



## Comparación teórico-experimental del calentamiento por radiación de una placa metálica.

Martínez-Picazo N.U.<sup>1</sup>, Hernández-Castillo A.S.<sup>1</sup>, Rodríguez-Angeles M.A.<sup>1\*</sup>, Murrieta-Luna E.<sup>1</sup>

Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Departamento de Ingeniería en Plásticos,  
mrodriguez\_ptc@upjr.edu.mx

### Resumen

Uno de los procesos más utilizados para el moldeo de plásticos es el termoformado, el cual consiste en calentar una lámina plástica, de forma que al reblandecerse puede adaptarse a la forma de un molde por acción de presión, vacío o de forma mecánica. Su gran ventaja ante otros procesos radica en la sencillez y bajo costo, sin embargo, una de sus principales desventajas radica en que el espesor de las piezas generalmente no es uniforme y se puede presentar ruptura del material debido al estiramiento al que es sometido. Para evitar estos problemas es necesario que el calentamiento se realice de forma diferencial, de forma que las zonas que requieran menos estiramiento se encuentren a una temperatura menor que las que requieren más, de este modo al aplicar un esfuerzo, este tendría una distribución constante en la pieza. Debido a esto resulta importante realizar un estudio de perfiles de temperatura en la placa durante la etapa de calentamiento, lo cual puede realizarse mediante una simulación del proceso, pero es necesario primero sintonizar dicha simulación para tener resultados confiables. En el presente trabajo se realizó el estudio del calentamiento de una placa de hierro comercial por medio de una fuente lumínica. El sistema se aisló de cualquier tipo de radiación externa, así como de la convección del lado opuesto al calentamiento para evitar pérdidas o ganancias de calor diferentes a la fuente. Se establecieron 9 nodos de medición de temperatura



en la placa y 6 para el aire dentro del sistema, registrando las medidas cada 5 minutos por un lapso de 30 minutos. Por otro lado, se generó una geometría representativa en CAD, el cual se malló y se utilizó para realizar las simulaciones correspondientes al sistema. Los resultados obtenidos de las simulaciones se compararon con los resultados experimentales con el objetivo de ajustarla.

## **Introducción**

Debido a la gran importancia que tiene el conocer los perfiles de temperatura en las placas sometidas al proceso de termoformado, se requiere realizar una simulación del proceso. Antes de realizar el análisis final es necesario, la sintonización de la simulación, es decir, asegurar que los resultados numéricos sean predichos con el menor error posible. La sintonización requiere de la comparación de los resultados de la simulación con resultados experimentales obtenidos de un proceso real, con el fin de ajustar los modelos matemáticos usados en la simulación y así obtener la menor diferencia entre ambos. Como una primera aproximación al proceso, en este proyecto se realizó el análisis experimental del calentamiento de una placa metálica. Para lo cual se utilizó una fuente lumínica de 40 Watts dentro de un dispositivo usado para aislar el proceso de factores como la transferencia de calor radiante y convectivo desde y hacia el ambiente. Se realizaron mediciones de temperatura de la placa y el ambiente dentro del dispositivo cada 5 minutos por un lapso temporal de 30 minutos, generando un historial de la temperatura por tiempo y nodo. Paralelamente se realizó el modelo representativo en 3D del dispositivo el cual fue discretizado utilizando elementos mixtos. Se realizaron simulaciones por CFD para obtener los perfiles de temperatura dentro del dispositivo. Finalmente, se compararon los resultados obtenidos de ambos métodos y se calculó el error, con esto se realizaron ajustes en los factores de corrección de los métodos numéricos que contiene el software para disminuir al máximo el error.



## Objetivos

### Objetivo general

Obtener los perfiles de temperatura de una placa metálica calentada por radiación mediante un análisis teórico-experimental para sintonizar la simulación y aplicarlos a un proceso de termoformado real.

### Objetivos específicos

Obtener experimentalmente los valores de las temperaturas en diferentes puntos de una placa metálica calentada por radiación. Realizar simulaciones del calentamiento de una placa metálica mediante CFD.

## Justificación

El proceso de termoformado es de los más usados en la industria del plástico debido a que es un proceso simple, se lleva a cabo a baja presión y resulta económico, sin embargo, tiene como desventaja que las piezas no poseen un grosor uniforme [1]. La diferencia de espesor y el mal calentamiento provocan que cuando se fabrican piezas nuevas éstas presenten desgarre o rompimiento antes de estandarizar el proceso, ya que los esfuerzos sobre la hoja plástica tienen una mala distribución sobre la pieza. Algunos autores [2] han demostrado la importancia que tiene la etapa de calentamiento en el termoformado de la pieza, y aunque los primeros esfuerzos por caracterizar el proceso se dieron en los 80's, fue hasta finales de los 90's cuando se fortaleció el análisis por medio del elemento finito [3,4], logrando con esto que a principios del presente siglo se simularan los perfiles de temperatura en una placa [5,6]. En los últimos años, la investigación sobre el proceso de termoformado apunta hacia la optimización del proceso completo [7] con el fin de utilizar menos recursos y generar menos desperdicio, pero para lograr la optimización se debe incluir el proceso completo, incluyendo la manera en que el calor se distribuye desde la fuente de calor hasta la placa, lo cual sólo se puede lograr incluyendo los fenómenos de radiación y convección. En este proyecto se realizó la simulación mediante CFD del proceso de calentamiento de una placa metálica por medio de una fuente lumínica. Se



