

Caracterización experimental del efecto de la ebullición en película en el enfriamiento de cilindros verticales

Esteban Barra León¹, Rubén Arévalo Ramírez¹

¹Instituto de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Chile. Email: estebanbarra@alumnos.uach.cl

² Instituto de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Chile. Email: ruben.arevalo@uach.cl

Resumen

En este estudio se lleva a cabo una caracterización experimental del efecto de la ebullición en película en la uniformidad del enfriamiento de cilindros verticales sumergidos en líquidos. La investigación se centra en la observación del comportamiento y características del colapso de la ebullición en película en enfriamientos de cilindros con una relación de aspecto (longitud/diámetro) de 4, utilizando agua destilada y mezcla de etanol con agua destilada al 20%, como fluidos de enfriamiento. Los resultados indican que la desaparición no uniforme de la capa de vapor en la pieza durante el enfriamiento, provoca variaciones de temperatura de hasta 281 °C, que podrían generar imperfecciones durante el tratamiento térmico de metales. Este efecto se hace menos notorio en la medida que es menor la temperatura inicial de la pieza y mayor el nivel de subenfriamiento. La adición de etanol al agua demostró atenuar la diferencia de temperatura observada.

Palabras clave: Transferencia de calor por ebullición, temple, ebullición en película, ebullición en piscina.

Abstract

In this study, an experimental characterization of the effect of film boiling on the cooling uniformity of vertical cylinders immersed in liquids is carried out. The research focuses on the observation of the behavior and characteristics of the collapse of film boiling in cooling cylinders with an aspect ratio (length/diameter) of 4, using distilled water and a mixture of ethanol and distilled water at 20% as cooling fluids. The results indicate that the non-uniform disappearance of the vapor layer in the piece during cooling causes temperature variations in it of up to 281 °C, which could generate imperfections during the heat treatment of metals. This effect becomes less noticeable as the initial temperature of the piece is lower and the level of subcooling is higher. The addition of ethanol to the water proved to attenuate the observed temperature difference.

Keywords: Heat transfer boiling, quenching, film boiling, pool boiling.

1. Introducción

La transferencia de calor por ebullición es un mecanismo de transferencia de calor comúnmente presente en diversas industrias y aplicaciones de ingeniería, tales como centrales térmicas, industria química y metalúrgica, criogenia y sistemas de aire acondicionado, entre otras [1]. Desde hace varias décadas y hasta la actualidad, la necesidad de poder diseñar y optimizar los procesos de transferencia de calor en estas industrias ha provocado que la ebullición sea un tema ampliamente investigado. En la transferencia de calor por ebullición se reconocen

principalmente 3 fases: ebullición nucleada, transición, y en película, las cuales se pueden identificar en las curvas de enfriamiento, como la mostrada en la Figura 1. La ebullición en película puede ocurrir en la práctica cuando se intenta transferir un flujo de calor muy alto o cuando ponemos en contacto un cuerpo muy caliente con un líquido; se caracteriza por la formación de una capa de vapor alrededor de la superficie calentada, lo que conduce a una reducción significativa en la transferencia de calor por ebullición, por lo tanto, no es deseable, ya que puede tener como consecuencia un sobrecalentamiento excesivo de la superficie. Sin

