70 m era requerida para la realización de los experimentos.

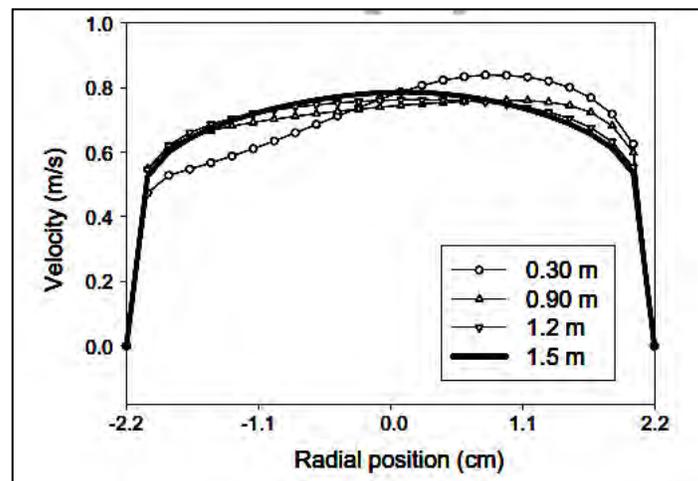


Figura 2.27.-Mediciones con (PIV) para calcular el perfil de velocidad (en la dirección radial) para varias distancias desde el codo de 90° (ver Fig. 2.18), para agua a 25°C , fluyendo a 0.70 m/s a través de un diámetro interno de 44 mm .

2.8.- Factores que intervienen en el proceso de temple.

Cuando se realiza un temple son varios los factores que intervienen en este para obtener un avance del frente de mojado uniforme. Se debe saber que medio de temple se usa, así como su temperatura y velocidad de agitación. En cuanto a la probeta se debe tener cuidado en el material, la geometría, la rugosidad y la formación de óxidos sobre la superficie de la probeta ya que son factores que influyen drásticamente en la temperatura de Leidenfrost y la velocidad del frente de mojado en la microestructura de la pieza templada.



2.8.1 Efecto de la temperatura del medio de enfriamiento.

Por lo general, el temple de piezas metálicas se realiza por lotes, es decir, dependiendo del tamaño, decenas de piezas son introducidas en una ésta y ésta a su vez es sumergida en el tanque de temple. El fluido de temple pasa a través de la ésta y de las piezas extrayendo cantidades significativas de calor a tal grado que la temperatura del baño puede incrementarse varios grados centígrados. Por lo anterior, Künzel [59] reporta el efecto que tiene la *temperatura del baño* sobre la dinámica del frente de mojado.

Se observa que al incrementar la temperatura del baño, la velocidad del frente de mojado disminuye. Una probeta de 45 mm de longitud enfriada en agua a 20 ° C requeriría de 2.96 segundos para que toda la superficie estuviera mojada (velocidad del frente de mojado 1.52 cm/s). Pero si el baño estuviera a 50 ° C, a esa misma probeta le tomaría entre 7.5-12.8 segundos para que toda su superficie estuviera mojada.

Lo anterior demuestra que la temperatura del baño es una variable que afecta significativamente la estabilidad de los regímenes de ebullición y debe ser tomada en cuenta para cualquier estudio de caracterización del frente de mojado en el proceso de temple.

2.8.2 Efecto de la velocidad de agitación del medio de enfriamiento.

Una forma de mejorar la extracción de calor de los fluidos utilizados para temple es la agitación. Por lo anterior, se han reportado [60, 61] trabajos que conectan la agitación con la estabilidad de los regímenes de ebullición ya antes descritos. La Figura 2.28 muestra un modelo de laboratorio diseñado para evaluar el efecto de la agitación sobre el poder de enfriamiento [62]. Se instrumenta una probeta de acero inoxidable AISI 304 con termopares para obtener curvas temperatura-tiempo. La agitación se cuantificó midiendo las revoluciones por minuto con la que gira una propela.

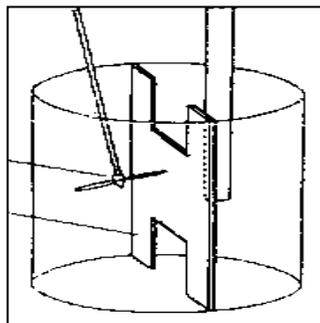


Figura 2.28.-Tanque con modificador tipo H utilizado para la cuantificación del efecto de la agitación [62].



Otro trabajo [62], reporta el uso de un dispositivo especialmente diseñado para evaluar el efecto de la agitación sobre la rapidez de enfriamiento (figura 2.29). Ésta vez, tubos en J fueron utilizados para direccionar el fluido de forma axial o perpendicular a una superficie metálica cilíndrica.

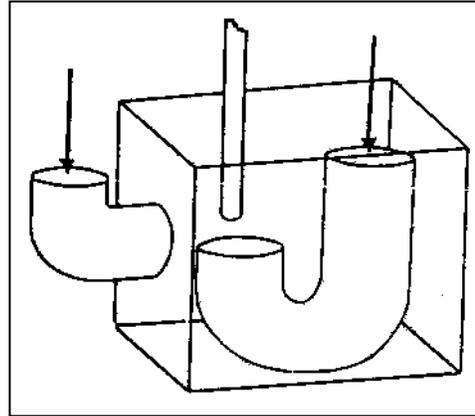


Figura 2.29.- Sistema para evaluar el efecto de la agitación sobre la rapidez de enfriamiento [62].

De acuerdo con el autor, los tubos en J utilizados para direccionar el fluido minimizaron también los efectos turbulentos del baño. El estudio con tubos en J demuestra que la estabilidad del régimen de ebullición por película se ve afectada de manera drástica por la agitación del fluido contenido en el tanque de temple. Cuando el fluido está en reposo la película de vapor se rompe a los 741°C ; si el fluido se agita (0.2 m/s) la capa envolvente de vapor se destruye apenas llega la superficie de la pieza a los 799°C .

La revisión de literatura en ésta sección demuestra que existen trabajos que han logrado predecir el efecto de variables aisladas sobre el frente de mojado como función del tiempo, sin embargo se han olvidado que el fenómeno, además de ser transitorio, tiene movilidad y por lo tanto también depende de la posición.

2.8.3 Efecto de forma de la probeta.

En los estudios de transferencia de calor llevados a cabo para el estudio de los procesos de temple se han utilizado probetas de geometría simple tales como cilindros, esferas, barras cuadradas, placas, anillos, discos redondos, fabricadas con diversos materiales, principalmente aceros inoxidable, plata, níquel, cobre, oro y aluminio [63]. En China y Japón se utilizan por norma cilindros de plata de $\text{Ø}10\text{ mm} \times 30\text{ mm}$, mientras que en USA se utilizan cilindros de la aleación Inconel 600 de $\text{Ø}12.5\text{ mm} \times 60\text{ mm}$. Se han utilizado probetas cilíndricas de base plana para caracterizar la capacidad de enfriamiento de diferentes medios de temple [64,65]; probetas con diferente geometría en la punta fueron



investigadas por primera vez por Narazaki y colaboradores [63]. Estos investigadores reportan diferentes valores de extracción de calor, es decir diferentes comportamientos en la curva de rapidez de enfriamiento, para un mismo fluido (estudiaron agua estancada así como soluciones poliméricas en agua). F. Frerichs y colaboradores [66] también investigaron la influencia de la geometría y las dimensiones de ésta en el avance del frente de mojado. Las geometrías que tomaron en cuenta fueron probetas con chaflanes y semicirculares. Estos mismos autores también estudiaron probetas cilíndricas huecas [67]. Los resultados de ésta investigación mostraron que el avance del frente de mojado no es función de la temperatura únicamente como se supone en la práctica y que la probeta con punta semicircular es la mejor para estudiar el avance del frente de mojado.

2.8.4.- Efecto de bordes de las probetas.

Los bordes de la probeta son de gran importancia cuando se rompe la capa de vapor e inicia la ebullición nucleada según lo reportó Narazaki et-al [68], en donde se observó claramente la tendencia de que la capa de vapor rompe en donde la probeta tiene bordes (efecto de bordes), (figuras 2.30 y 2.31).

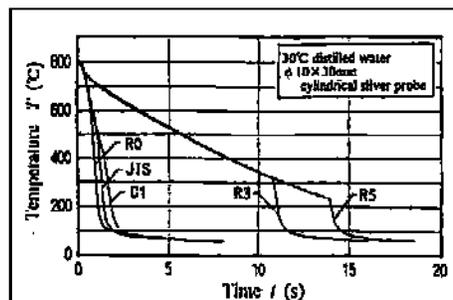


Figura 2.30.- Efecto de bordes en la base de la probeta. Probeta templada en polímero a 30 °C en agua quieta al 15% (PAG). El tamaño de la probeta es de 10 mm de diámetro y 30 mm de longitud. Se utilizan las probetas JIS con radios de 0 (R0), 3 (R3), 5 (R5), base plana, chaflanes de 1 mm X 45° (C1).

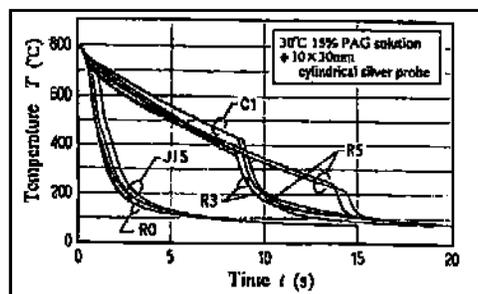


Figura 2.31.- Efecto de bordes en la base de la probeta. Probeta templada en polímero a 30 °C aceite (tipo JIS 1-1). El tamaño de la probeta es de 10 mm de diámetro y 30 mm de longitud. Se utilizan las probetas JIS con radios de 0 (R0), 3 (R3), 5 (R5), base plana, chaflanes de 1 mm X 45° (C1).



En las siguientes imágenes se puede observar que en la probeta cilíndrica de base plana el colapso de la capa de vapor inicia en donde hay bordes, en mayor proporción en la base de la probeta y en menor proporción en la parte superior de la probeta (figura 2.32 a). En la probeta prismática se puede observar con una mayor claridad que en las partes donde hay bordes el efecto de bordes se puede distinguir mejor.

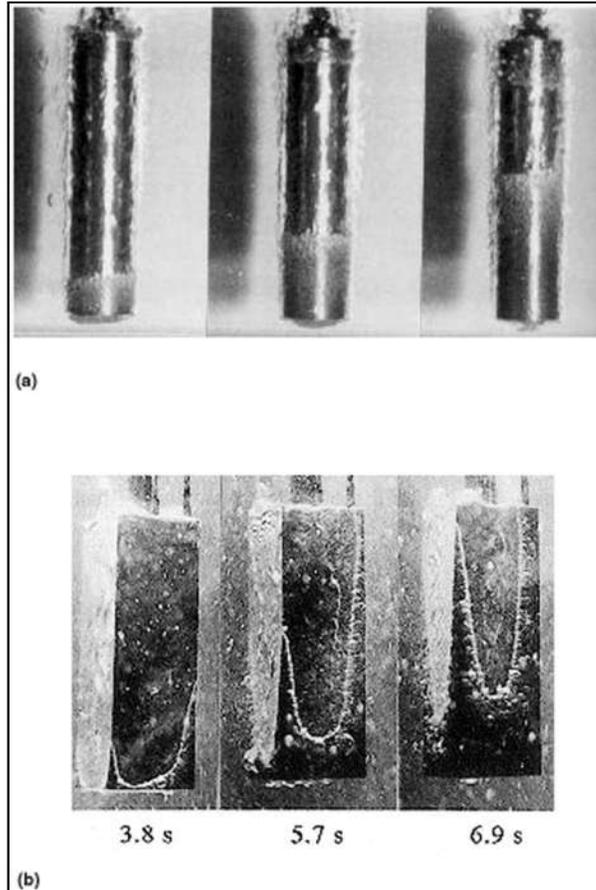


Figura 2.32 - Probetas de NiCr a) en probeta cilíndrica de 25 mm de diámetro por 100 mm de largo y b) probeta prismática de 15x15x45 mm templada en agua en baño quieto [69,70].

La probeta de punta semicircular es de las más inestables debido a que según los estudios de Narazaki, se supone que la capa de vapor debería de tender a romper como se muestra en la figura 4.24 debido a que no tiene bordes. En sus experimentos demuestra que no es así, ya que en sus experimentos que realizó con diferentes polímeros observó que no siempre sigue esa tendencia. En la figura 2.33 a) se observa que la probeta con 5 mm (R5) de radio rompió más mucho más rápido que la mostrada en la figura 3.33 b).

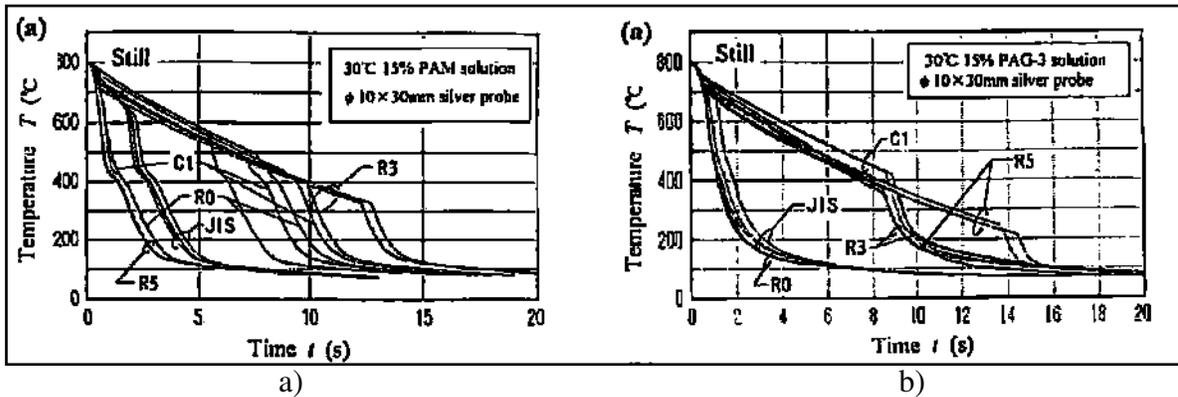


Figura 2.33.- Curvas de enfriamiento en baño quieto realizado a probetas con diferente geometría en la base [55].

Este tipo de probetas también ha sido reportada por F. Frerichs [66] y también reporta un comportamiento anormal de ésta probeta de 100 mm de longitud, 35 mm de diámetro y un radio de la base de 17.5 mm de acero inoxidable austenítico. La probeta es templada en baño quieto utilizando como medio de temple un aceite Isorapid 277[®] (figura 2.34).

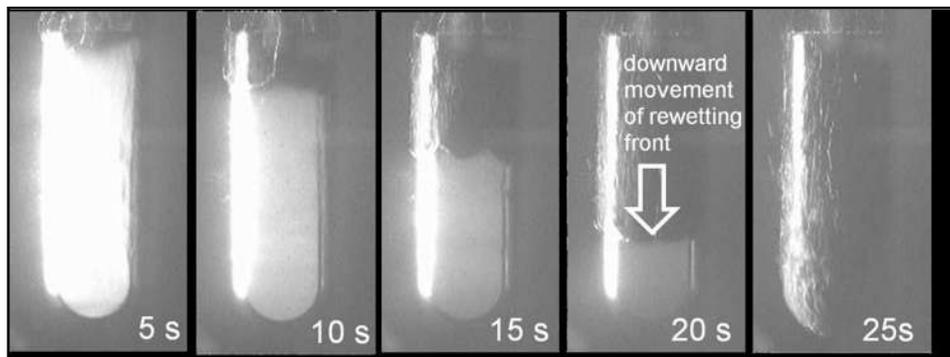


Figura 2.34.- Curvas de enfriamiento en baño quieto realizado a una probeta de forma semicircular y presenta un frente de mojado de la parte superior a la parte inferior de la probeta [66].

La figura 2.34 muestra que el avance del frente de mojado comienza de la parte superior hacia la parte inferior de la probeta. La figura 2.34 puede ser posible si se ve desde el punto de vista que la capa de vapor siempre rompe por los bordes.

2.8.5 Efecto de la rugosidad y el óxido en la probeta.

El efecto de la rugosidad y textura de las piezas en la superficie repercute directamente en la velocidad de enfriamiento, debido a que las piezas tratadas industrialmente tienen diferentes acabados, desde los más rugosos (lija (emery) 340), hasta los acabados espejo (lija (emery) 3000). En la figura 2.35 se muestra el efecto de la textura de la



superficie de probetas cilíndricas de plata, níquel y acero inoxidable sobre las curvas de rapidez de enfriamiento templadas en agua en baño quieto [68]. Los resultados obtenidos por estos investigadores fueron los siguientes:

- La textura de la superficie no tiene efecto en la rapidez de enfriamiento en la etapa de capa de vapor.
- La rugosidad causa que la capa de vapor rompa a una temperatura mayor y por lo tanto se tenga una mayor rapidez de enfriamiento.

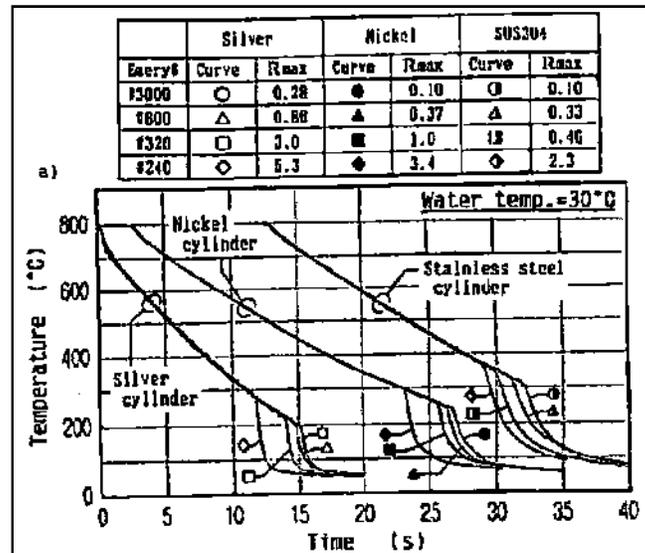


Figura 2.35– Efecto de la rugosidad de la probeta.

El óxido en las probetas tiene influencia principalmente en la rapidez de enfriamiento cuando se templen probetas metálicas [69]. En general, las capas delgadas de óxido incrementan la rapidez de enfriamiento, en tanto los espesores grandes retardan la rapidez de enfriamiento. Este fenómeno ocurre principalmente en el templeado de agua y polímeros. Los resultados de las pruebas realizadas muestran que:

- El óxido en la superficie de la probeta muestra un pequeño efecto en la etapa de capa de vapor.
- La oxidación en la superficie incrementa la temperatura de rompimiento de la capa de vapor. Ésta tendencia es más remarcable en el caso de templeado con agua a baja temperatura.
- La presencia de una capa de óxido porosa resulta en el rompimiento prematuro de la capa de vapor.

2.8.6 Efecto del material de la probeta.

Materiales tales como plata, oro, acero inoxidable, níquel, aluminio, inconel, etc., son usados en la fabricación de probetas para la realización de pruebas de enfriamiento. Estos materiales se utilizan principalmente porque con ellos se evita la oxidación de la superficie de las probetas y la transformación de fase.

Entre estos materiales, la plata y el oro tienen una alta sensibilidad térmica debido a la alta conductividad térmica que poseen, además se puede calcular fácilmente el coeficiente de transferencia de calor y el flux de calor usando el método Lumped [71]. Desgraciadamente el método Lumped no se puede aplicar a los aceros, los cuales son ampliamente utilizados en la industria debido a que los aceros tienen una baja conductividad térmica y se tienen que aplicar métodos inversos de transferencia de calor. A continuación se muestran las graficas que muestra la conductividad térmica (figura 2.36) de la plata y el acero inoxidable AISI 304 que se realizaron en el programa EES (Engineering Equation Solver).

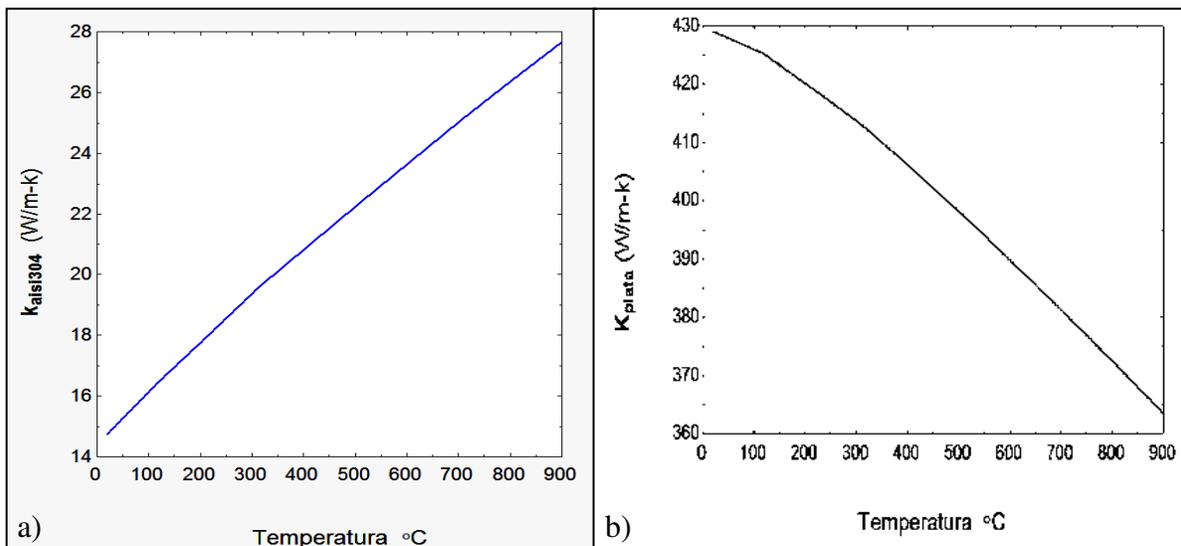


Figura 2.36.– Conductividad térmica: a) del AISI 304 y b) la plata.

Como se dijo anteriormente, el número de Grossman se utiliza para saber la severidad que proporciona el medio de temple y se define como:

$$H = h/(2k) \tag{2.2}$$

donde k es la conductividad térmica del metal. Por consiguiente h es igual coeficiente de transferencia de calor dividido entre dos veces el coeficiente de conductividad térmica del



metal. Cuando el valor de H se multiplica por las dimensiones del cuerpo, su producto corresponde al conocido número de Biot (Bi) [72]:

$$Bi = HD = hD/(2k) = hR/k \quad (2.3)$$

donde D y R ($D/2$) son los diámetros y el radio del cilindro o la esfera estudiada. El número de Biot compara las magnitudes relativas del coeficiente de transferencia de calor en la superficie y la conductividad térmica, un valor pequeño del número de biot significa que la conductividad térmica es despreciable comparado con el coeficiente de transferencia de calor. Esto implica que la temperatura en el interior de la pieza será casi uniforme en toda la probeta y gradientes nulos. Por consiguiente el número de Biot indica la no-uniformidad de la distribución de la temperatura durante el proceso de temple [72].

En las pruebas realizadas por Narazaki [73] utilizo aluminio debido a su excelente reproductibilidad, pero sólo se logró hacer una prueba con cada una de las probetas debido a que éstas sufrían una fisura longitudinal después de aproximadamente 10 pruebas, es por esto que el aluminio pese a su alta conductividad térmica no se usa. El material que más se usa para hacer las pruebas según las normas JIS es la plata ya que tiene una excelente reproductibilidad.



CAPÍTULO III

SIMULACIÓN FÍSICA.

3.1- Sistema utilizado.

Para la realización de las pruebas experimentales se construyó en la Facultad de Ingeniería Mecánica el sistema experimental basado en el dispositivo presentado en el artículo de Vergara-Hernández y Hernández-Morales [6], en el cual se introdujo como se dijo anteriormente al concepto de flujo totalmente desarrollado.

Como se mencionó en los antecedentes de este proyecto, la estabilidad del frente de mojado es afectada de manera significativa por los patrones de flujo cercanos a la frontera sólido-fluido. Por tal razón los dispositivos utilizados en varias investigaciones (tanque con modificador tipo H y de tubos en J) no son recomendables ya que se podría crear dispersión en los resultados, lo anterior debido a la turbulencia o la presencia aleatoria de torbellinos. En este proyecto es indispensable asegurarse que el campo de velocidad alrededor de la probeta de prueba sea lo más reproducible que se pueda; por lo que se construyó un sistema que garantice una condición de flujo desarrollado (figura 3.1).

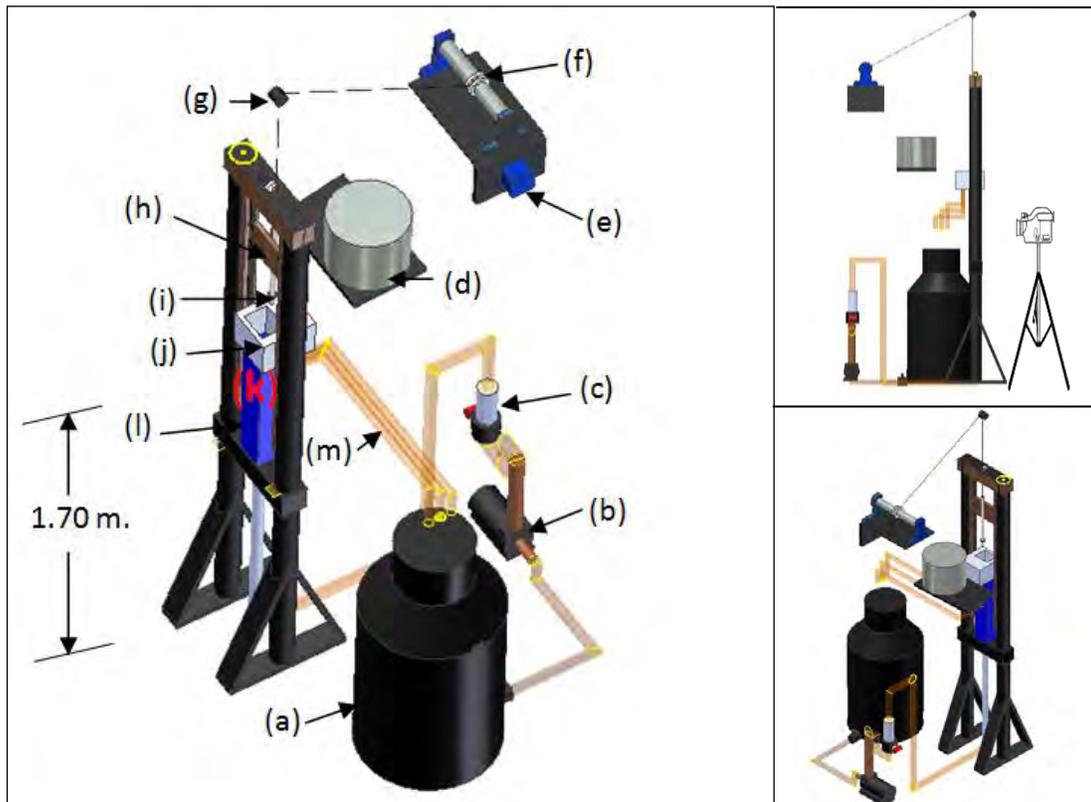


Figura 3.1.- Sistema experimental construido: a) tinaco, b) bomba hidráulica, c) rotámetro, d) horno tipo libro, e) servomotor, f) polea del eje, g) polea de alineación, h) carrera, i) probeta, j) caja de acrílico, k) posición de trabajo, l) caja de vidrio, m) tubos de recirculación.



Al inicio de cada prueba se verifica que la temperatura del agua en el tinaco de 200 L (a) sea la correcta; entonces, se conecta la bomba de 1.5 hp (b) y se fija el flujo de agua con el rotámetro (c). En el horno de resistencia eléctrica tipo libro (d) se calienta la probeta a 915 °C; luego, el servomotor Power Drive de ½ hp (e) se activa con un control para accionar la transmisión (f) la cual se conecta mediante un cable metálico a una polea (g) y mueve la carrera (h) para que la probeta (i) baje (siempre a una velocidad constante) a la posición de trabajo (k) dentro de un tubo de acrílico de 44 mm de diámetro. La caja de acrílico (j) y la tubería de retorno (m) se utilizan para que recircule el agua. En el último tramo de acrílico se encuentra una caja de vidrio cuadrada (l) se utiliza para evitar la refracción producida por el tubo de acrílico (figura 3.1).

El dispositivo tiene un tubo de acrílico (diámetro 45 mm) para poder video grabar los fenómenos de ebullición que ocurren en la 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). Una bomba es utilizada para hacer pasar fluido por el tubo de acrílico desde un contenedor principal. Un rotámetro se utilizó para regular el caudal y lograr velocidades de hasta 1 m/s.

La adquisición de las imágenes se realizó utilizando una cámara de alta velocidad FASTCAM-PCI R2, marca Photron, mientras que la adquisición de las historias térmicas se realizó con una tarjeta de adquisición de datos TempScan/1100 de la marca Iotech, controlada con el *software* ChartView.

Cada una de las pruebas se grabó a 125 fps a una resolución de 512 X 480 píxeles. La frecuencia de los datos adquiridos por los termopares es de 10 Hz y el tiempo de adquisición de datos es de tres minutos.

Para la realización de los experimentos se utilizan probetas cilíndricas, de diferentes geometrías, fabricadas de acero inoxidable AISI 304. Se utilizó este material debido a que no se presentan transformaciones de fase durante el enfriamiento.

En este trabajo de tesis se retomaron las geometrías utilizadas por Narazaki y colaboradores (probetas cilíndricas de cara plana), la de punta semiesférica que según F. Frerichs y colaboradores [66] es una de las que mejor controla la capa de vapor. Además se propone el uso de una novedosa probeta cilíndrica de punta cónica [6]. El estudio de éstas probetas se ve desde el punto de la mecánica de fluidos (capa límite y coeficiente de arrastre). En todos los casos se colocaron siete termopares, de 1/16” de diámetro, en los barrenos que se indican en la figura 3.2.



Las probetas se instrumentaron con termopares tipo K de 1/16” de diámetro externo, colocados dentro de los barrenos como se muestra en la figura 3.2. La temperatura del agua utilizada como medio de enfriamiento fue de 30, 45 y 60 °C en todas las pruebas, utilizándose tres valores de velocidad del agua (en el ducto, antes de impactar a la probeta): 0.2, 0.4 y 0.6 m/s.

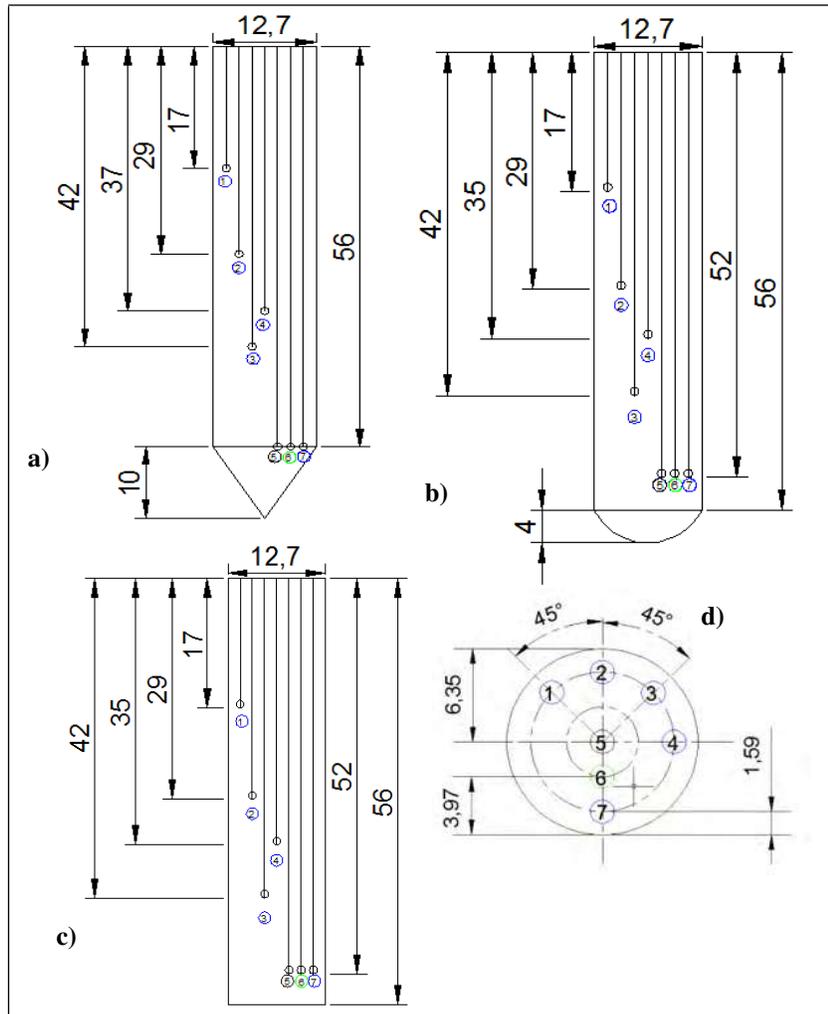


Figura 3.2.- Sección longitudinal de las probetas de base: a) cónica, b) semicircular y c) plana; d) sección transversal. Acotación en mm.

La forma que tiene cada una de las probetas es para estudiar la capa límite dinámica y térmica cuando impacta el fluido contra ésta. El volumen de acero de cada una de éstas es:

Probeta plana= 7093.904 mm³

Probeta cónica= 7516.16 mm³

Probeta semicircular= 7346.06 mm³



Una vez que el fluido, almacenado en el contenedor principal (a), circule por el tubo de acrílico y llegue a la parte superior en donde se almacenará por pocos en un segundo recipiente (j). Este recipiente o contenedor secundario debe de tener salidas que aseguren que la altura del fluido en el contenedor no rebase los dos centímetros (figura 3.3), ya que esto podría ocasionar que el agua se tire y con esto poner en riesgo la cámara de alta velocidad.

En nuestro caso se usa agua. El agua es relativamente barata y un disponible medio de temple que ha sido usado durante muchos años. El efecto que tiene en el temple es [11]:

- Los tiempos de enfriamiento se incrementan con el incremento en la temperatura del agua.
- La máxima rapidez de enfriamiento disminuye con el incremento de la temperatura del agua.
- La temperatura donde ocurre la máxima rapidez de enfriamiento disminuye con el aumento de la temperatura del agua.

Las propiedades del agua son altamente variables y muy sensitivas a los gradientes térmicos en los alrededores de la pieza templada, la principal desventaja de ésta es que ocasiona demasiados esfuerzos y no moja las piezas uniforme e instantáneamente. Estas variaciones producen grandes gradientes térmicos en la superficie de las piezas y se incrementa la distorsión y la posibilidad de fractura.

En nuestra investigación utilizamos agua debido a que video-grabamos cada una de las pruebas con una cámara de alta velocidad. Para relacionar las historias térmicas con los videos más fácilmente.

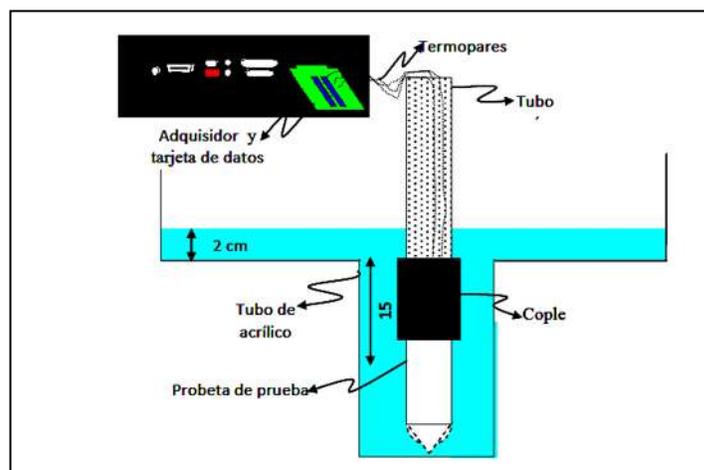


Figura 3.3.- Detalle de la probeta metálica instrumentada y su posición dentro del dispositivo experimental, en la posición de trabajo.



Un horno de resistencias se utiliza para calentar la probeta experimental. Cuando la probeta metálica alcanza la temperatura inicial, el horno se abre y se retira. El horno se diseñó y construyó especialmente para que la apertura (apertura de libro) sea rápida y segura, la altura donde el horno funciona es del orden de los 2.3 metros. Cuando la probeta esté a la temperatura correcta y el horno fuera, se hará bajar un cabezal que a su vez debe soportar una lanza guía, que es la que sujeta la probeta de prueba (figura 3.3)

Para evitar que los termopares de la probeta instrumentada se muevan o se zafen, es importante que los barrenos sean maquinados cuidadosamente para lograr orificios con un diámetro apenas más grande que el del termopar. Aunque los termopares entran dentro de los barrenos a presión, se debe evitar que el agua penetre al interior de los barrenos, ya que al introducir la probeta al horno, el agua que se llegue a infiltrar en los barrenos sufrirá un cambio de fase (agua-vapor); el cambio de presión repentino al interior de los barrenos destruirá los termopares.

3.2.- Construcción del sistema que permite direccionar el fluido.

La construcción del sistema lo podemos dividir en: sistema mecánico y sistema hidráulico.

3.2.1.-Sistema mecánico.

Para la transmisión de movimiento se utilizó un servomotor Power Drive de ½ hp (figura 3.4) el cual se utiliza comúnmente para abrir las cocheras de las casas. Este servomotor se instaló en la barda que está en la parte superior del baño del laboratorio de termofluidos de la facultad de ingeniería mecánica.

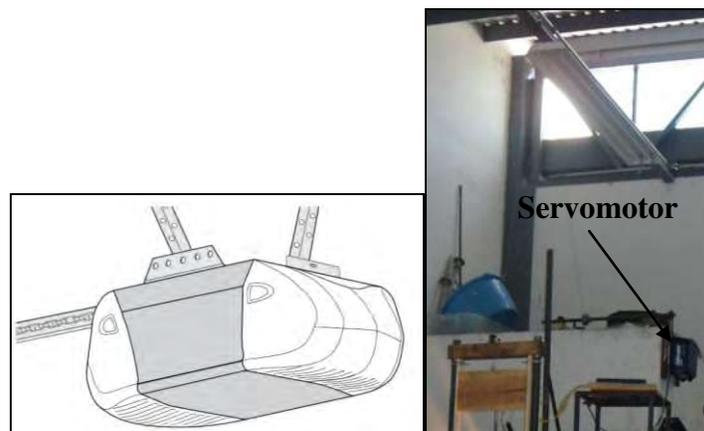


Figura 3.4.- Instalación del servomotor.



Este servomotor ésta acoplado por medio de una cadena y catarinas de 2.5 in de diámetro las cuales transmiten movimiento a un eje de 1 in de diámetro y 1.18 cm de largo. El eje está montado sobre un par de chumaceras, las cuales están soportadas por ménsulas colocadas en la barda (figura 3.5). Las chumaceras se colocaron sobre bloques de madera para facilitar la alineación del eje y poder evitar al mínimo las vibraciones.

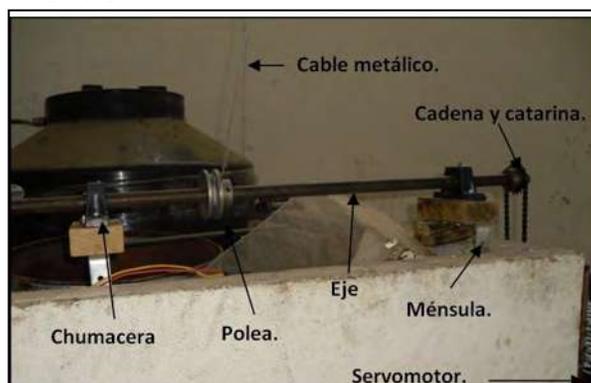


Figura 3.5.-Sistema de Transmisión.

En el eje va montada una polea de 4 in de diámetro en la cual se colocó un cable metálico, una segunda polea de 1 in de diámetro se instaló en la viga metálica del techo del laboratorio, exactamente en la parte superior del sistema (figura 3.6) .

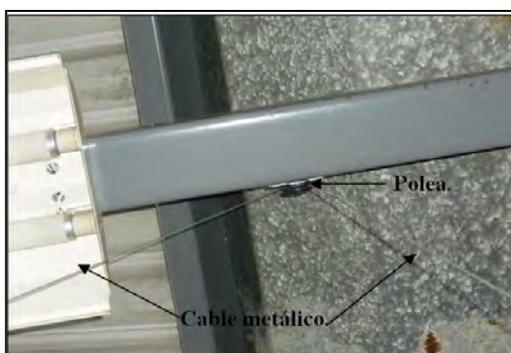


Figura 3.6.-Polea en la viga metálica.

La polea se colocó en la viga metálica para evitar que el sistema se mueva cuando se accione el servomotor mediante el control. Se tiene otra polea de 1 in de diámetro la cual está en la parte superior del sistema y es soportada por un bloque de madera (el cual también evita que se abra el sistema), ésta polea guía el cable metálico hasta una armella atornillada en la superficie de una tabla de madera (18 cm de largo, 15 cm de alto y 1.25 in de espesor) la cual es utilizada como la carrera del sistema. Ésta tabla cuenta con cuatro llantas, las cuales van en los rieles que comúnmente se utilizan en las puertas para closet y permiten que la bajada del sistema sea pareja (figura 3.7).



Figura 3.7.-Polea y carrera con 4 llantas.

En el centro de la tabla de madera van atornilladas un par de armellas (la lanza va insertada en la armella) las cuales nos ayudaron a centrar la lanza de entrada (la lanza es un tubo de acero en el que se insertan los termopares y su longitud es de 40 cm y 0.75 in de diámetro) y la probeta. El giro de las armellas fue una de las cosas que nos ayudo a centrar (Figura 3.8 y 3.9).

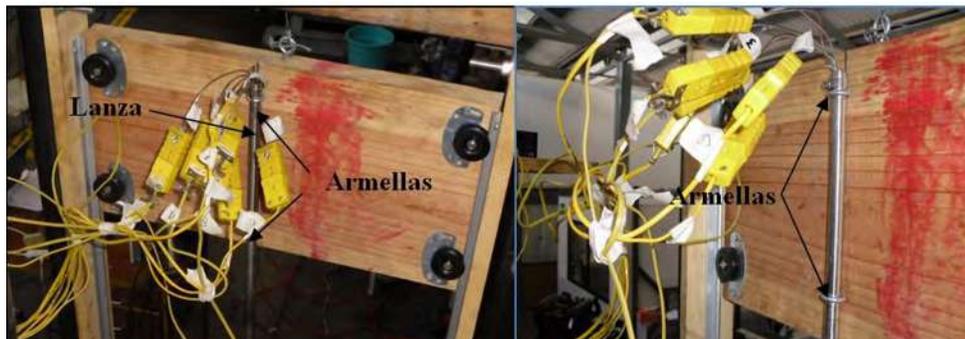


Figura 3.8.-Centrado de la lanza.

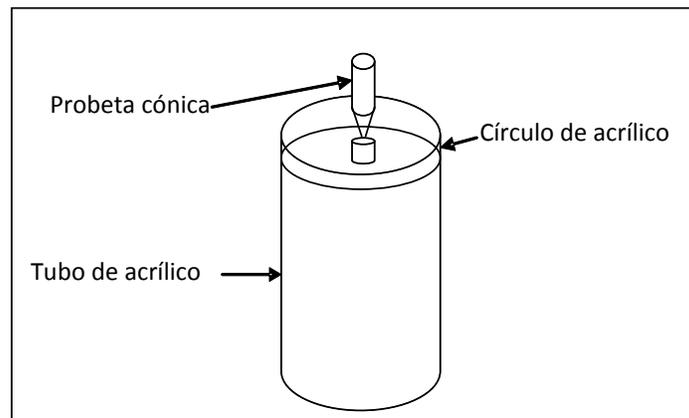


Figura 3.9.-Centrado con la ayuda de la probeta cónica.

Para calcular la velocidad de la carrera se tomaron las lecturas de tiempo 10 veces y se calculo un tiempo promedio, después se hizo el cálculo de la velocidad de la carrera. La distancia de la carrera es de 59 cm (tabla 3.1).

Tabla 3.1.-Velocidad de la carrera.

tiempo(seg)	3,96	3,35	3,54	3,38	3,17	3,44	3,3	3,39	3,48	3,36
Promedio de tiempo (seg)=3,43										
Velocidad (cm/seg)=17,16										

La desviación estándar de nuestra muestra (el tiempo) se calcula con la siguiente fórmula:

$$Desviación_estandar = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (3.1)$$

Desviación estándar del tiempo=0.209

3.2.2.-Sistema hidráulico.

Para el almacenamiento del agua se utilizo un tinaco con capacidad de 200 litros el cual se conecto mediante un arreglo de tubería de cobre de media pulgada a una bomba de agua con un motor monofásico de 1.5 hp



Figura 3.10.-Componentes hidráulicos del sistema.