analizaron los fenómenos de radiación y convección además de la conducción de calor en la placa. La inclusión de todos los factores en la simulación proporciona un mejor entendimiento del proceso. Por otro lado, la comparación de los resultados numéricos obtenidos en la simulación con los datos obtenidos de forma experimental, sirvieron para realizar ajustes en los modelos matemáticos para obtener resultados precisos. Los resultados obtenidos en este trabajo sentarán la base para extrapolar a la simulación del proceso de termoformado completo.

### Metodología

Se generó el diseño y se construyó un prototipo de un equipo de calentamiento de forma cubica, aislado en 5 lados con paredes de unicel, para evitar la transferencia de calor del interior el prototipo hacia el medio ambiente y viceversa. Las dimensiones del modelo físico son: 0.25 m X 0.25 m X 0.25 m. El exterior de las paredes se revistió con cartulina negra, ver Figura 1. La parte superior no fue tapada.

Para realizar las mediciones de temperatura se hicieron perforaciones de 0.005 m de diámetro en dos de las paredes a 0.05m, 0.1 m y 0.15 m de altura respecto a la placa metálica.

En la parte inferior del dispositivo se colocó una placa de hierro comercial de 0.15 m X 0.15 m, (ver Figura 2). La placa se dividió en nueve nodos centrales equidistantes, para generar una referencia para las mediciones de la temperatura.



**Figura 1.** Prototipo experimental



**Figura 2.** Colocación de placa dentro del dispositivo



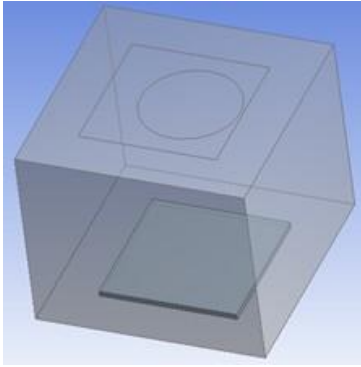
Se utilizó una lámpara de 40 Watts como fuente lumínica, y se realizaron mediciones de temperatura en cada nodo de la placa usando un termómetro láser. y en los puntos laterales la medición se realizó con un termómetro digital. Las mediciones se realizaron cada 5 min por un espacio temporal de 30 min. El proceso se repitió diez veces bajo las mismas condiciones, esto con la finalidad de reducir errores en los datos medidos.

### **Modelo para simulación**

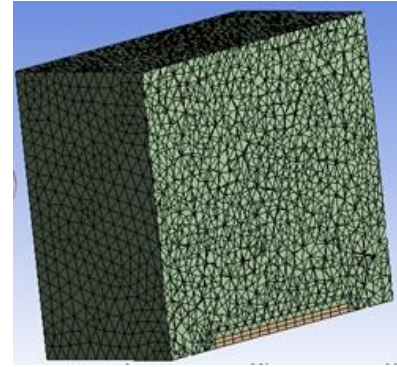
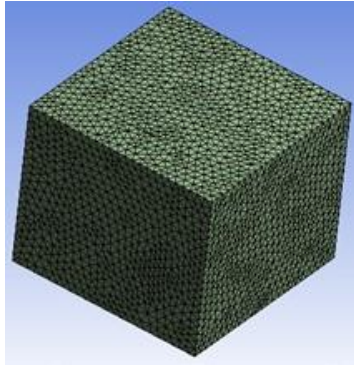
Se generó un modelo en CAD, el cual representa al prototipo, usando el software Space Claim, el modelo es mostrado en la Figura 3. La discretización espacial se realizó con el software Meshing, utilizando elementos mixtos. La malla generada se muestra en la Figura 4, la cual tiene 75,384 elementos.

La simulación se llevó a cabo mediante el software ANSYS V19 estudiantil. La lámpara se simuló como una superficie plana que emite radiación, por lo cual se utilizó el modelo de radiación S2S. El aire que entra en contacto con la radiación se calienta y esto genera una diferencia de temperaturas, lo que provoca movimiento por convección natural en las partículas de aire; el movimiento ascendente dentro del dispositivo genera remolinos, los cuales son modelados mediante el modelo de dos ecuaciones k-epsilon.