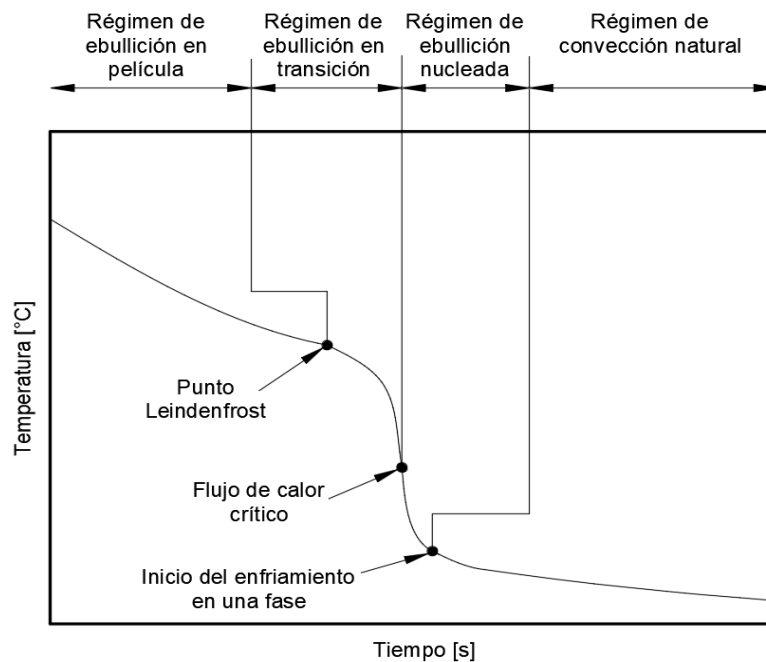


Figura 1. Regímenes de ebullición en curva de enfriamiento. Fuente: elaboración propia.

embargo, esta aparece inevitablemente en muchas aplicaciones, tales como criogenia (en donde es usual este tipo de fenómenos y la literatura de ebullición en película es extensa según Barron y Nelis [2]), refrigeración, análisis de seguridad de reactores nucleares, tratamiento térmico de metales, refrigeración regenerativa de cohetes, entre otras [3]. Existen distintos parámetros que afectan a la ebullición en película, por ejemplo, el tipo, temperatura y presión del fluido refrigerante utilizado, la forma y material de la pieza a enfriar, entre otros, los cuales han sido estudiados en diversas investigaciones. Ebrahim et al. [4] exploraron los efectos del subenfriamiento del líquido, las propiedades del material y las condiciones de la superficie para probetas cilíndricas de acero inoxidable, zirconio e Inconel-600, utilizando agua destilada como fluido base, obteniendo distintos rendimientos de enfriamiento para cada material. Beck et al. [5], compararon el comportamiento de la ebullición en película en probetas cilíndricas de aluminio utilizando líquidos iónicos y agua destilada como fluidos base en un medio subenfriado a 30°C, registrando visualmente el fenómeno con una cámara de alta velocidad, obteniendo una desaparición casi instantánea de la ebullición en película con el líquido iónico. Zabirow et al. [6] analizaron el enfriamiento en mezclas subenfriadas de agua-etanol de diferentes composiciones a diferentes temperaturas y presiones de líquido, concluyendo que el proceso de enfriamiento se intensifica considerablemente con el aumento de la presión, el aumento del subenfriamiento y de la fracción de masa de agua en la mezcla. Xiong et al. [7] analizaron el enfriamiento a presión atmosférica

utilizando distintos niveles de subenfriamientos con una probeta de 120 mm de largo y 20 mm de diámetro, con punta circular, la cual poseía 5 termocuplas en su interior a distintas profundidades con la finalidad de evaluar si el efecto de la capa de óxido que se generan en sus enfriamientos influyen en el flujo de calor durante la ebullición en película, apreciando diferencias de temperaturas dentro la pieza durante el enfriamiento, las cuales no fueron cuantificadas, y que se atribuyen principalmente a eliminación prematura de la ebullición en película en algunas zonas, donde se ve con claridad la transición de ebullición en película a nucleada, iniciando en la zona inferior del cilindro y desplazándose hacia arriba.

Lo descrito anteriormente puede provocar un enfriamiento disperejo de la pieza, al tener distintos valores del coeficiente convectivo en diferentes posiciones longitudinales, que puede conformarse en un problema en el tratamiento térmico de metales, ya que la pieza no obtiene propiedades homogéneas y su calidad se ve afectada. En virtud de ello, el presente trabajo busca cuantificar este efecto y responder si la característica de la ebullición en película en torno a cilindros de relación longitud/diámetro = 4 provoca un enfriamiento no uniforme que genere diferencias significativas de temperatura. Para ello se diseñó y construyó una instalación de prueba para realizar experimentos de enfriamientos, para una probeta de acero inoxidable AISI 304. La visualización del proceso de enfriamiento se realizó utilizando una cámara de alta velocidad para comprender el mecanismo de ruptura de la película. Finalmente se

realizó un análisis comparativo entre los experimentos utilizados.