A su vez la bomba se conectó por medio de otro arreglo de tubería a una válvula de tipo compuerta en la cual el flujo se mueve perpendicular a la apertura de ésta y es comúnmente



llamada como válvula de estrangulamiento, debido al estrangulamiento produce demasiadas pérdidas y turbulencia. Exactamente antes de la entrada del fluido al rotámetro se encuentra una válvula de tipo bola la cual tiene una abertura circular y las pérdidas que produce son menores que la mencionada anteriormente (figura 3.10). La válvula de bola se conecta al rotámetro (F-420) de la marca Blue-White Industries, el cual tiene un rango de 0 a 100 litros por minuto.

Después del rotámetro hay otro arreglo de tubería de PVC de 45 mm de diámetro. En este arreglo la tubería está apoyada en el suelo se realizó una perforación de $\frac{1}{4}$ in. y se colocó una manguera que sirve para drenar el fluido que queda en la tubería (figura 3.10). Enseguida este último arreglo de PVC este se unió mediante un codo, a un tubo de acrílico de 45 mm de diámetro. Este tubo de acrílico mide 1.80 m. (figura 3.11).



Figura 3.11.-Conexión PVC y acrílico.

En la parte superior del tubo de acrílico, se encuentra una caja de acrílico (ésta tiene las dimensiones de 26 cm. de largo por 26 cm. de ancho por 14 cm. de alto) conectada con el tubo de acrílico en la parte central de la caja. Ésta caja tiene tres perforaciones de $1\frac{1}{4}$ in. en la parte de abajo para conectarse mediante un arreglo de tubería al tinaco y recircular el agua, lo que nos ayuda a evitar que haya un gran desperdicio de agua. En estos tubos se colocaron unos filtros en la parte de la entrada del tinaco a fin de quitarle las impurezas que tiene el agua (figura 3.12). Estos filtros se utilizan antes de comenzar las pruebas para garantizar la limpieza del agua, una vez que se utilizaban, se retiraban debido a que la malla utilizada como filtro era demasiado fina y si se dejaban en las pruebas se corría el riesgo de que la caja de acrílico se llenara, ocasionando con esto que la cámara de alta velocidad se pudiera mojar.



Figura 3.12.- Caja de acrílico y tubos de recirculación.

3.3.- Cámara de alta velocidad.

Debido a que como se dijo anteriormente, es un poco difícil poder caracterizar los fenómenos de ebullición en utilizando cámaras convencionales. La cámara utilizada es una cámara de alta velocidad de la marca Photron-Fastcam-PCI-R2 (figura 3.13).

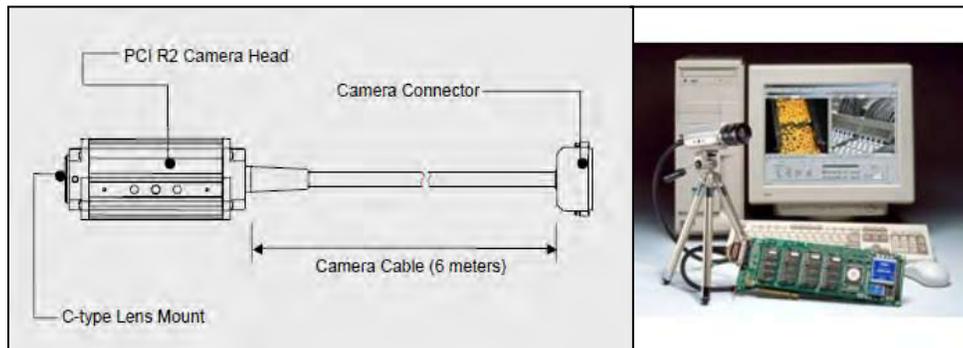


Figura 3.13- Cámara de alta velocidad Photron-Fastcam-PCI-R2.

3.3.1.- Características de la Cámara FASTCAM-PCI R2.

Resolución máxima. -La cámara tiene una resolución máxima de 512x 240 pixeles y va desde 30 hasta 250 fps a ésta misma resolución. Se pueden grabar 2176 frames.

Memoria. -La memoria es de 512 MB.

Frecuencia máxima. -A frecuencia máxima de 1000 fps la resolución es de 256x240pixeles y se pueden grabar 8704 frames.



Resolución a frecuencia máxima.-Es de 256x240 pixeles.

Frecuencia a máxima resolución.-Va desde 30 hasta 250 fps a la resolución de 512x480.

Cuantos niveles de grises posee (Bits). - Tiene 8 Bits.

Tipo de montura.- L a montura es tipo C.

Tipo de sensor.- El sensor es tipo CMOS.

A mayor apertura, menor es la profundidad de campo.

Distancia y profundidad de campo.- (DOF-Profundidad de campo.)

Apertura abierta=DOF limitada.

Apertura cerrada=DOF más larga.

Las cámaras de alta velocidad necesitan mucha luz a grandes frecuencias.

El software que se utiliza en la cámara de alta velocidad es el PFV ver2.4.5.1 (Photron FASTCAM Viewer).

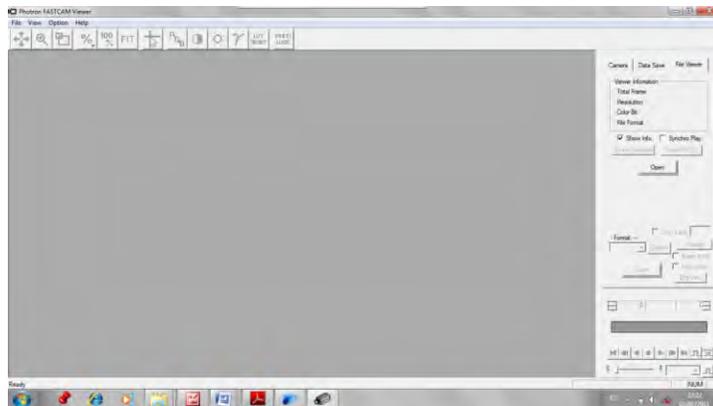


Figura 3. 14.- Software PFV.

El tiempo que nos permite grabar la cámara de alta velocidad está relacionado con la resolución y la frecuencia. Hay que tener mucho cuidado en escoger una frecuencia que nos garantice que vamos a poder grabar bien todas las pruebas. En este caso nosotros estuvimos trabajando a una frecuencia de 125 fps y una resolución de 512X480, se encontró que el número de imágenes que capta es de 2176 y dura 17.41segundos.Si disminuimos la resolución el tiempo de grabación aumenta.



Por ejemplo en la siguiente tabla sabemos que tenemos una memoria de 512MB y si quisiéramos grabar a una resolución de 512x 480 tendríamos 2175 imágenes y un tiempo de 36.3 seg. Pero si disminuimos la resolución a 256X240 aumenta el número de imágenes a 8735 y el tiempo a 145.6 seg (tabla 3.2).

Tabla 3.2.-Determinación del tiempo de grabado.

Frame Rate (FPS)	Resolution	Memory Capacity / Record Duration / Number of Recorded Frames							
		128MByte		256MByte		384MByte		512MByte	
		Frames	Duration (sec.)	Frames	Duration (sec.)	Frames	Duration (sec.)	Frames	Duration (sec.)
60	512x480	544	9.1	1087	18.1	1631	27.2	2175	36.3
	512x240	1091	18.2	2183	36.4	3275	54.6	4367	72.8
	256x240	2183	36.4	4367	72.8	6551	109.2	8735	145.6
	256x120	4367	72.8	8735	145.6	13103	218.4	17471	291.2
	128x120	8735	145.6	17471	291.2	26207	436.8	34943	582.4
	128x 80	13103	218.4	26207	436.8	39311	655.2	52415	873.6
	128x 32	32768	546.1	65536	1092.3	98304	1638.4	131072	2184.5

En la tabla 3.3 se puede ver que a 30 fps y hasta 250 fps soporta todas las resoluciones, pero de 500 fps la resolución comienza a disminuir.

Tabla 3.3.-Resolución contra frecuencia.

Frame Rate (FPS)	Image Resolution						
	512 x 480	512 x 240	256 x 240	256 x 120	128 x 120	128 x 80	128 x 32
30	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
60	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
125	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
250	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
500	NA	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1000	NA	NA	✓	✓	✓	✓	✓
2000	NA	NA	NA	✓	✓	✓	✓
3000	NA	NA	NA	NA	✓	✓	✓
5000	NA	NA	NA	NA	NA	✓	✓
10000	NA	NA	NA	NA	NA	NA	✓



3.3.2.- Pruebas para determinar en qué formato se deben de guardar las imágenes y el video.

Se realizaron algunas pruebas para ver que formato deberían tener las imágenes y con éstas pruebas se determinó que el .png fue el mejor en cuanto a calidad y espacio. En cuanto al video el único formato es el .avi (tabla 3.4).

Tabla 3.4.-Determinación de formatos a utilizar.

Resolución	Formato	Espacio en disco	Numero de fotos.	Distancia	Frecuencia.	Campo.
512x480	JPG			25 mm	30 fps.	3.5cm
512x480	JPG			40 mm	30 fps.	5.5cm
512x480	JPG			70 mm	30 fps.	9.8cm
256x240	JPG	68.5 MB (8 KB c/u)	8704	25 mm	1000 fps.	1.8cm
256x240	TIFF	544 MB (64 KB c/u)	8704	25 mm	1000 fps.	1.8cm
256x240	RAW	510 MB (64 KB c/u)	8704	25 mm	1000 fps.	1.8cm
256x240	AVI	514 MB		25 mm	1000 fps.	1.8cm
256x240	PNG	273 MB (32 KB c/u)	8704	25 mm	1000 fps.	1.8cm



3.3.3.-Tipos de lentes con los que se cuentan.

Los tipos de lentes con los que se cuenta en el laboratorio son:

- El C22525KP RoHS Complain 25 mm. F/1.4 1 MI C (figura 3.15). Es un lente de 25mm y queda en la clasificación: lentes gran angular (3-25 mm).

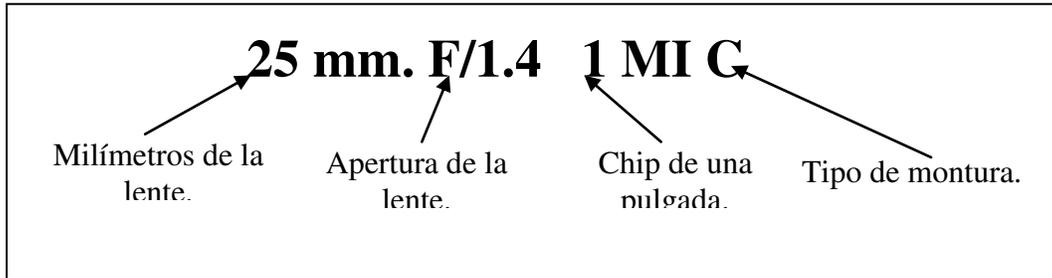


Figura 3. 15.-Lectura de un lente.

- El Navitar Zoom 7000 18-108 mm. F/2.5 1 MI C Format Macro Zoom (figura 3.16). Este se encuentra dentro de la clasificación de todos los tipos de lente.



Figura 3. 16.-Zoom [74].

3.4.-Horno de resistencias tipo libro.

Se construyó un horno de resistencias tipo libro para calentar la probeta a la temperatura de trabajo, se dice tipo libro porque puede abrirse de esa forma permitiendo la entrada de la pieza.

El horno se diseñó y construyó para que la apertura fuera fácil, segura y rápida. Las resistencias son de una aleación cromo-níquel llamada comúnmente aleación “A1”. Ésta aleación se colocó en forma de bobinas para después cubrirla por un refractario. Posteriormente en el laboratorio de metal-mecánica de la facultad de ingeniería mecánica se



cortó y moldeó una lámina para colocarse y soldarse en la parte exterior del horno (figura 3.17).

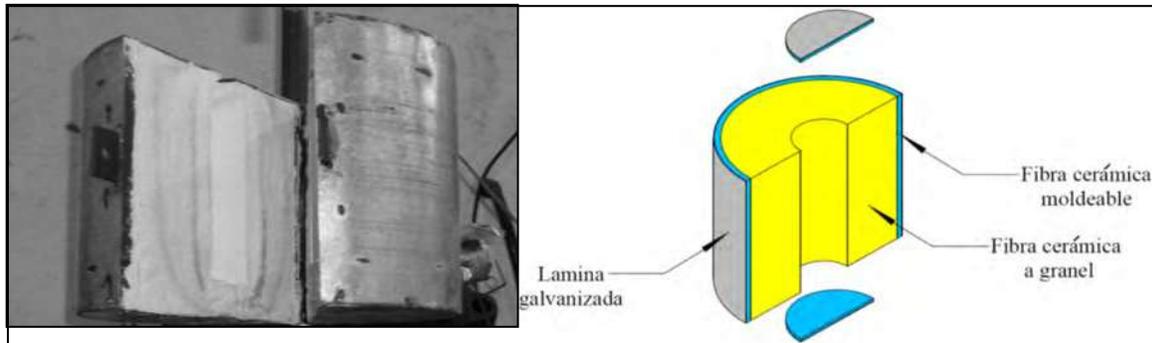


Figura 3. 17- Horno tipo libro.

El horno tiene un diámetro exterior de 13.5 in, una altura de 10.75 in y un diámetro interior de 1.25 in, este diámetro interior tiene una distancia desde la superficie de 9 in. El diámetro interior es pequeño para evitar que haya demasiado aire dentro del horno y se oxide la pieza. Aunque es un acero inoxidable AISI 304 y no debería oxidarse, en algunas de las pruebas se encontró óxido en la probeta.

En la parte superior de la estructura de PTR, se colocó un riel de ángulo de 3/4 X 1/8. Se construyó un carro para mover el horno a la posición de calentamiento de la probeta (figura 3.18).

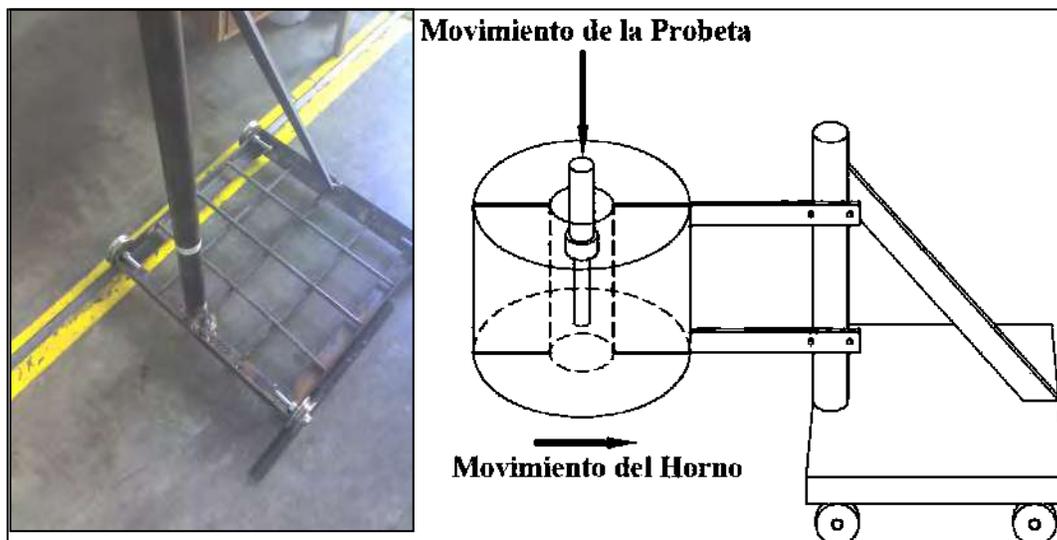


Figura 3. 18- Carro para mover el horno.

El horno se montó en el carro sobre el riel a una altura aproximada de 2.30 m. En el carro también se monto un contrapeso para soportar el horno.



Figura 3. 19- Montaje del horno.

En el horno se utiliza un controlador de temperatura, el cual consta de un relevador, el cual nos indica cuando el horno se encuentra a la temperatura deseada y un pirómetro analógico. El circuito se cierra mediante un termopar tipo K, el cual manda la señal de la temperatura dentro del horno, este termopar va en el centro del horno para sensar la temperatura (figura 3.19).

Para la adquisición de los datos de los termopares insertados dentro de la probeta 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 3.20).



Figura 3. 20.- Adquisidor de datos [75].

Este adquisidor cuenta con una tarjeta de adquisición de datos de 32 canales en donde se conectan los termopares a utilizar (figura 3.21). El software que se utiliza con la tarjeta es

el ChartView. En este se puede ver el cambio de temperaturas cuando calentamos y enfriamos la probeta. Este nos permite habilitar los canales a utilizar, el tipo de termopar, los límites mínimo y máximo de temperatura, el tiempo a grabar y el intervalo de tiempo de grabación, además nos permite escoger el formato en que deseamos grabar y la dirección de donde lo queremos grabar.

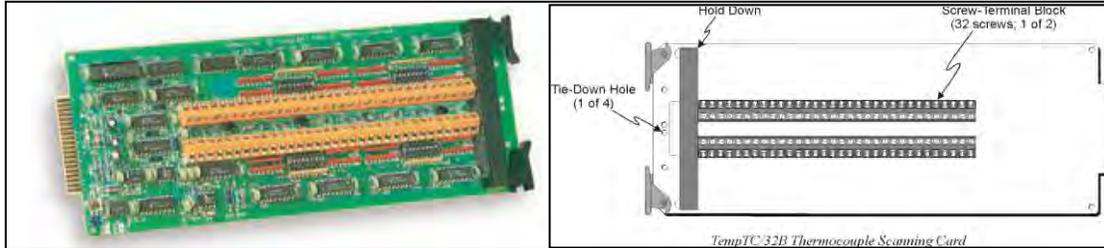


Figura 3. 21.- Tarjeta de adquisición.

En la tabla siguiente se da el rango de medición de temperatura de cada uno de los termopares que existen en el mercado.

Tabla 3.5.- Tipos de termopares.

<i>Thermocouple</i>	<i>Range</i>	<i>Accuracy</i>
<i>Type J:</i>	-200° to +760°C;	± 0.5°C;
<i>Type K:</i>	-100° to +1372°C;	± 0.5°C;
<i>Type T:</i>	-100° to +400°C;	± 0.5°C;
<i>Type E:</i>	-100° to +1000°C;	± 0.5°C;
<i>Type N:</i>	-200° to +1300°C;	± 0.5°C;
<i>Type R:</i>	0.0° to +1768°C;	± 1.00°C;
<i>Type S:</i>	0.0° to +1768°C;	± 1.00°C;
<i>Type B:</i>	-350° to +1820°C;	± 1.00°C;
<i>Type N14:</i>	0.0° to +1300°C;	± 0.5°C;
<i>Type N28:</i>	-270° to +400°C;	± 0.5°C;

El adquisidor se colocó en la parte superior de la estructura de PTR en una mesa de ángulo en la que se pusieron dos tablas de madera. Aquí se buscó la posición óptima para que los cables de los termopares y la tarjeta no sufrieran algún daño cuando bajara la carrera del sistema (figura 3.22).



Figura 3. 22.- Colocación del Adquisidor.



3.5.-Pruebas en estado Isotérmico.

Para tratar de visualizar las líneas de flujo se realizaron algunas pruebas en estado isotérmico. Se utilizó 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 3.23 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 (3.23 b, c y d) muestra las líneas de corriente de las probetas

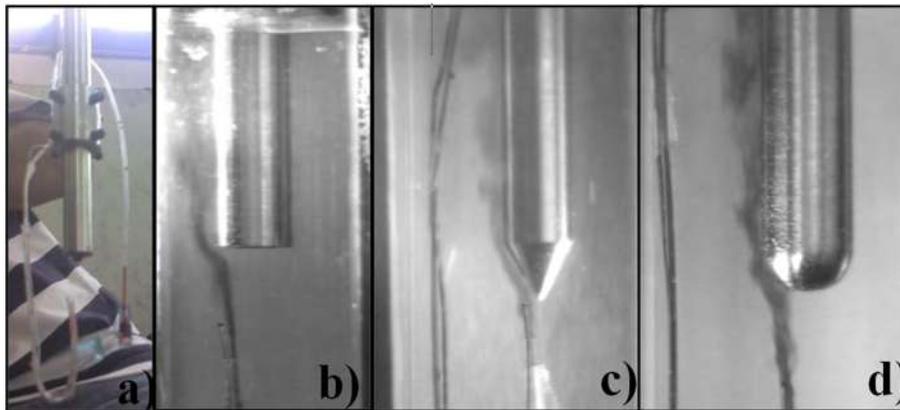


Figura 3. 23.-a) inyector del colorante, b) probeta plana, b) cónica, c) semicircular.

Otra forma que se 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 lt/min (figura 3.24). 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).

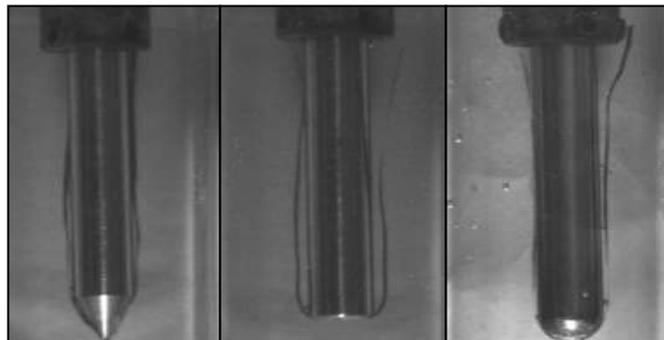


Figura 3. 24.-Pruebas con escarcha a 20 lt/min.

En las siguientes pruebas solo se variaron las condiciones de flujo. En la figuras 3.25 y 3.26 las pruebas se realizaron a 40 lt/min y 60 lt/min respectivamente. Se puede notar que en las probetas cónica y semicircular se sigue teniendo un comportamiento parecido al de 20 lt/min, los hilos continúan prácticamente pegados a la probeta. Mientras que en la probeta plana hay una separación de los hilos en la parte inferior de la probeta. La probeta plana es la que presento una mayor cantidad de fluctuaciones en los hilos a lo largo de ésta.

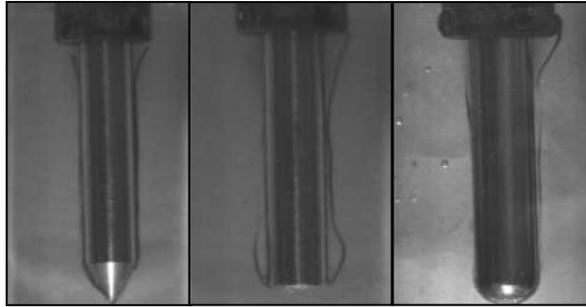


Figura 3. 25.-Pruebas con escarcha a 40 lt/min.

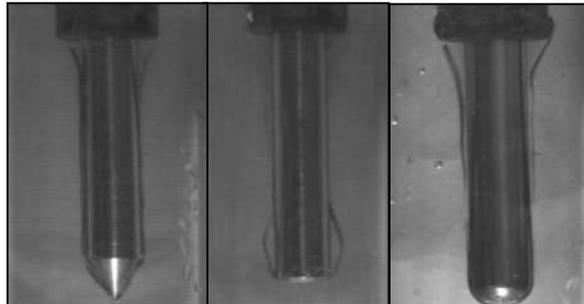


Figura 3. 26.-Pruebas con escarcha a 60 lt/min.

En el artículo de H.J. Vergara Hernández [76] se muestra que el comportamiento de las pruebas es similar a las pruebas realizadas con los hilos (figura 3.27).

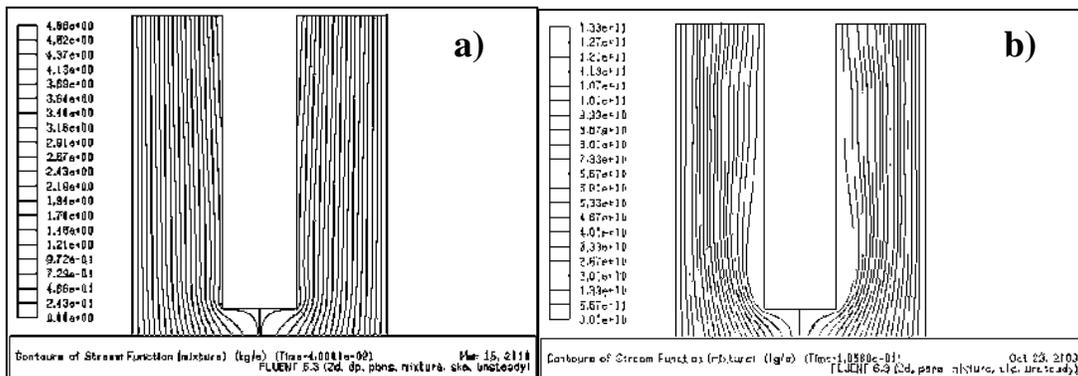


Figura 3. 27-Lineas de corriente con agua a 60 °C y un flujo de: a) 20 lt/ min y b) 60 lt/ min.



También se observó en el modelo matemático que la separación del flujo se debe a una caída de presión, lo que genera una recirculación del fluido (figura 3.28 y 3.29).

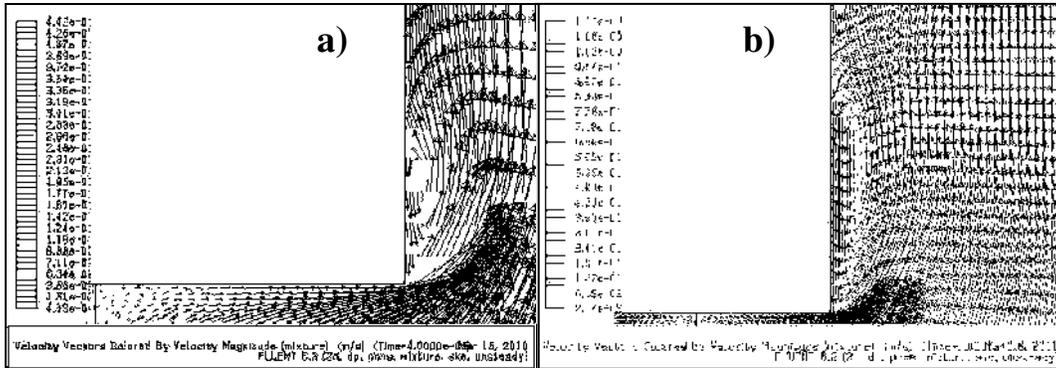


Figura 3. 28.-Vectores de velocidad con agua a 60 °C y un flujo de: a)20 lt/ min y b) 60 lt/ min.

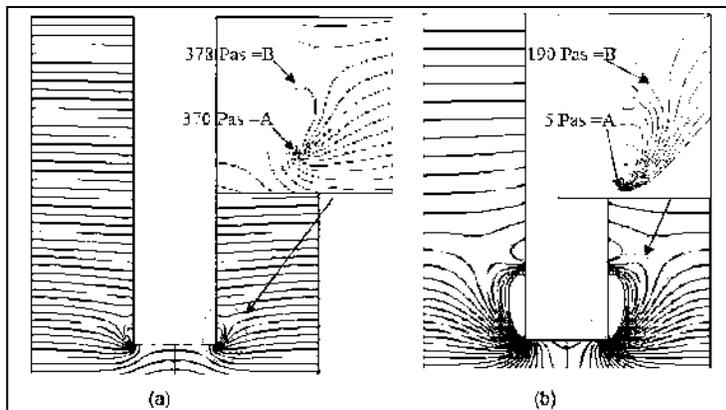


Figura 3. 29.-Presión estática con agua a 60 °C y un flujo de: a)20 lt/ min y b) 60 lt/ min.



3.6.-Matriz de experimentación utilizada en estado no-isotérmico.

Las pruebas para la condición en estado no-isotérmico se realizaron con temperaturas del fluido de 30, 45 y 60 °C. Los flujos utilizados para cada una de las probetas fue de 20, 40 y 60 lt/min.

La lectura de la nomenclatura se realiza de la siguiente manera:

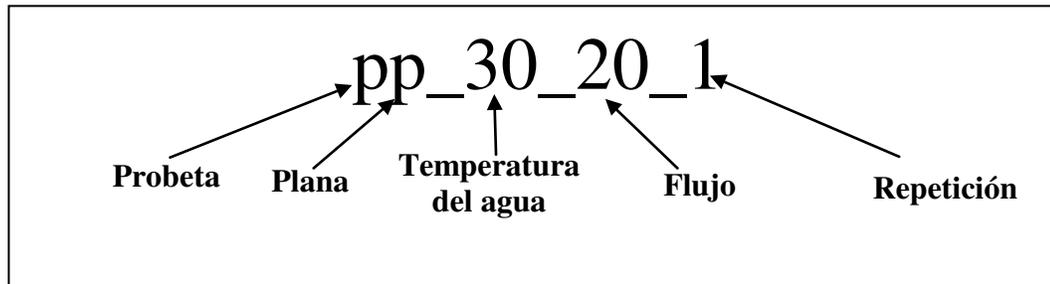


Tabla 3.6.-Matriz experimental.

Probeta plana		
pp_30_20_1	pp_30_40_1	pp_30_60_1
pp_45_20_1	pp_45_40_1	pp_45_60_3
pp_60_20_1	pp_60_40_3	pp_60_60_1
Probeta cónica		
pc_30_20_2	pc_30_40_1	pc_30_60_1
pc_45_20_3	pc_45_40_2	pc_45_60_1
pc_60_20_1	pc_60_40_1	pc_60_60_1
Probeta semicircular.		
ps_30_20_2	ps_30_40_1	ps_30_60_2
ps_45_20_2	ps_45_40_1	ps_45_60_2
ps_60_20_2	ps_60_40_2	ps_60_60_3



3.7.-Procedimiento experimental.

El procedimiento experimental tiene dos etapas, primero se preparan las probetas y al día siguiente se comienza con las pruebas.

3.7.1.-Preparación de las probetas.

Para comenzar las pruebas primeramente se pulen las puntas de los termopares tipo K (longitud de 60 cm) verificando que cada uno de ellos toque el fondo de cada una de las perforaciones de la probeta. Los termopares son de 1/16 in de diámetro exterior, igual que el diámetro de la broca que se utilizó para perforar la probeta, pero debido a que la herramienta de corte (broca) tiene un desgaste por el huso, las perforaciones son menores a 1/16 in y ésta es la razón principal de pulir los termopares.

Una vez que se pulen los termopares, se marcan con un plumón de aceite a la longitud que van a entrar y se enumeran para saber qué posición le toca a cada termopar. Después se procede a insertar los termopares (figura 3.30) en la lanza de entrada (la cual es un tubo de 44 cm de largo $\frac{3}{4}$ in de diámetro exterior) y se van colocando cuidadosamente cada uno de los termopares en el interior de la probeta verificando que las marcas que se hicieron anteriormente correspondan a la longitud correcta dentro de la probeta.

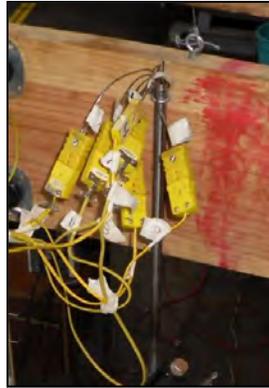


Figura 3. 30.-Colocación de los termopares en la lanza.

Cuando se verifica que la posición de cada uno de los termopares es la correcta, se hace una mezcla de un cemento llamado OMEGA BOND 600 (High Temperature Chemical Cement). Ésta mezcla se hace poco densa para que se llenen bien los espacios de las perforaciones y evitar que entre agua a éstas, alrededor de la probeta se pone cinta para evitar que la mezcla escurra. Es muy importante que no les entre agua porque de ser así, tendríamos lecturas incorrectas y con el riesgo de que los termopares exploten y se abran a la mitad debido al cambio de fase repentino que sufran estos (figura 3.31). Ésta mezcla se deja secar un día.



Figura 3. 31-Cemento utilizado y sellado de la probeta.

3.7.2.-Inicio de las pruebas.

Realizando el procedimiento anterior al día siguiente se está en condiciones para comenzar las pruebas, apretando cada uno de los opresores del porta probetas para ajustar y alinear la probeta.

El agua contenida en el tinaco de 200 lts. se calienta a la temperatura deseada (temperatura de trabajo) utilizando 6 resistencias, la temperatura del agua es constantemente sensada utilizando un medidor de temperatura llamado FLUKE 52 THERMOMETER en el que se conecta un termopar tipo K para realizar las lecturas (figura 3.32). El tiempo para elevar la temperatura del agua a 30 °C fue de 45 min aprox., para elevarla a 45 °C fue de 1 hora 50 min aprox. y para elevarlo a 60 °C fue de 3 h aprox.



Figura 3. 32.-Fluke y calentamiento de agua con resistencias.

Cuando la temperatura del agua está próxima a la temperatura de trabajo se conecta el horno de resistencias tipo libro y se calibra para que se eleve a una temperatura aproximada de 915 °C (figura 3.33). El tiempo que tarda en alcanzar ésta temperatura es alrededor de 20 min.



Figura 3. 33.-Calentamiento del horno.

Para regular el flujo de trabajo se debe de utilizar una válvula tipo bola, ya que la válvula de estrangulación además de provocar turbulencia y pérdidas, ocasiona que haya demasiado flujo de burbujas pasando a través del flujo deacrílico.

La lectura de datos se hace por medio del software ChartView, en el cual se habilitan 7 de los 32 canales disponibles, una vez habilitados los canales se abre la ventana donde se dan las especificaciones del tipo de termopar (figura 3.34) y valores máximos y mínimos a adquirir.

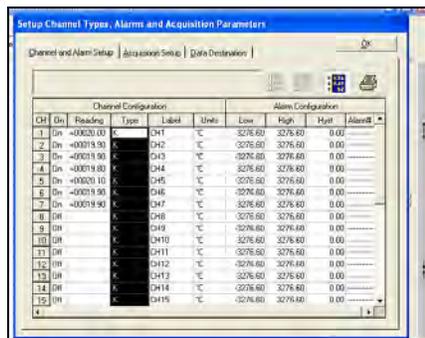


Figura 3. 34-Habilitación de los canales y selección de tipo de termopar.

Los datos se grabaron a una frecuencia de 10 Hz (10 lecturas por segundo) durante 3 minutos para obtener un total de 1200 mediciones por termopar (figura 3.35 a). La ruta donde queremos guardar los archivos generados y el formato a utilizar en estos también se selecciona, en este caso estamos guardando en un formato .txt (figura 3.35 b) .La computadora y la tarjeta de adquisición de datos están conectadas a un No-Break por si hubiese una falla en la electricidad al momento de estar grabando una prueba.

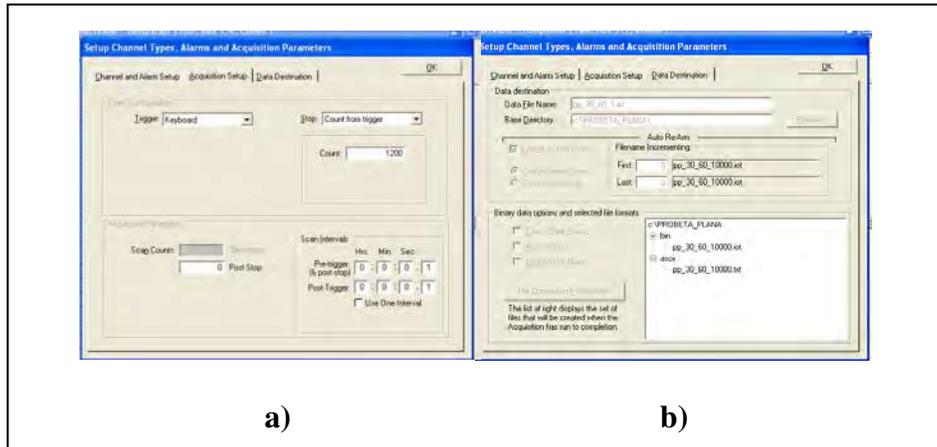


Figura 3. 35.-a) tiempo de adquisición y b) ruta y formato de guardado.

El programa ChartView debe quedar listo para presionar el trigger.

Por último debe asegurarse que la cámara de alta velocidad este en la posición de trabajo, correctamente enfocada y a una distancia aproximada de 60 cm. La iluminación juega un papel muy importante ya que durante varias pruebas se busco la posición adecuada de la lámpara de 300 watts (figura 3.36). La posición que se encontró perfecta para la realización de las pruebas es a la altura del fondo de la caja de vidrio. Se estuvo buscando un fondo detrás de la probeta y fue el fondo negro el más apropiado.



Figura 3. 36.-Posicionamiento de la cámara de alta velocidad y la luz.



Las pruebas se realizaron en un horario de 9 am a 3 pm debido a que en este horario la luz del sol nos favorecía para la realización de las pruebas, y como ya se dijo anteriormente, la luz juega un papel muy importante.

Hecho todo lo anterior, se introduce la probeta al horno tipo libro empujando el carro que soporta el horno a la posición de calentamiento. Se debe cuidar que el termopar dentro del horno no se dañe cuando se cierre este con la ayuda de unas pinzas de presión (figura 3.37 a).

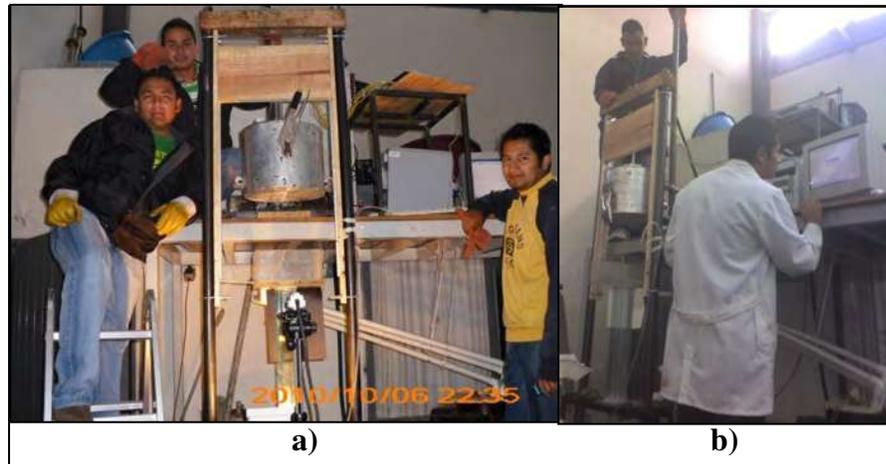


Figura 3. 37.- a) Introducción de la probeta al horno y b) monitoreo de temperatura.

Una vez que la probeta está dentro del horno se monitorea la temperatura de la probeta (figura 3.37 b) y cuando la temperatura llega a los 800 °C (a aproximadamente 5 minutos después de que la probeta se metió al horno), en este momento se conecta la bomba para que el flujo se estabilice en lo que la pieza llega a su temperatura de trabajo. El criterio que se toma para saber cuando la probeta llega a la temperatura de trabajo es que el termopar de menor temperatura sea de 910 °C, esto debido a que todos los termopares tienen diferentes mediciones porque los termopares están en diferentes posiciones, además el acero AISI 304 tiene una baja conductividad térmica de 14.9 W/m-k, comparada con la plata la cual tiene un coeficiente de 429 W/m-k [77] y es por esto que se utiliza en la norma JIS K 2242[78].

Llegando la probeta a la temperatura de trabajo se apaga la luz del laboratorio y se trabaja solamente con la luz de la lámpara de 300 W (figura 3.38), se enciende el cronómetro, que se encuentra pegado en la caja de vidrio y que posteriormente nos ayudara a calcular las tiempos en que rompe la capa de vapor y las velocidades del frente de mojado. También comienza la grabación de la adquisición de datos presionando en trigger del ChartView (figura 3.39).



Figura 3. 38.- Apagado de la luz para comenzar la grabación.

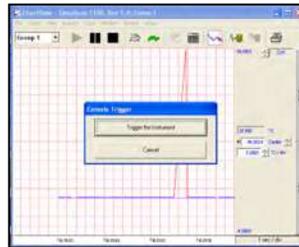


Figura 3. 39.- Trigger listo para presionarse.

En este mismo instante se procede a retirar el horno, y se presiona el botón del control del servomotor y comience la bajada de la carrera (figura 3.40).



Figura 3. 40.- Salida de la probeta y bajada a la posición de trabajo.

Un instante antes de que la probeta a alta temperatura entre al tubo de acrílico y tenga contacto con el medio de enfriamiento se presiona el trigger para adquirir las imágenes con la cámara de alta velocidad (figura 3.41)



Figura 3. 41.- Adquisición de imágenes con la cámara de alta velocidad.

Una vez terminada la prueba se revisa que la probeta no contenga indicios de óxido. La prueba se acepta o se rechaza cuando se hace un análisis visual de la probeta, así como el análisis rápido del video y los datos adquiridos por los termopares.

Finalmente se guardan las imágenes y el video captados por la cámara, el formato utilizado para las imágenes fue el .png y para el video fue el .avi.

Terminada la prueba, se pule la probeta con lijas de 180, 1000 y 1200 garantizando con esto que la probeta quede bien pulida para la siguiente prueba no se oxide. El pulido es muy importante debido a que nos ayuda a que la pieza no se oxide (figura 3.42).

En la literatura se dice que la aspereza de la probeta no influye en la etapa de capa de vapor, pero tiene una gran influencia en la etapa de convección forzada [45].



Figura 3. 42.- Pulido de la probeta.

3.8.- Tratamiento de los datos adquiridos por los termopares.

Como se dijo anteriormente, los datos se adquirieron en un formato .txt. Estos formatos se abren con el programa Excel y se les agrego la columna de tiempo, en donde sabemos que adquirimos los datos cada 0.1 segundos. Después se calculo la derivada de cada uno de los canales de los termopares (figura 3.43).

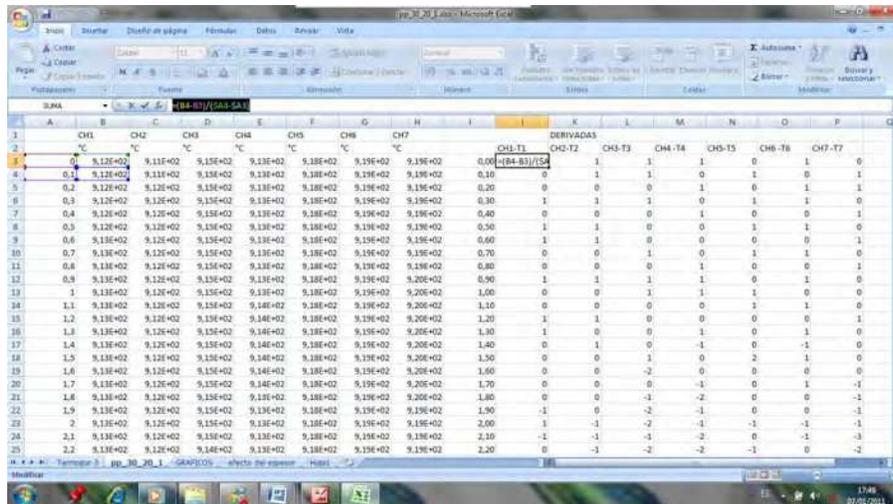


Figura 3. 43- Tratamiento de los datos adquiridos.

Una vez tratados los datos, se generan las curvas de Temperatura-tiempo (figura 3.44) y la de rapidez de enfriamiento (dT/dt) (figura 3.45).

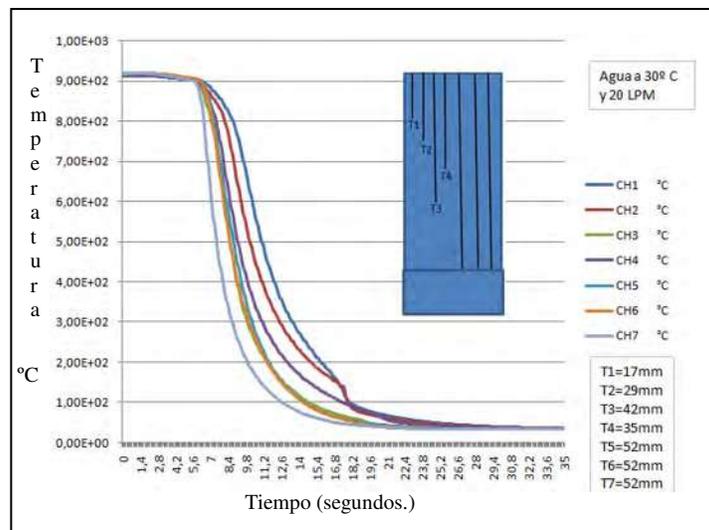


Figura 3. 44.- Curva Temperatura-tiempo.