Debido a que los materiales usados no se encuentran en la base de datos de FLUENT, se crearon nuevos para la cartulina, el unicel, la lámpara y el hierro comercial, usando las propiedades reportadas en diferentes fuentes (cuales fuentes). En el caso del aire, tanto su densidad como viscosidad son variables por causa del calentamiento, por lo tanto se utilizó un modelo polinómico para su predicción basado en los datos reportados en tablas [8].



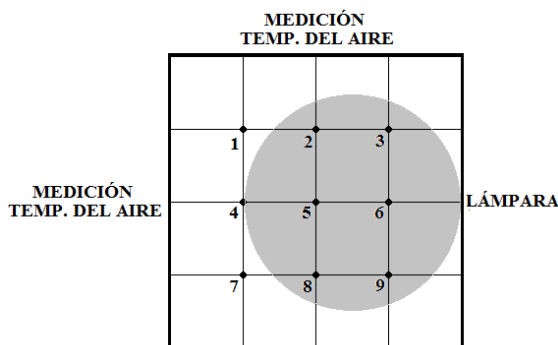
**Figura 3.** Modelo CAD.



**Figura 4.** Malla del modelo (izquierda) y detalle interior de la malla (derecha)

## Resultados

La Figura 5 muestra un esquema numerado de los nodos equidistantes para la toma de mediciones en la placa, la zona gris representa la posición que ocupa la lámpara sobre la placa. La Figura 5 también muestra en que pared se encuentran los puntos de medición de la temperatura del aire, estos estarían numerados de arriba hacia abajo del 1 al 3 en la pared frente a la lámpara y del 4 al 6 en la lateral.

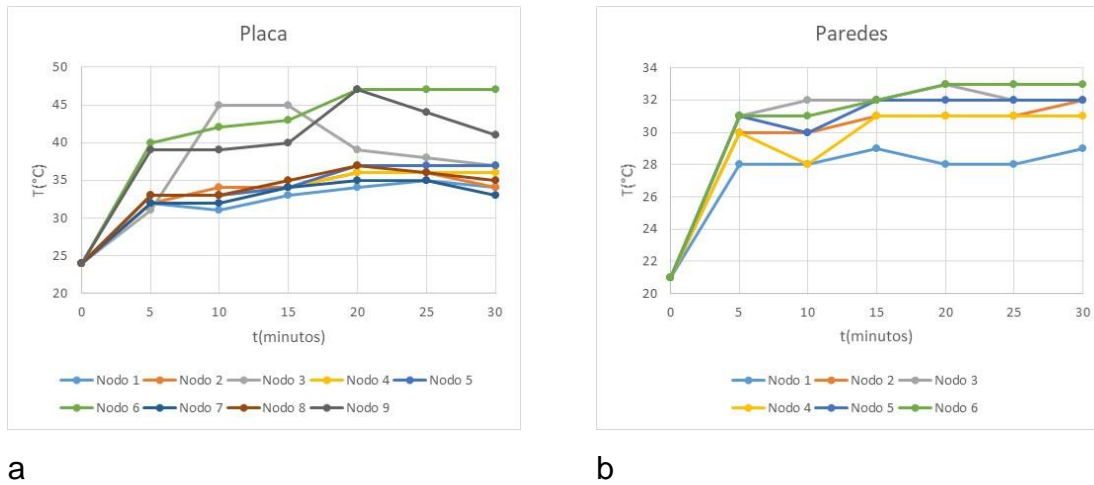


**Figura 5.** Esquema de los nodos de medición en la placa

Los valores experimentales obtenidos son graficados y se muestran en la Figura 6. Estas mediciones fueron realizadas respecto al tiempo. La Figura 6 a) corresponde a la gráfica de los datos de temperatura medida en los nodos sobre la placa con respecto al tiempo. Se puede observar que la temperatura se incrementa de forma rápidamente en los primeros 5 minutos y disminuye el

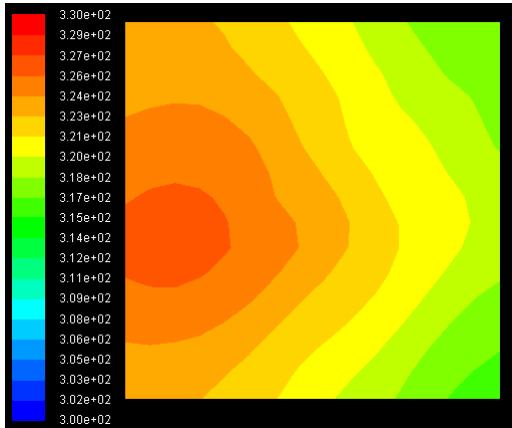


incremento hasta el minuto 20, en el cual se estabiliza y se mantiene constante. Las temperaturas más altas corresponden a los nodos más cercanos a la lámpara siendo el más alto el nodo 6 que está al centro de la fila más cercana, con un valor final de 47°C.