2. Metodología

2.1. Equipo experimental

En la Figura 2 se muestra el equipo experimental utilizado, el cual es similar al reportado en otros estudios análogos [4,7–11], compuesto de una mufla vertical de 27 cm de alto, 35 cm de diámetro externo y 11 cm de diámetro interno, con una temperatura máxima de trabajo de 800 °C; un depósito de refrigerante de acero inoxidable con dimensiones de 30 x 25 x 35 cm con ventana de cristal templado; una

probeta de ensayo de acero inoxidable 304, con dimensiones de 30 mm de diámetro y 120 mm de largo, instrumentada con 3 termocuplas tipo K localizadas a 33, 60 y 87 mm de profundidad y 3 mm del borde del cilindro, distribuidas angularmente para la medición de temperatura (ver Figura 3); un sistema de adquisición de datos de temperatura Omega modelo TC08, capaz de captar hasta 10 lecturas por segundo para un máximo de 8 termocuplas, con una precisión del $0,2\% \pm 0,5$ °C; un termorregulador de temperatura de refrigerante; y una cámara de grabación de alta velocidad SONY RX100 IV, que permite grabar hasta a 960 FPS el fenómeno.

2.2. Condiciones experimentales

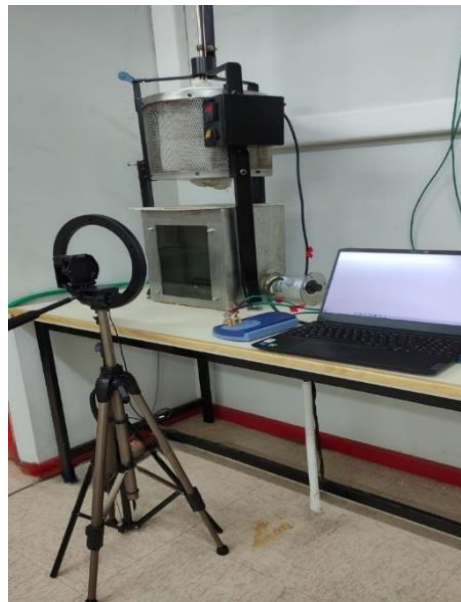


Figura 2. Equipo experimental. Fuente: elaboración propia.

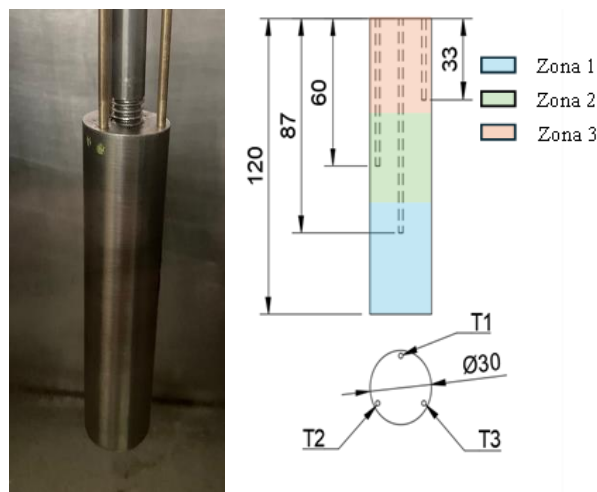


Figura 3: Probeta de ensayo. Fuente: elaboración propia.