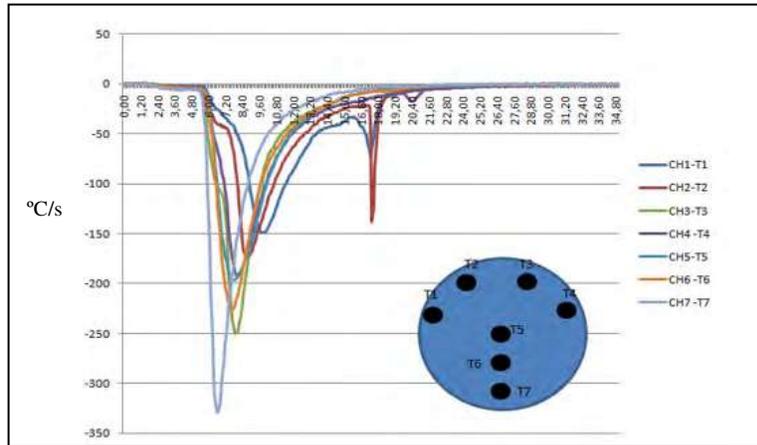


Figura 3. 45.- Curva de rapidez de enfriamiento.

3.9.-Tratamiento de los videos.

Se realizó un programa en Matlab® debido a que cuando se quería editar el video en Nero y tratar de poner el posicionamiento de los termopares (mediante pixelamiento) para un realizar un mejor análisis de los videos y las curvas de enfriamiento, el Nero no reconocía los videos con formato .avi extraídos directamente del programa PFV ver2.4.5.1 de la cámara de alta velocidad. Esto es porque el programa de la cámara de alta velocidad no contaba con codecs (codificador-decodificador) para sr leído por el Nero®.

Un códec es un formato de archivos de vídeo, modo en el que se guardan los datos de un archivo de vídeo con el fin de que puedan ser interpretados por el ordenador o computadora [79].

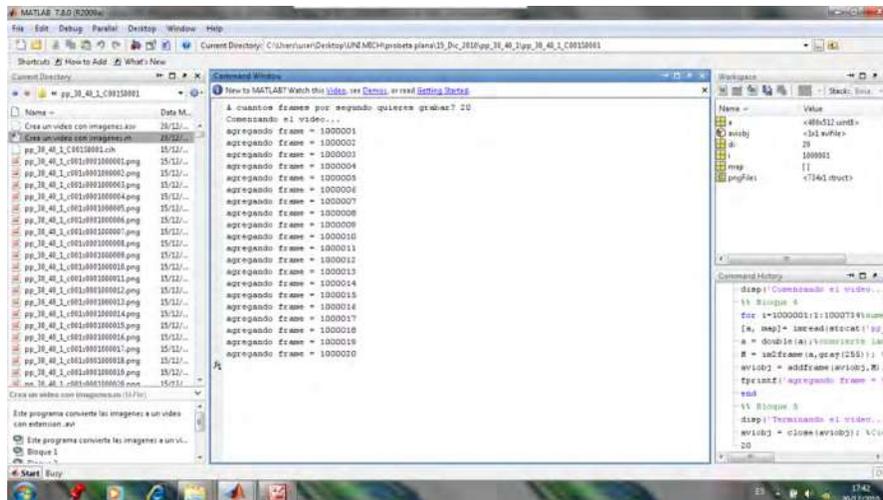


Figura 3. 46.- Asignación del códec cinepak.



Debido a que los videos se grabaron a 125 frames por segundo y es muy complicado analizar los videos en esa forma, en el programa realizado se pudieron editar a 20 frames por segundo para tener un mejor análisis (figura 3.46). Las cámaras comerciales graban a 30 fps.

El código con el que se le pudieron asignar los códecs a las imágenes captadas con la cámara de alta velocidad es el mostrado en el apéndice B.

Después de asignarle los códecs al video, se puso la posición de cada uno de los termopares (letras amarillas T1, T2, T3, T4, T5, T6 y T7), para posteriormente identificar las diferentes zonas de ebullición y relacionarlas con las curvas (figura 3.47).

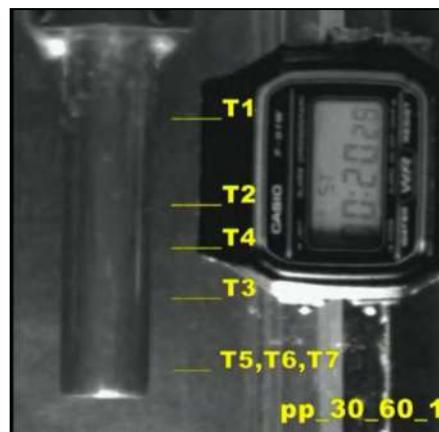


Figura 3. 47.-Posición de cada termopar en el video.



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

4.1.- Reproducibilidad de las pruebas.

Como ya se dijo anteriormente las probetas se fabricaron con acero inoxidable AISI 304. Este acero no presenta transformaciones de fases en el rango de las temperaturas experimentales (900°C a 60°C) y evita la formación de óxido en la superficie de la probeta, esto aunado al sistema construido permite tener una buena reproducibilidad de las historias térmicas medidas al interior del sólido (figura 4.1).

Una de las grandes cualidades que se presentan en el sistema construido es que el flujo es totalmente desarrollado, lo que permite que el perfil de velocidades permanezca constante después de una cierta longitud.

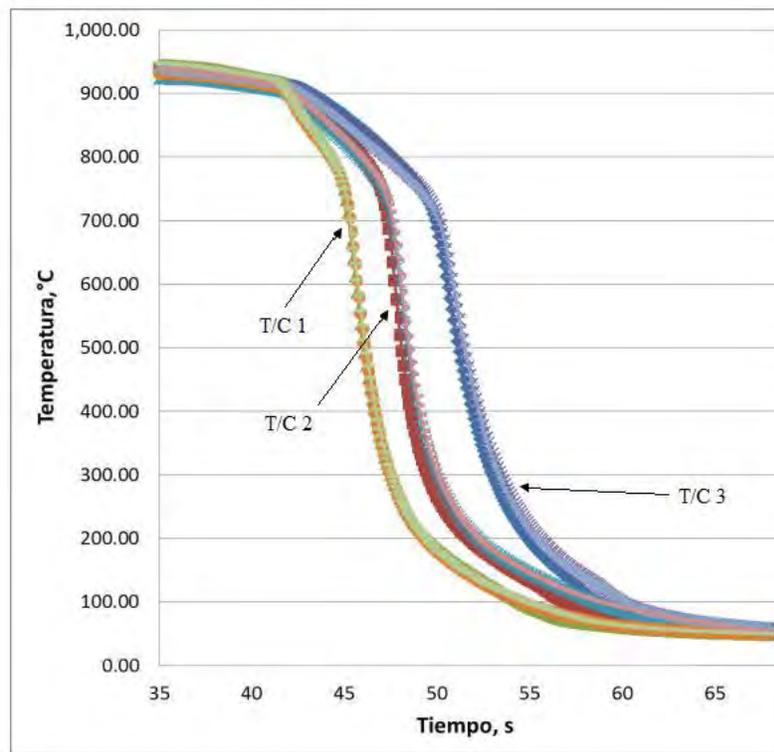


Figura 4.1.- Reproducibilidad experimental de la probeta de punta instrumentada con termopares tipo K de 1/16 de pulgada. Tres experimentos superpuestos durante el temple de una probeta calentada a 920 °C y enfriada hasta los 60 °C.



4.2-Número de Reynolds utilizado.

En la tabla 4.1 se muestran los valores del número de Reynolds en la corriente libre del tubo de acrílico antes de que el flujo de agua impacte en la probeta que se muestra en la figura 3.2, para cada valor de velocidad del agua estudiado. Los números de Reynolds se calcularon con base al diámetro interno del tubo y con las propiedades del agua evaluadas a temperatura ambiente.

Tabla 4.1.- Valores del número de Reynolds en la corriente libre del tubo de acrílico de la figura 3.1 para cada valor de velocidad del fluido estudiado.

Velocidad, m/s	Numero de Reynolds
0.2	8900
0.4	17800
0.6	26700



4.3.-Análisis de las pruebas en estado isotérmico.

4.3.1-Probeta plana.

Para dar una explicación del por qué se distorsiona la capa de vapor en la base de las probetas cilíndricas de cara plana (reportado por H. J. Vergara-Hernández, Bernardo Hernández-Morales), se decidió estudiar las condiciones hidrodinámicas del sistema. Inicialmente, se procedió a desarrollar un experimento (a temperatura ambiente) en el laboratorio de termofluidos de la Facultad de Ingeniería Mecánica (UMSNH) que permitiera visualizar a las líneas de corriente alrededor de la probeta de cara plana. Para ello, se pegaron listones de celofán a la base de las probetas con la finalidad de “trazar” las líneas de corriente y así visualizar el comportamiento del flujo de fluidos alrededor de la pieza (figura 4.2).

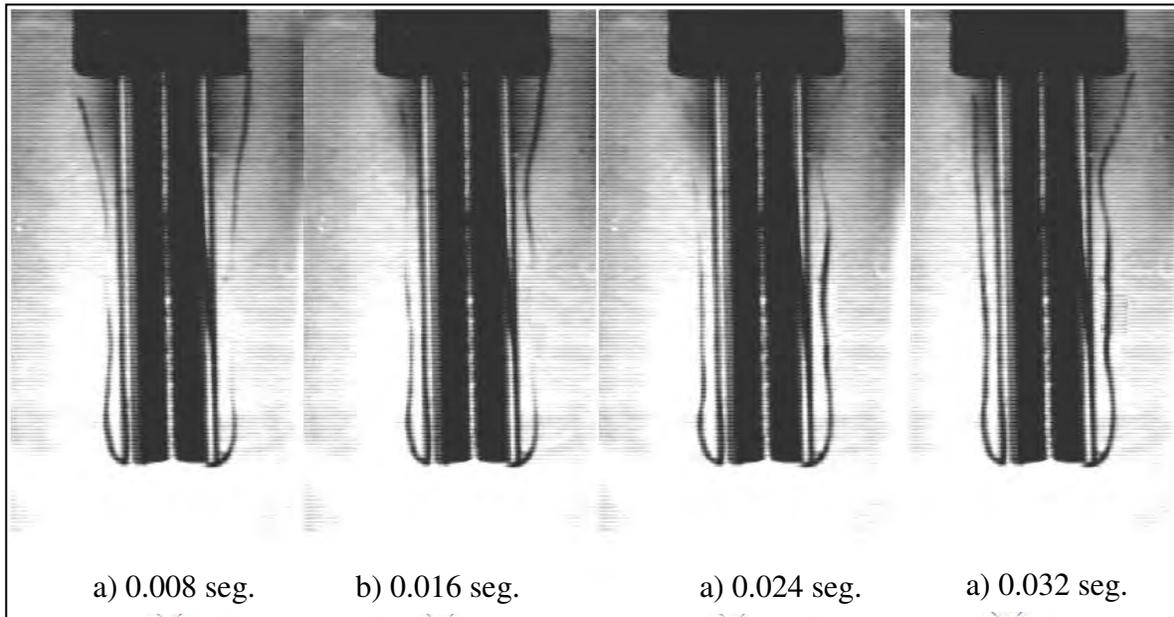


Figura 4.2.- Imágenes de listones sujetos a la base de las probetas cilíndricas de cara plana para agua circulando a una velocidad de 0.20 m/s en un ducto de 44 mm de diámetro interno.

La figura 4.2 muestra que, para una velocidad del medio de temple de 0.2 m/s, los listones se mantienen paralelos a lo largo de toda la base lateral del cilindro.

Cuando la velocidad del agua se incrementa a 0.4 m/s a través del ducto el comportamiento de los listones se vuelve más caótico en la base del cilindro (figura 4.3). De las imágenes de la figura 4.3 se desprende que, para una velocidad del agua en el ducto de 0.4 m/s, la

hidrodinámica del sistema provoca que los listones toquen la cara lateral del cilindro y en la base inferior de la probeta cilíndrica se puede ver una separación clara, pero ligera.

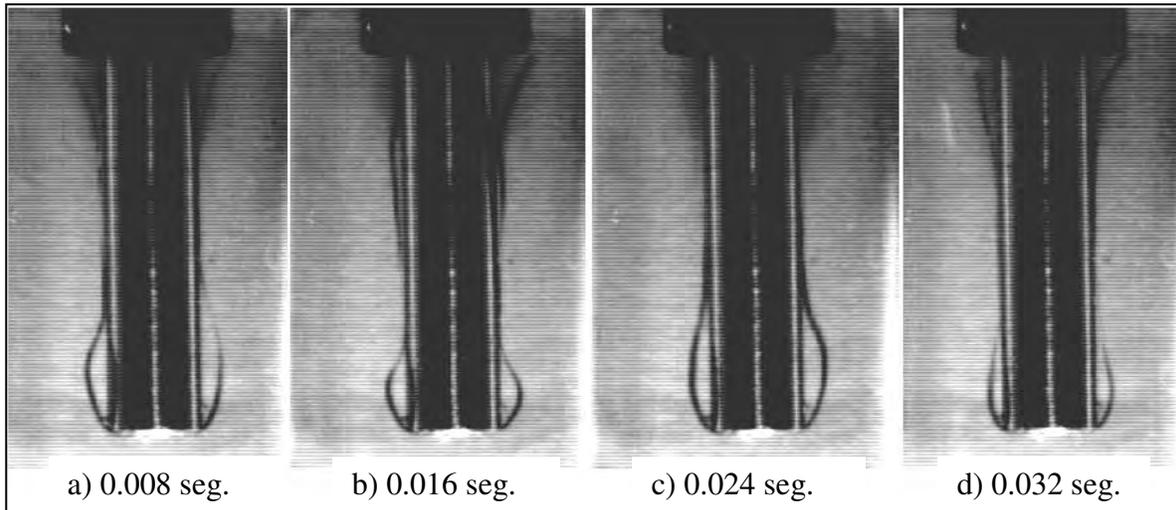


Figura 4.3. -Imágenes de listones sujetos a la base de probetas cilíndricas de cara plana para agua circulando a una velocidad de 0.40 m/s en un ducto de 44 mm de diámetro interno.

Como se puede ver en la figura 4.4, la oscilación de los listones a lo largo del cilindro se incrementa cuando el fluido tiene una velocidad de 0.60 m/s (comparar figuras 4.2 (b) y 4.3 (b)), alcanzando un comportamiento caótico como el mostrado en la figura 4.4 (d). Además, en comparación con las separaciones de los listones en la base del cilindro en las imágenes de la figura 4.3, se puede ver que en las imágenes de la figura 4.4 los listones se separan de forma no simétrica, es decir, la separación del listón derecho en la figura 4.4(c) es totalmente diferente en forma a la que presenta el listón izquierdo en esa misma imagen.

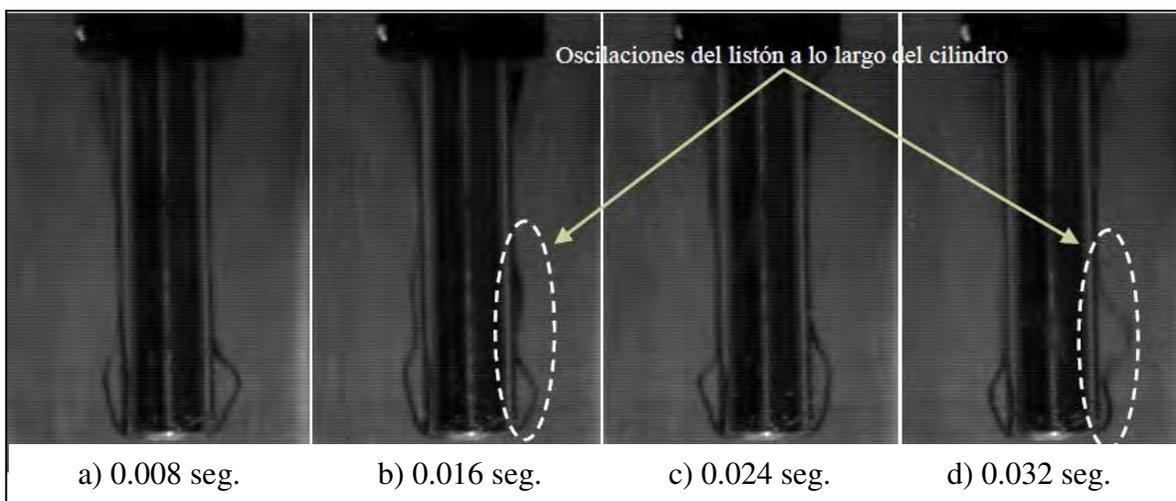


Figura 4.4.- Imágenes de listones sujetos a la base de probetas cilíndricas de cara plana para agua circulando a una velocidad de 0.60 m/s en un ducto de 44 mm de diámetro interno.



También es importante que se observe en las imágenes de la figura 4.3 que los listones presentan separaciones suaves, con máximos casi al centro de la longitud de la separación, mientras que en las imágenes de la figura 4.4 los máximos se observan en puntos más cercanos a la terminación de la oscilación, es decir, ésta no es simétrica.

Aunque la experimentación con listones trazadores deja clara evidencia de la separación de las líneas de corriente en el vértice de la cara plana, no se obtuvo prueba de la formación de flujo re-circulatorio en ésta zona, tal como lo indica la literatura de separación de capa límite en otro tipo de aplicaciones.

Por lo anterior, se desarrollaron varios procedimientos experimentales tratando de evidenciar el flujo re-circulatorio en la zona de separación mostrada por los listones trazadores. El primer procedimiento que se ensayó consistió en inyectar tinta mediante un tubo capilar de 1 mm de diámetro interno, cuya boca se localizaba muy cerca de la cara plana inferior de la probeta cilíndrica. La trayectoria que marcó la tinta, para un experimento con agua a temperatura ambiente fluyendo a 0.4 m/s, se observa en la figura 4.5.

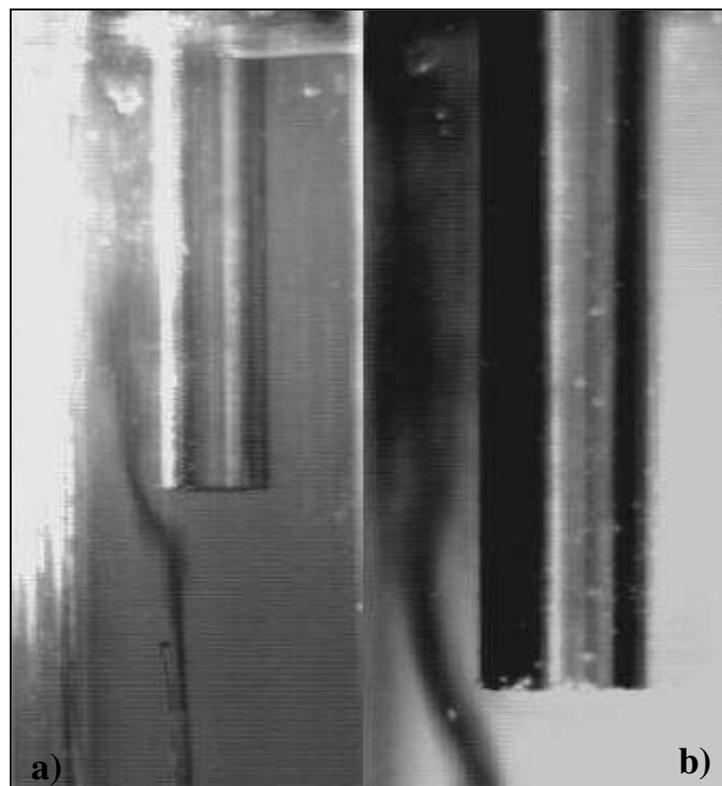


Figura 4.5.- Imágenes de los experimentos de inyección de tinta cerca de la base de una probeta cilíndrica de cara plana sumergida en un ducto de 44 mm de diámetro con agua, a temperatura ambiente, circulando a una velocidad de 0.40 m/s: (a) vista del capilar y la tinta; (b) detalle de la trayectoria de la tinta.



Como se puede observar en la figura 4.5(a), la inyección de tinta se realizó usando un tubo capilar cuya salida estaba muy cerca de la cara plana inferior de la probeta cilíndrica. En la imagen de la figura 4.5 (b) reafirma la observación de la separación de las líneas de corriente en la parte inferior de la probeta. Estos experimentos no permitieron visualizar al flujo re-circulatorio que se espera en la zona de separación del flujo.

Otra de las pruebas consistió en mantener la probeta en la posición de trabajo y posteriormente encender la bomba a 60 lt/ min y temperatura ambiente (figura 4.6).

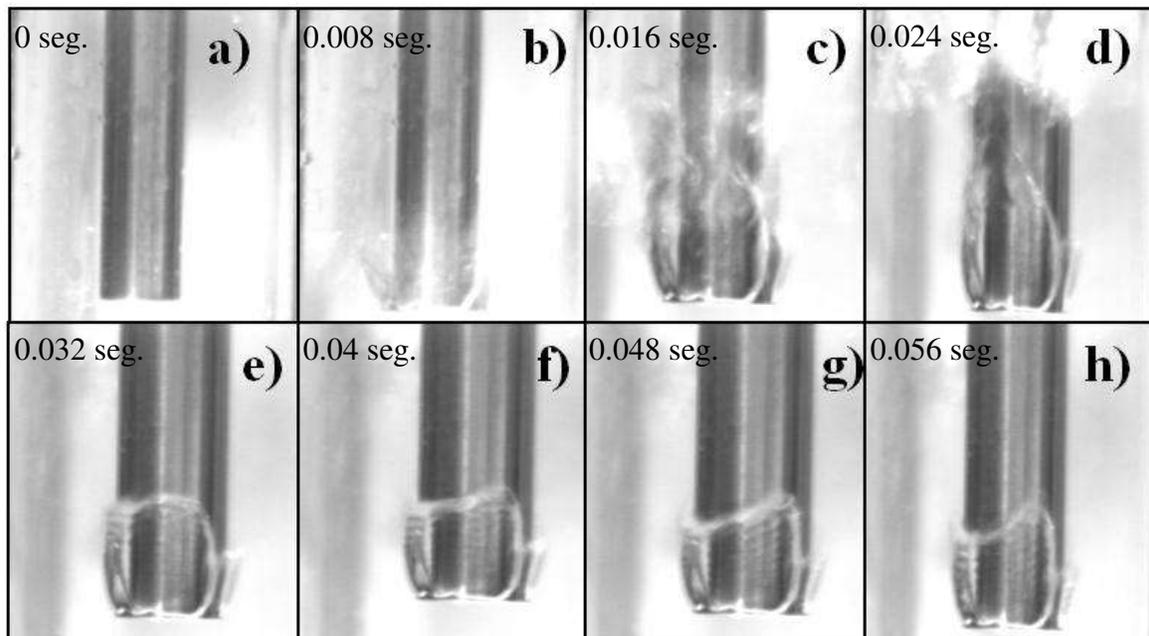


Figura 4.6.-Aire atrapado en la base de la probeta plana.

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 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 4.6). 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 4.6 se grabó a 60 fps y una resolución de 512x 480. En la figura 4.6 c) y d) se muestra que la probeta no es mojada instantáneamente. Y en las imágenes 4.6 e)-h) queda atrapada una burbuja de aire, en la cual se observan unas ondulaciones alrededor.



4.3.2- Probeta semicircular.

También se procedió a realizar experimentos con listones de celofán para visualizar a las líneas de corriente alrededor de la probeta semicircular (figura 4.7).

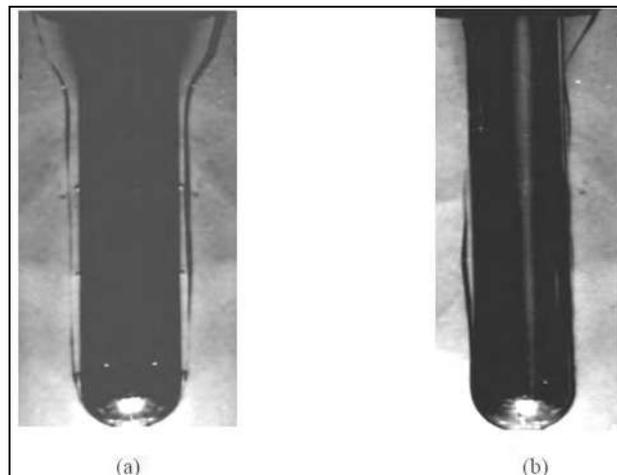


Figura 4. 7.- Imágenes de listones sujetos a la base de las probetas cilíndricas de punta semiesférica para agua circulando, en un ducto de 44 mm de diámetro interno, a una velocidad de: a) 0.20 m/s y b) 0.60 m/s.

La figura 4.8 muestra listones de celofán pegados a la base de las probetas de punta semiesférica con la finalidad de trazar las líneas de corriente y visualizar el comportamiento del flujo. Para una velocidad de 0.2 m/s, los listones se mantienen paralelos a lo largo de toda la base lateral del cilindro (ver Figura 4.7(a)). Cuando la velocidad del agua se incrementa a 0.6 m/s la hidrodinámica del sistema provoca que, en la parte baja de la probeta, el listón de celofán esté pegado a la cara lateral del cilindro mientras que en la parte superior de la probeta se pueden observar separaciones suaves de los listones (ver figura 4.7 (b) y comparar con figura 4.7 (a)).

Los resultados de estos experimentos demuestran que la probeta de punta semiesférica tiene una mejor hidrodinámica que la que presenta la probeta de cara plana (comparar figura 4.8 con figuras 4.2 y 4.4).

A continuación se muestran los resultados de experimentos de inyección de tinta mediante un tubo capilar de 1 mm de diámetro interno, cuya boca se localizaba muy cerca de la punta semiesférica de la probeta cilíndrica (figura 4.8).

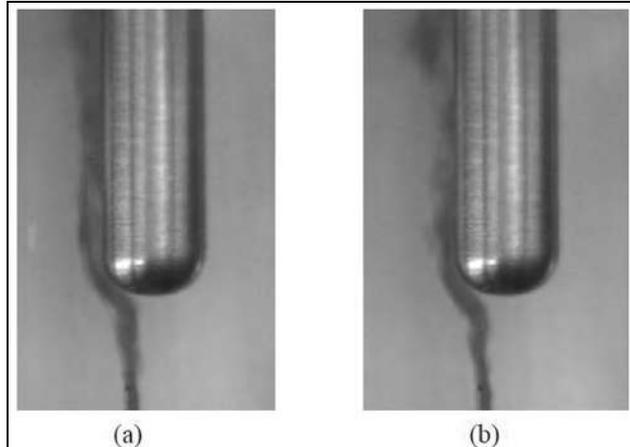


Figura 4.8.- Imágenes de los experimentos de inyección de tinta cerca de la punta semicircular de una probeta que es sumergida en un ducto de 44 mm de diámetro con agua, a temperatura ambiente, circulando a una velocidad de: (a) 0.2 m/s y (b) 0.60 m/s.

En la figura 4.8 se muestra la trayectoria que marcó la tinta, para un experimento con agua a temperatura ambiente fluyendo a diferentes velocidades. La imagen de la figura 4.8 (a) reafirma la observación de líneas de corriente paralelas a la cara lateral del cilindro de punta semiesférica (figura 4.7 (a)). También se observa que en la figura 4.8(a) la turbulencia que se genera alrededor de la probeta es pequeña comparada con la que se presenta en la figura 4.8 (b).

Este experimento tampoco permitió visualizar ningún cambio en la hidrodinámica alrededor de la punta semiesférica de la probeta.



4.3.3.-Probeta cónica.

A continuación se presentan los resultados de los experimentos con listones de celofán en el sistema a temperatura ambiente para visualizar a las líneas de corriente alrededor de la probeta de punta cónica (figura 4.9).

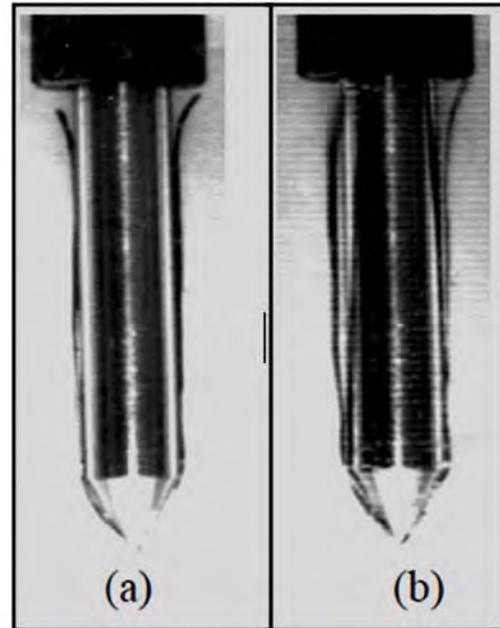


Figura 4. 9.- Imágenes de listones sujetos a la base de las probetas cilíndricas de punta cónica para agua circulando, en un ducto de 44 mm de diámetro interno, a una velocidad de: a) 0.20 m/s y b) 0.60 m/s.

La figura 4.9 muestra imágenes de listones de celofán pegados a la base de las probetas de punta cónica con la finalidad de “trazar” las líneas de corriente y visualizar el comportamiento del flujo. Para una velocidad de 0.2 m/s, los listones se mantienen paralelos a lo largo de toda la base lateral del cilindro (figura 4.9 (a)). Cuando la velocidad del agua se incrementa a 0.6 m/s, la hidrodinámica del sistema provoca que, en la parte alta de la probeta, el listón de celofán se desprege ligeramente de la cara lateral del cilindro.

Los resultados de estos experimentos demuestran que la probeta de punta cónica tiene un comportamiento más aerodinámico comparado con el que presenta la probeta de punta semiesférica y muy superior al de la probeta de cara plana.



4.4.- Análisis todos los termopares en estado no-isotérmico.

Una vez que se analizó la hidrodinámica alrededor cada una de las probetas estudiadas isotérmicamente, ahora se procede al análisis de los resultados obtenidos en estado no-isotérmico.

El método más empleado para la caracterización del proceso de temple es mediante la utilización de curvas de enfriamiento y de rapidez de enfriamiento. Las curvas se obtienen templando una probeta y midiendo la temperatura en función del tiempo por medio de termopares insertados en el interior del sólido.

En la figura 4.10 se muestra la curva de enfriamiento de una de las pruebas, 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 CTT (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. Este tipo de curvas son las que se ponen de los artículos publicados por los japoneses. Es por esto que se obtiene la curva de rapidez de enfriamiento calculando la primera derivada de la temperatura con respecto al tiempo. 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.

Por lo anterior nos auxiliaremos en las curvas de rapidez de enfriamiento, ya que éstas nos proporcionan una mayor información.

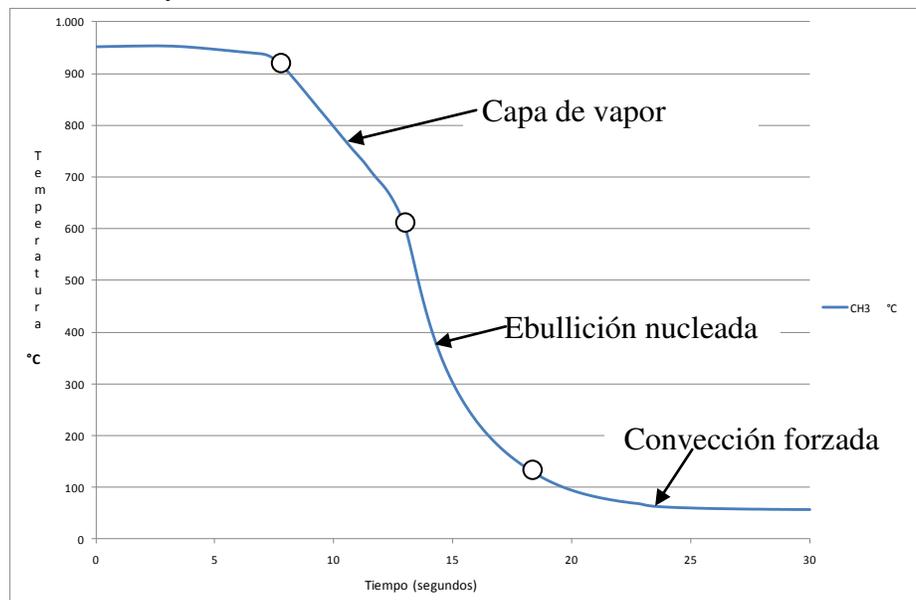


Figura 4.10.- Curva de enfriamiento.



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 4.11 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 una de las cosas nuevas que se ha encontrado debido 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 (este se toma a 300 °C como se muestra en la figura 2.7). El punto que delimita al fenómeno de ebullición nucleada de la convección forzada no ha sido definido exactamente en ninguno de los artículos, en la mayoría de estos solo se hace referencia a este.

El punto E es donde algunos de los autores dicen que rompe la capa de vapor, pero como se verá más adelante ese no es el punto 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.

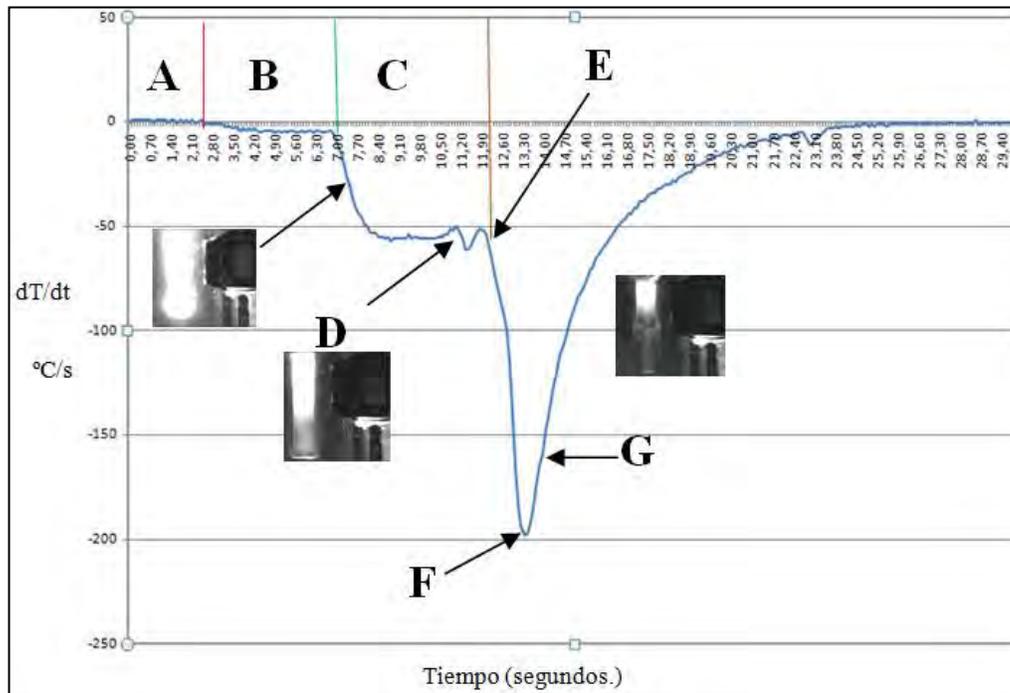


Figura 4. 11.- Partes identificadas de una curva de rapidez de enfriamiento.

El análisis de los resultados tanto para los datos adquiridos por los termopares como para las imágenes adquiridas con la cámara de alta velocidad se ha realizado para las tres geometrías; de base plana, semicircular y cónica, utilizando las condiciones de velocidad del flujo de 0.2 m/s, 0.4 m/s y 0.6 m/s y la temperatura del medio de enfriamiento (agua) a 60 °C.

4.1.1-Curvas de rapidez de enfriamiento.

En las siguientes figuras (4.12, 4.18 y 4.26) se comparan las curvas de rapidez de enfriamiento utilizando agua a 60 °C con flujos de 0.2, 0.4 y 0.6 m/s en corriente libre. Esto con el objetivo de tener una idea del comportamiento de este tipo de curvas cuando hay un cambio del flujo. También se analiza la forma de éstas curvas cuando la probeta tiene diferente geometría en la base. Las curvas se pusieron de tal forma que todas comiencen un segundo antes de que la probeta entre al medio de temple y la escala de rapidez de enfriamiento es la misma para poder hacer así una mejor comparación. Se utilizaron los termopares que están próximos a la superficie.

4.4.1.1.-Probeta plana.

En la figura 4.12 se observa que cuando el flujo del fluido es relativamente pequeño (figura 4.12(a)), si se traza una línea recta en cada uno de los termopares pasando por la máxima rapidez de enfriamiento, se observa que todos tocan ésta línea.

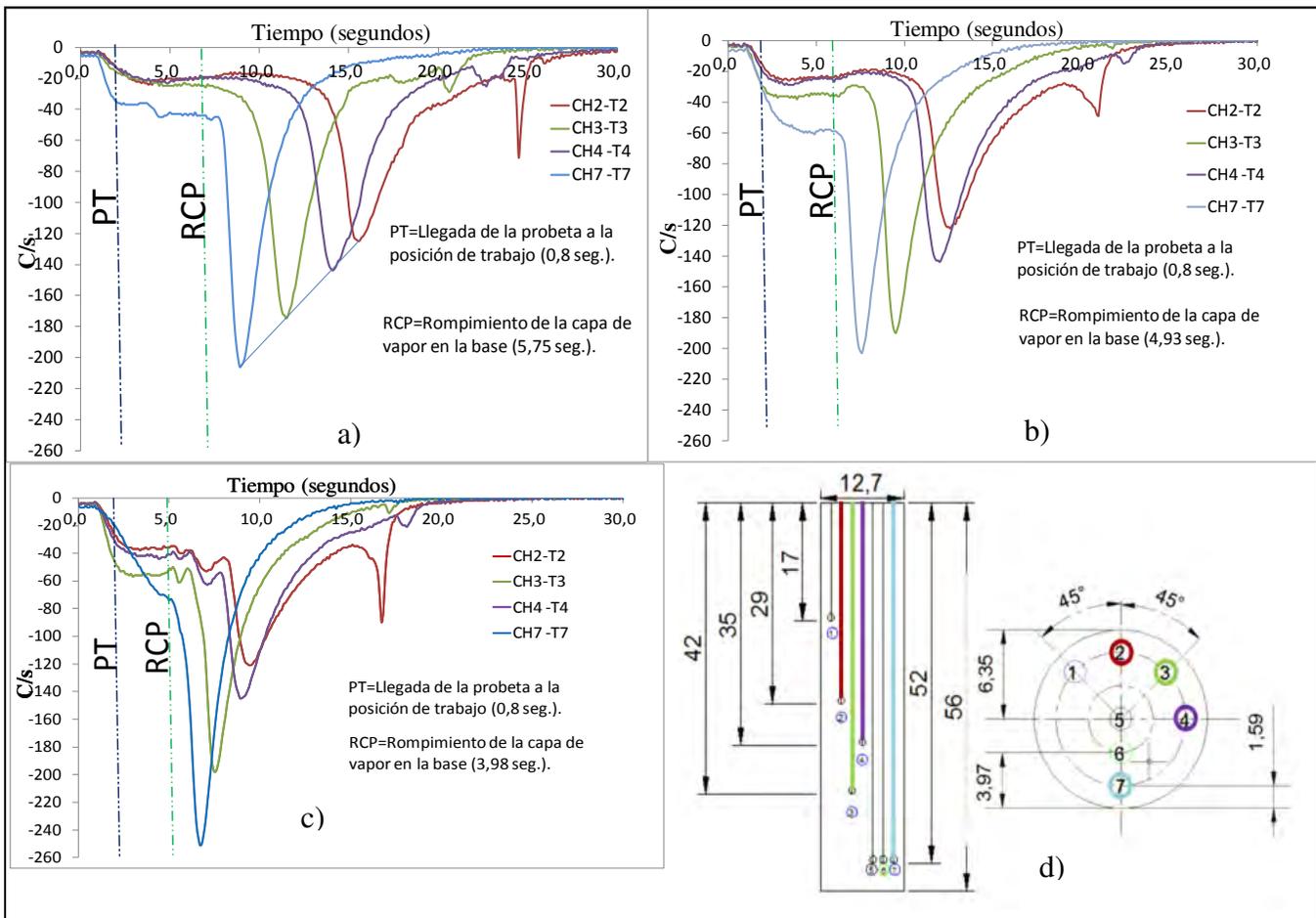


Figura 4. 12.- Curvas de rapidez de enfriamiento de la probeta plana con agua a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s, c) 0.6m/s y d) posición de los termopares. El tiempo se toma en cuenta desde que la probeta entra en contacto con el medio de temple.

Comprobando con esto que la estabilidad de las líneas de corriente mostradas en las pruebas en estado isotérmico a 60 °C y 0.2 m/s (figura 4.2) se refleja en los valores obtenidos en la curva de la figura 4.12 (a). Las figuras 4.12 b) y 4.12 c) no presentan el mismo comportamiento debido a las inestabilidades (oscilaciones de los listones) claramente mostradas a 60 °C y 0.4 m/s (figura 4.3), 60 °C y 0.6 m/s (figura 4.4), y a la burbuja de aire atrapada en la base de la probeta plana (figura 4.6).

Los puntos mostrados en la figura 4.12 como PT y RCP representan cuando la probeta llega a la posición de trabajo (PT) y cuando rompe la capa de vapor en la base (RCP).

Cuando se tienen condiciones de 60 °C y 0.2m/s (figura 4.13 (a)), la capa de vapor tarda en romper 5.75 segundos, mientras que para 60 °C y 0.4m/s (figura 4.13 (b)) ésta tarda en romper 4.93 segundos y para 60 °C y 0.6m/s (figura 4.13 (c)) la capa rompe a los 3.98 segundos. Los tiempos se miden desde que la probeta entra en contacto con medio de temple.

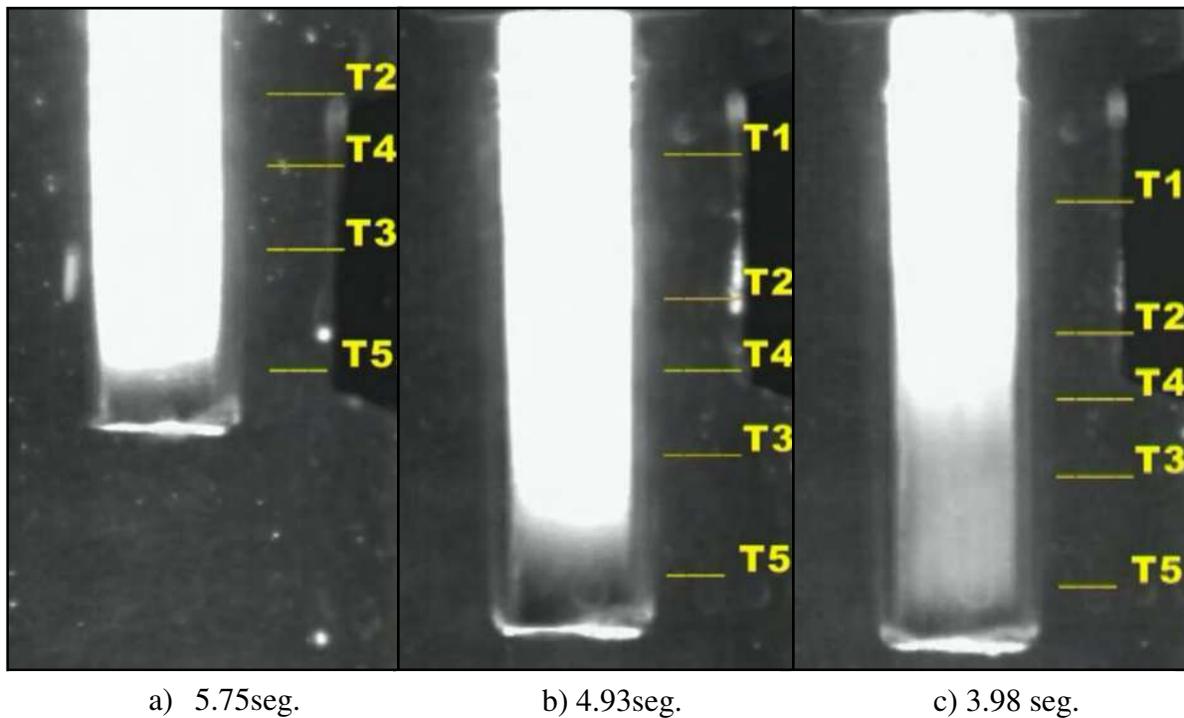


Figura 4. 13.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta plana con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. En el momento en el que rompe la capa de vapor. El tiempo se mide desde que la probeta entra al tubo y tiene contacto con el medio de enfriamiento en todos los casos.

En la figura 4.13 se observa el momento en que rompe la capa de vapor, mostrándose que en ese momento se presentan gradientes de temperatura cerca de la base de la probeta, estos gradientes hacen que la temperatura no sea uniforme en el interior del sólido y se identifican claramente debido a su cambio de color longitudinal en la escala de grises. En la figura 4.13 a) el gradiente es pequeño, a medida que se aumenta el flujo el gradiente va en aumento. El máximo gradiente se presenta en la figura 4.13 c).