Se realizan pruebas de enfriamiento en dos fluidos, agua destilada (AD) y mezcla de AD etanol al 20% de concentración másica (EA). Las temperaturas iniciales de probeta utilizadas en los experimentos con AD son de 750 °C y 500°C, mientras que para EA solo se utilizó 750°C. La temperatura del refrigerante utilizada para las pruebas se muestra en la Tabla 1. Antes de realizar los enfriamientos se comprueba la temperatura del agua en 4 puntos distintos de la piscina para garantizar su homogeneidad. Para cada nivel de temperatura del agua se realizan 5 pruebas de enfriamiento con el fin de asegurar su repetibilidad y con ello, la consistencia de los resultados.

Tabla 1. Temperaturas del refrigerante en pruebas de enfriamiento.

Temperatura del refrigerante [°C]	Agua destilada (AD)	Mezcla Etanol-Agua (EA)
50	X	X
70	X	X
90	X	
100	X	

Fuente: elaboración propia.

El uso de temperaturas menores para la mezcla de etanol-agua se debe principalmente para evitar la autoignición del etanol y resguardar la integridad del personal y equipo experimental.

2.3. Procedimiento experimental

La probeta se calienta en la mufla vertical a la temperatura deseada y luego es sumergida rápidamente a la piscina de líquido refrigerante con la ayuda de un mecanismo manual que permite su descenso (y ascenso). La temperatura del refrigerante se fija mediante el termorregulador en el valor deseado, sea la condición de saturación del líquido o algún nivel de subenfriamiento. Para AD cuya condición de saturación a presión atmosférica es próximo a 100°C, se reconoce como 10°C de subenfriamiento (Se) a la temperatura de 90°C, misma relación para los otros niveles de subenfriamientos. La data entregada por las termocuplas es registrada por el sistema de adquisición de datos con una frecuencia de 200 milisegundos para ser procesada posteriormente en un ordenador.

Con los datos anteriores, se construyen las curvas de enfriamiento de los sitios de la probeta donde están colocadas las termocuplas, lo que permite caracterizar el proceso e identificar los regímenes de ebullición a partir de los cambios de pendiente de la curva.

Se graba el proceso con una cámara de video de alta velocidad para dejar un registro visual de los experimentos que permita el posterior análisis

cualitativo de las distintas fases de ebullición a medida que se enfría la probeta, hasta llegar a la condición de convección natural.

2.3.1. Corrección de concentración de etanol

Es conocido que el punto de ebullición del etanol a presión atmosférica es de 78°C, y que además es muy volátil, incluso a temperatura ambiente. Es esperable, por las temperaturas manejadas dentro del proceso de enfriamiento, que la concentración másica al inicio de los experimentos sea distinta al finalizar cada uno de estos. Para garantizar la concentración másica de etanol deseada, se agrega cantidades de etanol necesarias calculadas a partir de las ecuaciones de densidad planteadas por Danahy et al. [58].

3. Resultados

3.1. Pruebas con agua destilada

En la Figura 4 se muestran curvas de enfriamiento para temperaturas iniciales de probeta de 500°C con AD. Se observa que para 50°C de subenfriamiento no sucede la ebullición en película (o probablemente sea muy breve y no se alcance a apreciar), y las curvas de temperatura caen de forma rápida apenas la pieza es sumergida en el refrigerante, característico del régimen de ebullición nucleada. Para 30°C de subenfriamiento, la ebullición en película aparece por breves momentos en las zonas inferior y central, mientras que en la zona superior nunca se presenta este régimen de ebullición, situación que cambia para 10°C de subenfriamiento, donde inicialmente existe ebullición en película en todo el cilindro, perdiéndose la película progresivamente desde ambos extremos hacia el centro, comenzando desde la zona inferior, obteniéndose diferencias de temperaturas de 122°C. Finalmente, para la condición de saturación se identifica un aumento en la duración de la ebullición en película en todas las zonas respecto al caso anterior; esta vez la capa de vapor desaparece inicialmente en la zona superior, bajando por la probeta hasta la zona central, momento en donde la capa comienza a perderse desde la zona inferior, observándose diferencias de temperaturas de hasta 221°C. En la Figura 5 se aprecia una comparación cualitativa entre este experimento y el de 10°C de subenfriamiento en distintos instantes de tiempo.

Los experimentos con temperatura inicial de probeta de 750°C en AD (ver Figura 6) tienen un comportamiento similar a los vistos para 500°C, pero los tiempos de ebullición en película aumentan para todos los casos. Para el caso de 50°C de subenfriamiento existe un breve periodo de ebullición en película, pero desaparece de forma súbita en toda la pieza, permitiendo un enfriamiento parejo; y para el caso de 10°C de subenfriamiento, se presentan diferencias en

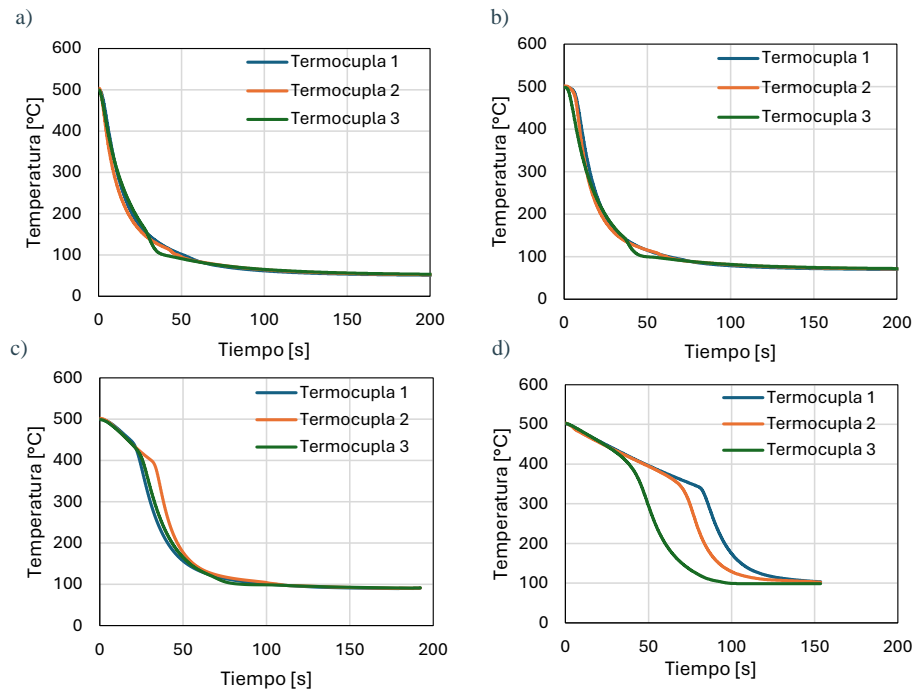


Figura 4. Enfriamientos a 500°C, a) 50°C (Se), b) 30°C (Se), c) 10°C (Se), d) condición de saturación. Fuente: elaboración propia.