Los gradientes mostrados en las figuras 4.13 b) y 4.13 c) se reflejan en las curvas 4.12 b) y 4.12 c), las cuales no tienen un comportamiento estable, es decir los eventos caóticos que suceden en la superficie de la probeta son captados claramente por cada uno de los termopares.

Debido a que la capa de vapor rompe por la parte de la base de la probeta y asciende hacia la superficie por medio del frente de mojado, los termopares que captan la disminución de temperatura son los que se encuentran cercanos a la base.

La capa de vapor más estable se muestra a la condición de 60 °C y 0.2m/s y la rapidez de enfriamiento en ésta capa de vapor muestra un patrón constante de -20 °C/s para los termopares T2, y T4, y -60 °C/s para el termopar T7. Para las condiciones de 60 °C a 0.4m/s y 0.6m/s la capa de vapor se vuelve más inestable debido a las condiciones hidrodinámicas presentadas en la superficie y se observan como una serie de fluctuaciones en la zona de capa de vapor mostradas en las figuras 4.12 b) y 4.12 c).

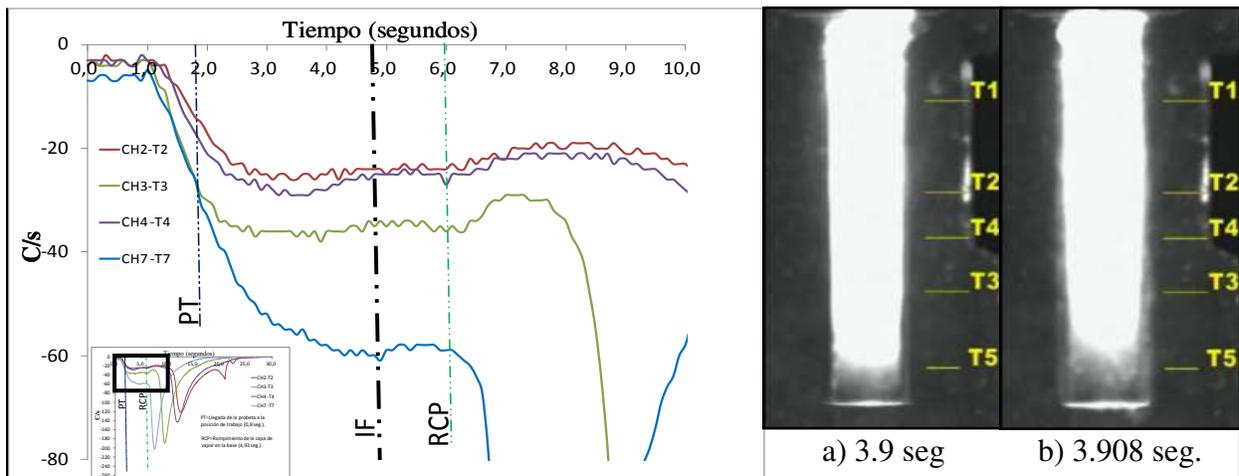


Figura 4. 14.- Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta plana con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: 0.4m/s. a) instante antes de la explosión de la capa de vapor y b) explosión de la capa de vapor.

Éstas fluctuaciones de la capa de la capa de vapor están relacionadas con explosiones que ocurren un instante antes de que rompa la capa de vapor mostradas en las figuras 4.14 y



4.15. En la grafica de la figura 4.14 se marca con las letras IF el inicio de las fluctuaciones en la capa de vapor y corresponde a la figura 4.14 a) donde se observa que el tiempo es de 3.9 segundos medidos desde que la probeta toca el medio de temple.

Las explosiones provocan que haya un aumento repentino del espesor de la capa de vapor (figura 4.14 b) y se refleja en las curvas por medio de un aumento pequeño en el pico de las fluctuaciones, las cuales se ven más claramente entre las zonas IF y RCP de la grafica de la figura 4.14.

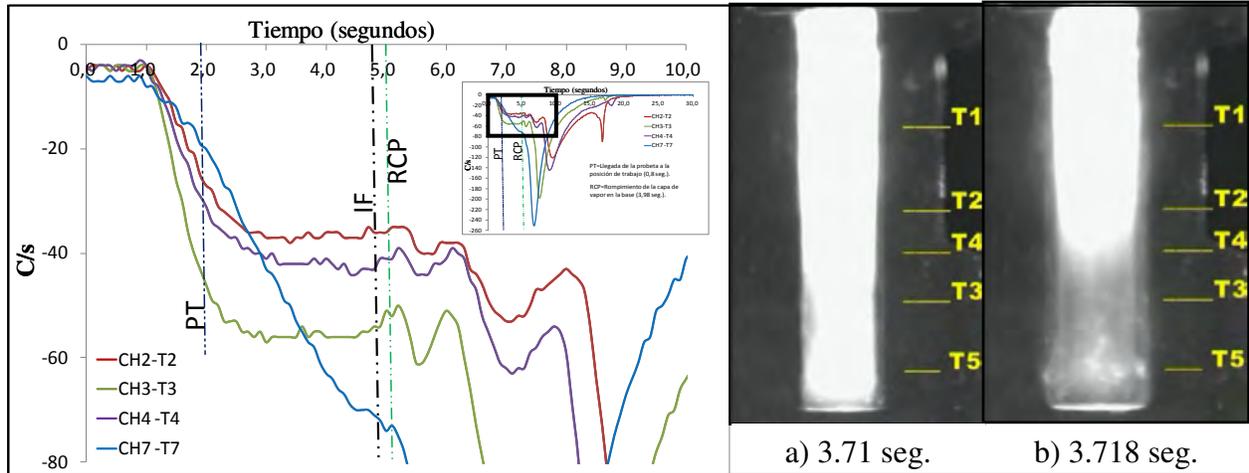
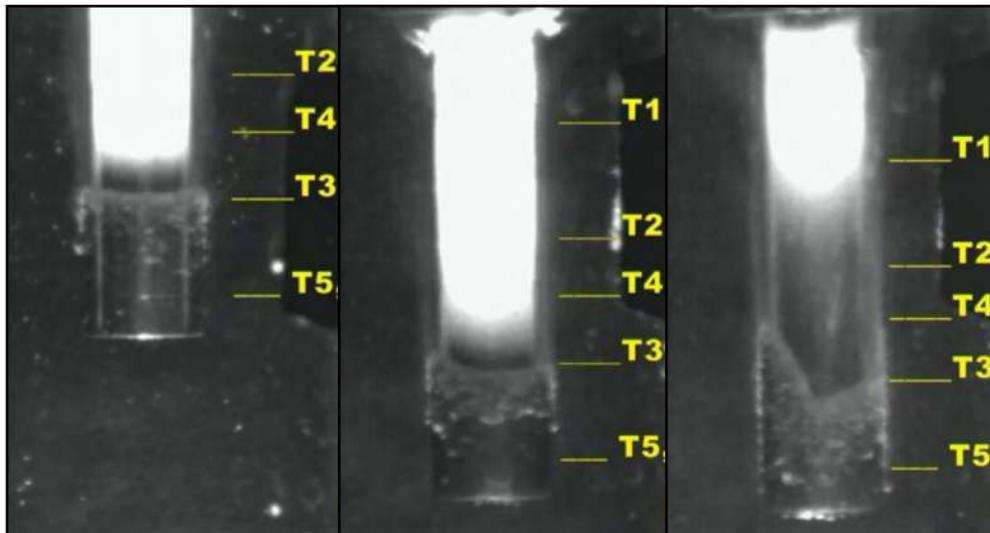


Figura 4. 15.- Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta plana con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: 0.4m/s. a) instante antes de la explosión de la capa de vapor y b) explosión de la capa de vapor.

En la grafica de la figura 4.15 se marca con las letras IF el inicio de las fluctuaciones en la capa de vapor y corresponde a la figura 4.15 a) donde se observa que el tiempo es de 3.71 segundos medidos desde que la probeta toca el medio de temple. Las explosiones provocan que haya un aumento repentino del espesor de la capa de vapor (figura 4.15 b) y se refleja en las curvas por medio de un aumento pequeño en el pico de las fluctuaciones, las cuales se ven más claramente entre las zonas IF y RCP de la grafica de la figura 4.15. El tiempo de duración de las fluctuaciones es menor que en el que se muestra en la figura 4.14.

En las figuras 4.14 y 4.15 solo se muestran dos imágenes de las explosiones, pero se tienen más imágenes en las que se observa este fenómeno.

En la figura 4.16 se puede ver que conforme se tiene un aumento en el flujo el avance del frente de mojado se hace más inestable cuando rompe la capa de vapor. La mayor inestabilidad del avance del frente de mojado se muestra en la figura 4.16 c), mostrando claramente el que no sigue un comportamiento uniforme hacia la superficie como el caso de la figura 4.16 a).



a) 9.7 seg

b) 7.8 seg.

c) 5.8 seg.

Figura 4. 16.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta plana con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. Mostrando la estabilidad del avance del frente de mojado cuando pasa enfrente del termopar 3.

Por lo anterior, se puede decir que aumentar la velocidad nos garantiza un enfriamiento más rápido, pero con grandes gradientes en el interior del sólido lo cual tendrá grandes repercusiones en la microestructura de la probeta.

En un artículo reportado por Von Bergen [80] se dice que en el temple de una probeta se estaba teniendo demasiada distorsión de las piezas a altos flujos del medio de enfriamiento. La solución para reducir tal distorsión de las piezas fue reducir el flujo del medio de enfriamiento, logrando con esto también una transferencia de calor más uniforme a lo largo de la probeta.

Lo anterior, fortalece nuestras observaciones de que las probetas planas tienen un mejor comportamiento a bajos flujos y no como se supone y no como algunos investigadores suponen, ya que se piensa que a mayores flujos se tiene una mayor rapidez de enfriamiento.



En las graficas de rapidez de enfriamiento (figura 4.17) se muestran los detalles de los dos primeros segundos que es donde se encuentra la zona A para cada uno de los diferentes flujos, la cual indica el momento en que la probeta plana tiene contacto con el medio de enfriamiento. En éstas graficas se muestra que todos los termopares captan el momento cuando la probeta entra en contacto con el medio de temple

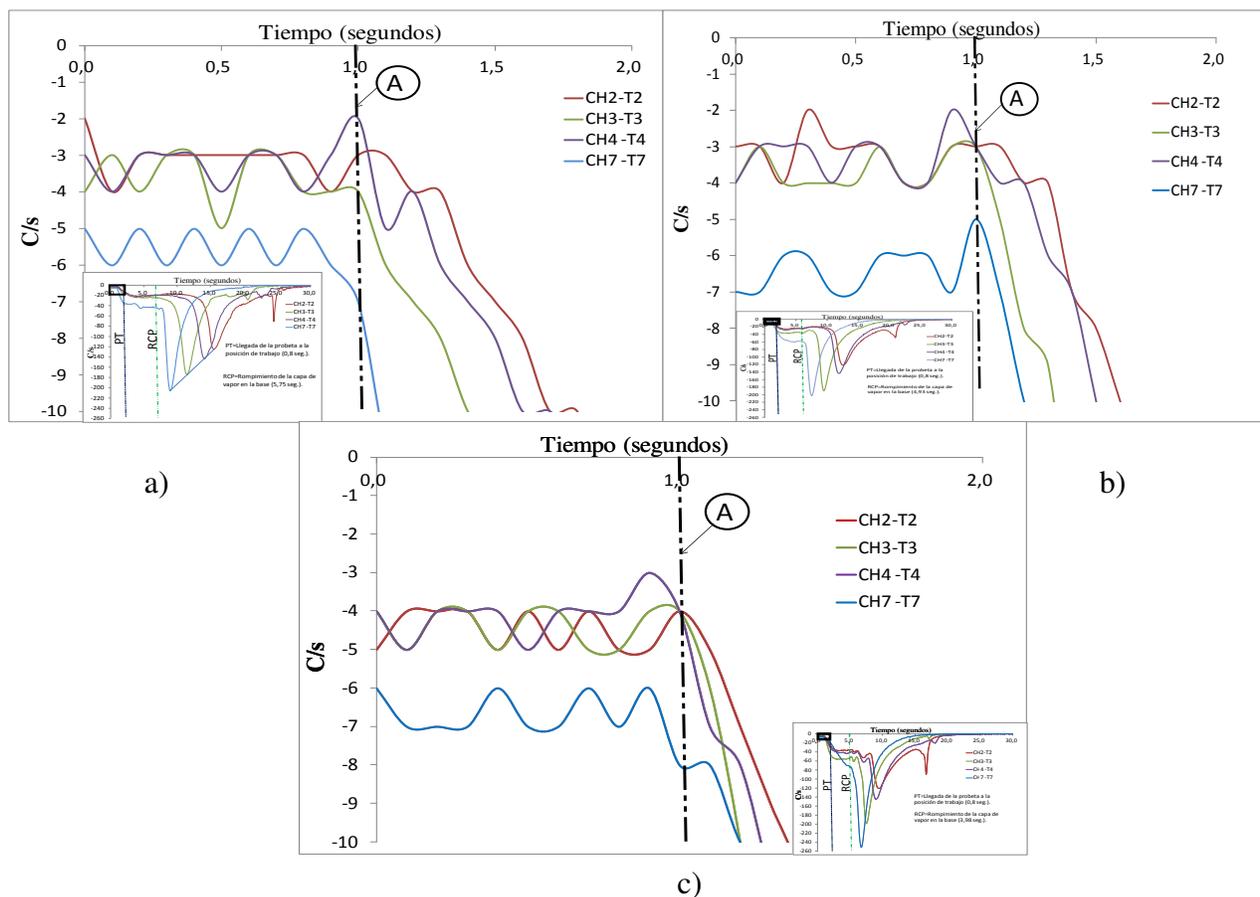


Figura 4. 17.- Graficas con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. Mostrando el punto el detalle del punto A cuando la probeta plana tiene contacto con el medio de enfriamiento.

4.4.1.2.- Probeta semicircular.

La probeta de base semicircular mostrada las curvas de en la figura 4.18 no siguen un patrón específico en la extracción de calor. Se esperaría que los termopares que se encuentran más cerca a la base de la probeta sean los primeros que detecten la máxima rapidez de enfriamiento de la probeta, pero no se sigue este comportamiento en las curvas.

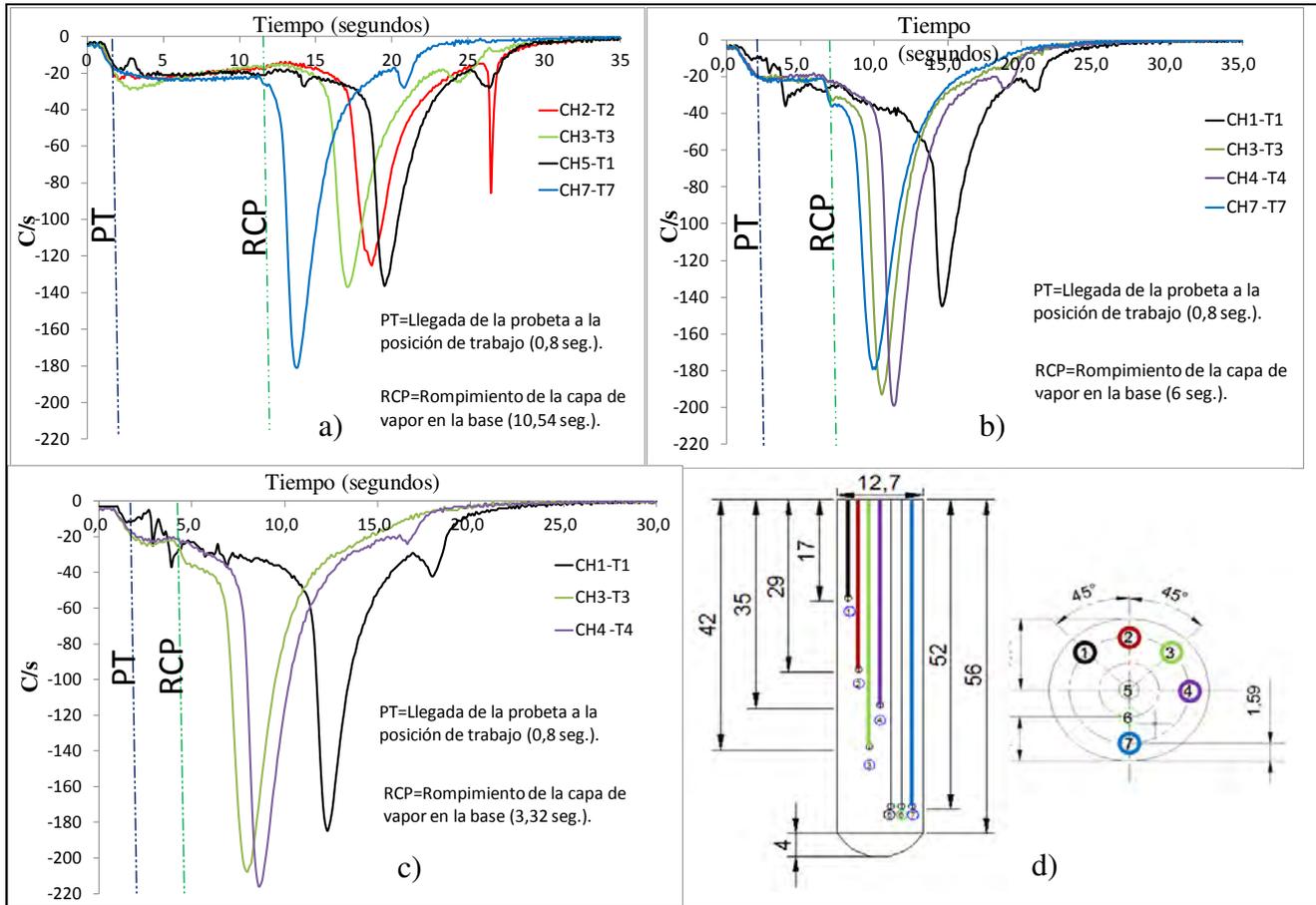


Figura 4. 18.- Curvas de rapidez de enfriamiento de la probeta semicircular con agua a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s, c) 0.6m/s y d) posición de los termopares. El tiempo se toma en cuenta desde que la probeta entra en contacto con el medio de temple.

Debido a que la forma de la probeta semicircular en la base tuvo un buen comportamiento hidrodinámico en las figuras 4.7 y 4.8, se esperaba que las curvas tuvieran una forma parecida a la de la probeta plana de la figura 4.12 a).

De la figura 4.18 se esperaría que el orden en que se detecta la máxima rapidez de enfriamiento fuera primero el termopar T7 seguido de lo termopares T3, T4, T2 y T1 en todos los casos. Sin embargo en la figura 4.18 a) el orden si es congruente pero la máxima

rapidez de enfriamiento debería ser mayor en el termopar 2 que en el termopar 1. En la figura 4.18 b) el orden de la máxima rapidez de enfriamiento es: T4, T3, T7 y T1. Para la figura 4.18 c) el orden de enfriamiento es: T4, T3 y T1. En las figuras 4.18 b) y 4.18 c) el comportamiento de las curvas de rapidez de enfriamiento de la probeta semicircular es similar.

Cuando se tienen condiciones de 60 °C y 0.2m/s (figura 4.19 (a)), la capa de vapor tarda en romper 10.54 segundos, mientras que para 60 °C y 0.4m/s (figura 4.19 (b)) ésta tarda en romper 6 segundos y para 60 °C y 0.6m/s (figura 4.19 (c)) la capa rompe a los 3.32 segundos. Los tiempos se miden desde que la probeta va entrando al medio de temple.

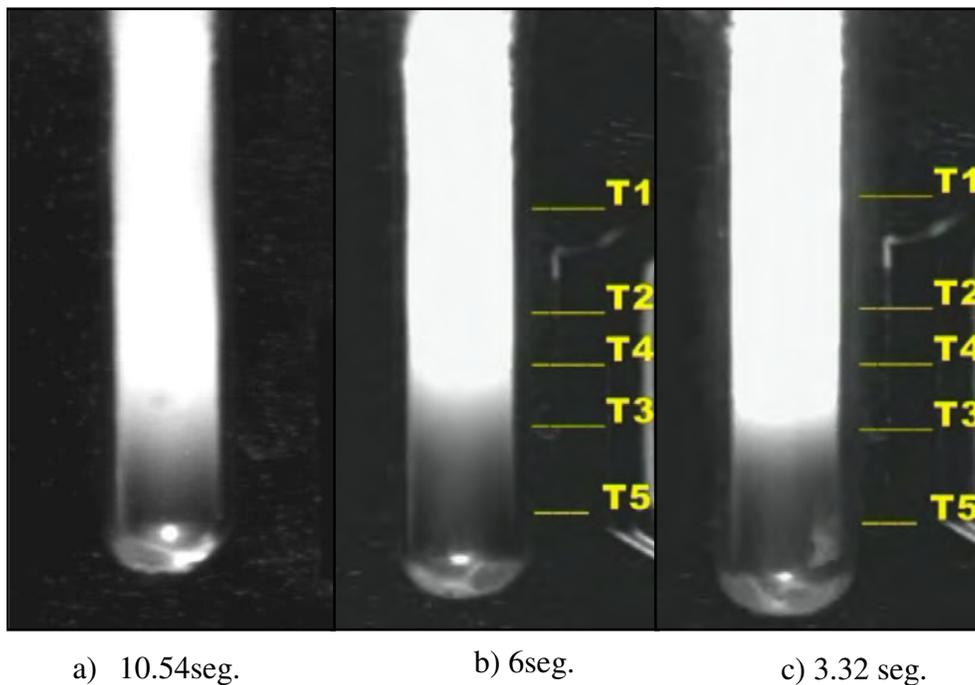


Figura 4.19.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta semicircular con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. En el momento en el que rompe la capa de vapor. El tiempo es medido desde que la probeta entra a el tubo y tiene contacto con el medio de enfriamiento en todos los casos.

En la figura 4.19 se ve el momento en que rompe la capa de vapor, observándose que en ese momento se presentan gradientes de temperatura cerca de la base de la probeta (al igual que en la probeta plana), estos gradientes hacen que la temperatura no sea uniforme en el interior del sólido y se identifican claramente debido a su cambio de color longitudinal en la escala de grises. En la figura 4.19 se observa que el gradiente es parecido en las tres pruebas.

Los puntos mostrados en la figura 4.18 como PT y RCP representan cuando la probeta llega a la posición de trabajo (PT) y cuando rompe la capa de vapor en la base (RCP).

El tiempo que tarda en romper la capa de vapor en la probeta semicircular de las figuras 4.19 a) es demasiado comparado con el de la figura 4.13 a). Mientras que el tiempo que tarda en romper la capa de vapor de la probeta semicircular de las figuras 4.19 (b y c) no varía tanto comparadas con las de la probeta plana (figuras 4.13 (b y c)). Lo que ocurre en la figura 4.19 a) es se debe posiblemente al efecto de bordes aunado con el bajo flujo que hace que el tiempo de rompimiento de la capa de vapor aumente.

La capa de vapor más estable se muestra a la condición de 60 °C y 0.2m/s y el enfriamiento en ésta capa de vapor muestra un patrón constante de -20 °C/s, (muy similar al que presenta la probeta de base plana de la figura 4.12 (a)). Mientras para las condiciones de 60 °C a 0.4m/s (figura 4.18 (b)) y 0.6m/s (figura 4.18 (c)) la capa de vapor se vuelve más inestable, pese a que aparentemente las condiciones hidrodinámicas en estado isotérmico son favorables en este tipo de geometría aerodinámica

En las curvas de la figura 4.18 a), figura 4.18 b) y figura 4.18 c) se muestran fluctuaciones en la zona de capa de vapor instantes antes de que rompa ésta. En ésta probeta se muestran fluctuaciones en todas las pruebas, a diferencia de la probeta plana que nada más ocurren en las condiciones de 60 °C a 0.4m/s (figura 4.12 (b)) y 0.6 m/s (figura 4.12 (c)).

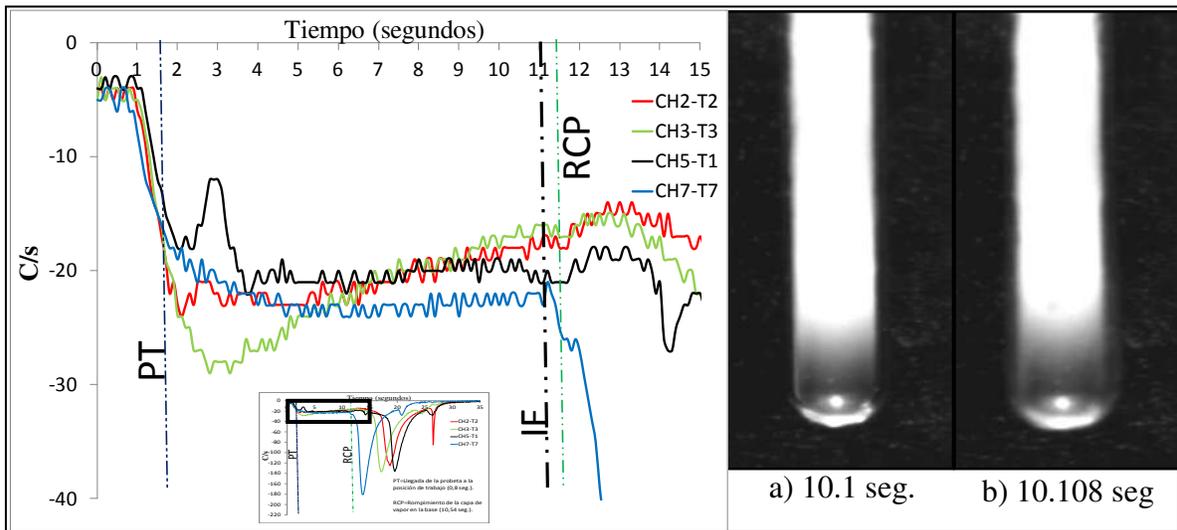


Figura 4. 20.- Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta semicircular con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: 0.2 m/s. a) instante antes de la explosión de la capa de vapor y b) explosión de la capa de vapor.

En las figuras 4.20, 4.21 y 4.22 se muestran los detalles de la zona donde inician las fluctuaciones y tienen la nomenclatura IF (Inicio de las Fluctuaciones), las curvas están acompañadas fotografías. La figura 4.20 a) corresponde a la línea IF de la curva en la figura 4.20, la figura 4.21 a) corresponde a la línea IF de la curva en la figura 4.21 y la figura 4.22 a) corresponde a la línea IF de la curva en la figura 4.22.

Las explosiones provocan que haya un aumento repentino del espesor de la capa de vapor y se refleja en las curvas por medio de un aumento pequeño en el pico de las fluctuaciones.

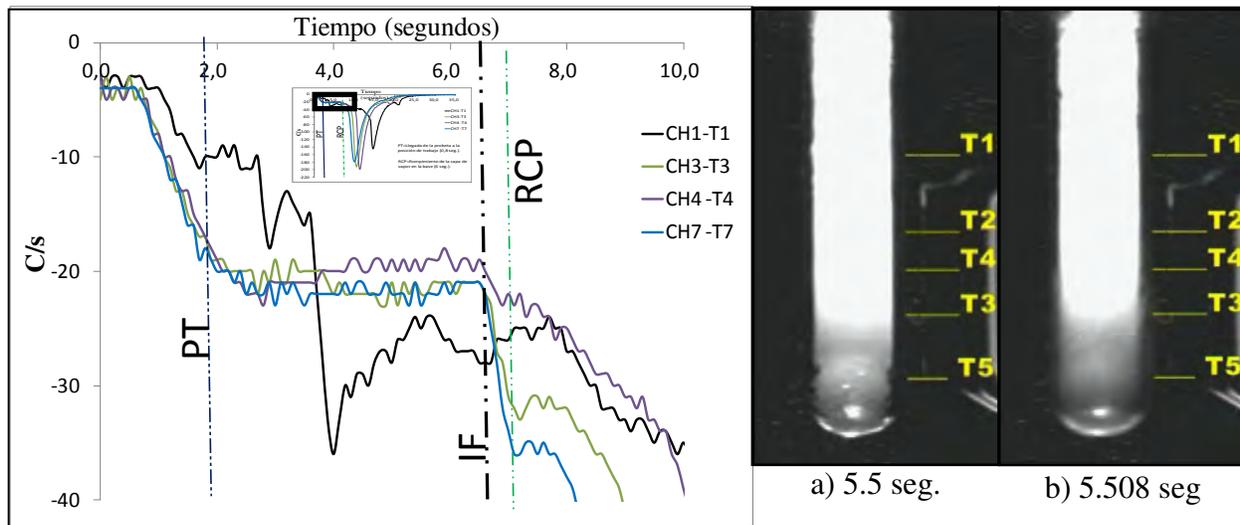


Figura 4. 21.- Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta semicircular con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: 0.4 m/s. a) instante antes de la explosión de la capa de vapor y b) explosión de la capa de vapor.

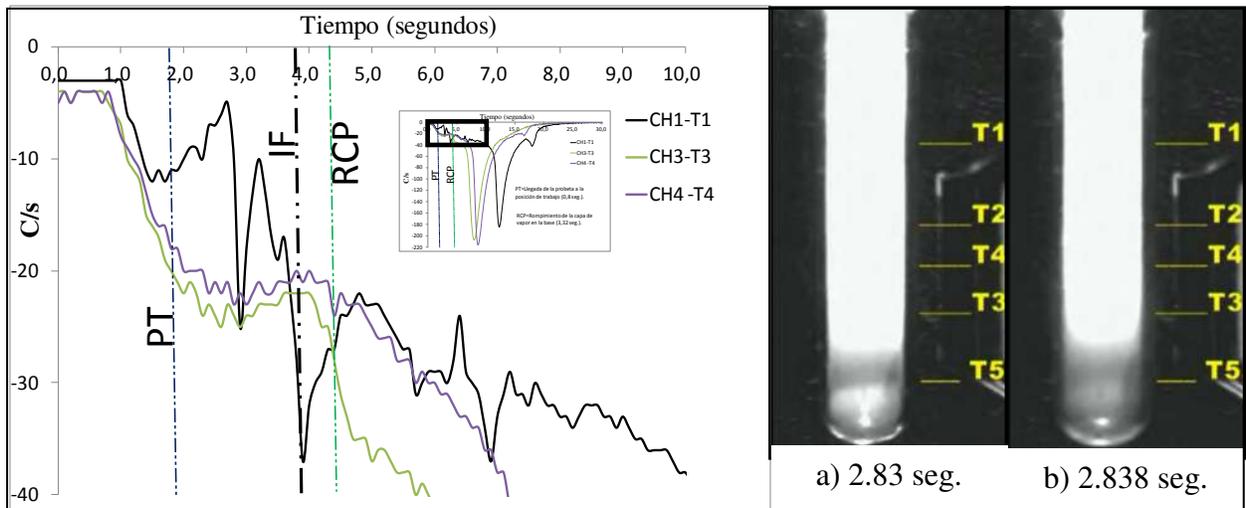


Figura 4. 22.- Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta semicircular con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: 0.2 m/s. a) instante antes de la explosión de la capa de vapor y b) explosión de la capa de vapor.

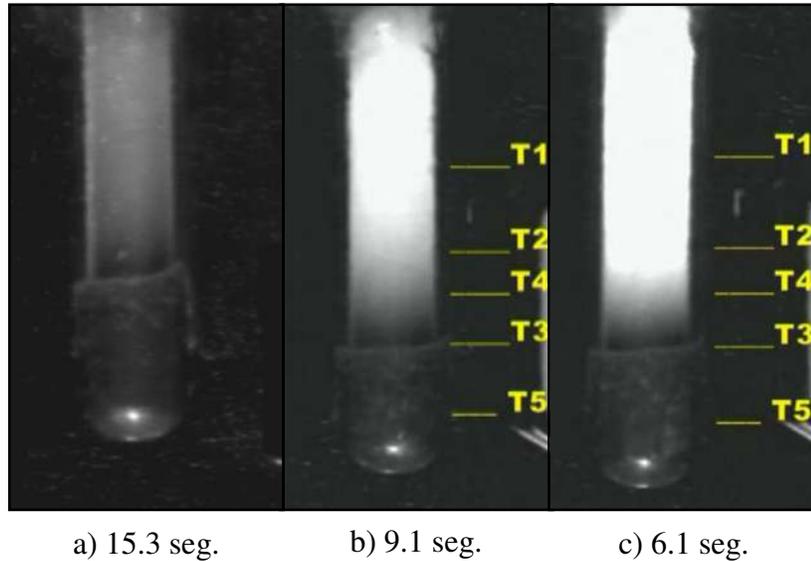


Figura 4. 23.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta semicircular con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. Mostrando la estabilidad del avance del frente de mojado, pasando enfrente del termopar T3.

En la figura 4.23 se puede observar que el avance del frente de mojado es estable para todas las condiciones cuando rompe la capa de vapor. Este avance es más simétrico que el que se muestra para la probeta plana a 60 °C y 0.6 m/s (figura 4.16 c).

La figura 4.23 a) se observa que el color es más oscuro que el de las figuras 4.23 (b y c), y además se identifica (en la figura 4.23 a)) que el color a lo largo probeta es más uniforme, lo que implica un espesor de capa de vapor casi igual. Esto podría explicar porque en la curva de enfriamiento de la figura 4.18 a) los valores de extracción de calor máxima son similares en los termopares T1, T2 y T3.

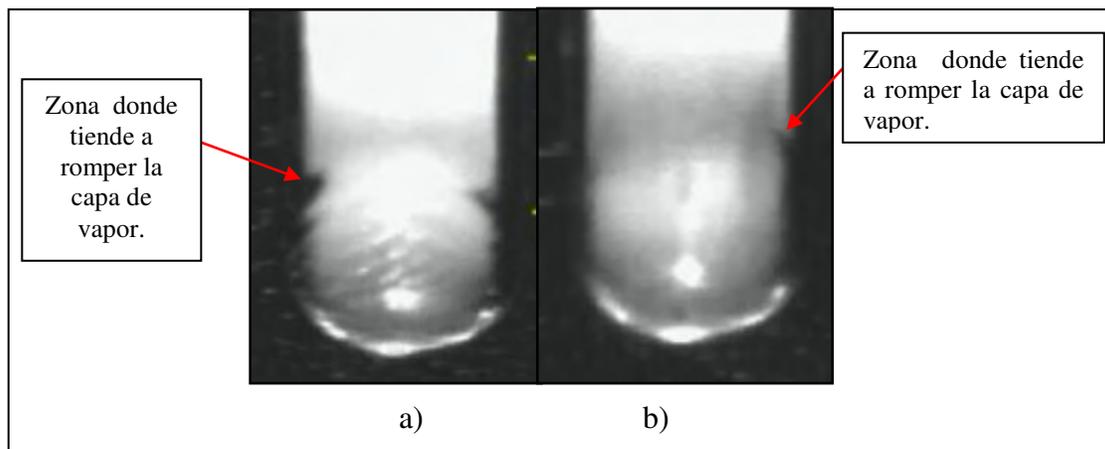


Figura 4.24.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta semicircular con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.4m/s y b) 0.6m/s. Punta de la probeta semicircular.



Narazaki et al [55] ha reportado que los bordes de las probetas tienen una gran influencia en la ruptura de la capa de vapor y son las causantes de esto. En la figura 4.24 se puede observar que como la probeta semicircular no presenta bordes, la capa tiende a romperla en la parte de arriba de la de la base semicircular donde se muestran las flechas de las figura 4.24.

En las graficas de rapidez de enfriamiento (figura 4.25) se muestran los detalles de los dos primeros segundos que es donde se encuentra la zona A para cada uno de los diferentes flujos, la cual indica el momento en que la probeta semicircular tiene contacto con el medio de enfriamiento. En éstas graficas se muestra que todos los termopares captan el momento cuando la probeta entra en contacto con el medio de temple

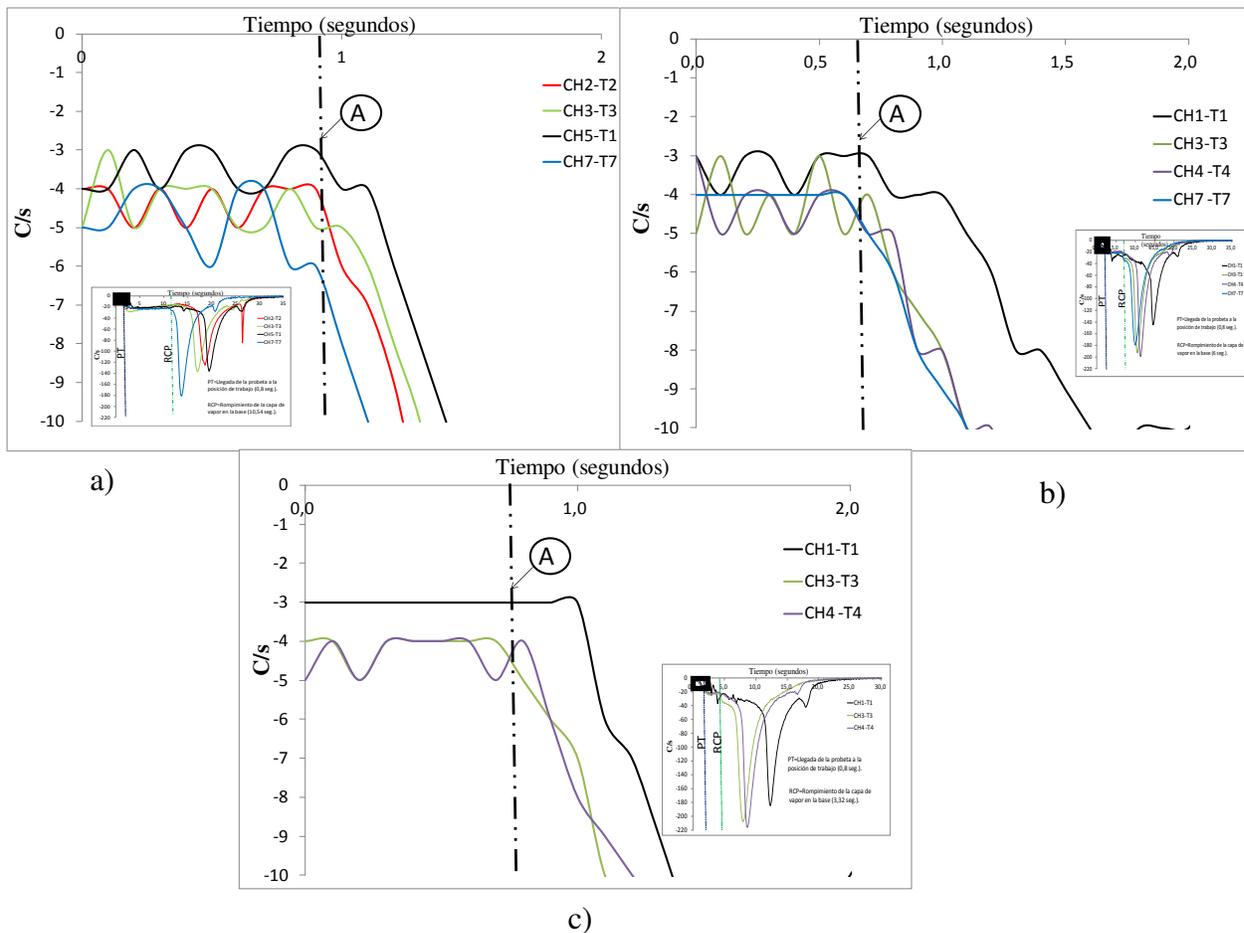


Figura 4. 25.- Graficas con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. Mostrando el punto el detalle del punto A cuando la probeta semicircular tiene contacto con el medio de enfriamiento.



4.4.1.3.- Probeta cónica.

Este tipo de probetas ya se habían estudiado anteriormente por el Prof. Tamura y Tagaya [50] pero en realidad no se dice porque no se le dio un seguimiento al estudio de este tipo de geometrías. Hace poco H. J. Vergara-Hernández, Bernardo Hernández-Morales [6] retomaron el estudio de este tipo de probetas (2009) y en este año (2011) Nikolai Kobasko [81] también comenzó a estudiar este tipo.

De las probetas estudiadas, ésta es la que tiene un mejor comportamiento, ya que como se puede observar en las curvas de rapidez de enfriamiento de la figura 4.26, si se traza una línea ésta toca todos los puntos donde hay una rapidez de enfriamiento máxima en cada termopar. Con esto se podría tratar de predecir de una mejor manera los coeficientes de transferencia de calor y el flux de calor, y por lo tanto también se tendría la información de cómo evolucionó el campo microestructural en el interior del sólido.

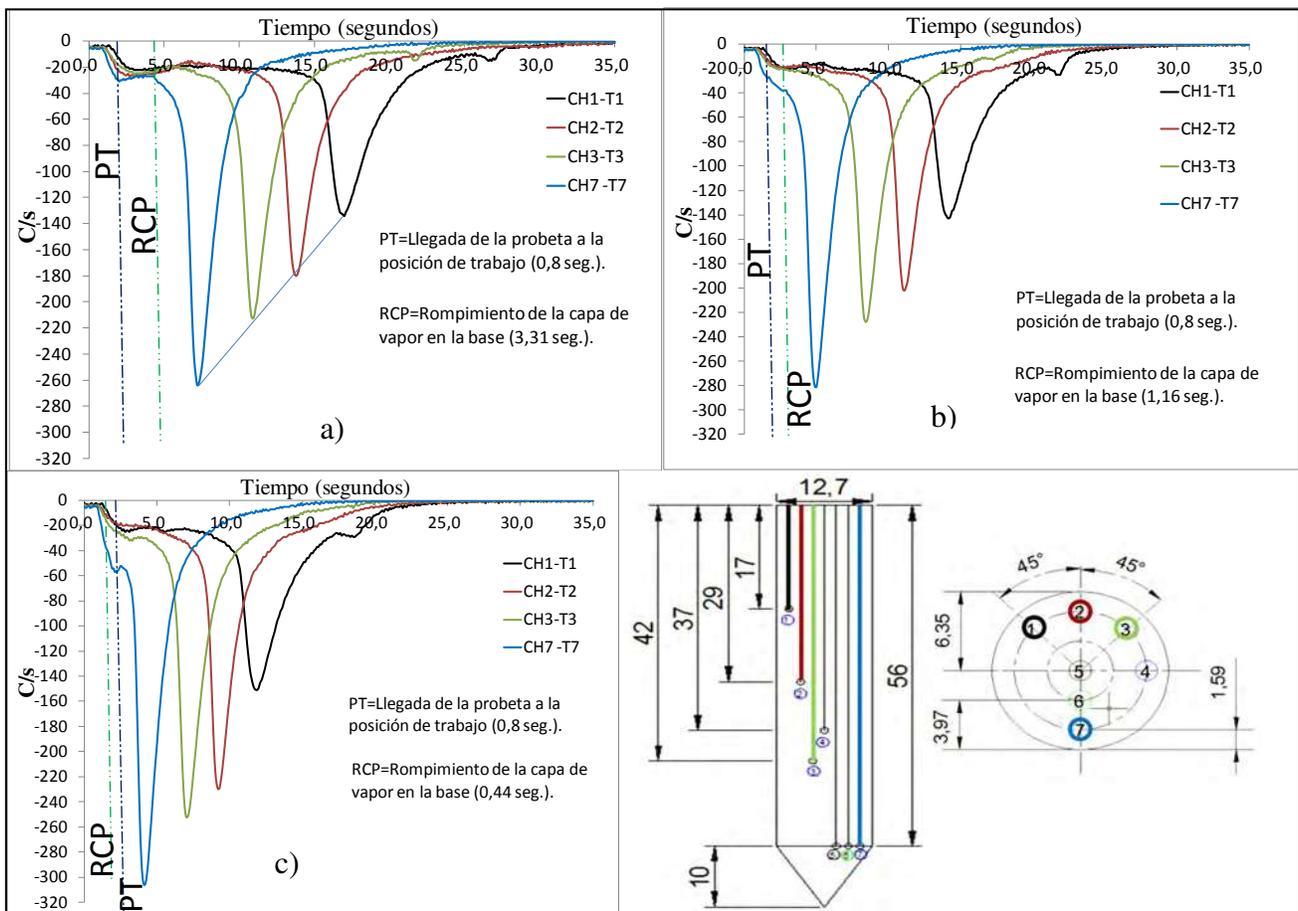


Figura 4. 26.- Curvas de rapidez de enfriamiento de la probeta cónica con agua a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s, c) 0.6m/s y d) posición de los termopares. El tiempo se toma en cuenta desde que la probeta entra en contacto con el medio de temple.



Comprobando con esto que la estabilidad de las líneas de corriente mostradas en las pruebas en estado isotérmico (figuras (4.9)) se refleja en los valores obtenidos en la figura 4.26 (a, b y c).