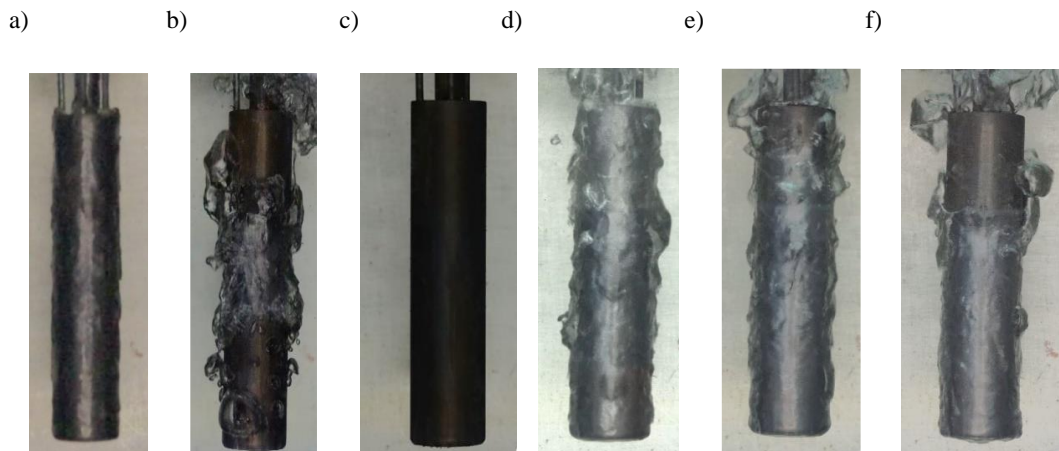


Figura 5. Comparación entre casos de enfriamientos a 500°C, a) 10 [s] en 10°C (Se), b) 30 [s] a 10°C (Se), c) 70 [s] a 10°C (Se), d) 10 [s] a en saturación, e) 30 [s] a en saturación, f) 70 [s] a en saturación. Fuente: elaboración propia.

cómo se pierde la capa de vapor, que empieza a desaparecer desde la zona superior llegando hasta la zona central momento en que simultáneamente se pierde la capa en la zona inferior, alcanzando diferencias de temperaturas de hasta 258°C durante el enfriamiento.

La diferencia más grande de temperatura encontrada en los experimentos es para el caso con temperatura inicial de probeta de 750°C y AD en condición de saturación, en donde se alcanza un valor de 281°C.

3.2. Pruebas con mezcla etanol-agua destilada

En la Figura 7 se muestra las curvas de enfriamiento para el caso de temperatura inicial de probeta de 750°C, con la mezcla agua-etanol al 20% masa a 50 y 70 °C. Para el primer caso, se aprecia un enfriamiento uniforme, en donde ocurre ebullición en película por breves instantes. Por otro lado, el caso con la mezcla a 70°C se presenta un periodo de ebullición en película más largo, y según lo mostrado en la Figura 8, la capa de vapor se pierde desde los extremos hacia el centro,

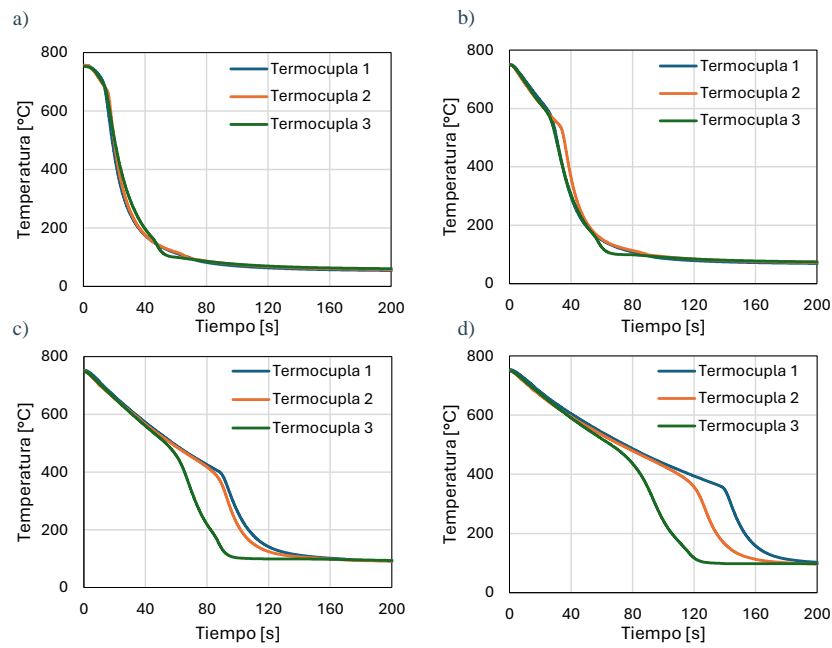


Figura 6. Enfriamientos a 750°C, a) 50°C (Se), b) 30°C (Se), c) 10°C (Se), d) condición de saturación. Fuente: elaboración propia.