En las curvas de rapidez de enfriamiento se puede observar que los datos adquiridos si se apegan a lo esperado, es decir, que primero se detecte el enfriamiento en el termopar T7, seguido de los termopares T3, T2 y T1. Por lo que se puede decir que este tipo de probetas controla muy bien cada uno de los fenómenos de ebullición (capa de vapor, ebullición nucleada y convección forzada).

Cuando se tienen condiciones de 60 °C y 0.2m/s (figura 4.27 (a)), la capa de vapor tarda en romper 3.31, mientras que para 60 °C y 0.4m/s (figura 4.27 (b)) ésta tarda en romper 1.16 segundos y para 60 °C y 0.6m/s (figura 4.27 (c)) la capa rompe a los 0.44 segundos. Los tiempos se miden desde que la probeta va entrando al medio de temple.

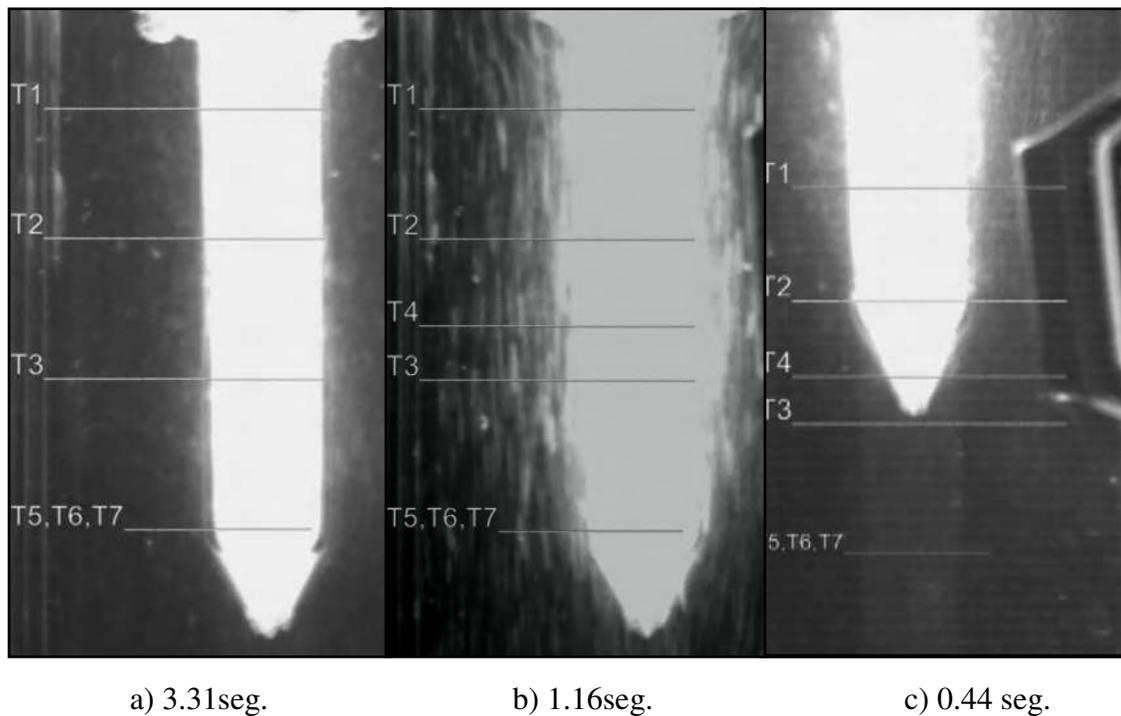


Figura 4. 27.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta cónica con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. En el momento en el que rompe la capa de vapor segundos. El tiempo es medido desde que la probeta entra a el tubo y tiene contacto con el medio de enfriamiento en todos los casos.



En la figura 4.27 (a y b) la capa de vapor comienza a romper cuando la probeta ya está totalmente en la posición de trabajo inmersa en el medio de temple, mientras que para las pruebas de la figura 4.27 (c) este rompimiento de la capa de vapor se realiza cuando la probeta está bajando todavía.

La punta de la probeta de punta cónica actúa como un solo borde donde se concentra el rompimiento de la capa (figura 4.28 a). La probeta punta plana se podría considerar que tiene varios puntos en su base y donde la capa de vapor puede romper al azar por cualquiera de estos puntos (figura 4.28 b).

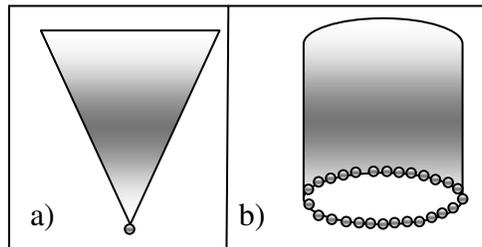


Figura 4. 28.- a) En la probeta de punta cónica hay un solo punto por donde puede romper la capa de vapor, b) mientras que en la cilíndrica se puede considerar que hay varios.

En la figura 4.27 se muestra el momento en que rompe la capa de vapor, observándose que en ésta probeta no se presentan los gradientes de temperatura cerca de la base de la probeta en ninguna de las tres condiciones de experimentación (en la probeta plana y semicircular si se observaron gradientes de temperatura cerca de la base de la probeta). Se dice que no hay gradientes de temperatura ya que con el color claro de la probeta mostrada en la figura 4.28 es homogéneo a lo largo de ésta.

El tiempo que tarda en romper la capa de vapor en la probeta cónica de las figuras 4.27 (a, b y c) es mucho menor que el de la probeta semicircular de las figuras 4.19 (a, b y c) y menor que la probeta plana de las figuras 4.13 (a, b y c).

La capa de vapor estable en ésta probeta de base cónica se muestra para todas las condiciones de experimentación mostradas en la figura 4.27, ésta capa de vapor muestra un patrón constante de $-20\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ para los termopares T1 y T2. La capa de vapor es más estable debido a que las condiciones hidrodinámicas en estado isotérmico son favorables en este tipo de geometría aerodinámica.

Al igual que en las curvas de enfriamiento las probetas plana y semicircular, en la figura 4.26 también muestran unas pequeñas fluctuaciones casi imperceptibles en la zona de capa de vapor instantes antes de que rompa ésta.

Las fluctuaciones se deben igual que en las probetas anteriores a que un instante antes de que la capa de vapor rompa, hay una explosión casi imperceptible, pero analizando los videos se pudo observar que éstas sólo aparecen en una secuencia de tres imágenes seguidas, cada imagen equivale a 0.008 segundos en tiempo real. Recordando que trabajamos con la cámara de alta velocidad a 125fps.

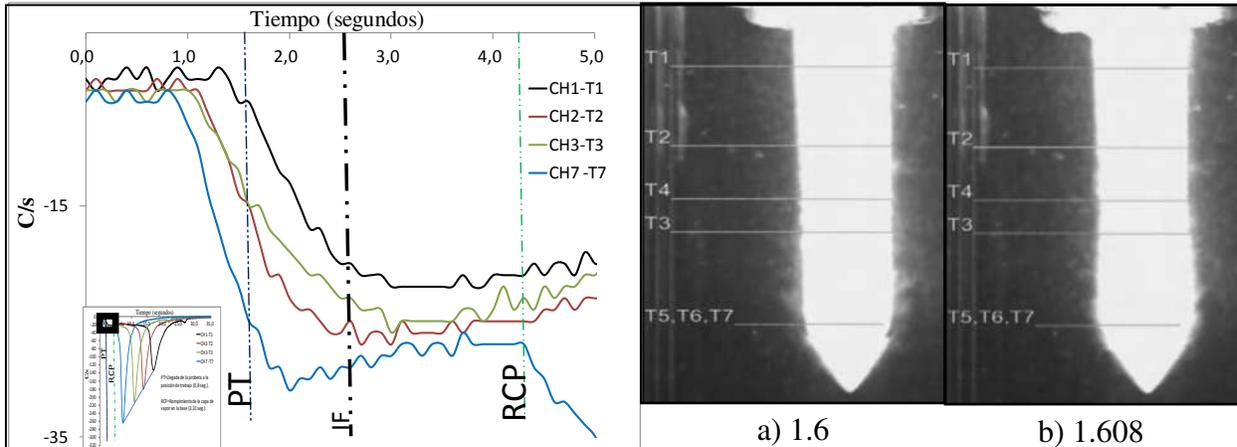


Figura 4. 29.- Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta cónica con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: 0.2 m/s. a) instante antes de la explosión de la capa de vapor y b) explosión de la capa de vapor.

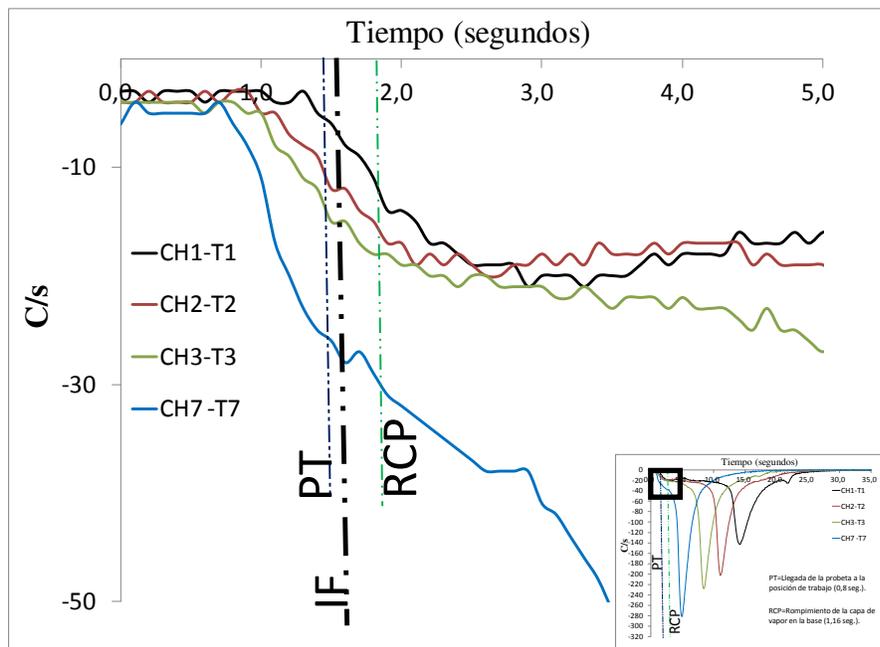


Figura 4. 30.- Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta cónica con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: 0.4 m/s.



En ésta probeta de base cónica fluctuaciones de la capa de la capa de vapor están relacionadas con una explosión que ocurre un instante antes de que rompa la capa de vapor mostradas en las figuras 4.29, 4.30 y 4.31. Las explosiones provocan que haya un aumento repentino del espesor de la capa de vapor y se refleja en las curvas por medio de un aumento pequeño en el pico de las fluctuaciones.

En las figuras 4.29, 4.30 y 4.31 se muestran las líneas cuando la capa de vapor llega a la posición de trabajo (PT), cuando rompe la capa de vapor (RCP) y cuando inician las fluctuaciones (IF). En éstas también se puede distinguir que en la condición de 60 °C y 0.6 m/s la capa de vapor rompe antes de que la probeta llegue a la posición de trabajo.

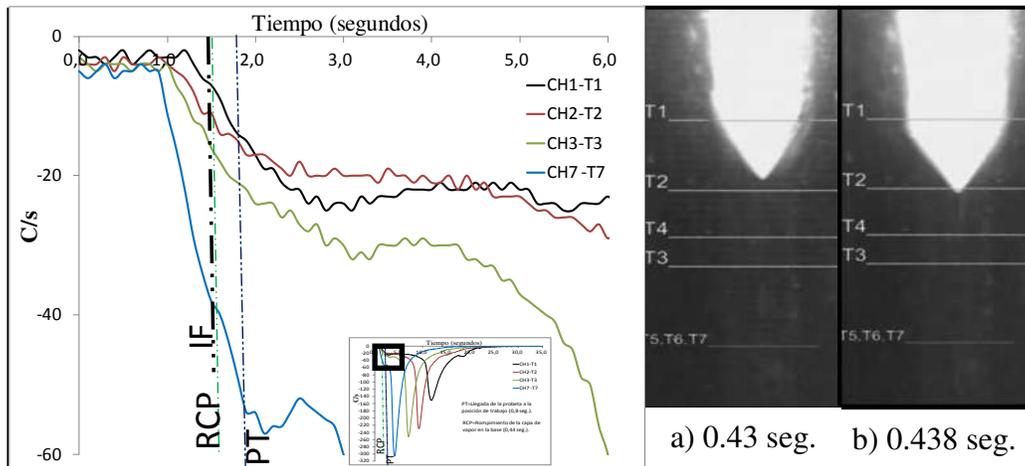


Figura 4. 31.- Detalle de curvas de rapidez de enfriamiento y fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta cónica con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: 0.6 m/s. a) instante antes de la explosión de la capa de vapor y b) explosión de la capa de vapor.

En la figura 4.32 se puede ver que el avance del frente de mojado es estable y simétrico para todas las condiciones cuando rompe la capa de vapor. Este avance es parecido al que se muestra en los experimentos con la probeta semicircular y la probeta a 60 °C y 0.6 m/s.

Como se pudo observar en las curvas de rapidez de enfriamiento, cuando se tienen condiciones de flujo bajo (0.2 m/s), los fenómenos de ebullición (capa de vapor, ebullición nucleada y convección forzada) duran hasta 35 segundos. Mientras que para flujos más elevados (0.4 y 0.6 m/s) los fenómenos de ebullición duran solo 25 segundos.

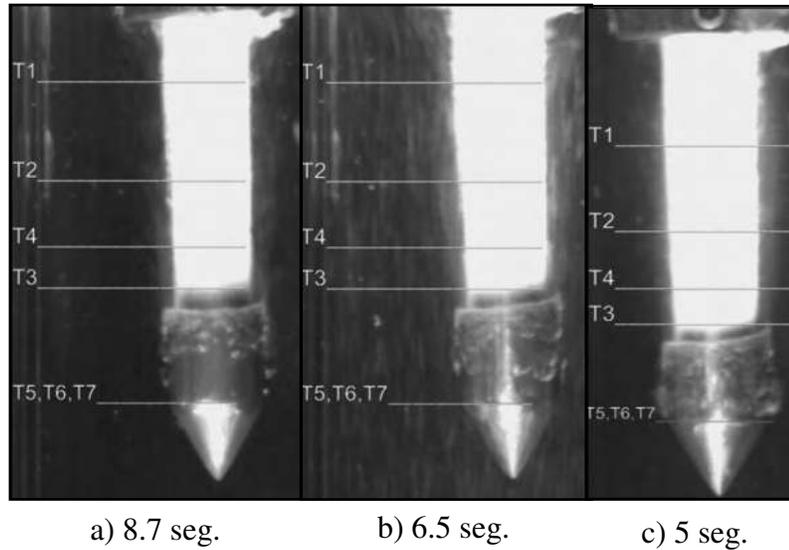


Figura 4.32.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta cónica con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. Mostrando la estabilidad del avance del frente de mojado enfrente del termopar T3. El tiempo que se toma como referencia es desde que la probeta entra en contacto con el medio de temple.



En las graficas de rapidez de enfriamiento (figura 4.33) se muestran los detalles de los dos primeros segundos que es donde se encuentra la zona A para cada uno de los diferentes flujos, la cual indica el momento en que la probeta semicircular tiene contacto con el medio de enfriamiento. En éstas graficas se muestra que todos los termopares captan el momento cuando la probeta entra en contacto con el medio de temple.

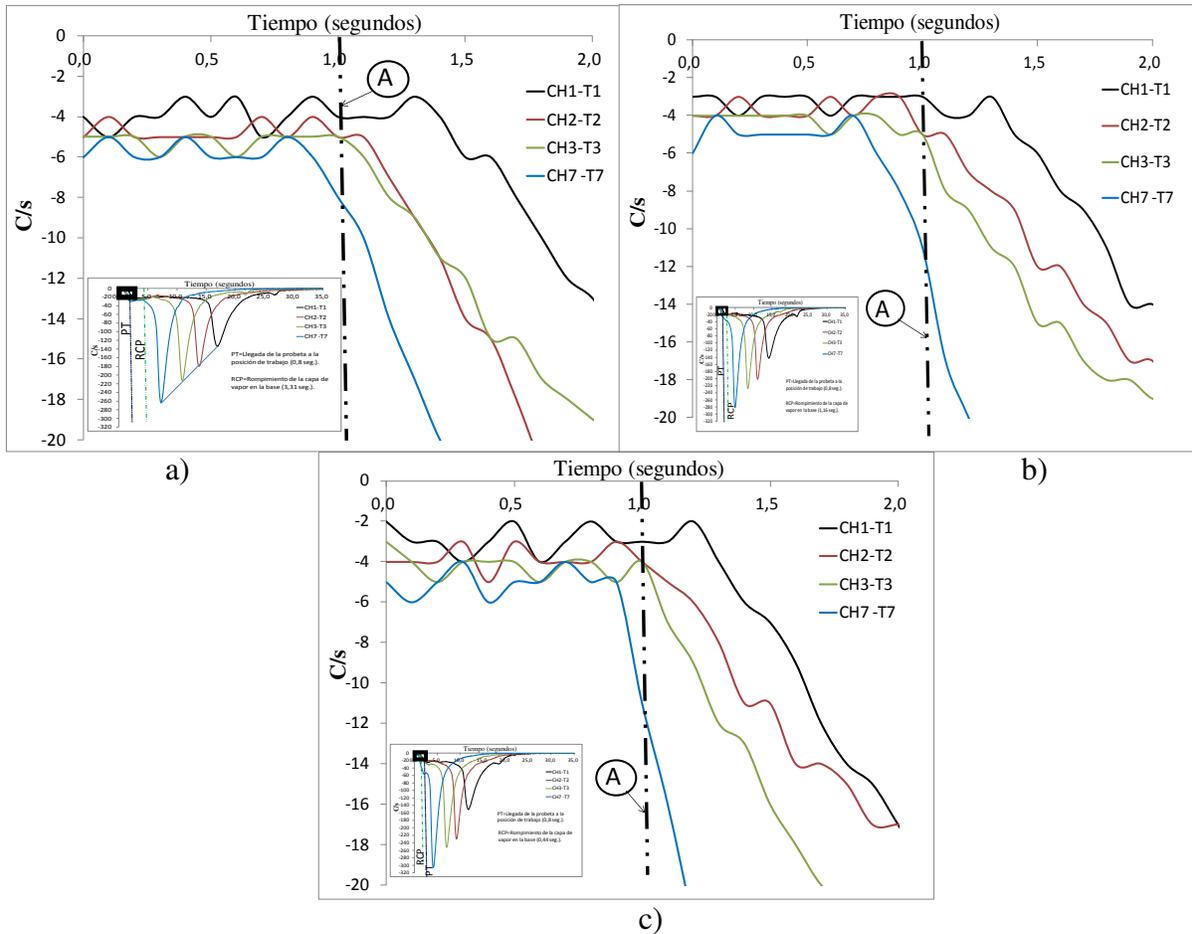


Figura 4. 33.- Graficas con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s. Mostrando el punto el detalle del punto A cuando la probeta cónica tiene contacto con el medio de enfriamiento.



4.5.- Importancia del tamaño de burbuja.

En las pruebas realizadas se logró ver que el tamaño de la burbuja juega un tamaño muy importante en la etapa de ebullición nucleada. En la figura 4.34 se muestran diferentes fotografías a los tiempos de a) 7.13 seg., b) 10.44 seg., y c) 13.97 seg.

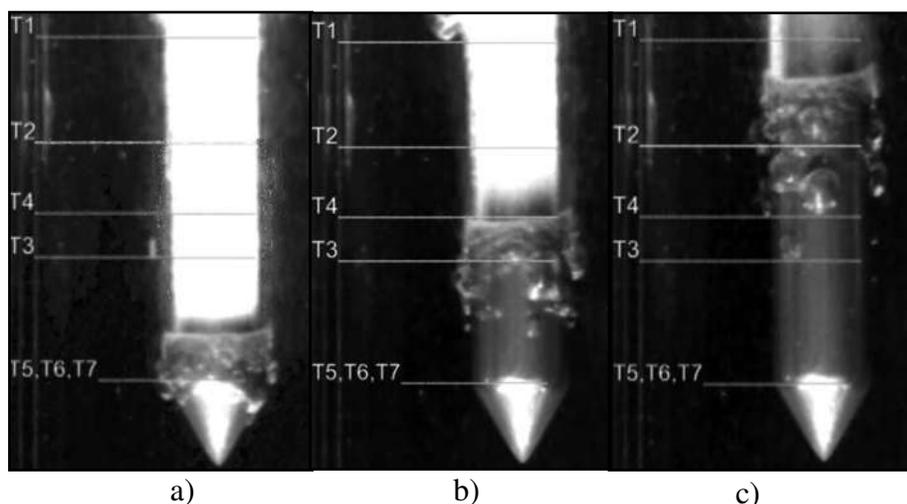


Figura 4. 34.- Fotografías adquiridas con la cámara de alta velocidad de la probeta cónica con agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a 0.2m/s a diferentes tiempos: a) 7.13 segundos. , b) 10.44 segundos y c) 13.97 segundos. Mostrando la el efecto del tamaño de burbuja.

En la figura 4.34 a) la etapa de ebullición nucleada está enfrente del termopar T7, en la figura 4.34 b) la misma etapa de ebullición nucleada pasa enfrente del termopar T3 y en la figura 4.34 c) la etapa de ebullición nucleada pasa enfrente del termopar T2.

En la figura 4.34 a) se observa que el tamaño de la burbuja en la etapa de ebullición nucleada es pequeña. Relacionando ésta imagen con las curvas de rapidez de enfriamiento (figura 4.26 (a)), se nota que esa posición es cercana al termopar T7 tiene la velocidad de enfriamiento máxima, viendo con esto que la generación de burbujas pequeñas a alta frecuencia son las que generan una mayor rapidez de enfriamiento.

Conforme se va incrementando el tamaño de burbuja (se reduce la frecuencia de generación de burbujas) en la etapa de ebullición nucleada la velocidad de rapidez de enfriamiento máxima se va reduciendo (figura 4.34 (b)). Aquí también se nota que hay una mayor distancia de la base de la probeta hacia el termopar T3, el cual tiene una velocidad de enfriamiento máxima menor que el termopar T7.



Cuando la etapa de ebullición nucleada pasa enfrente del termopar T2 (figura 4.34 c) se observa un tamaño de burbuja grande, por lo que la rapidez de enfriamiento máxima e este termopar es menor que la rapidez de enfriamiento del termopar T7 y termopar T.

Con esto se comprueba que a menor tamaño de burbujas la frecuencia de generación de éstas será mayor y también ocasionaran una mayor rapidez de enfriamiento. De forma inversa, a mayor tamaño de burbujas la frecuencia de generación de éstas será menor y ocasionarán una menor rapidez de enfriamiento. El espaciamento que existe entre las burbujas pequeñas es reducido, mientras que el que existe entre las burbujas más grandes aumenta.

4.6.-Análisis Del Termopar 3.

4.6.1.-Temperatura de Leidenfrost, rapidez de enfriamiento y velocidad del frente de mojado.

Dada la importancia de conocer los parámetros más relevantes en la caracterización de los fenómenos de ebullición de cada una de las probetas, se analizó el termopar 3 que se localiza a 42 mm medidos desde la superficie de la probeta (figura 3.2). El termopar 3 se utilizo debido a que con la ayuda de las pruebas experimentales y la simulación matemática se encontró que las velocidades del flujo son más estables enfrente de ese punto. Las condiciones de análisis de las tres geometrías se realizó utilizando agua como medio de enfriamiento a 60 °C fluyendo a 0.2, 0.4 y 0.6 m/s.

En la tabla 4.2 y la figura 4.35 se observa que para cada una de las condiciones se vio el comportamiento de la temperatura de Leidenfrost, la rapidez de enfriamiento en la capa de vapor y la rapidez de enfriamiento máxima (estos datos se determinaron en base a la figura 4.11).

Tabla 4.2. -Datos experimentales obtenidos en cada una de las condiciones en el enfriamiento (en la posición del termopar T3) para experimentos en agua a 60 °C.

Prueba	Temperatura de Leidenfrost (°C)	Rapidez de enfriamiento en la capa de vapor (°C/ seg)	Rapidez de Enfriamiento máxima. (°C/seg)
plana 20 lt/min	731	23,26	175
plana 40 lt/min	705	31,34	190
plana 60 lt/min	692	48,43	198
conica 20 lt/min	726	23,13	213
conica 40 lt/min	749	24,33	228
conica 60 lt/min	767	28,33	252
semicircular 20 lt/min	613	20,34	137
semicircular 40 lt/min	718	23,70	193
semicircular 60 lt/min	760	27,09	208

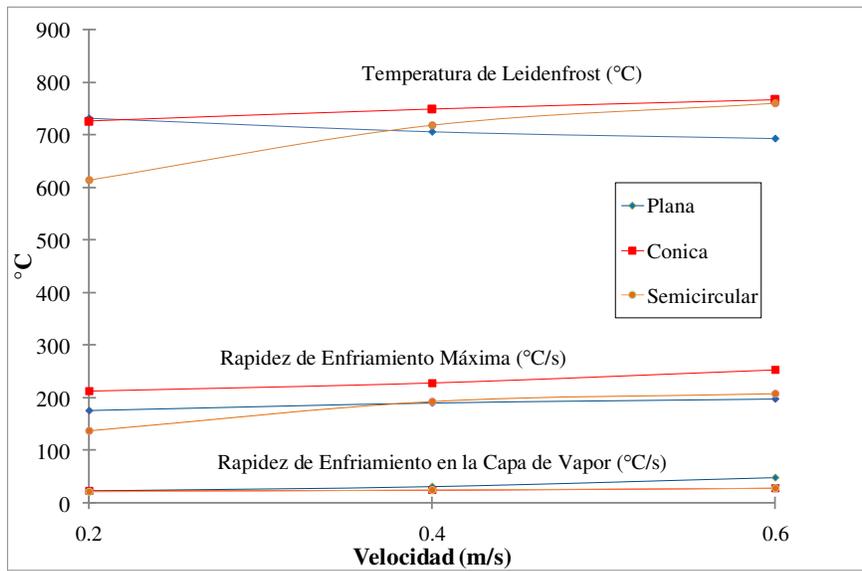


Figura 4. 35.- Efecto de la velocidad del agua sobre parámetros de las curvas de historia de rapidez de enfriamiento (en la posición del termopar $T/3$) para experimentos en agua a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la figura 4.35 y la tabla 4.2 se puede observar que la temperatura de Leidenfrost no es una constante como se lo ha supuesto Th. Lübben et al [67]. Ésta temperatura depende de la geometría de la probeta y de las condiciones hidrodinámicas alrededor de ésta.

En la probeta plana (figura 4.35) conforme aumenta el flujo la capa de vapor se vuelve más inestable (figuras 4.12 (b y c)) provocando que se rompa en diferentes posiciones lo que hace que la velocidad del frente de mojado se incremente en una mayor proporción que para las demás probetas (tabla 4.3 y figura 4.36), y que presente un frente de avance irregular, sin embargo la rapidez de enfriamiento máxima se mantiene casi constante. No así la temperatura de Leidenfrost que conforme aumenta el flujo ésta tiende a disminuir.

En la probeta semicircular (al igual que en la probeta plana) de la figura 4.35, conforme se incrementa el flujo la capa de vapor se vuelve inestable (figura 4.18 (b y c)) pero el frente de mojado tiene un avance más simétrico que la probeta plana. La temperatura de Leidenfrost se incrementa en gran proporción al incrementarse el flujo. La velocidad del frente de mojado en ésta probeta semicircular es irregular, ya que de la condición de 0.2 m/s a 0.4 m/s se tiene un incremento de la velocidad del frente de mojado, pero ésta velocidad disminuye a la condición de 0.6 m/s (tabla 4.3 y figura 4.36).

La probeta cónica (figura 4.35) mantiene la capa de vapor estable a pesar que se incrementa el flujo de agua, pero el tiempo que tarda en romper disminuye conforme aumenta el flujo lo que hace que la temperatura de Leidenfrost se incremente al aumentar el flujo, así como



la rapidez de enfriamiento máxima. La velocidad del frente de mojado se mantiene casi constante para las condiciones de agua fluyendo a 60 °C y 0.2 y 0.4 m/s, pero para la condición de 0.6 m/s ésta velocidad se incrementa (tabla 4.3 y figura 4.36).

Tabla 4.3.- Datos experimentales obtenidos de la velocidad del frente de mojado (en la posición del termopar 3) para experimentos en agua a 60 °C.

Prueba	Velocidad(mm/seg)
plana 20 lt/min	3,81
plana 40 lt/min	5,61
plana 60 lt/min	11,59
conica 20 lt/min	4,32
conica 40 lt/min	4,43
conica 60 lt/min	6,38
semicircular 20 lt/min	4,02
semicircular 40 lt/min	7,42
semicircular 60 lt/min	7,01

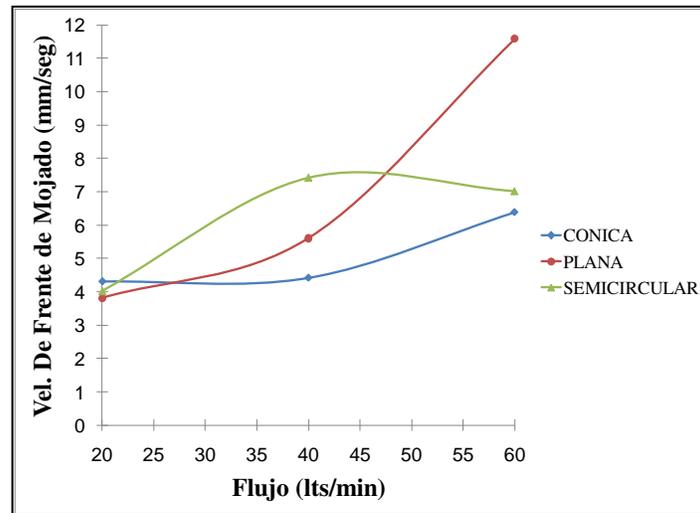


Figura 4. 36.- Velocidad del frente de mojado (en la posición del termopar T 3) para experimentos en agua a 60 °C.

4.6.2.- Análisis de las curvas de rapidez y aceleración de enfriamiento.

Los fenómenos de ebullición tienen un proceso muy complicado que no puede ser descrito por una sola ecuación para obtener las curvas de enfriamiento como una función del tiempo y la posición. Por ésta razón, la duración de la ebullición nucleada ha sido desarrollada analíticamente por Kobasco et al [82]. En estas ecuaciones toma en cuenta algunas



constantes, la difusividad térmica, la conductividad térmica y el coeficiente de transferencia de calor promedio y el factor de Kondratjev (que relaciona el radio de la probeta y la altura de ésta). Estas ecuaciones son experimentales y toman en cuenta algunas constantes.

A continuación se muestran curvas de la rapidez de enfriamiento con curvas de aceleración de enfriamiento. *Las curvas de aceleración de enfriamiento superpuestas con las de rapidez de enfriamiento no han sido publicadas en ninguno de los artículos estudiados hasta la fecha.* “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”, figuras (4.37, 4.41, 4.45). A continuación se muestra la nomenclatura utilizada para la lectura de éstas 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 [83].

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 (según figura 2.7).

PT.- Posición de trabajo de la pieza.

RCP.- Rompimiento de la capa de vapor en la base.

REM.- Rapidez de enfriamiento máxima.

4.6.2.1.-Probeta plana.

Las curvas de la figura 4.37 muestran una clara congruencia con las imágenes adquiridas con la cámara de alta velocidad de las figuras 4.38, 4.39 y 4.40. Las curvas se grafican desde un segundo antes que la probeta entre en contacto con el medio de temple, pero en tiempo de referencia es el punto A en todos los casos (para las tres probetas).

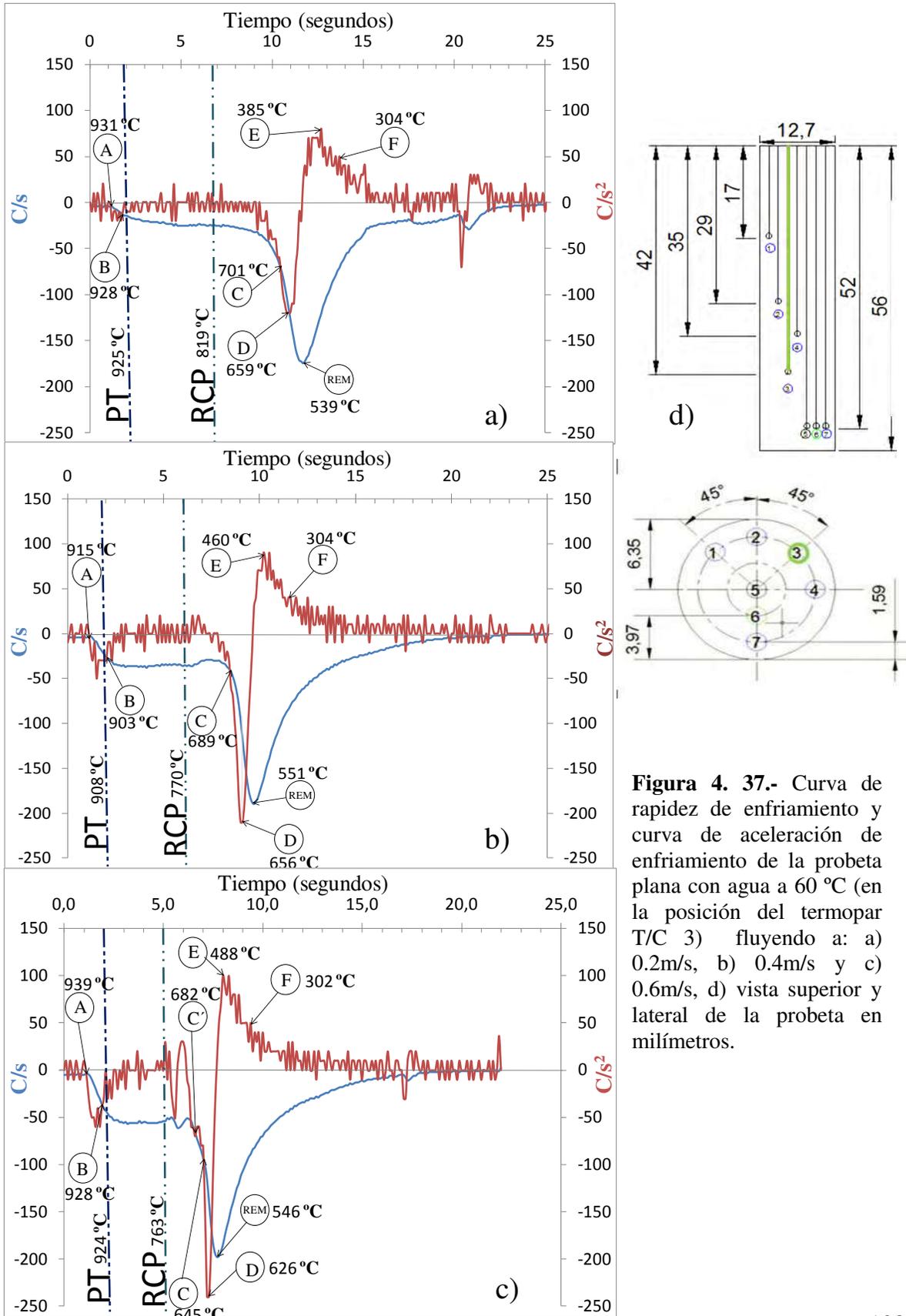


Figura 4. 37.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento de la probeta plana con agua a 60°C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a: a) 0.2 m/s , b) 0.4 m/s y c) 0.6 m/s , d) vista superior y lateral de la probeta en milímetros.

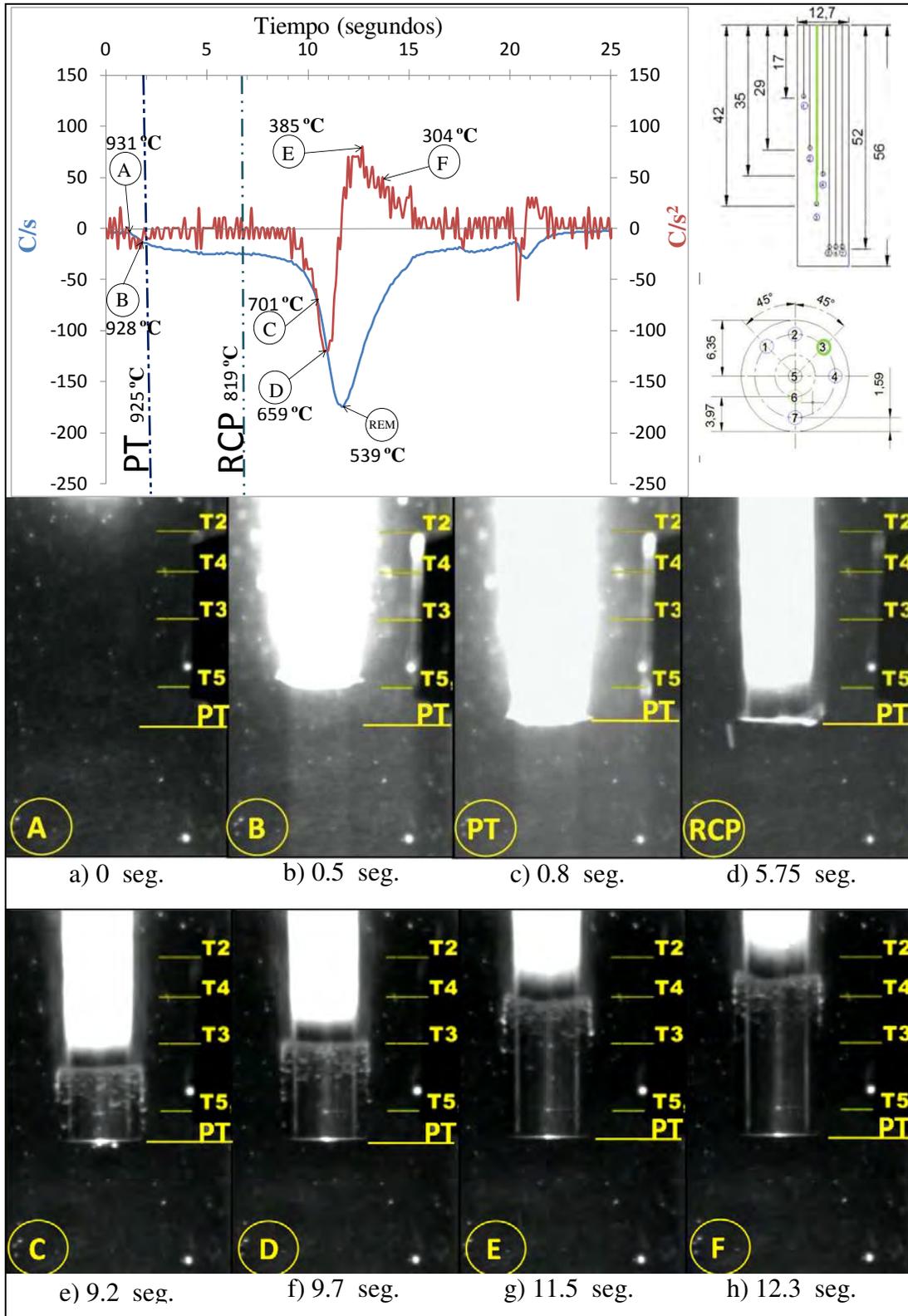


Figura 4. 38.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta plana con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.2 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.



El punto A de las figuras 4.37 a) y 4.38 corresponde al momento en que la probeta a 931 °C entra en contacto con el medio de temple (agua) cuando va entrando al tubo de acrílico.

La zona entre el punto A y el punto B se llama primer flujo de calor crítico y dura 0.5 segundos. El punto PT el cual corresponde al momento en que la probeta llega a la posición de trabajo dura 0.8 segundos.

En el punto RCP que es cuando la capa de vapor rompe en la parte de la base de la probeta, aquí se aprecia (figura 4.38 d) que la probeta comienza a romper el borde inferior derecho.

En la figura 4.38 se aprecia la capa de vapor (puntos B-C), ésta etapa dura 8.7 segundos. Entre los puntos C y REM se encuentra el segundo flujo de calor crítico. También se puede identificar que entre los puntos C-D la distancia longitudinal entre estos es pequeña, ésta etapa dura sólo 0.5 segundos, ésta parte corresponde a la zona de disminución del espesor de la capa de vapor que se muestra enfrente del termopar T3 de la figuras 4.38 (e y f).

El punto D de la figura 4.38 f) es donde rompe la capa de vapor e inicia la ebullición nucleada, es decir es el punto de Leidenfrost, y comienza a los 9.7 segundos después de que se introduce la probeta al baño de temple, en este momento se inicia la ebullición nucleada a alta frecuencia y la rapidez de enfriamiento es máxima (REM). La etapa (D-E) de ebullición nucleada a alta frecuencia dura sólo 1.8 segundos, mientras que la etapa (E-F) de ebullición nucleada a baja frecuencia dura 0.8 segundos. En la etapa (D-E) de la figura 4.38 la curva presenta una pendiente pronunciada con respecto a la horizontal. Además en el punto B de la figura 4.38 b) la probeta no ha llegado a la posición de trabajo.

En la figura 4.39 la probeta entra a los 915 °C (punto A) y el primer flujo de calor crítico (entre puntos A y B) dura 0.9 segundos, es decir dura 0.1 segundos más después de que la probeta llega a la posición de trabajo PT. Se puede observar que la capa de vapor comienza a tener inestabilidades (puntos B-C), ésta etapa dura 6.3 segundos (figuras 4.39 (c y e)).

También podemos identificar que entre los puntos C-D de la figura 4.39 (e y f) la distancia longitudinal creció un poco más que la de la figura 4.38 (e y f)), ésta etapa dura 0.6 segundos (un segundo más que la figura 4.38).

En la figura 4.39 e) (punto C) se ve que también hay una reducción del espesor de la capa de vapor cuando pasa enfrente del termopar T3 (a los 7.2 segundos) y se sigue detectando hasta los 7.8 segundos en figura 4.39 f) (punto D). Entre los puntos C y REM se encuentra el segundo flujo de calor crítico.

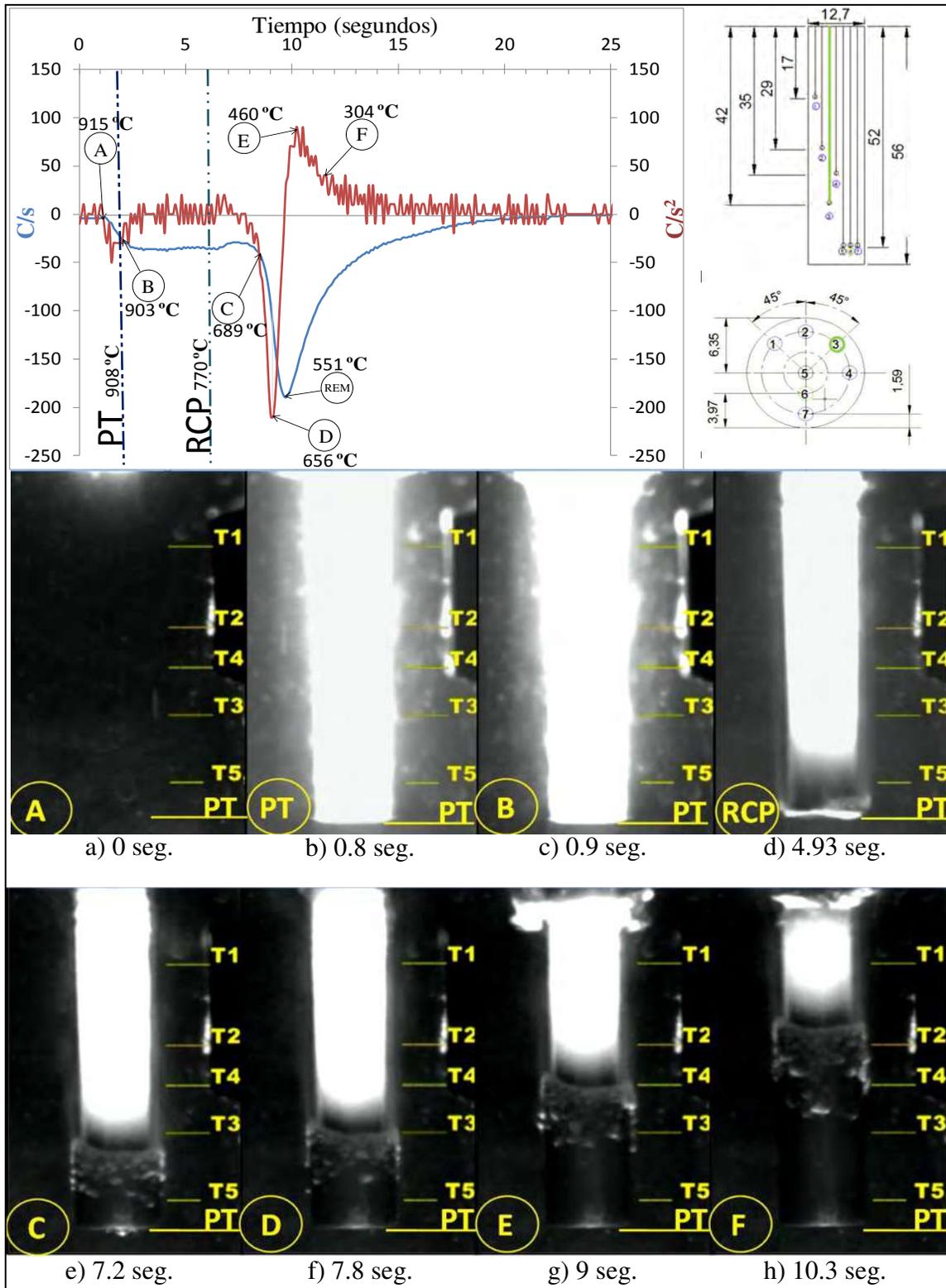


Figura 4. 39.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta plana con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.4 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.



A partir del punto D de la figura 4.39 f) la velocidad de extracción es máxima debido a la ebullición nucleada de alta frecuencia, ya que comienza la etapa de la temperatura de Leidenfrost. La ebullición nucleada a alta frecuencia dura 1.2 segundos, puntos D-E de la figuras 4.39 (f y g). La distancia longitudinal entre estos puntos es grande, además de que la zona presenta una pendiente casi a 90° con respecto a la horizontal.

La ebullición nucleada a baja frecuencia dura 1.3 segundos, puntos E-F de la figura 4.39. A partir del punto F comienza la zona de convección forzada para todas las pruebas y ésta se toma a la temperatura de 300°C .

El tiempo de ebullición nucleada total (ebullición nucleada a alta frecuencia mas ebullición nucleada a baja frecuencia) para la figura 4.36 a) es de 2.6 segundos y para la figura 4.36 b) es de 2.5 segundos. El tiempo es muy parecido y la diferencia es de apenas 0.1 segundo.

En la figura 4.40 se encontró un punto adicional de transición de ruptura de la capa de vapor mostrado como C' (figura 4.40 e). Aquí se puede observar que la capa de vapor totalmente inestable y caótica (puntos B-C' de las figuras 4.40 (b y e)), ésta etapa dura 4.6 segundos.

La zona entre los puntos C' y C (figuras 4.40 e y f) se ve que ocurre porque la capa de vapor no rompe uniformemente, ya que la parte izquierda de la probeta marcada con IZQ se encuentra a mayor distancia de la base de la probeta que la parte derecha marcada con DER (figura 4.40 f), ésta etapa dura 0.5 segundos. Entre los puntos C y REM se encuentra el segundo flujo de calor crítico.

También podemos identificar que entre los puntos C-D (figuras 4.40 f y g) la distancia longitudinal entre estos puntos creció un poco más que la de la figuras 4.39 (e y f), ésta etapa dura solo 0.2 segundos, (figuras 4.40 f y g).

En cuanto a la zona de ebullición nucleada de alta frecuencia entre los puntos D-E (figuras 4.40 g y h) la distancia longitudinal es grande y la etapa dura 0.8 segundos, aquí se zona presenta una pendiente casi a 90° con respecto a la horizontal.

El punto D de las curvas de aceleración de enfriamiento de la figura 4.40 g) va disminuyendo conforme se aumenta el flujo. Mientras que el punto E de figura 4.40 h), en la parte superior de la curva se mantiene a una altura casi constante en todas las condiciones.

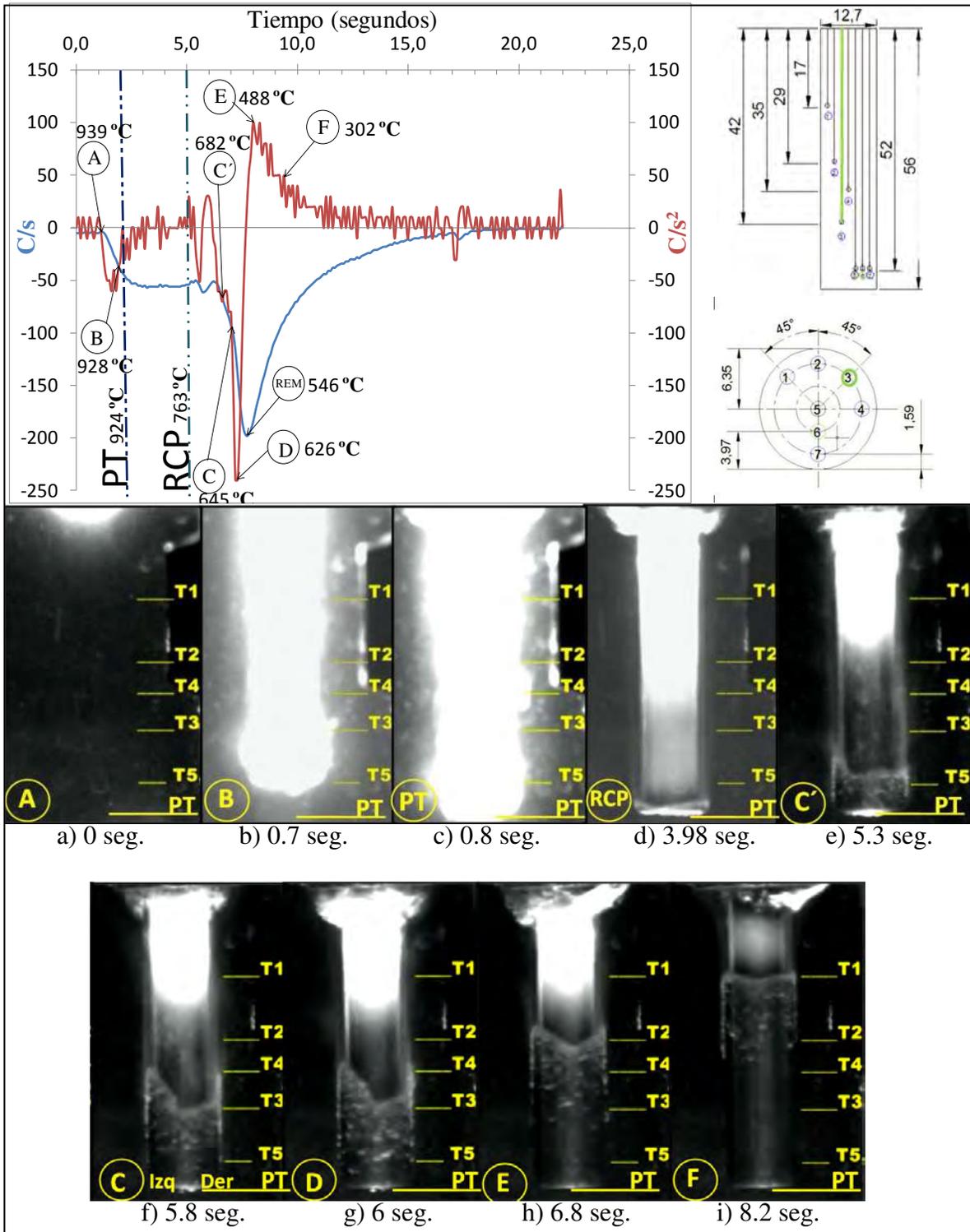


Figura 4. 40.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta plana con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.6 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.



La zona de ebullición nucleada a baja frecuencia (puntos E, figura 4.40 g) comienza a los 6.8 segundos y dura 1.4 segundos (puntos E-F de la figuras 4.40 (g y h). El tiempo de ebullición nucleada total en este caso es de 2.2 segundos.

En parte final después del punto F (figura 4.40 i) donde comienza a cerrar la curva de rapidez de enfriamiento se tiene una temperatura aproximada de 100 °C para todas las pruebas.

En todas las pruebas, el tiempo que tarda la probeta desde que toca el medio de enfriamiento hasta que llega a la posición de trabajo PT es de 0.8 segundos.

En la figura 4.37 de las curvas de rapidez de enfriamiento y aceleración de enfriamiento, se muestra que en el punto de ruptura en la capa de vapor en la base de la probeta la mayor temperatura de ruptura de la capa de vapor es a la condición de 0.2 m/s (819 °C) y la menor temperatura de ruptura de la capa de vapor es a la condición de 0.6 m/s (763 °C). Esto es diferente a lo que se esperaría, ya que se pensaría que a mayor flujo, mayor sería la temperatura de ruptura. Esto es debido a que como se vio en las pruebas en estado isotérmico, hay una separación de la capa límite, la cual disminuye la transferencia de calor.

4.6.2.2.-Probeta semicircular.

Las curvas de la figura 4.41, al igual que en la probeta plana, también muestran una clara congruencia con las imágenes adquiridas con la cámara de alta velocidad de las figuras 4.42, 4.43 y 4.44. Las curvas se grafican desde un segundo antes que la probeta entre en contacto con el medio de temple, pero en tiempo de referencia es el punto A en todos los casos (para las tres probetas).

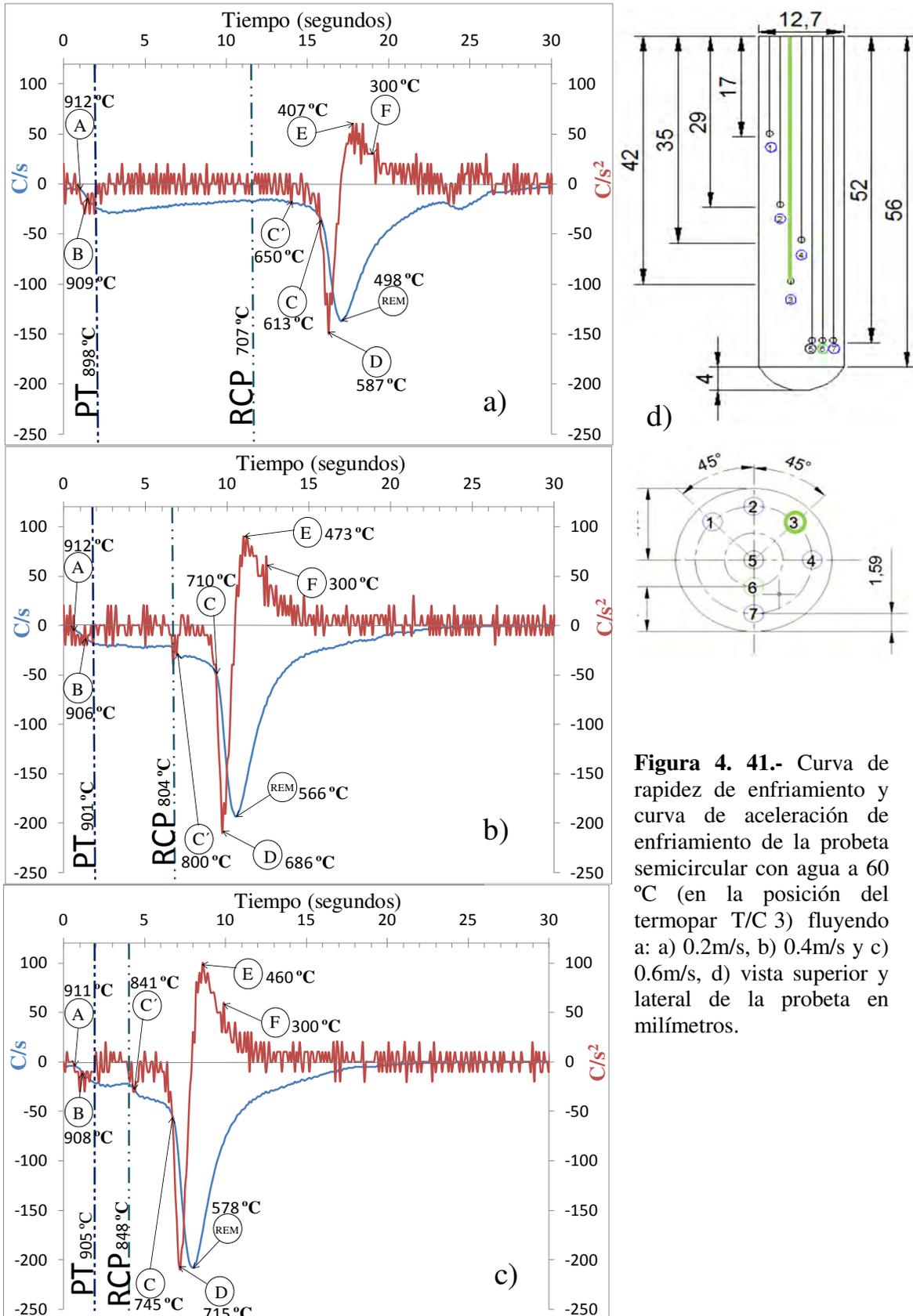


Figura 4. 41.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento de la probeta semicircular con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s, d) vista superior y lateral de la probeta en milímetros.

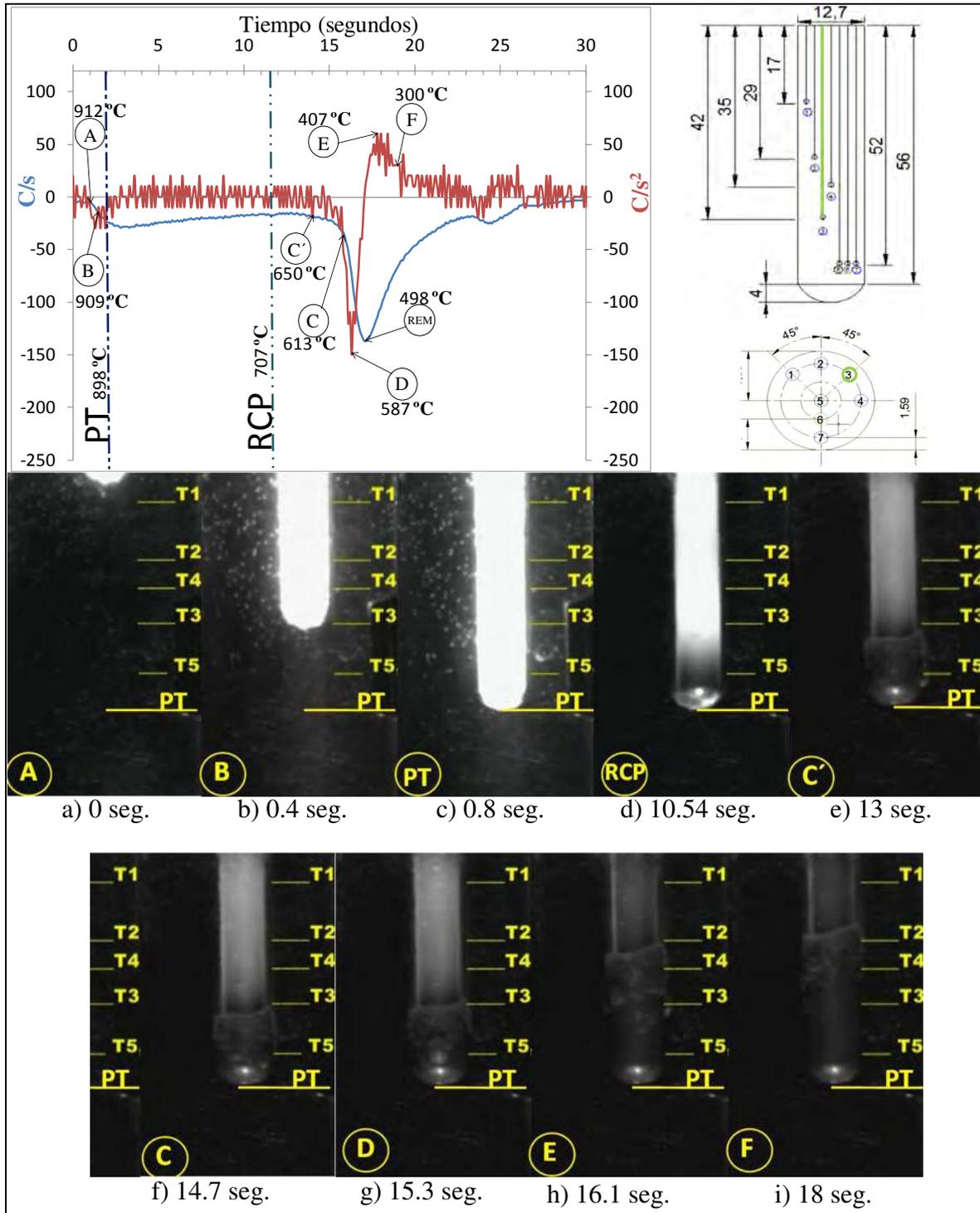


Figura 4. 42.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta semicircular con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.2 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.



El tiempo que se toma como referencia es cuando la probeta entra en contacto con el medio de temple (punto A). En todos los casos, en las curvas de rapidez de enfriamiento y aceleración de enfriamiento de la probeta semicircular se encontró un punto adicional de transición de ruptura de la capa de vapor mostrado como C', el punto C' solamente se encontró en el caso de la probeta plana a la condición de 60 °C y 0.6 m/s (figura 4.40 e).

El punto A de la figura 4.42 a) indica el contacto de la pieza a 912 °C con el medio de enfriamiento, que en nuestro caso es agua. Entre el punto A y B (figuras 4.42 a y b) se muestra el primer flujo de calor crítico el cual tiene una duración de 0.4 segundos.

En las figuras 4.42 (b y e) se puede observar la capa de vapor estable (puntos B-C'), ésta etapa dura 12.6 segundos. En zona entre los punto C' y C (figuras 4.42 e y f) la capa de vapor rompe uniformemente y el avance del frente de mojado es simétrico, ésta etapa dura 1.7 segundos. Entre los puntos C y REM se encuentra el segundo flujo de calor crítico.

También se puede identificar que entre los puntos C-D (figuras 4.42 f y g) la distancia longitudinal entre estos puntos es pequeña, ésta etapa dura solo 0.6 segundos, por lo que encontramos que flujo de calor en la etapa de disminución del espesor la capa de vapor.

En cuanto a la zona de ebullición nucleada a alta frecuencia entre los puntos D-E (figuras 4.42 g y h) la distancia longitudinal es grande y la etapa dura 0.8 segundos, por lo que la zona presenta una pendiente pronunciada con respecto a la horizontal.

La zona de ebullición nucleada a baja frecuencia dura 1.9 segundos, puntos E-F de la figura 4.42 (h, i). Después del punto F (figura 4.42 i) la extracción de calor es por convección forzada. En el punto B cuando se tiene el primer flujo de calor crítico, en la figura 4.42 b) la probeta no ha llegado a la posición de trabajo.

En el punto A de la figura 4.43 a), la temperatura a la que la probeta cuando tiene contacto con el medio de temple es de 912 °C. Al igual que en los casos anteriores tenemos el primer flujo de calor crítico entre los puntos A y B (figuras 4.43 a y b) el cual tiene una duración de 0.77 segundos.

Así mismo, la figura 4.43 b) se ve que la capa de vapor comienza a mostrar inestabilidades (puntos B-C', figuras 4.43 b y e), ésta etapa dura 6.03 segundos. En la zona entre los puntos C' y C (figuras 4.43 e y f) la capa de vapor rompe uniformemente y se ve un avance del frente de mojado simétrico, ésta etapa dura 1.9 segundos.

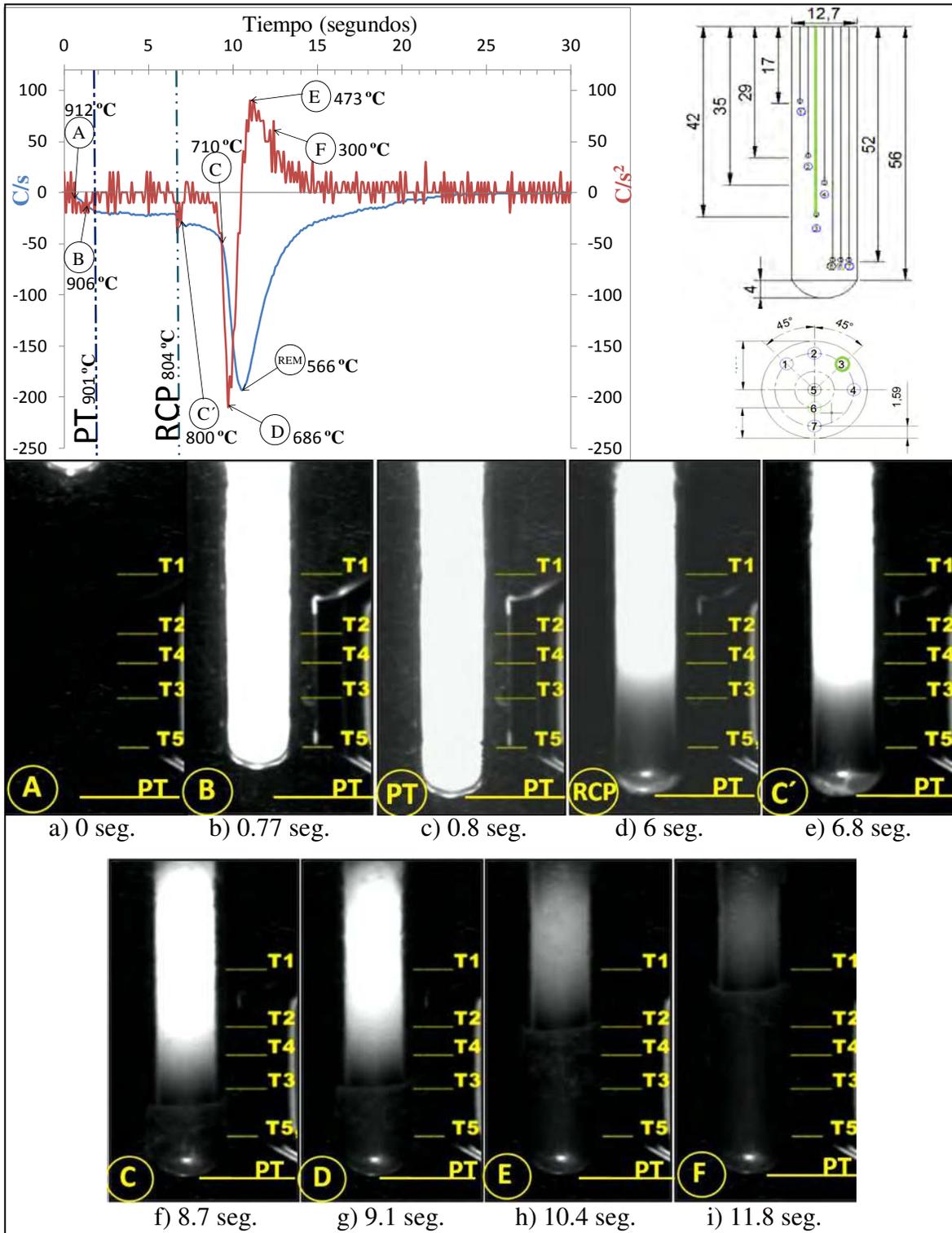


Figura 4. 43.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta semicircular con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.4 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.



También se puede identificar que entre los puntos C-D (figuras 4.43 f y g) la distancia longitudinal entre estos puntos es mayor que el mostrado en la figura 4.42 (f y g), ésta etapa dura 0.4 segundos, aquí tenemos extracción de calor por disminución del espesor de la capa de vapor. Entre los puntos C y REM se encuentra el segundo flujo de calor crítico.

En cuanto a la zona de ebullición nucleada de alta frecuencia entre los puntos D-E (figuras 4.43 f y g) la distancia longitudinal es grande y la etapa dura 1.3 segundos y la extracción de calor es máxima, además la zona presenta una pendiente un poco menos pronunciada con respecto a la horizontal que la mostrada en la figuras 4.42 (g y h).

La zona de ebullición nucleada a baja frecuencia comienza a los 10.4 segundos y está ubicada entre los puntos E-F (figuras 4.43 h, i) y tiene una duración de 1.4 segundos. Después del punto F (figura 4.43 i) comienza la convección forzada y la curva comienza a tocar el eje del tiempo a una temperatura aproximada de 100 °C.

La figura 4.44 a) (punto A) muestra que la temperatura a la que la probeta tiene contacto con el medio de temple es de 911 °C. También se observa entre los puntos A y B (figuras 4.44 a y b) el primer flujo de calor crítico.

En la figura 4.44 (b y e) se puede ver que la capa de vapor es totalmente inestable (puntos B-C'), ésta etapa dura 3.2 segundos. En zona entre los punto C' y C (figuras 4.44 e y f) la capa de vapor rompe no uniformemente (figura 4.44 e), pero ya en la figura 4.44 f se ve un avance del frente de mojado simétrico (igual que en las figuras 4.42 y 4.43 (e y f)), ésta etapa dura 2.5 segundos.

También se puede identificar que entre los puntos C-D (figuras 4.44 f y g) la distancia longitudinal entre estos parecida a la mostrada en la figura 4.43 (f y g), ésta etapa dura 0.4 segundos, aquí también tenemos extracción de calor por disminución del espesor de la capa de vapor.

La zona de ebullición nucleada a alta frecuencia comienza a los 6.5 segundos y está ubicada entre los puntos D-E (figuras 4.44 g y h) donde la distancia longitudinal entre estos puntos es grande y la etapa dura 1.4 segundos, por lo que la zona presenta una pendiente menos pronunciada con respecto a la horizontal que las mostradas en la figura 4.42 y 4.433 (g y h).

En cuanto a la zona de ebullición nucleada a baja frecuencia, comienza a los 7.9 segundos (punto E, figura 4.44 h), está representada por los puntos E-F (figuras 4.44 h, i) y tiene una duración de 1.3 segundos.

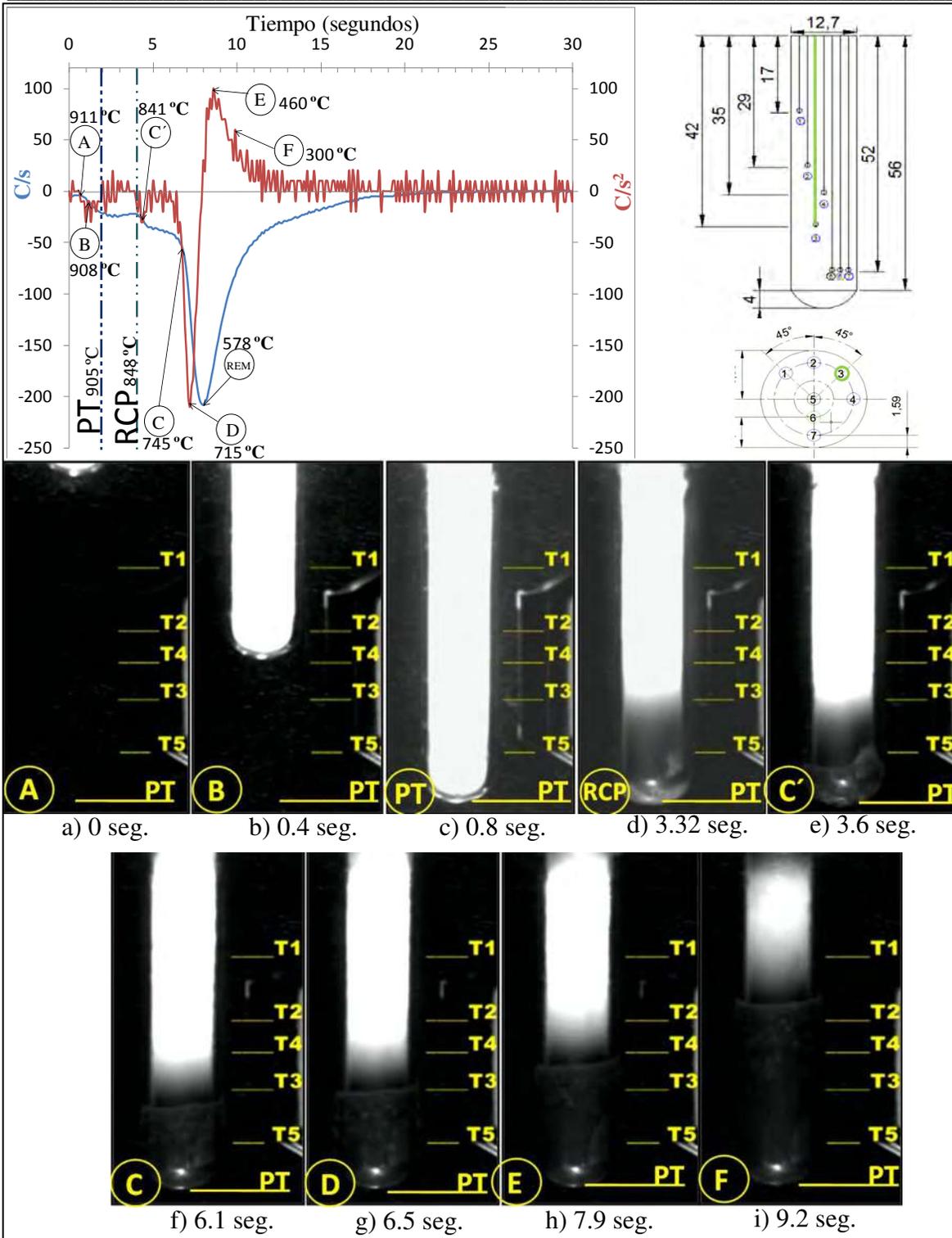


Figura 4. 44.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta semicircular con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.6 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.



En el punto B de la figura 4.44 b) la probeta no ha llegado a la posición de trabajo. En parte final después del punto E donde comienza a cerrar la curva de rapidez de enfriamiento se tiene una temperatura aproximada de 100 °C para todas las pruebas.

En la figura 4.41 de las curvas de rapidez de enfriamiento y aceleración de enfriamiento, se muestra que en el punto de ruptura en la capa de vapor en la base de la probeta la mayor temperatura de ruptura de la capa de vapor es a la condición de 0.6 m/s (848 °C) y la menor temperatura de ruptura de la capa de vapor es a la condición de 0.2 m/s (707 °C). Esto es lo que se esperaría, ya como se ha encontrado en la literatura consultada, a mayor flujo, mayor será la temperatura de ruptura de la capa de vapor. Esto es totalmente diferente a lo que ocurre con la probeta de base plana.

4.6.2.3.-Probeta cónica.

Las curvas de la figura 4.45, al igual que en la probeta plana, también muestran una clara congruencia con las imágenes adquiridas con la cámara de alta velocidad de las figuras 4.46, 4.47 y 4.48. Las curvas se grafican desde un segundo antes que la probeta entre en contacto con el medio de temple, pero en tiempo de referencia es el punto A en todos los casos (para las tres probetas).

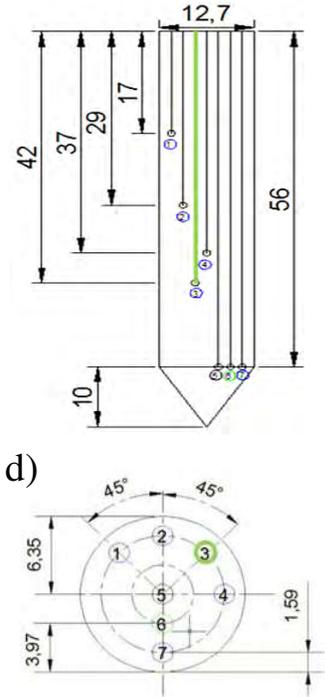
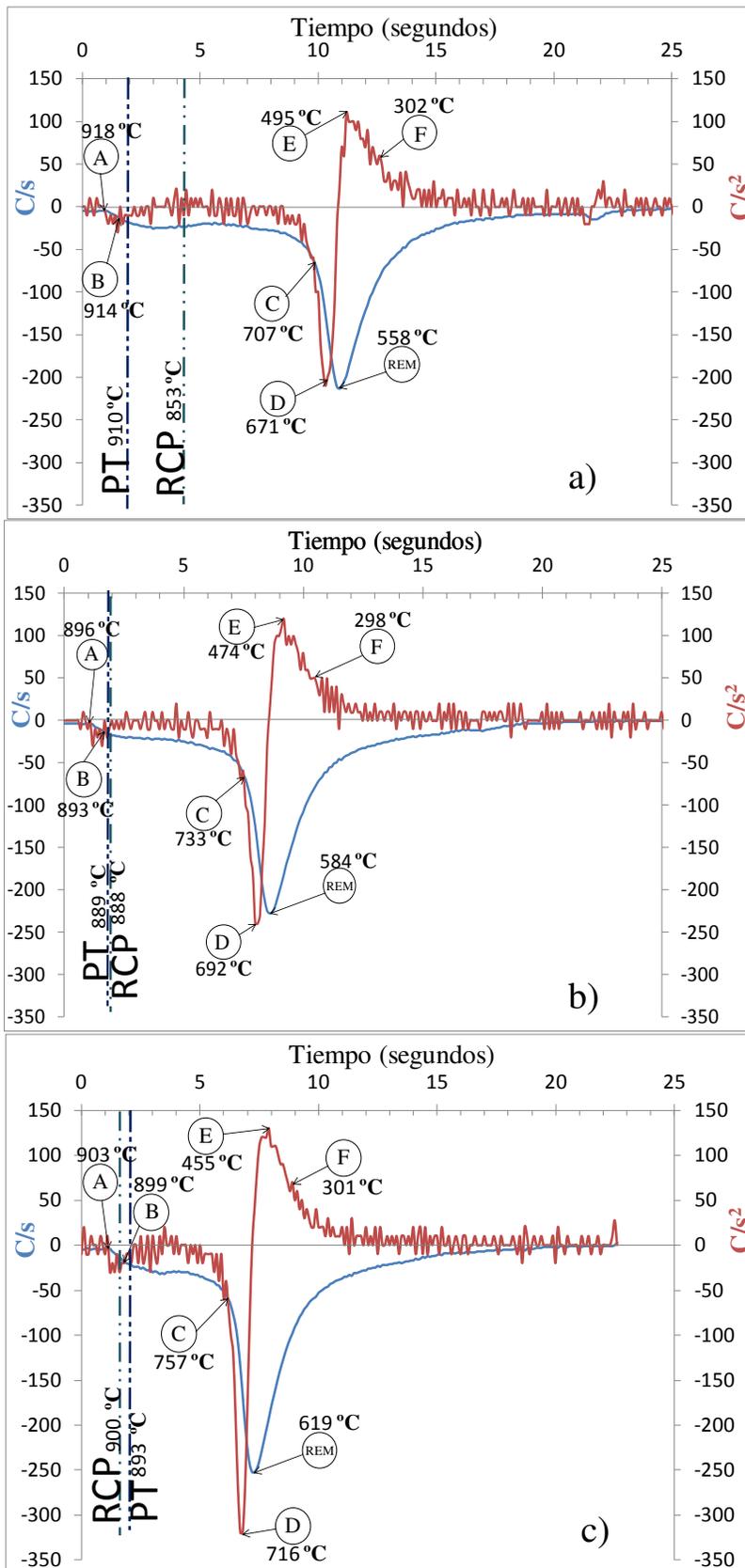


Figura 4. 45.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento de la probeta cónica con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a: a) 0.2m/s, b) 0.4m/s y c) 0.6m/s, d) vista superior y lateral de la probeta en milímetros.

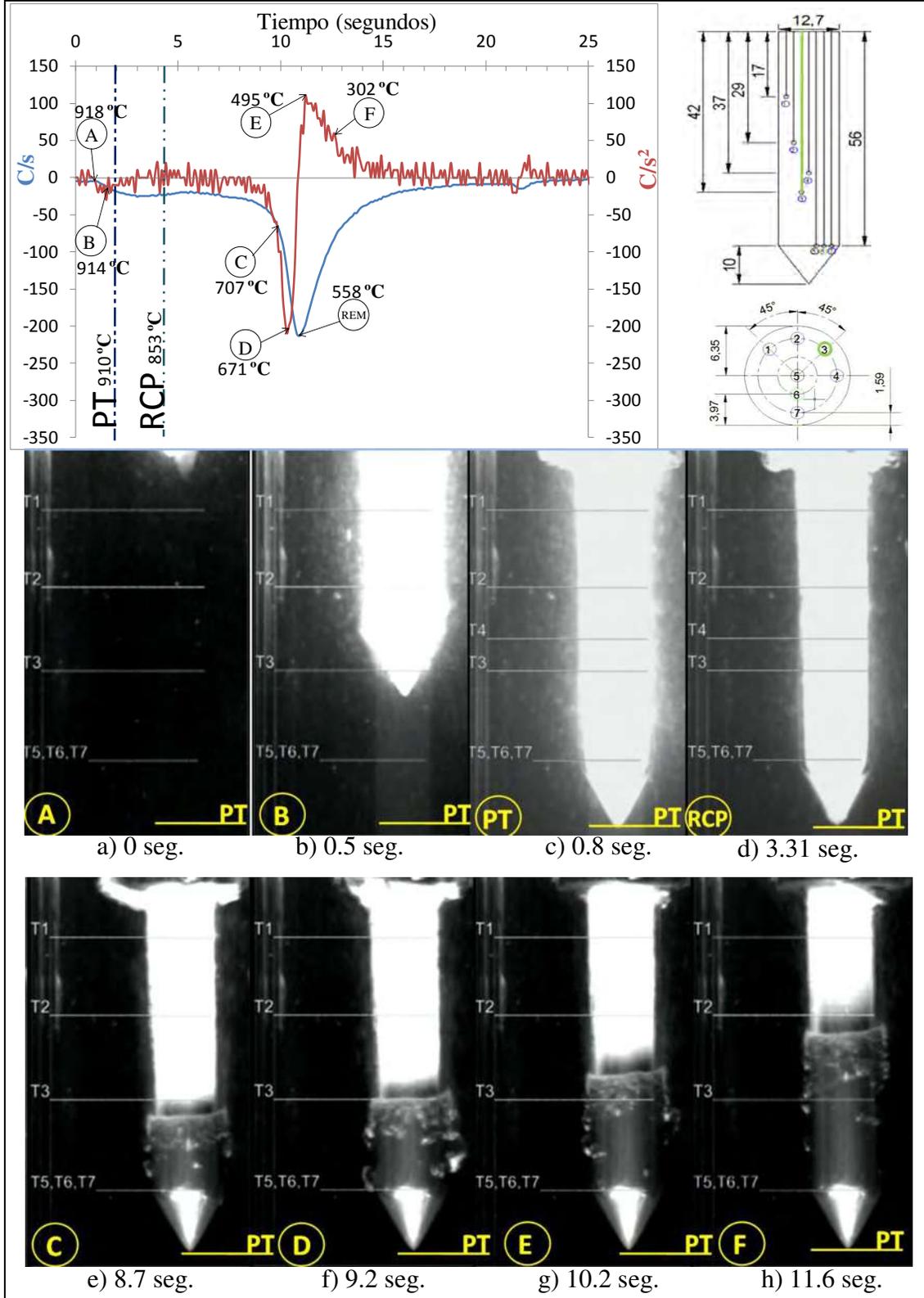


Figura 4. 46.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta cónica con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.2 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.



En el punto A de la figura 4.46 a), la temperatura a la que la probeta cuando tiene contacto con el medio de temple es de 918 °C. Al igual que en los casos anteriores tenemos el primer flujo de calor crítico entre los puntos A y B (figuras 4.46 a y b) el cual tiene una duración de 0.5 segundos.

En la figura 4.46 (b y e) se puede observar que la capa de vapor es estable (puntos B-C), ésta etapa dura 8.2 segundos. También se identifica que entre los puntos C-D (figuras 4.46 e y f) la distancia longitudinal entre estos puntos es pequeña, ésta etapa dura solo 0.6 segundos, por lo que se puede decir que hay extracción de calor por reducción del espesor de la capa de vapor.

En lo que se refiere a la zona de ebullición nucleada de alta frecuencia entre los puntos D-E (figuras 4.46 f y g) la distancia longitudinal entre estos dos puntos es grande, ésta comienza a los 9.2 segundos (punto D, figura 4.46 f), y la etapa dura 1.0 segundo, por lo que la zona presenta una pendiente pronunciada con respecto a la horizontal y se presenta una alta extracción de calor.

La etapa de ebullición nucleada a baja frecuencia comienza a los 10.2 segundos (punto E, figura 4.46 g), ésta zona se ubica entre los puntos E-F (figuras 4.46 g y h) y tiene una duración de 1.4 segundos.

A partir del punto F (figura 4.46 h) comienza la etapa de convección forzada y se toma a los 300 °C como se dice en la literatura, debido a que en la mayoría de los aceros al carbono es donde comienza la transformación de martensita.

En el punto B de la figura 4.46 b) la probeta no ha llegado a la posición de trabajo, ya que como se dijo anteriormente que el tiempo desde que la probeta toca el medio de enfriamiento hasta que llega a la posición de trabajo es de 0.8 segundos (figura 4.46 c).

En el punto A de la figura 4.47 a), la temperatura a la que la probeta cuando tiene contacto con el medio de temple es de 896 °C. Al igual que en los casos anteriores tenemos el primer flujo de calor crítico entre los puntos A y B (figuras 4.47 a y b) el cual tiene una duración de 0.5 segundos.

En las figuras 4.47 (b y e) se puede observar que la capa de vapor es se sigue manteniendo estable pese a que hay un incremento en el flujo (puntos B-C), ésta etapa comienza a los 0.5 segundos (punto B) y dura 6.0 segundos.

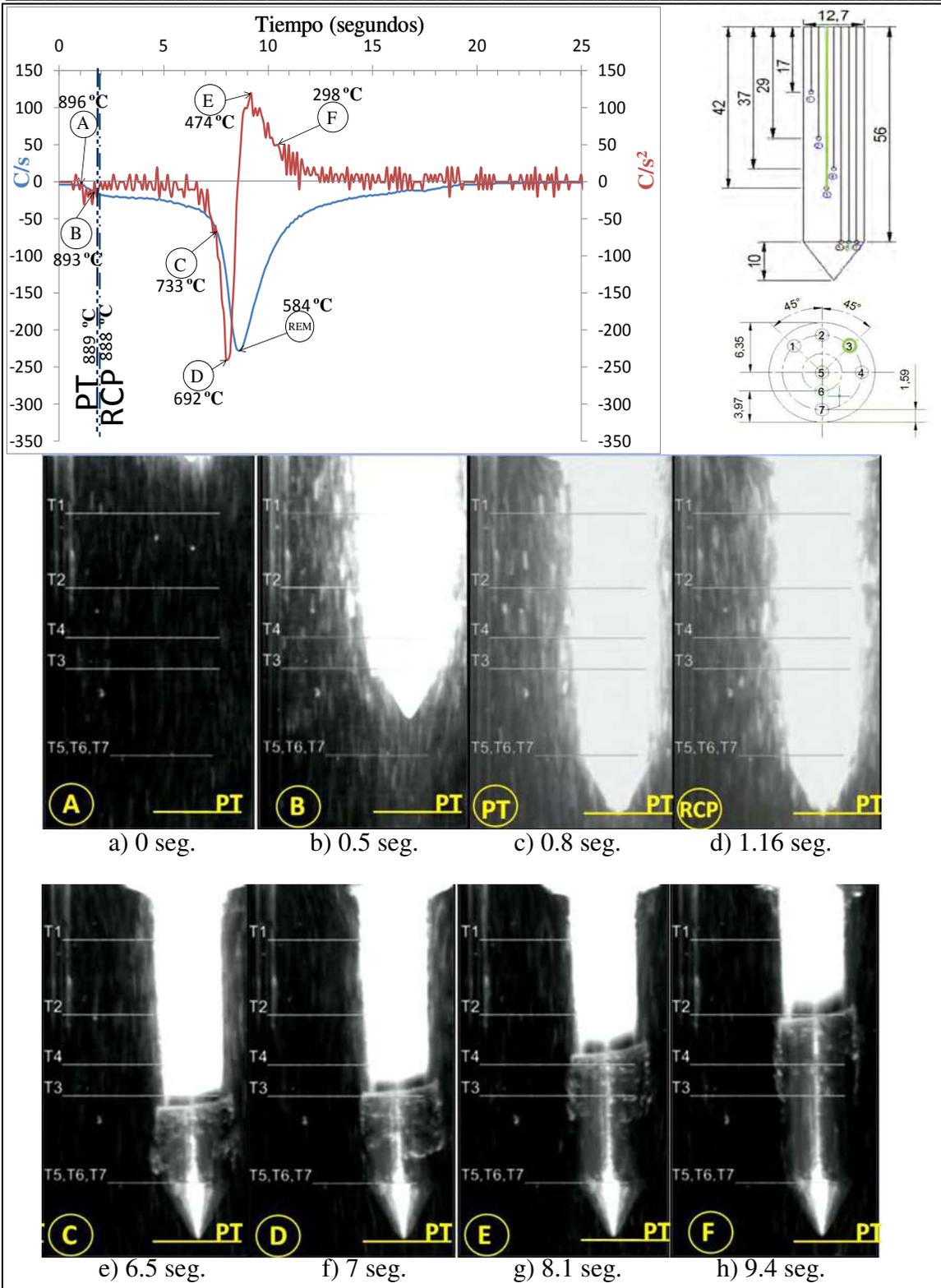


Figura 4. 47.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta cónica con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.4 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.