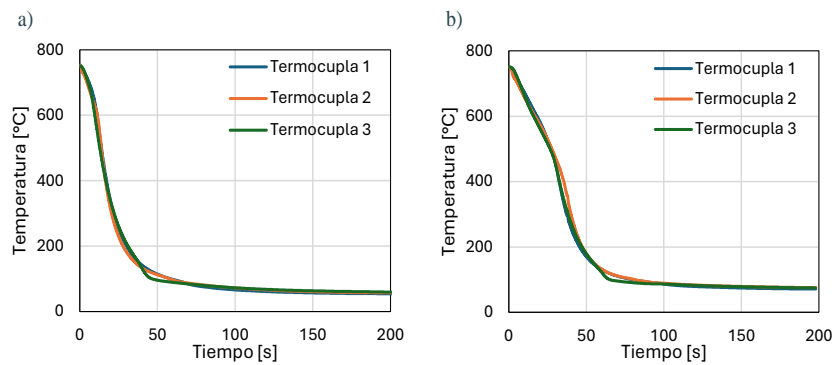


Figura 7. Enfriamientos a 750°C a distintas temperaturas de refrigerante, a) 50°C , b) 70°C. Fuente: elaboración propia.

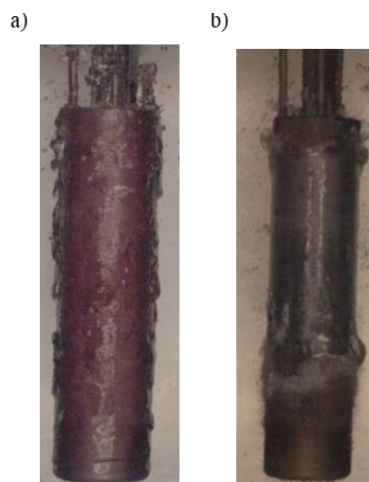


Figura 8. Visualización de enfriamiento de mezcla EA, a 70°C . a) 2 [s], b) 30 [s]. Fuente: elaboración propia.

es decir, la capa se pierde de manera no homogénea, lo cual no produjo una diferencia de temperatura subenfriamiento de la mezcla etanol-agua, se obtiene una intensificación en el enfriamiento, disminuyendo la duración de la ebullición en película. En la Figura 9 se comparan las diferencias de temperaturas alcanzadas en todos los casos presentados para ambos fluidos. Los resultados obtenidos tanto para agua destilada como para la mezcla etanol-agua, presentan una clara influencia del nivel de subenfriamiento del refrigerante en la duración de la ebullición en película de la probeta y, por lo tanto, en la uniformidad de su enfriamiento. La forma en que generalmente se rompe la capa de vapor en la probeta es desde los extremos hacia el centro, lo cual en la mayoría de los casos estudiados, provoca diferencias significativas de temperaturas en

En particular, los experimentos mostraron que el enfriamiento es más homogéneo cuando la probeta se somete a condiciones de mayor subenfriamiento del refrigerante, como en el caso del agua destilada a 50°C. Sin embargo, en condiciones de menor subenfriamiento, la duración de la ebullición en película es mayor, lo que resulta en variaciones de temperatura más notables por la forma en que la película desaparece. Este fenómeno puede impactar negativamente en aplicaciones industriales donde la uniformidad térmica es crítica para las propiedades mecánicas del material tratado. Una correcta selección del fluido refrigerante y la temperatura de subenfriamiento es esencial para optimizar los procesos de enfriamiento y evitar problemas de no uniformidad.

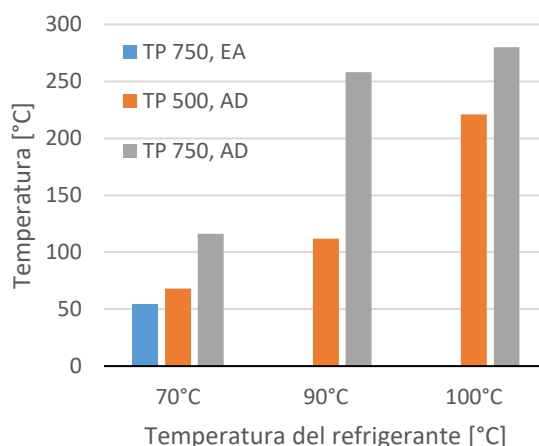


Figura 9. Diferencias de temperatura alcanzadas en los enfriamientos, TP (Temperatura de probeta). Fuente: elaboración propia.

ella, siendo una excepción en este estudio el caso de 70°C con la mezcla etanol-agua, en donde el uso de este refrigerante parece atenuar significativamente la falta de uniformidad durante el enfriamiento, no considerando los casos de 50°C del refrigerante al presentar estos un enfriamiento casi homogéneo.