También se identifica que la distancia longitudinal entre los puntos C-D (figuras 4.47 e y f) creció un poco con respecto a la de las figuras 4.46 (e y f), por lo que se ha visto hasta ahora ésta zona corresponde a la disminución del espesor de la capa de vapor, ésta etapa dura solo 0.5 segundos, lo que quiere decir que la extracción de calor de la capa de vapor en ésta zona se incremento.

En cuanto a la zona de ebullición nucleada de alta frecuencia que comienza a los 7.0 segundos (punto D, figura 4.47 f) y termina a los 8.1 segundos (punto E, figura 4.47 g) y se encuentra entre los puntos D-E, la distancia longitudinal es una poco mayor a la de la figura 4.44 a) y la etapa dura 1.1 segundos, por lo que la zona presenta una pendiente un poco menos pronunciada con respecto a la horizontal.

La zona de ebullición nucleada a baja frecuencia comienza a los 8.1 segundos (punto E, figura 4.47 g) y se encuentra entre los puntos E-F (figuras 4.47 g y h) con una duración de 1.3 segundos.

Después del punto F comienza la zona de convección forzada. En el punto B de la figura 4.47 b) la probeta no ha llegado a la posición de trabajo.

En el punto A de la figura 4.48 a), la temperatura a la que la probeta cuando tiene contacto con el medio de temple es de 903 °C. Al igual que en los casos anteriores tenemos el primer flujo de calor crítico entre los puntos A y B (figuras 4.48 a y b) el cual tiene una duración de 0.5 segundos.

En la figuras 4.48 (c y e) se observa que la capa de vapor se sigue manteniendo estable pese a que se está trabajando con el máximo flujo (puntos B-C), la etapa comienza a los 0.5 segundos (punto B) y ésta etapa dura 4.5 segundos.

La distancia longitudinal entre los puntos C-D (figuras 4.48 e y f) creció con respecto a las de las figuras 4.46 y 4.47 (e y f), ésta etapa dura 0.5 segundos.

En cuanto a la zona de ebullición nucleada de alta frecuencia que comienza a los 5.5 segundos (punto D, figura 4.48 f) y se encuentra entre los puntos D-E (figuras 4.48 f y g), la distancia creció más con respecto de las figuras 4.46 y 4.47 (f y g), y la etapa dura 1.2 segundos, por lo que la zona presenta una pendiente menos pronunciada con respecto a la horizontal que los dos casos anteriores a 0.2 y 0.4 m/s.

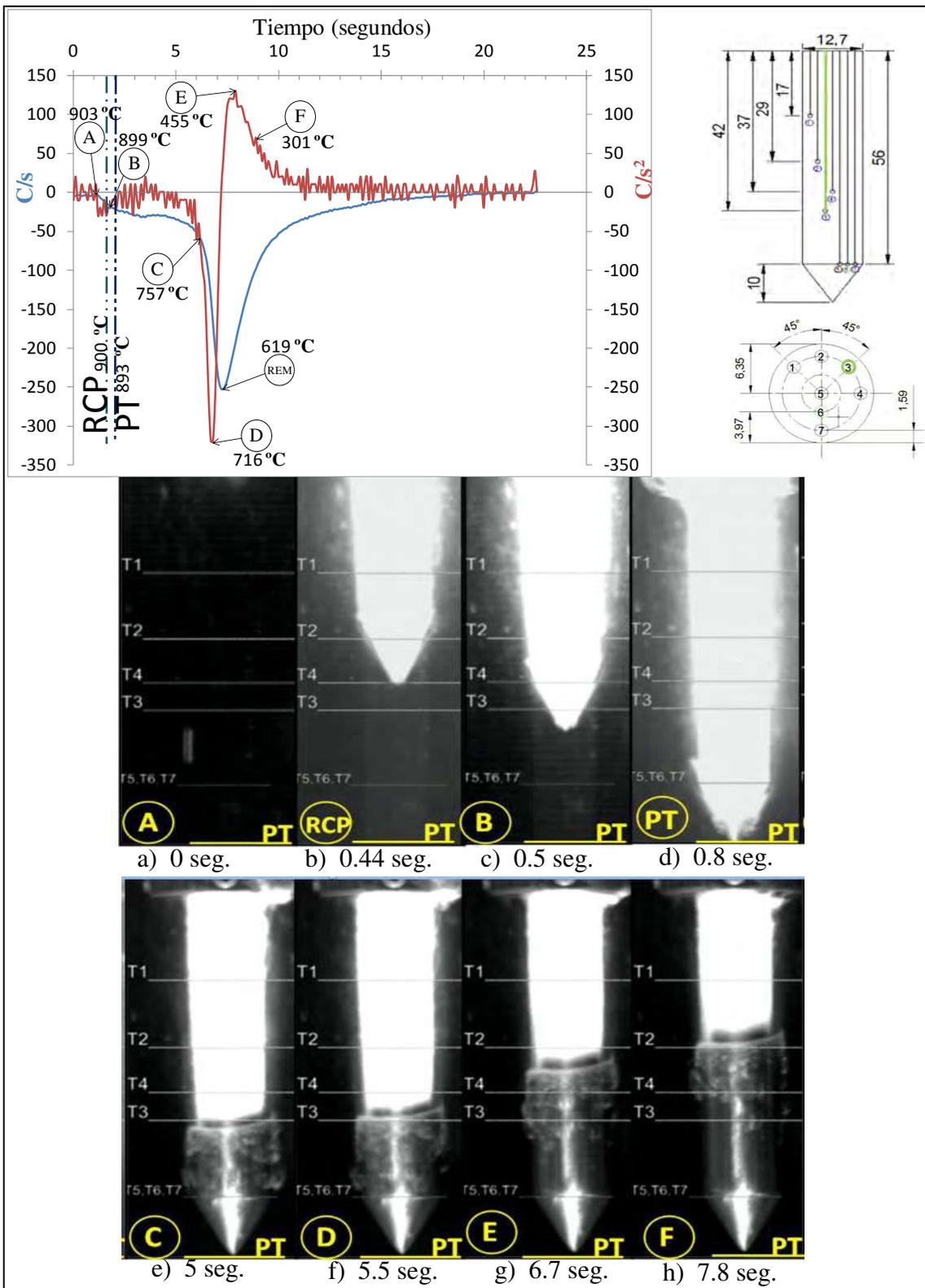


Figura 4. 48.- Curva de rapidez de enfriamiento y curva de aceleración de enfriamiento con imágenes representando cada uno de los puntos significativos de la probeta cónica con agua a 60 °C (en la posición del termopar T/C 3) fluyendo a 0.6 m/s. El tiempo de referencia es el punto A.



La zona de ebullición nucleada a baja frecuencia comienza en el punto E (figura 4.48 g) a los 6.7 segundos y la zona se encuentra entre los puntos E-F (figuras 4.48 g y h) y tiene una duración de 1.1 segundos. Después del punto F (figura 4.48 h) comienza la zona de convección forzada. En el punto B de la figura 4.48 c) la probeta no ha llegado a la posición de trabajo. La capa de vapor rompe en el punto RCP a los 0.44 segundos (figura 4.48 b).

El punto E de las figuras 4.45 (a, b y c), es parecido y se mantiene casi constante en un valor de $100\text{ }^{\circ}\text{C/s}^2$.

En las figuras 4.45 (a, b y c) de la probeta de base cónica se observa que conforme se incrementa el flujo, la rapidez de enfriamiento máxima se incrementa en una mayor proporción a las demás probetas.

El tiempo de ebullición nucleada total para 0.2 m/s es de 2.4 segundos, para 0.4 m/s es de 2.4 segundos y para 0.6 m/s es de 2.3 segundos. Vergara Hernández y Hernández Morales [6] reportaron valores para la condición de 0.2 m/s de 3.67 y 4.16 segundos de ésta etapa, lo cual es mayor tiempo de lo que hemos obtenido.

En las curvas de rapidez ya aceleración de enfriamiento de la figura 4.45 se observa para los puntos D-E que conforme disminuye la pendiente, la extracción de calor aumenta. En tanto que para los puntos E-F la extracción de calor disminuye conforme aumenta la pendiente.

4.7.-Comparación del punto de Leidenfrost con las curvas de rapidez de enfriamiento y las nuevas curvas.

No todos los parámetros de caracterización de las curvas de enfriamiento y de la rapidez de enfriamiento cambiaron con la introducción de esta nueva forma de interpretar las curvas, es decir con la curva de aceleración y rapidez de enfriamiento superpuestas. La rapidez de enfriamiento máxima y la rapidez de enfriamiento en la capa de vapor no sufrieron ningún cambio, el único cambio significativo se observó en la temperatura de Leidenfrost.

La temperatura de Leidenfrost disminuyó en todos los casos (figuras 4.49 y 4.50). En el caso de la curva de la probeta plana, esta se mantuvo como la anterior, con sus valores decreciendo. El decrecimiento de la temperatura va en contra de lo que dicen algunos de los investigadores. Ellos dicen que al aumentar la velocidad la temperatura de Leidenfrost aumenta, lo que se ve claramente que es erróneo, ya que al aumentar la velocidad la temperatura de Leidenfrost disminuye.

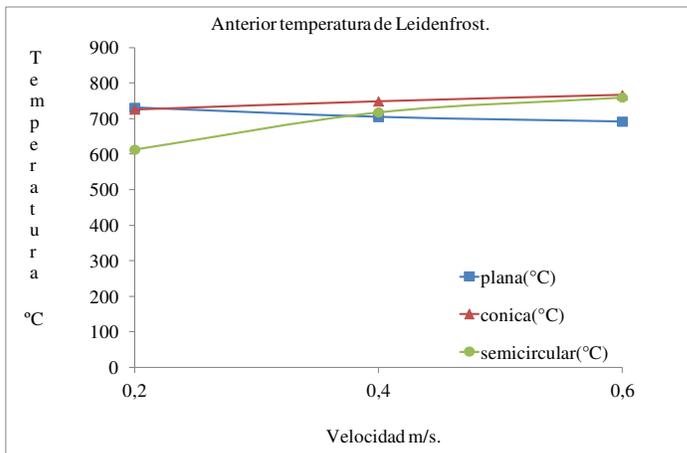


Figura 4. 49.- Temperatura de Leidenfrost anterior.

Tabla 4.4.- Temperatura de Leidenfrost anterior.

velocidad (m/s)	plana(°C)	cónica(°C)	Semicircular (°C)
0,2	731	726	613
0,4	705	749	718
0,6	692	767	760

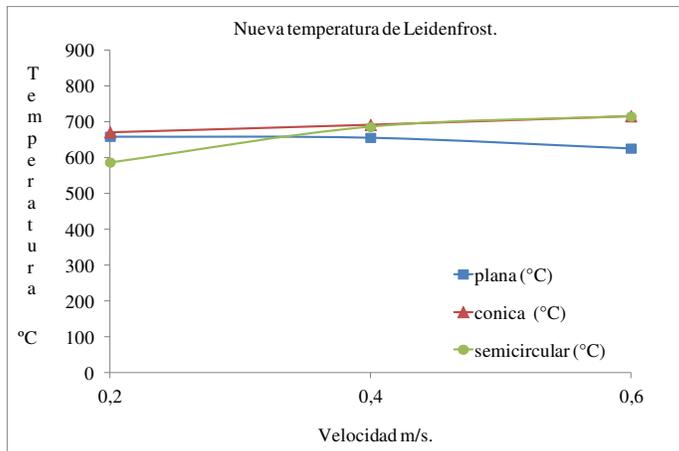


Figura 4. 50.- Temperatura de Leidenfrost nueva.

Tabla 4.5.- Temperatura de Leidenfrost nueva.

velocidad (m/s)	plana(°C)	cónica (°C)	semicircular (°C)
0,2	659	671	587
0,4	656	692	686
0,6	626	716	715



Para la temperatura de Leidenfrost anterior y nueva (figura 4.49 y 4.50) el comportamiento se mantiene igual.

4.8.-Efecto de la oxidación de la probeta.

Como se menciona en los antecedentes la oxidación en las probetas tiene una fuerte relación con la rapidez de enfriamiento. En la figura 4.51 se muestra una probeta sin oxidación y en la figura 4.52 se muestra una probeta con pequeñas manchas de óxido en la superficie. En la probeta sin oxidación la rapidez máxima de enfriamiento es de 211 °C/s y en la pieza oxidada es de 248 °C/s. Lo anterior va de acuerdo con la teoría mencionada en los antecedentes, ya que se dijo que cuando la capa de óxido es pequeña la rapidez máxima de enfriamiento crece, pero que si esta capa de óxido pasa de un espesor determinado la rapidez de enfriamiento disminuye bastante.

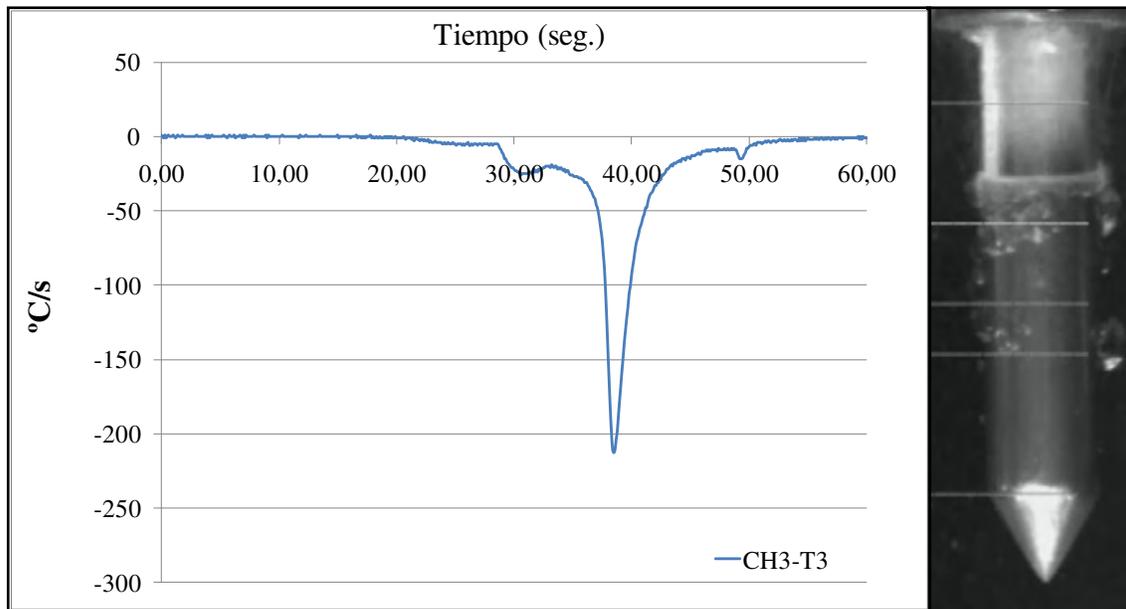


Figura 4. 51.-Probeta sin oxidación (pc_60_20_1).

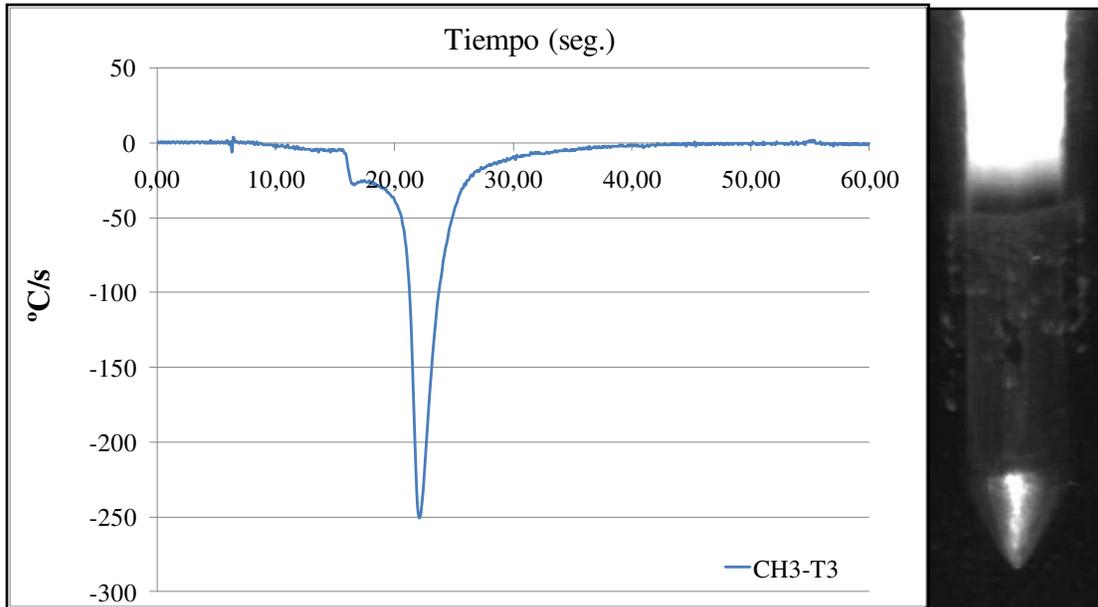


Figura 4. 52.-Probeta oxidada (pc_60_20_2).

Por ahora con lo presentado en las figuras 4.51 y 4. 52 se puede verificar que es cierto lo que dicen los investigadores acerca de la capa de oxido de espesores pequeños y que es un tema que todavía se encuentra en investigación.

4.9.-Distorsión de las probetas

La distorsión es uno de los parámetros que se deben tener en cuenta cuando se realiza el temple de piezas metálicas, ya que este es el principal detonante para la formación de fisuras, en los casos más leves, hasta grietas que, en los casos donde el trabajo anterior se considera como trabajo no aprovechado y con pérdidas monetarias.

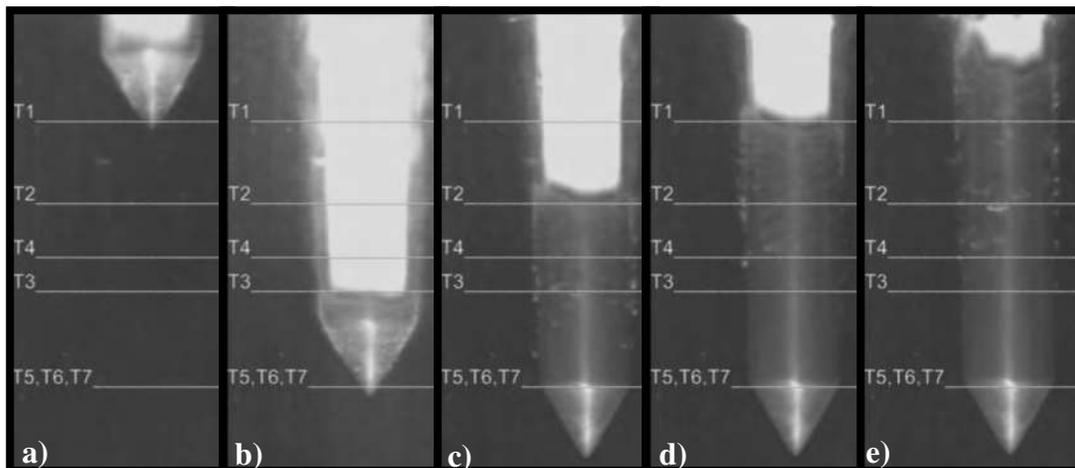


Figura 4. 53.-Probeta cónica sin distorsión (pc_30_20_2).

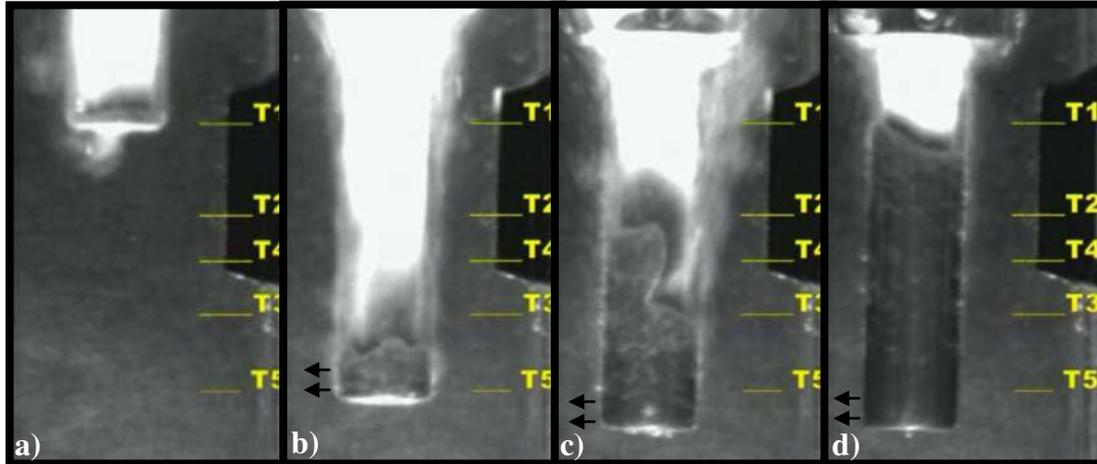


Figura 4. 54.-Probeta plana con distorsión (pp_30_20_1).

En la figura 4.53 (probeta cónica) se observa que el avance del frente de mojado es estable y con un avance uniforme aun a la condición de agua a 30 °C y 0.2 m/s, mientras que en la figura 4.54 (probeta plana) el avance es totalmente caótico (figura 4.54 b y c) y no uniforme a las mismas condiciones que la probeta cónica.

En la figura 4.53 la probeta baja verticalmente sin tener un movimiento hacia los lados o torcerse debido a los esfuerzos térmicos que se presentan por la formación de gradientes de temperatura, en cambio en la figura 4.54 se ve que la probeta entra verticalmente sin ningún desalineamiento con respecto a la vertical, pero conforme va avanzando el frente de mojado a la superficie, la punta de esta comienza a moverse hacia la izquierda, esto se ve más claramente en la figura 4.54 (b, c y d). En esta figura se hace más evidente que hay un gradiente demasiado grande que hace que los esfuerzos se incrementen en una gran magnitud. En la parte de arriba predominan los esfuerzos de tensión, mientras que en la parte de abajo los de compresión, es por esto que la punta de la probeta se dobla hacia la izquierda (figura 4.54 d).

4.10.-Efecto del espesor de la probeta.

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor (h) es muy importante para la predicción de la microestructura en el interior del sólido, pero los métodos utilizados actualmente no proporcionan una idea real de este ya que toman la pieza como si el enfriamiento fuese uniforme (modelo Lumped) y es por esto que solo se introduce un solo termopar a las probetas de plata (JIS). En las empresas o industrias el material más utilizado es el acero al carbono y su coeficiente de conductividad térmica es pequeño, es por esto que no se puede aplicar el modelo antes mencionado, además de h varía con el tiempo y la posición.

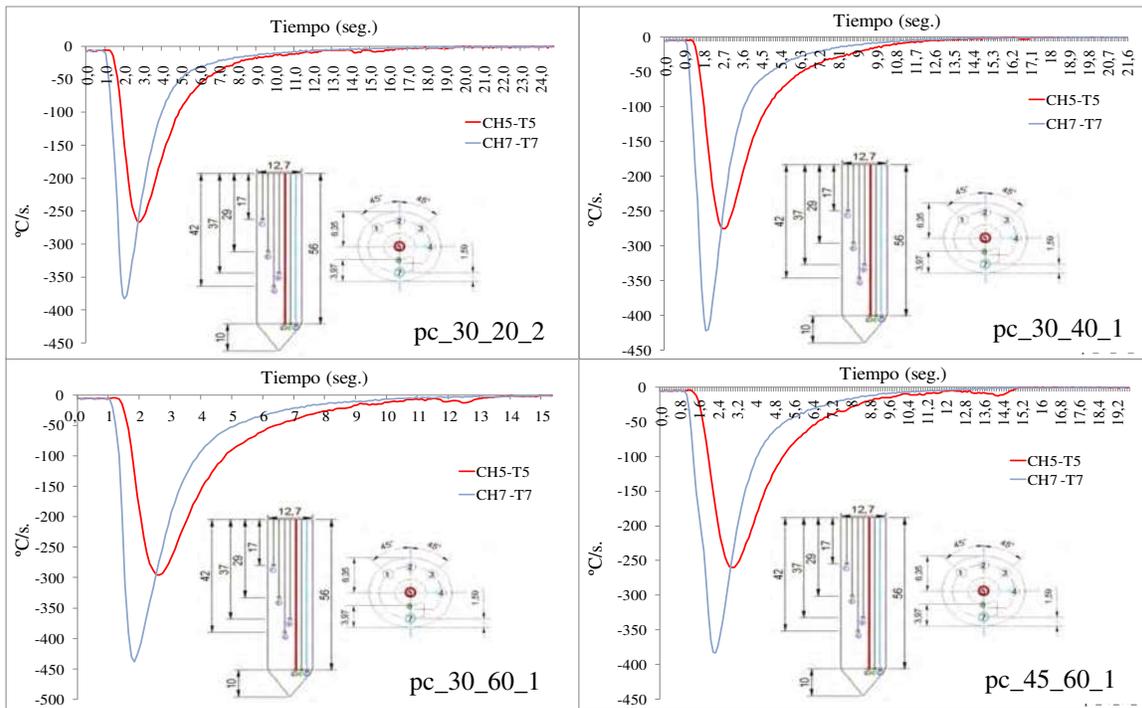


Figura 4.55.-Efecto del espesor en la probeta cónica a diferentes condiciones.

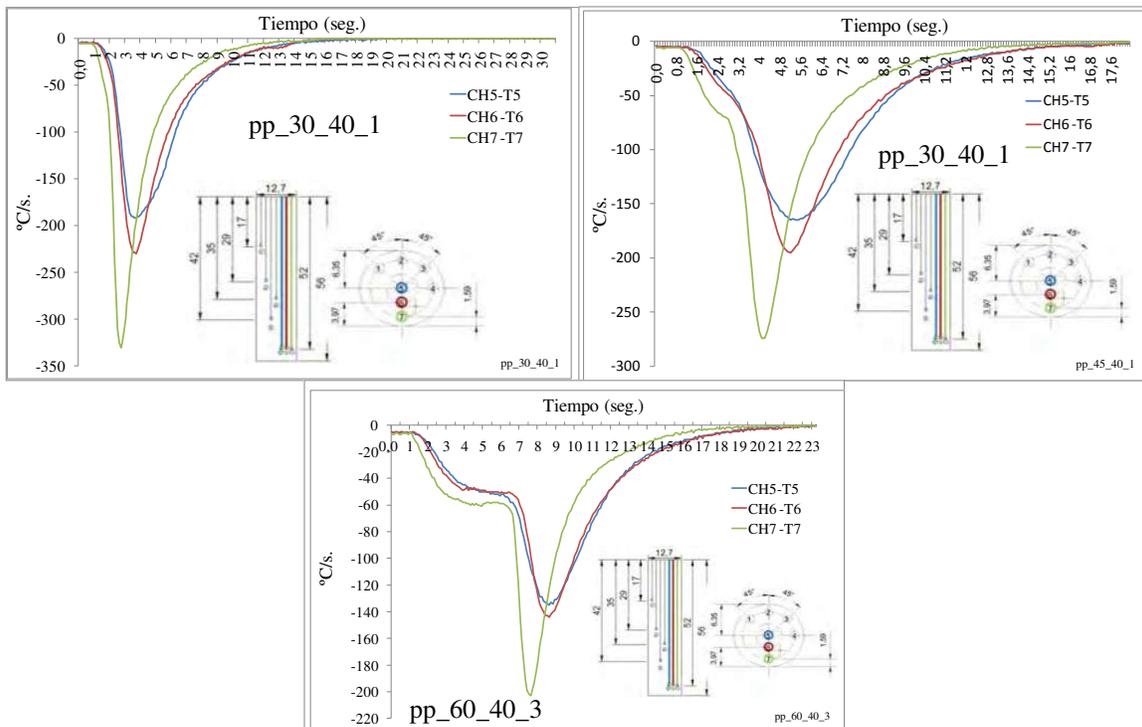


Figura 4.56.-Efecto del espesor en la probeta plana a diferentes condiciones.



En la probeta cónica de la figura 4.55 se ve que la máxima rapidez de enfriamiento del termopar T5 se encuentra exactamente en el centro de la curva del termopar T7, este mismo comportamiento se observa para todos los casos en este tipo de probetas.

La probeta plana de la figura 4.56 muestra un comportamiento similar al de la probeta plana. En estas se observa que el termopar T5 y el termopar T6 muestran la máxima rapidez de enfriamiento tocando en este máximo, a la línea del termopar T6. Aquí se muestra que el termopar que está más pegado a la superficie es que tiene una mayor rapidez de enfriamiento, mientras que las que están más al centro de la probeta tienen una menor rapidez de enfriamiento. En este caso la mayor rapidez de enfriamiento la muestra el termopar T7, seguido de los termopares T6 y T5 respectivamente.

Teniendo en mente estos resultados, se pudo comprobar que usar el modelo Lumped en este tipo de probetas provoca la obtención de resultados totalmente erróneos. Es por esto que se busca utilizar métodos inversos para poder calcular de una forma más confiable las historias térmicas al interior del sólido y tener una mayor confiabilidad cuando se calcula el coeficiente de transferencia de calor.

4.11.- Simulación matemática.

Para la simulación matemática se dibujaron las tres probetas en el programa Gambit en dos dimensiones, donde también se malló con la función de boundary layer en la zona de la superficie de la pared en la probeta con 10 filas con incremento de 0.1 y relación de 1.2 para las tres probetas, posteriormente, para el resto del dibujo se tomó un mallado cuadrado (figura 4.57).

Una vez que se obtuvo el mallado, se procedió a poner las condiciones de frontera conocidas y con las cuales se hizo la simulación física. En la parte de abajo se utilizaron las velocidades de entrada de 0.2, 0.4 y 0.6 m/s con la función velocity inlet. En la salida se utilizó la condición de presión de salida, presión manométrica igual a cero con la función pressure outlet. Debido a que hay una simetría de las probetas y para disminuir el tiempo de simulación se hizo uso de la función symmetry. La última función que se utilizó fue la de pared (wall) con condición de no deslizamiento, es decir paredes sin movimiento.

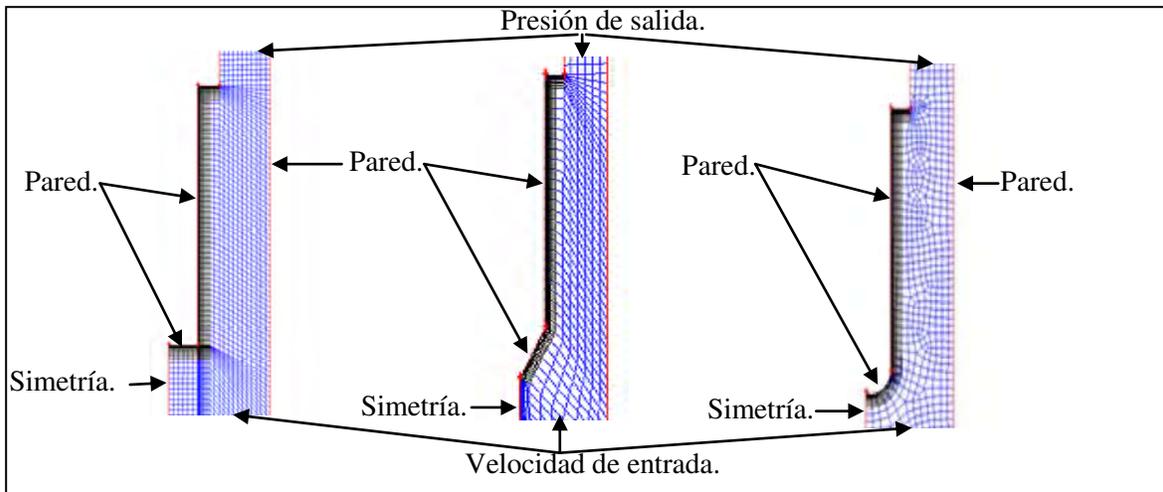


Figura 4. 57.-Mallado y condiciones de frontera de las probetas.

El mallado se exportó y guardó con el solver Fluent 5/6 el cual da la extensión .msh. El mallado se chequeó en el programa Fluent y se escogió el modelo de turbulencia K- ϵ . El material empleado fue agua a temperatura ambiente y se inicializó en cada uno de los casos a 0.2, 0.4 y 0.6 m/s.

En las figuras siguientes se muestran y analizan los resultados obtenidos con cada una de las simulaciones y validando con esto los resultados obtenidos en la simulación física. Con la simulación matemática nos podemos dar cuenta de las magnitudes de velocidad alrededor de cada una de las condiciones, ya que la simulación física solo es cualitativa, mientras que la simulación matemática es cuantitativa. La interpretación de los resultados se hace más sencilla debido a que las magnitudes se presentan en colores y con tamaños de flechas diferentes, para las magnitudes más grandes se presentan de color rojo y para las magnitudes más pequeñas son de color azul.

4.11.1.-Probeta plana.

En la simulación matemática se puede observar que el cople que se utiliza para unir la lanza de entrada y la probeta, no se tomó en cuenta en el artículo presentado por B- Hernández-Morales [84], y que este sí influye en el comportamiento del fluido ya que se puede observar que la zona de unión del cople hay una disminución de velocidad y podría afectar el funcionamiento del termopar T1.

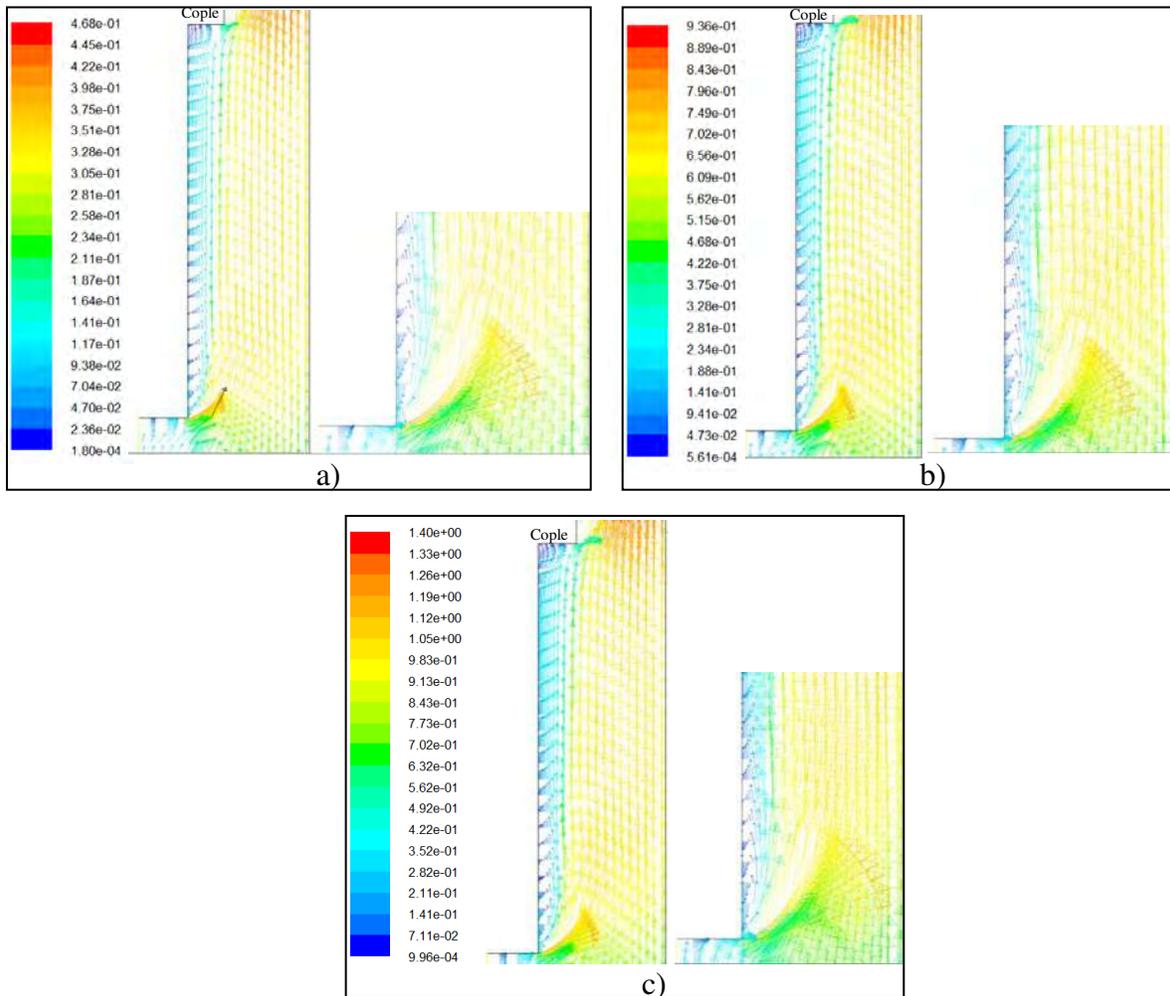


Figura 4. 58.-Probeta plana, vectores de velocidad (m/s) a: a) 0.2, b) 0.4 y c) 0.6 m/s.

En la figura 4.58 se muestra que en la parte de debajo de la probeta plana donde impacta el fluido hay una disminución de velocidad. En la parte lateral de la figura 4.58 a), solo un poco arriba de la base de la probeta, se ve que el flujo cambia de dirección regresándose hacia la base de la probeta y disminuyendo su velocidad. La longitud de la zona de retorno de fluido aumenta con el aumento de la velocidad (figura 4.58 a y b).

Este retorno de fluido de la figura 4.58 a) es lo que hace que haya una separación de los listones de la figura 4.2. En la esquina derecha (figura 4.58) de la probeta hay un aumento en la velocidad del fluido y la magnitud de esta velocidad aumenta en gran proporción con el aumento de la velocidad de entrada del fluido, incrementándose con esto la distancia de la separación de la capa limite dinámica, ya que a 0.2 m/s esta se encuentra cercana a la probeta, y a 0.6 m/s se encuentra más cerca a la pared derecha.



La figura 4.58 b) se puede comparar con la figura 4.3 en la que se muestran las mismas condiciones de trabajo y que el retorno del fluido es el que hace que haya la separación del listón debido a la baja velocidad.

En la figura 4.58 c) se muestra que es la zona que presenta una mayor longitud de recirculación y que corresponde a las figuras 4.4 y 4.6. Aunque en esta la figura 4.58 c) no se observan las ondulaciones asimétricas de los listones (figura 4.4) y de la burbuja de aire (figura 4.6), esta nos da una idea de la magnitud de las velocidades que se presentan después de que el fluido choca con la probeta.

Con lo anterior se puede corroborar lo observado con los videos grabados con la cámara de alta velocidad, ya que como se ve en la figura 4.11 después del punto C hay una expansión de la capa de vapor debido a el desprendimiento de la capa limite dinámica y térmica y a el retorno de el fluido hacia la parte inferior de la cara plana de la probeta. Cuando la velocidad del fluido aumenta la capa de vapor encuentra las condiciones óptimas para expandirse.

4.12.2.-Probeta semicircular.

Debe recordarse que según la literatura este tipo de probetas es la que tiene el menor coeficiente de arrastre y por lo tanto el mejor perfil aerodinámico de los estudiados en esta tesis.

En esta probeta (figura 4.59) ya no se muestra el retorno del flujo que se presento en la probeta plana (figura 4.58). Por lo tanto el desprendimiento de la capa limite dinámica no es tan grande en la probeta cónica como el que se presenta en la probeta plana, comprobando con esto la figura 4.7.

En la figura 4.59 se encontró que las magnitudes de velocidad aumentan con respecto a las mostradas en la probeta plana.

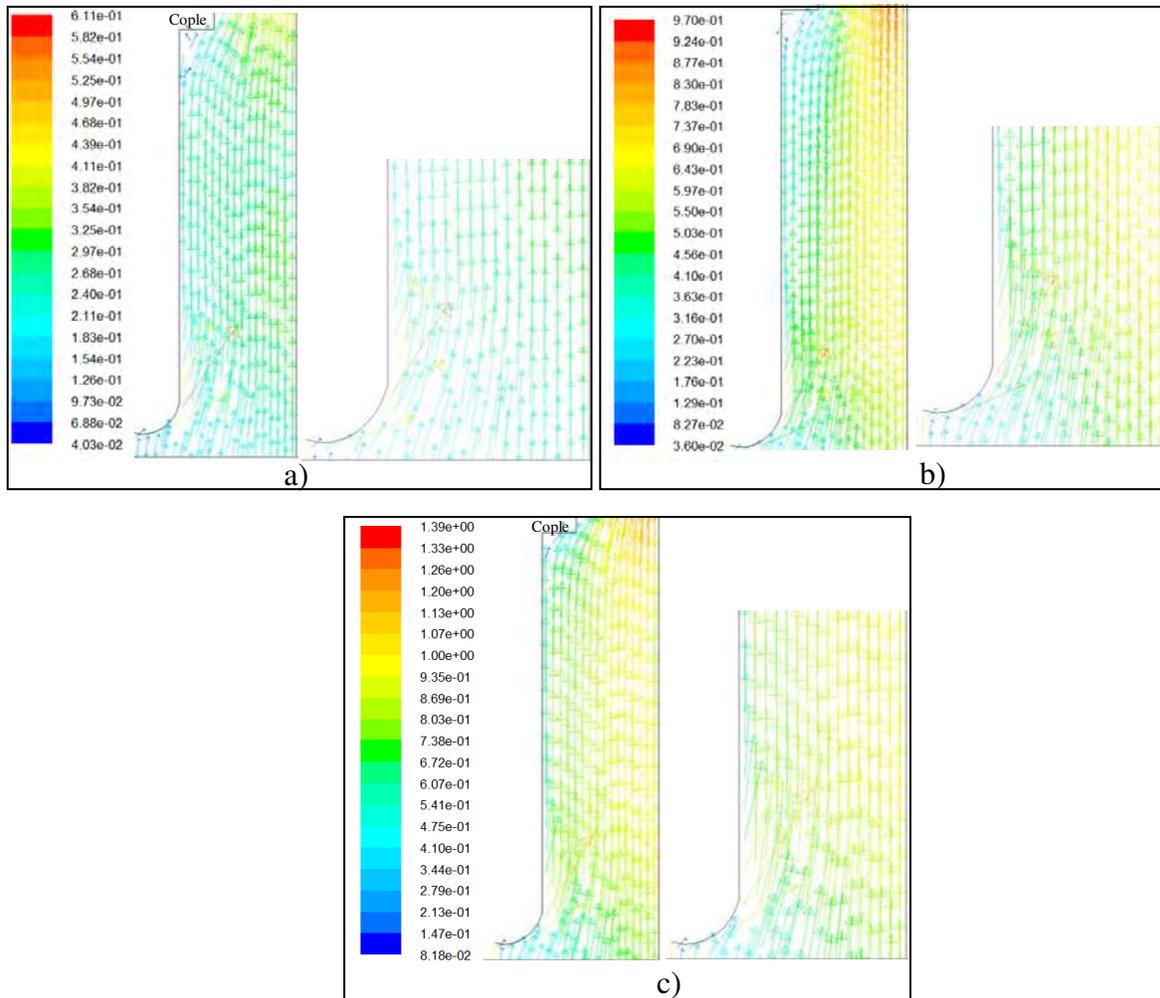


Figura 4. 59.-Probeta semicircular, vectores de velocidad (m/s) a) a) 0.2, b) 0.4 y c) 0.6 m/s.

Cerca de donde inicia el semicírculo se observa que la magnitud de los vectores crece, lo que comparado con la figura 4.24 podría ser la causa de que la capa de vapor rompa un poco después del inicio del semicírculo. Ya que al aumentar la velocidad (figura 4.59), mayor es la extracción de calor y por lo tanto un adelgazamiento de la capa de vapor.

Para la condición de 0.2 m/s la velocidad alcanzada en la parte de adelgazamiento de la capa de vapor es de 0.554 m/s, para 0.4 m/s corresponde una velocidad 0.877 m/s y para la velocidad de 0.6 m/s se presenta una velocidad de 1.26 m/s.

4.11.3.-Probeta cónica.

La probeta cónica es la que mejores resultados presenta ya que es la que alcanza mayores valores en la magnitud de los valores de velocidad. Estos valores de velocidad son más homogéneos en cuanto a magnitud comparada con las probetas plana y semicircular.