4. Conclusiones

En este estudio, se investigó experimentalmente el efecto de la ebullición en película en el enfriamiento de cilindros verticales de acero inoxidable AISI 304 sumergidos en agua destilada y en una mezcla de etanol al 20% en masa con agua destilada. Los resultados obtenidos demuestran que la ebullición en película juega un papel crucial en la distribución de la temperatura a lo largo del cilindro durante el proceso de enfriamiento. Se observó que la capa de vapor tiende a desaparecer desde los extremos hacia el centro de la probeta, lo cual provoca diferencias significativas en la temperatura a lo largo del cilindro.

5. Referencias

- [1] S.H. Golkar, M. Khayat, M. Zareh, Nucleate and Film Boiling Performance of Ethanol-Based Nanofluids on Horizontal Flat Plate: An Experimental Investigation, *Int. J. Thermophys.* 42 (2021) 55. <https://doi.org/10.1007/s10765-021-02805-0>.
- [2] R.F. Barron, G.F. Nellis, *Cryogenic Heat Transfer*, Second Edition, Taylor & Francis, Boca Raton, 2016.
- [3] Y. Chen, Heat Transfer in Film Boiling of Flowing Water, in: A. Belmoudi (Ed.), *Heat Transf. - Theor. Anal. Exp. Investig. Ind. Syst.*, InTech, 2011. <https://doi.org/10.5772/14474>.
- [4] S.A. Ebrahim, S. Chang, F.-B. Cheung, S.M. Bajorek, Parametric investigation of film boiling heat transfer on the quenching of vertical rods in water pool, *Appl. Therm. Eng.* 140 (2018) 139–146.

- <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.021>.
- [5] M. Beck, C. Neise, M. Ahrenberg, C. Schick, U. Kragl, O. Kessler, Heat transfer mechanisms analysed by high speed video recording of metal quenching in ionic liquids and water, *Int. J. Microstruct. Mater. Prop.* 11 (2016) 359. <https://doi.org/10.1504/IJMMP.2016.080698>.
- [6] A. Zabiroy, V. Yagov, P. Kanin, V. Ryzantcev, M. Vinogradov, I. Molotova, Pressure influence on unsteady film boiling of water-ethanol mixtures, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 118 (2020) 110130. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110130>.
- [7] J. Xiong, Z. Wang, P. Xiong, T. Lu, Y. Yang, Experimental investigation on transient boiling heat transfer during quenching of fuel cladding surfaces, *Int. J. Heat Mass Transf.* 148 (2020) 119131. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119131>.
- [8] D. Ciloglu, A. Bolukbasi, K. Comakli, Effect of Nanofluids on the Saturated Pool Film Boiling, 6 (2012).
- [9] A. Inbaoli, A. Krishnan, V. Jehana, C.S. Sujith Kumar, S. Gangolu, Influence of alumina nanoparticle concentrations on quenching characteristics of cylindrical Al7075, *Therm. Sci. Eng. Prog.* 39 (2023) 101687. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101687>.
- [10] D. Ciloglu, A. Bolukbasi, The quenching behavior of aqueous nanofluids around rods with high temperature, *Nucl. Eng. Des.* 241 (2011) 2519–2527. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.04.023>.
- [11] A. Bolukbasi, D. Ciloglu, Investigation of heat transfer by means of pool film boiling on vertical cylinders in gravity, *Heat Mass Transf.* 44 (2007) 141–148. <https://doi.org/10.1007/s00231-007-0238-7>.