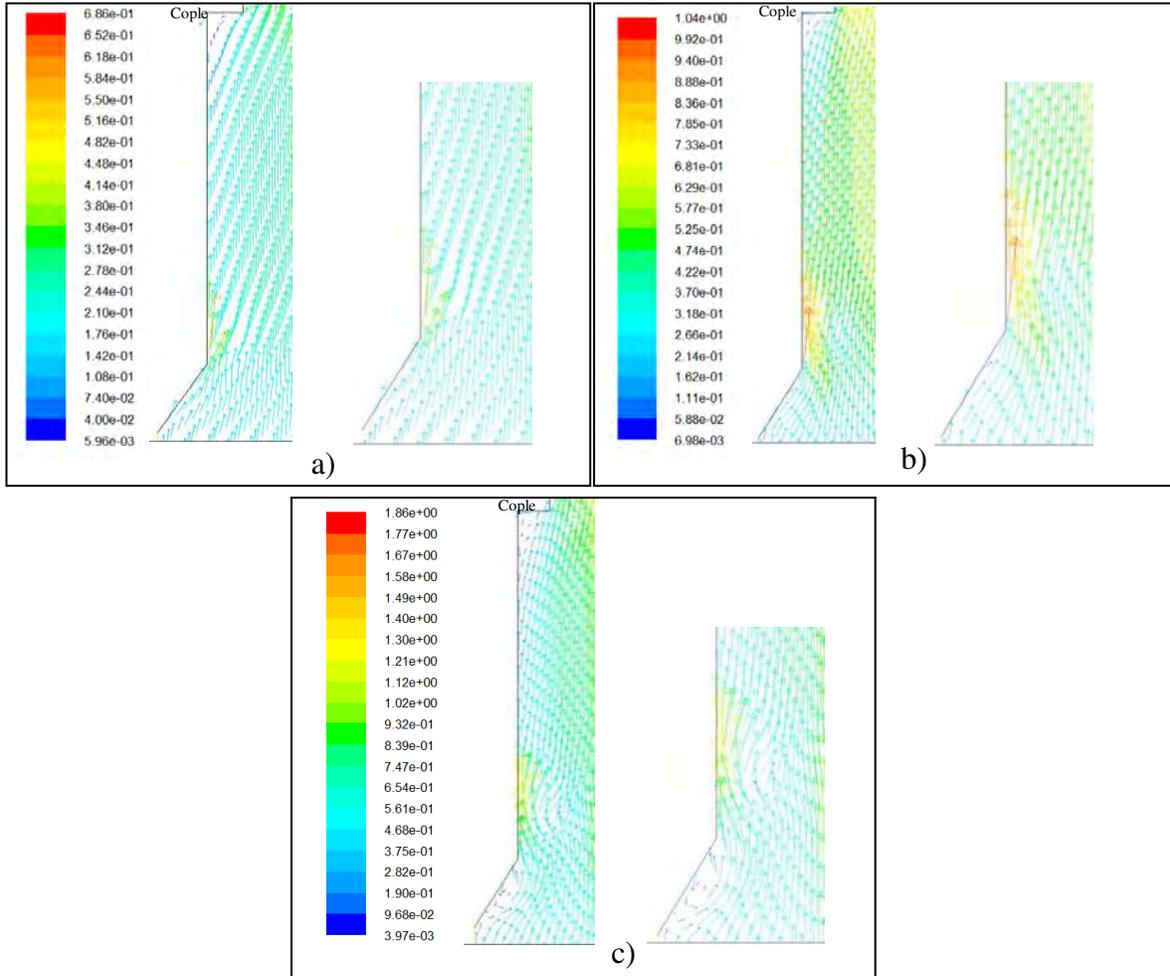


Figura 4. 60.-Probeta cónica, vectores de velocidad (m/s) a: a) 0.2, b) 0.4 y c) 0.6 m/s.

En la figura 4.60 a) los valores de velocidad en la cara lateral de la probeta son uniformes en cuanto a la magnitud de los vectores, lo que corrobora que los listones de la figura 4.9 a) estén adheridos a la probeta cónica.

En las figuras 4.60 (b y c) se observa que el fluido presenta un salto en el valor de la velocidad exactamente en el vértice de las líneas que representan la cara lateral del cilindro y el cono. Para la velocidad de trabajo (velocidad de corriente libre) de 0.4 m/s, la velocidad alcanzada en la zona mencionada anteriormente es de 0.940 m/s y para la velocidad de 0.6 m/s se alcanza una velocidad de 1.30 m/s.



La figura 4.60 c) muestra una clara concordancia con la figura 4.9 b). En la figura 4.9 b) se observa que en la parte el vértice de las líneas que representan la cara lateral del cilindro y el cono el listón está pegado a la superficie de la probeta, pero un poco arriba después se separa de la probeta. En la parte donde está pegado el listón las velocidades son de 1.30 m/s, después de que se despega el listón las velocidades son de 0.654 m/s. El listón se despega en la parte de arriba cercano al cople porque las velocidades disminuyen en gran proporción a causa del cople.



CONCLUSIONES.

Las conclusiones que se tienen después de haber construido el sistema y analizado las pruebas experimentales en estado isotérmico y no isotérmico, además de las simulaciones en estado isotérmico son las siguientes:

- En los sistemas experimentales propuestos por Narazaki no se analiza el efecto del flujo del fluido es por eso que no tiene una buena reproductibilidad en los sistemas, en cambio en sistema construido en la FIM propuesto por H. J. Vergara-Hernández y Bernardo Hernández-Morales toma concepto de flujo totalmente desarrollado.
- Con las pruebas iniciales se corrobora que las historias térmicas adquiridas en el sistema fueran reproducibles y la punta de plata de los termopares nos garantiza una buena sensibilidad en la adquisición de las historias térmicas debido a su elevada conductividad térmica.
- Las pruebas realizadas a la probeta de cara plana en estado isotérmico mediante la utilización de listones de celofán concuerdan con las simulaciones de líneas de corriente empleando una ecuación experimental de velocidad mediante la programación de un UDF (User Defined Function), publicado por B- Hernández-Morales y colaboradores [84].
- La probeta cilíndrica de punta plana a 60 °C y 0.2 m/s es la única condición a la que produce familias de curvas. Por lo que no es cierto lo que se dice Aronov [86] trabajando a elevadas velocidades con este tipo de geometrías (1.6 a 1.8 m/s) en el Intensive Quenching se tendrá un enfriamiento más uniforme en la probeta.
- El aumento en la velocidad del medio de enfriamiento cuando se templan probetas de cara plana hace que la longitud de la zona de retorno de flujo se incremente, aumentando con esto la expansión de la capa de vapor. Pese a que la norma JIS K 2242 autorizo este tipo de probetas en el 2004, el presente estudio reafirma que esta probeta no debe usarse para caracterizar el frente de mojado.
- A la condición de flujo de agua a 30 °C y velocidad de 0.2 m/s, la probeta cónica presento un avance uniforme del frente de mojado y sin distorsión, mientras que a las mismas condiciones la probeta plana presento un frente de mojado que no rompió uniforme y con una elevada distorsión.



- El hecho que la probeta sea aerodinámica no garantiza que obtengamos un buen comportamiento en la rapidez de enfriamiento, ya que se vio que la probeta semicircular se comporta bien hidrodinamicamente, pero la capa de vapor tarda demasiado tiempo en romper debido a que no tiene bordes. En cambio la probeta cónica reúne estas dos características, es decir, se comporta bien hidrodinamicamente y tiene un punto por donde puede comenzar a romper, en este caso es la punta.
- Las probetas deben de ser pulidas con un terminado a espejo, ya que esto nos garantiza que no haya formación de oxido en la superficie de la probeta.
- El tamaño de burbuja juega un papel muy importante, ya que se observo que a tamaño de burbujas pequeñas, la rapidez de enfriamiento es mayor.
- Se encontraron nuevas curvas para localizar exactamente cada uno de los fenómenos de ebullición mediante la superposición de la curva aceleración de enfriamiento con la curva de rapidez de enfriamiento. Con la sincronización de las nuevas curvas y las imágenes captadas con la cámara de alta velocidad se logro la ubicación exacta de los puntos donde comienza cada uno de los fenómenos de ebullición.
- La probeta cilíndrica de punta cónica produce familias de curvas de rapidez de enfriamiento para todas las condiciones estudiadas en este proyecto de tesis.
- La temperatura de Leidenfrost en procesos de temple por convección forzada no es constante si no que depende significativamente de la forma de la probeta y de la velocidad del medio de enfriamiento.
- La temperatura de Leidenfrost aumenta al aumentar la velocidad del agua para las probetas de base cónica y semicircular, mientras que disminuye en la probeta de base plana.
- La rapidez de enfriamiento máxima aumenta conforme se tiene una mayor velocidad del fluido probetas cónica y semicircular. En tanto que en la probeta plana también se tiene un aumento en la rapidez de enfriamiento máxima, pero este es pequeño.
- De las tres geometrías estudiadas, la probeta cilíndrica de base cónica es la que muestra historias de rapidez de enfriamiento más regulares, por lo que se recomienda su uso para estudios de éste tipo.



APENDICE A.

Índice de refracción y caja cuadrada.

La luz se propaga con velocidades diferentes a través de los distintos materiales. Por ejemplo, la velocidad de la luz en el aire es mayor que en el agua, el vidrio o el plástico [85]. Cuando un rayo de luz que se propaga en cierta dirección, pasa a otro medio en el que la velocidad es diferente, la dirección de propagación se altera. Cuando pasa un rayo de luz de un medio a un medio donde hay agua, la luz se desvía. Esto se debe como ya se mencionó, a que la velocidad de propagación de la luz en el aire es mayor que en el líquido. Cuando la luz se desvía al pasar de un medio de propagación a otro, se dice que se produce una refracción. Este fenómeno solo puede producirse cuando la velocidad de la luz es diferente en los diferentes medios [85].

Índice de refracción, de una sustancia o un medio transparente, es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en la sustancia o el medio transparente [86].

Tabla A1.-Indices de refracción [87].

Substancia	<i>n</i>	Substancia	<i>n</i>
Vacío	1 (exacto)	Helio	1,000036
Aire (0 °C, 1 bar)	1,0002926	Heptanol (25 °C)	1,423
1-butanol (20 °C)	1,399	Hidrógeno	1,000132
Acetaldehído	1,35	Hielo	1,309
Acetona	1,36	Metacrilato	1,491
Agua (20 °C)	1,333	Metanol (20 °C)	1,329
Alcohol etílico (etanol)	1,361	PET	1,58
Ambar	1,55	Polycarbonato	1,585
Arseniuro de galio(III)	3,927	Silicio	4,01
Benceno (20 °C)	1,501	Teflón	1,38
Cloroformo	1,48	Tetracloruro de carbono	1,460
Cloruro sódico (sal común)	1,544	Trementina	1,472
Criolita	1,338	Vidrio Crown	1,52
Cuarzo	1,544	Vidrio Flint denso	1,66
Diamante	2,417	Vidrio Flint ligero	1,58
Dióxido de carbono	1,00045	Vidrio Flint medio	1,62
Disulfuro de carbono	1,630	Vidrio Pirex® (borosilicato)	1,470
Fluorita	1,43	Xileno	1,83
Fosfuro de galio(III)	3,5	Zafiro	1,77
Glicerina (glicerol)	1,4729	Zircón	1,923

En la tabla A1 no se muestra el índice de refracción del acrílico, pero este es de 1.49.

El efecto de la refracción se puede observar fácilmente introduciendo una varilla en agua. Se puede ver que parece quebrarse bajo la superficie. En realidad lo que sucede es que la luz reflejada por la varilla (su imagen) cambia de dirección al salir del agua, debido a la diferencia de índices de refracción entre el agua y el aire.



Se utiliza la letra **n** para representar el índice de refracción del material, y se calcula por la siguiente fórmula:

$$n = \frac{c_0}{v} \quad (A.1)$$

Donde:

- n** : índice de refracción del medio en cuestión.
- c₀** : velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s).
- v** : velocidad de la luz en el medio en cuestión.

Es decir que es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y en el medio. Dado que la velocidad de la luz en cualquier medio es siempre menor que en el vacío, el índice de refracción será un número siempre mayor que 1 [88].

En el vacío: $n=1$

En otro medio: $n>1$

La relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de una longitud de onda determinada en una sustancia se conoce como índice de refracción de la sustancia para dicha longitud de onda. El índice de refracción del aire es 1,00029 y apenas varía con la longitud de onda. En la mayoría de las aplicaciones resulta suficientemente preciso considerar que es igual a 1 [86]. Si un rayo de luz que se propaga a través de un medio homogéneo incide sobre la superficie de un segundo medio homogéneo, parte de la luz es reflejada y parte entra como rayo refractado en el segundo medio [86].

En la figura A1 se muestra la trayectoria de un rayo de luz que atraviesa varios medios con superficies de separación paralelas. El índice de refracción del agua es más bajo que el del vidrio. Como el índice de refracción del primer y el último medio es el mismo, el rayo emerge en dirección paralela al rayo incidente AB, pero resulta desplazado [86].

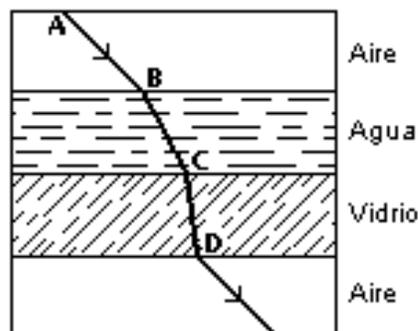


Figura 61.- Rayo refractado que atraviesa 3 medios diferentes.



Para entender más este efecto se realizó un experimento con un vaso con agua y se le hizo incidir un rayo laser. Aquí se pudo observar que si se hace incidir un rayo laser perpendicular al vaso en los extremo, el rayo tiene una gran desviación debido a la forma redonda de el vaso y al índice de refracción (figura A2).

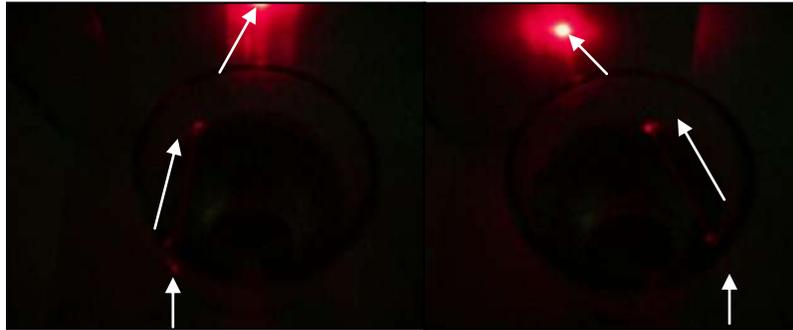


Figura 62.-Refracción en un vaso con agua.

También se realizó otro experimento con una caja cuadrada de vidrio y se lleno con agua, dentro de ésta misma caja se puso el vaso de vidrio con agua. Se hizo incidir el rayo laser de la misma forma que en el experimento anterior. Se puede observar que la desviación de la luz no cambia mucho debido a que el fluido es el mismo dentro de los dos recipientes (figura A3).

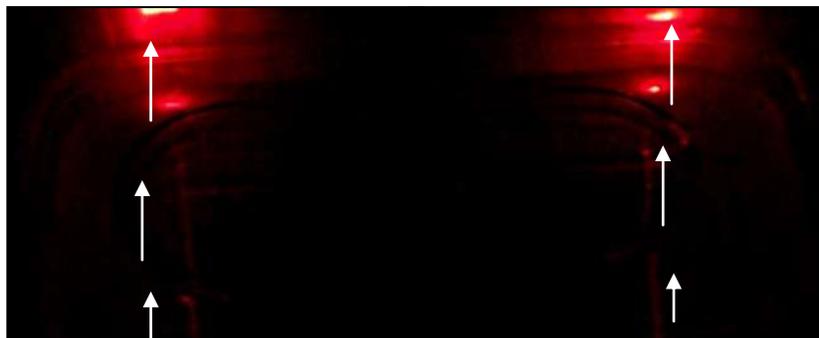


Figura 63.-Refracción en una caja y vaso de vidrio con agua.

Debido a todo lo anterior se utilizó una caja cuadrada de vidrio en la parte exterior del tubo de acrílico y se le introdujo agua para que el índice de refracción permaneciera parecido dentro del tubo de acrílico y la desviación de rayos de luz no nos afectara tanto, y lograr que el efecto de distorsión de la pieza sea menor debido a este fenómeno.



La caja tiene las siguientes dimensiones: 8 cm. de largo, 8 cm. de ancho y 60 cm. de altura. En ésta caja se hizo una perforación de 0.25 in. en el fondo y en ésta perforación se insertó una manguera para llenarla de agua utilizando el principio de vasos comunicantes (figura A4). En la parte superior de la caja se hizo un pequeño orificio con para que el aire que queda atrapado salga de la caja cuando se está llenando de agua.

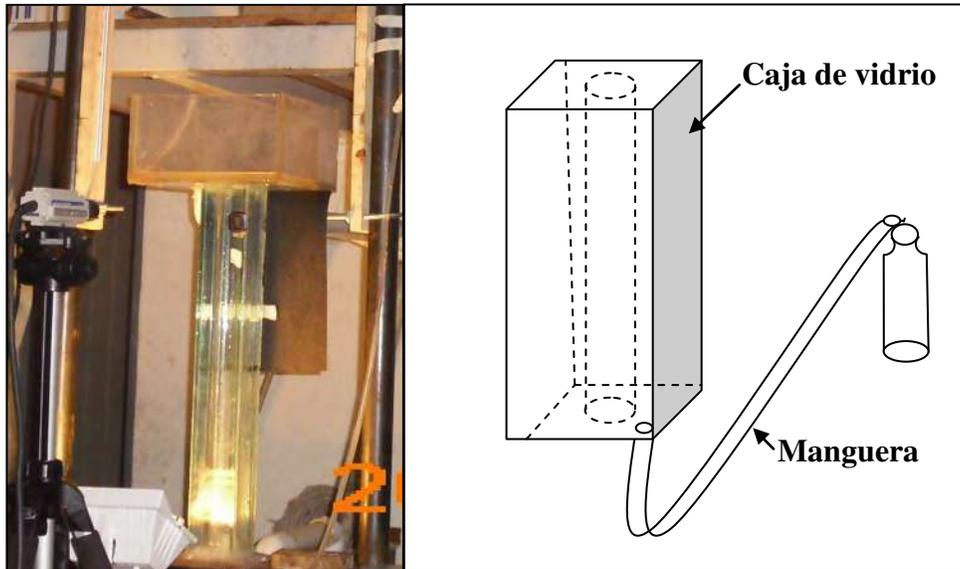


Figura 64.- Caja de vidrio para disminuir la refracción.



APENDICE B.

Programa para convertir las imágenes a video.

```
% Este programa convierte las imagenes a un video con extension .avi
%Bloque 1; funciones utilizadas
%Bloque 2; Borra el workspace y lee en el directorio la extension .jpg
%Bloque 3; Funcion para crear el video ya darle el nombre deseado
%Bloque 4; Inicio de la lectura de las imagenes y adiccion de los frames
%Bloque 5; Se salva el archivo con una extension '.avi'

%% Bloque 1
% [a, map] = imread(filename); ésta es la sintaxis para leer cada
imagen

%strcat: es la funcion que nos sirve para concatenar las imagenes
%int2str: convierte de caracteres enteros a caracteres cadena

%% Bloque 2
clear all; clc %clear all Borrar todo en el workspace y clc borra lo
de la ventana de trabajo
pngFiles = dir('*.png'); %directorio en donde están las imagenes jpg
%% Bloque 3
di=input('A cuantos frames por segundo quieres grabar? ');

aviobj = avifile('pp_30_40_1_conversion.avi','fps',di, 'compression',
'Cinepak'); %crea un video y lo salva el numero de frames deseado
disp('Comenzando el video...');

%% Bloque 4
for i= 1000001:1:1000734%numero de imagenes que se van a leer, y se
van a leer de una en una

[a,
map]=imread(strcat('pp_30_40_1_c001s000',strcat(int2str(i),'.png')));

    a = double(a);%convierte las imagenes a el tipo unit8
    M = im2frame(a,gray(255)); %convierte las imagenes a frames
    aviobj = addframe(aviobj,M);%agrega los frames a el objeto
avi creados previamente
    fprintf('agregando frame = %i\n', i);
end

%% Bloque 5
disp('Terminando el video...')
aviobj = close(aviobj); %Cierra el video
```



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] J.C. Chaves. The Effect of Surface Condition and High Temperature Oxidation on Quenching Performance of 4140 Steels in Mineral Oil, in Manufacturing Engineering. 2001, Worcester Polytechnic Institute: Worcester.
- [2] G.E Totten, A.H Maurice. Steel Heat Treatment Handbook, 1997, Marcel Dekker, Inc. p. 157.
- [3] J.H. Lienhard IV, J.H. Lienhard V. A Heat Transfer Textbook, Tercera edición, Phlogiston Press 2003.
- [4] J. Leidenfrost, “Aquæ communis nonnullis qualitatibus tractatus“, 1756. Reeditado en 1966 por el Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 9, 1153–1166
- [5] F. Frerichs, Th. Lübben, F. Hoffmann, H.-W. Zoch. The influence of geometrical conditions on rewetting behavior of cylindrical components.
- [6] H. J. Vergara-Hernández, Bernardo Hernández-Morales. A Novel Probe Design to Study Boiling Phenomena During Forced Convective Quenching, Experimental Thermal and Fluid Science, Elsevier. Exp. Therm. Fluid. Sci. (33) 797-807.
- [7] S. Owaku, Quench Distortion of Steel Parts, Netsu Shori (J. Jpn. Soc. Heat Treat.), Vol 32 (No. 4), 1992, p 198–202.
- [8] M. Narazaki, Utsunomiya University G.E. Totten and G.M. Webster, The Dow Chemical Company. Hardening by Reheating and Quenching.
- [9] C.E. Bates, G.E. Totten, and R.L. Brennan, Quenching of Steel, Heat Treating, Vol 4, ASM Handbook, 1991, ASM International, p 67–120.
- [10] G. E. Totten, Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel Chapter 4, ASM International, 2002.
- [11] G.E. Totten, C.E. Bates, and N.A. Clinton, Other Quenching Processes, chapter 8, Handbook of Quenchants and Quenching Technology, ASM International, 1993, p 291–338.
- [12] J.R. Davis, ASM Materials Engineering Dictionary, ASM International, 1992, p 407.



- [13] G.E. Totten, C.E. Bates and N.A. Clinton. Handbook of Quenchants and Quenching Technology, ASM International 1993.
- [14] G. E. Totten, M. E. Dakins and R. W. Heins, Cooling curve analysis of synthetic quenchants—A historical perspectiva, Journal of Heat Treating Vol 6, Num 2, 1988, pp 87-95.
- [15] www.houghtonintl.com/images/Hougton%20on%20quenching.pdf
- [16] 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
- [17] H.M. Tensi and M. Schwalm, Wirkung von Abschreckflüssigkeiten unter Berücksichtigung spezieller wässriger Kunststofflösungen (Polyäthylenoxide), HTM 34: 122–131 (1980).
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] G.E.Totten. Polymer Quenchants For Induction Heat Treating Applications: The Basics.
- [21] 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
- [22] T.H. Kunzel, H.M. Tensi y G. Welzel, "Rewetting rate-The Decisive Characteristic of a Quenchant", 5th International Congress on Heat Treatment of Materials, Vol. III; Budapest-Hungary; 1986, pp 1806-1813.
- [23] F. Ravnik and J. Grum. Cracking Perception By Emitted Sound During Quenching.



- [24]. Steel Heat Treatment Handbook, Second Edition - 2 Volume Set Editor(s): George E . Totten, Portland State University, Oregon, USA, 2006.
- [25] H.J. French, Trans. A.S.S.T., V 17 (1930).646.796.
- [26] K. G. Speith and H. Lange, Mitt. Kai. Wilh. Inst. Eisenforschung. 17 (1935), s.175.
- [27] A. Rose, Arch. Eisenhuettenwes., V13 (1939/1940), s.345.
- [28] W. Peter. Arch. Eisenhuettenwes., V20 (1949), Heft 7/8, s.263.
- [29] S. Sato: Kinzoku Kenkyu, V10 (1933) , p. 63.
- [30] M. Tagaya and I. Tamura; J. JIM B-V15 (1951), N11. P. 535-537.
- [31] M. Tagaya and I. Tamura; Technology Report of Osaka University. V4 (1954). N123, p.305-319.
- [32] M. Tagaya and I. Tamura; J. Jim V20 (1956), N3, p.124-128.
- [33] M. Tagaya and I. Tamura; J. Jim V16 (1952), N12, p.652-656.
- [34] JIS K2242. Heat Treat Oil. 1986.
- [35] M. Tagaya and I. Tamura; J. JIM V22 (1958), N12. P. 631-636.
- [36] Y. Tokihiro and I. Tamura; T anH. V60 (19-74). N6. P. 661-670.
- [37] M. Tagaya and I. Tamura; J. JIM V24, N10. P. 676-679.
- [38] G.E.Totten, C.E.Bates. N.A.Clinton. Handbook of Quenchants and Quenching.
- [39] H. Gilliland, -J., Journal of Met.Prog., 1960: p. 111-114.
- [40] E.A.Bender, H-J. Gilliland, Journal of Steel, 1957: p. 56-59.
- [41] C.A.Barley, J.S.Aarons, The lubrication Engineers Manual. 1971, U.S. Steel Corp. p. 56-57.



- [42] J.C. Chaves. The Effect of Surface Condition and High Temperature Oxidation on Quenching Performance of 4140 Steels in Mineral Oil, in Manufacturing Engineering. 2001, Worcester Polytechnic Institute: Worcester. p. 8, 9,29.
- [43] W. E. Jominy, Hardenability of Alloys Steels. American Society for Metals, 1939: p. 73.
- [44] IVF, IVF quenchttest. 2000: Sweden.
- [45] M. Narazaki, S. Asada, K. Fukahara. Recent Research on Cooling Power of Liquid Quenchants in Japan.
- [46] Instruments and Technology Inc, Quenchalyzer. 2000.
- [47] G.E.Totten, C.E.Bates. N.A.Clinton. Handbook of Quenchants and Quenching.
- [48] M. Tagaya and I. Tamura, Journal of Hart.-Tech. Mitt. 1963. 18: p. 63-67.
- [49] M. Narazaki, A Tajima, S. Asada, K. Ichitani, H. Yokota, M. Tanaka, Y. Watanabe. Development of New Sliver Probe for Cooling Power Test of Polymer Quenchants
- [50] K. Funatani, G.E. Totten. Overview of Prof. Imao Tamura's Contribution to the Field of Heat Treating.
- [51] M.Shuhui , A.S. Varde, M. Takahashi, D. K. Rondeau, M. Maniruzzaman and R. D. Sisson, Jr. Quenching-Understanding, Controlling and Optimizing the Process.
- [52] K. Funatani, M. Narazaki, M Tanaka. Evaluation of Testing Methods of Cooling Power.
- [53] M. Narazaki, S. Asada, K. Fukahara. Recent Research on Cooling Power of Liquid Quenchants in Japan.
- [54] M. Narazaki, M. Kogawara, A. Shirayori, S. Fuchisawa. Influence on Wetting Behavior on Cooling Characteristics During Quenching of Hot Metal.
- [55] M. Narazaki, M. Kogawara, A. Shirayori, S. Fuchisawa. Laboratory Test of Cooling Power of Polymer Quenchants.
- [56] I.Tamura, N. Shimizu, and T. Okadu, Journal of Heat Treating, 1984. 3: p. 335.



- [57] J.R. Davis, ASM Materials Engineering Dictionary, ASM International, 1992, p 407.
- [58] M. Narazaki, M. Kogawara, A. Shirayori, S. Fuchisawa. Laboratory Test of Cooling Power of Polymer Quenchants.
- [59] 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
- [60] W.J. Titus, “Understanding and Optimizing Flow Uniformity in Propeller and Impeller Agitated Quench Tanks”, 19th ASM Heat Treating Society Conference Proceedings Including Steel Heat Treating in the New Millennium.
- [61] H.M. Tensi, G.E. Totten and T. Kunzel, “Physics and Technology of Quenching in Fluids. Part II: Technology of Quenching”, 20th ASM Heat Treating Society Conference Proceedings, October 2000, St. Louis, MO, pp. 731-736.
- [62] Quenching and Carburising: Proceedings of the Third International Seminar of the International Federation for Heat Treatment (Melbourne, 1991), The Institute of Materials 1993.
- [63] M. Narazaki, S. Fuchizawa and M. Usuba, “Effects of specimen geometry on characteristic temperature during quenching of heated metals in subcooled water”, Tetsuto Hagane (Journal of the Iron Steel Institute Japan), 75, 1989, pp. 634–64.
- [64] H.M. Tensi, G.E. Totten and T. Kunzel, “Physics and Technology of Quenching in Fluids. Part I: Physics of Quenching”, 20th ASM Heat Treating Society Conference Proceedings, October 2000, St. Louis, MO, pp. 727-730.
- [65] H.M. Tensi, G.E. Totten and T. Kunzel, “Physics and Technology of Quenching in Fluids. Part II: Technology of Quenching”, 20th ASM Heat Treating Society Conference Proceedings, October 2000, St. Louis, MO, pp. 731-736.
- [66] F. Frerichs, Th. Luebben, F. Hoffmann, H. Zoch, W. "The influence of geometrical conditions on rewetting behavior of cylindrical components ". Proceedings of the IFHTSE Conference “New Challenges in Heat Treatment and Surface Engineering”, 9. – 12. Juni 2009, Dubrovnik-Cavtat, Croatia.



- [67] Th. Luebben, F. Frerichs, Hoffmann, H. Zoch, W. "Rewetting behavior during immersion quenching". Proceedings of the IFHTSE Conference "New Challenges in Heat Treatment and Surface Engineering", 9. – 12. Juni 2009, Dubrovnik-Cavtat, Croatia.
- [68] M. Narazaki, S. Fuchizawa and M. Usuba , Ttsu-to-Hagané (J. Iron Steel Inst. Jpn.), 75 p 634-641 (1989).
- [69] C.E. Bates, G.E. Totten, and R.L. Brennan, Quenching of Steel, Heat Treating, Vol 4, ASM Handbook, 1991, ASM International, p 67–120.
- [70] P.F. Stratton, N. Saxena, and R. Jain, Requirements for Gas Quenching Systems, Heat Treat. Met., Vol 24 (No. 3), 1997, p 60–63.
- [71] J. P. Holman. Heat Transfer. P 97. McGraw-Hill. Kogakusha Ltd., Tokyo (1976).
- [72] J.P. Holman, Heat Transfer, 1976, Mc- Graw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo, p 114–115.
- [73] M. Narazaki, M. Tajima, S. Asada, K. Ichitani, H. Yokota, M. Tanaka, Y. Watanabe. Development of new silver probe for cooling power test of polymer quenchants.
- [74] www.vaxasoftware.com
- [75] USER'S MANUAL. TempScan / MultiScan. High-Speed Temperature & Voltage Systems
- [76] H.J. Vergara Hernández, B. Hernández Morales, G. Solorio Diaz, G.Gutiérrez-Gnechi. Effect of the hydrodynamic conditions on the vapor film during forced convective quenching.
- [77] Y. A. Çengel. Transferencia de Calor. McGRAW-HILL 2ª Edición.
- [78] M. Tagaya and I. Tamura, Journal of Hart.-Tech. Mitt. 1963. 18: p. 63-67.
- [79] Biblioteca de Consulta Microsoft ® Encarta ® 2005. © 1993-2004 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.
- [80] 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



[81] N. Kobasko. Discussion of the Problem on Designing the Global Database for Different Kinds of Quenchants. En Memorias del 8th WSEAS International Conference on Heat and Mass Transfer (HMT 11), WSEAS.

[82] N.J. Kobasco, Sh. E Guseynov, Initial heat flux densities an duration of non stationary nucleate boiling during quenching, in J Krope, S.H Sohrab, F.K. Benra (Eds.), Proceedings of the Fifthth WSEAS International Conference on Heat and Mass Transfer, Acapulco, Mexico, January 2008, pp. 104–109.

[83] S. H. Chang, Y. H. Jeong and B. S. Shin. *Critical Heat Flux Enhancement*. Department of Nuclear & Quantum EngineeringKorea Advanced Institute of Science and Technology. pp 753-762. Nuclear Engineering And Technology, Vol.38 No.8 December 2006.

[84] B- Hernández-Morales,H.J. Vergara-Hernández and G. Solorio-Díaz (2011). “Fluid dynamics during forced convective quenching of flat-end cylindrical probes”, en Memorias del 8th WSEAS International Conference on Heat and Mass Transfer (HMT 11), WSEAS, pp. 135-141.

[85] A. Cortés Juárez, Y. Kamichika Kohashi. Física creativa. Pág. 206.

[86] Biblioteca de Consulta Microsoft ® Encarta ® 2005. © 1993-2004 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

[87] www.vaxasoftware.com

[88] Wikipedia, la enciclopedia libre.



TRABAJO A FUTURO.

En la figura TF 1 se muestran tres probetas con forma aerodinámica, dos probetas de punta cónica y una de punta semicircular. El análisis de las pruebas anteriores nos llevo a identificar las alturas más significativas para la introducción los termopares en el interior del sólido. La distancia del termopar T1 de 20 mm se debe a que el cople mete ruido en la adquisición de datos de la historia térmica. El termopar T2, se pone lo más cercano a la punta de la probeta debido a que este nos proporcionara la información del punto de Leidenfrost de la probeta y no de un termopar en especifico como se tomo en la presente tesis, recordando que el punto de Leidenfrost es cuando rompe la capa de vapor e inicia la ebullición nucleada. La posición del termopar T3 a 40 mm es porque en esa zona se registraron las mayores velocidades y se piensa que nos darán buena información de los fenómenos de ebullición que ocurran en la superficie del sólido. El análisis también se realizara con el análisis de imágenes con la cámara de alta velocidad.

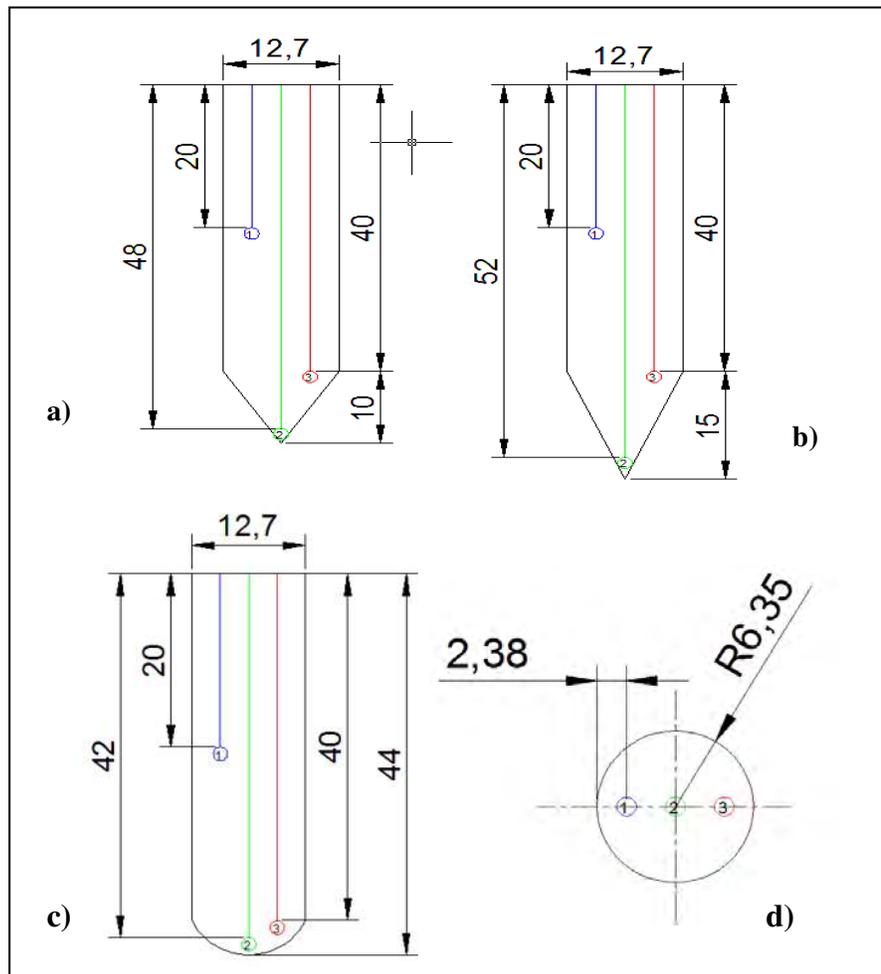


Figura TF1.- Nuevas probetas de estudio. a) Cónica a 65° , b) Cónica a 46° , c) Semicircular y d) vista superior.



ARTICULOS Y CONGRESO ASISTIDO.

A. Cervantes García, G. Solorio Díaz, B. Hernández Morales y H.J. Vergara Hernández. “Comparative Study of the Wetting Front Kinematics during Quenching of Cylindrical Probes with Different Geometry”. ” pags 2240-2245. Memorias del XXXII Encuentro Nacional y 1er Congreso Internacional de la AMIDIQ Riviera Maya, Quintana Roo, México Del 3 al 6 de mayo de 2011. ISBN: 978-607-95593-0-4.





J.R. González López, B. Hernández Morales, H.J. Vergara Hernández, G. Solorio Díaz y A. Cervantes García. “Effect of Water Velocity on Heat Extraction during Forced Convective Quenching” pags 2087-2092. Memorias del XXXII Encuentro Nacional y 1er Congreso Internacional de la AMIDIQ Riviera Maya, Quintana Roo, México Del 3 al 6 de mayo de 2011. ISBN: 978-607-95593-0-4.





Reconocimiento de primer lugar en el concurso de carteles con motivo del décimo aniversario de la División de Estudios de Posgrado (DEP) de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Morelia , Mich. .Presentando el tema “Uso de una novedosa curva para el análisis del frente de mojado durante el temple de probetas cilindricas de diferente geometria”.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

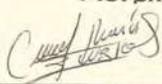
Otorgan el presente:

RECONOCIMIENTO

A:
Alberto Cervantes García

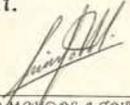
Por el 1 lugar del Concurso del Cartel del X Aniversario
de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Morelia, Mich., a 24 octubre de 2011.


DR. CARLOS RUBIO MAYRA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE
LA FACULTAD EN INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UMSNH



DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO
FAC. DE ING. MECÁNICA


DR. CRISANTO MENDOSA COVARRUBIAS
DIRECTOR DE LA FACULTAD EN INGENIERÍA MECÁNICA DE
LA UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



Otros de los artículos que no son de este tema, pero fueron desarrollados durante la estancia de en el programa de maestría en la Facultad de Ingeniería Mecánica son los siguientes:

M. Vigil Martínez, A. Cervantes G, G. Solorio Díaz, J.A. Ramos Banderas, J. de J. Barreto. “Estudio Mediante Simulación Física Y Matemática de un Distribuidor de Colada Continua Tipo Delta de 4 Salidas”. XXVII Simposio Nacional de Siderurgia llevado a cabo del 11 al 13 de Noviembre del 2009.





Cervantes García, A., Velázquez Aguilar, J. G., Jiménez Mejía, M., González Bernal, R., Rubio Maya, C., Mendoza Covarrubias, C. “Construcción y Caracterización Termodinámica de un Tubo Ranque-Hilsch”. Memorias del XVI Congreso Internacional Anual de la Somim 22 Al 24 de Septiembre, 2010 Monterrey, Nuevo León, México. ISBN: 978-607-95309-3-8.

SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA MECÁNICA A.C.

SOMIM
Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica

Alberto Cervantes García
Presente.

CONSEJO DIRECTIVO

JAIME GONZALO CERVANTES DE GORTARI
Presidente

OSWALDO MENDOZA CARRANZA
Vicepresidente de Fomento

ANGELA RODRIGUEZ GONZALEZ
Representante de Ingeniería Teórica

VICENTE BOLA AMARAL
Representante de Diseño Mecánico

ARTURO BARRA PARRAGÓN
Representante de Máquinas y Motores

MARCIAL DEL TRILLO LIZARRAGA
Secretario

OSWALDO HERNANDEZ GONZALEZ
Tesorero

PABLO HERRERA OLIVERA
Coordinador Regional

ROSALBA FLORES GARCÍA
Jefe de Estudios

MARINO VARELA DEL CASTILLO
Jefe de Asesorías Técnicas

OSWALDO DE CRISTÓBAL RAMIREZ
Jefe de Oficio

A la vez de saludarlo sirva este medio para informar a usted que el Comité Evaluador del 16 Congreso Internacional Anual de la SOMIM ha decidido aceptar para su presentación y publicación el trabajo titulado:

CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN TERMODINÁMICA DE UN TUBO RANQUE-HILSCH

Con clave de registro: A5_220

Asimismo confirmamos el cumplimiento de todos los lineamientos para incorporar su ponencia en la publicación de las memorias del Congreso de la SOMIM y presentación dentro del Congreso que se llevará a cabo los días 22, 23 y 24 de Septiembre del 2010 en Monterrey, Nuevo León, México.

En breve le enviaremos la información turística, ubicación de la sede, y en semanas próximas al evento el Programa General con la fecha, hora y lugar de la presentación de su artículo durante el Congreso.

A nombre de la SOMIM lo felicito por haber enviado un trabajo digno de ser publicado en las memorias del 16 Congreso Internacional Anual de la SOMIM.

En espera de que en el futuro podamos seguir contando con su decidida participación, reciba un cordial saludo.

Para cualquier duda que pudiera surgir me pongo a sus órdenes en la siguiente dirección de correo electrónico webmaster@somim.org.mx.

Reciba un cordial saludo.

Atentamente,


Dr. Jaime Gonzalo Cervantes de Gortari
PRESIDENTE DE LA SOMIM

México D.F. a 1° de Septiembre del 2010

México No. 51, Col. Independencia, Delegación Benito Juárez, C.P. 07000, México, D.F.
e-mail: webmaster@somim.org.mx



Cervantes García, A., Velázquez Aguilar, J. G., Montejo Alvaro, F., Rubio Maya, C., Solorio Díaz, G., Gutiérrez Sánchez, H.C.” Estudio Experimental del Fenómeno Ranque-Hilsch en un Tubo Vórtice”. Memorias del XVI Congreso Internacional Anual de La Somim 22 Al 24 de Septiembre, 2010 Monterrey, Nuevo León, México. ISBN: 978-607-95309-3-8.

SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA MECÁNICA A.C.

SOMIM Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica

Alberto Cervantes García
Presente.

CONSEJO DIRECTIVO

JAIME GONZÁLEZ CERVANTES DE GORTARI
Presidente

OSWALDO BRACERÍA CARRASQUERA
Vicepresidente de Ejecutivos

MARCELA DELGADO BALBUENA
Vicepresidenta de Ejecutivos Técnica

VERÓNICA BARRERA
Vicepresidenta de Ejecutivos Académico

JUAN CARLOS PÉREZ GARCÍA
Vicepresidente de Investigación y Desarrollo

MARCELA DELGADO BALBUENA
Secretaria

LEONOR DEL MONTEGONZÁLEZ
Tesorera

RODRIGO PÉREZ ESPINOSA
Coordinador Regional

ADRIÁN ESPINOSA BALBUENA
Vice de Ejecutivos

MARIANO GARCÍA DEL GALFÍN
Vice de Ejecutivos Académico

SABRINA S. CÁDIZ HERNÁNDEZ
Vice de Ejecutivos

A la vez de saludarlo sirva este medio para informar a usted que el Comité Evaluador del 16 Congreso Internacional Anual de la SOMIM ha decidido aceptar para su presentación y publicación el trabajo titulado:

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FENÓMENO RANQUE-HILSCH EN UN TUBO VÓRTICE

Con clave de registro: A5_222

Asimismo confirmamos el cumplimiento de todos los lineamientos para incorporar su ponencia en la publicación de las memorias del Congreso de la SOMIM y presentación dentro del Congreso que se llevará a cabo los días 22, 23 y 24 de Septiembre del 2010 en Monterrey, Nuevo León, México.

En breve le enviaremos la información turística, ubicación de la sede, y en semanas próximas al evento el Programa General con la fecha, hora y lugar de la presentación de su artículo durante el Congreso.

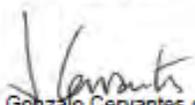
A nombre de la SOMIM lo felicito por haber enviado un trabajo digno de ser publicado en las memorias del 16 Congreso Internacional Anual de la SOMIM.

En espera de que en el futuro podamos seguir contando con su decidida participación, reciba un cordial saludo.

Para cualquier duda que pudiera surgir me pongo a sus órdenes en la siguiente dirección de correo electrónico webmaster@somim.org.mx.

Reciba un cordial saludo.

Atentamente,


Dr. Jaime González Cervantes de Gortari
PRESIDENTE DE LA SOMIM

México D.F. a 1° de Septiembre del 2010

Avda No. 51, Col. Independencia, Delegación Benito Juárez, C.P. 06630, México, D.F.
E-mail: webmaster@somim.org.mx