**Figura 6.** Gráficos de Temperatura contra tiempo. a) sobre la placa y b) en el aire.

En cuanto a las mediciones de temperatura del aire, la Figura 6 b) muestra que se incrementa rápidamente la temperatura al igual que en la placa en los primeros 5 minutos, sin embargo, después de este tiempo se estabiliza. En este caso las temperaturas más altas pertenecen a los nodos más cercanos a la placa, quedando la temperatura mayor en el sitio 6 con un valor de 33°C, las demás temperaturas son muy parecidas, excepto la del sitio 1 que es notablemente más baja.

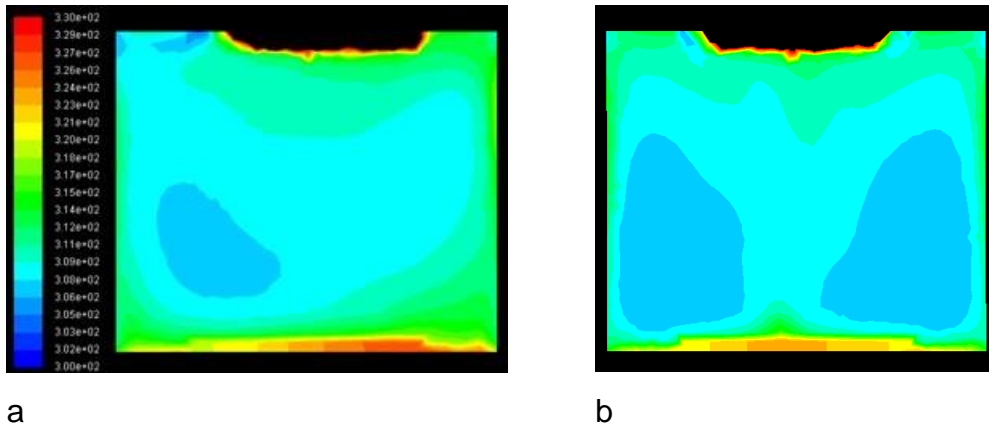


**Figura 7.** Perfiles de temperatura en la placa obtenidos mediante simulación

Al realizar la simulación y graficar los perfiles de temperatura se puede apreciar que la distribución de temperatura es similar, pero los valores numéricos si presenta diferencias. La Figura 7 muestra los perfiles de temperatura obtenidos en la placa metálica, se puede analizar que los nodos que se encuentran debajo de la lampara presentan una temperatura mas elevada, respecto a los que quedan más alejados. El nodo 6 presenta la mayor temperatura respecto al 3 y el 9, al igual que el 5 en comparación con el 2 y 8 y el 4 con respecto al 7 y 1; este fenómeno se observa de igual forma en los datos experimentales de la Figura 6a, por lo tanto el comportamiento que predice el software es similar al real, sin embargo el software predice una temperatura para el nodo 6 de 53°C, 6°C más alta que la temperatura real, esta diferencia se acentúa para los nodos alejados de la lámpara por ejemplo el nodo 4 cuyo valor de la temperatura en la simulación es 10°C más alto que el real.

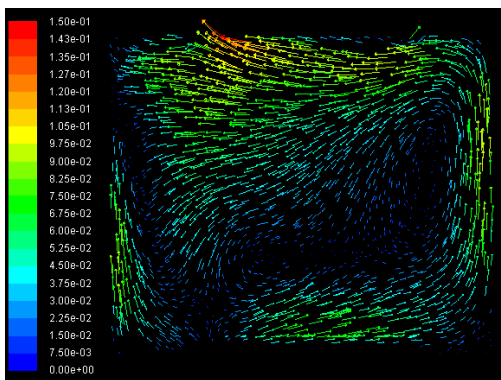
En cuanto a las temperaturas del aire, en la Figura 8 se muestran 2 cortes perpendiculares del interior del sistema, el 8 a) representa el corte longitudinal y el 8 b) el corte transversal, ambas figuras son muy similares, se puede observar que ambas figuras presentan manchas oscuras en una determinada zona que representa una disminución de 2 °C con respecto al aire que las rodea, esto representa la probabilidad de que se haya creado un vórtice con el aire caliente fluyendo alrededor de una zona de menor temperatura.





a b  
**Figura 8.** Perfiles de temperatura en el aire dentro del dispositivo corte: a) longitudinal b) transversal

Se realizó un análisis de vectores de velocidad para corroborar el vórtice, mostrado en la Figura 9, el corte es el mismo que la figura 8 a). El resultado es que efectivamente se puede apreciar la generación de una corriente de aire provocada por la diferencia de temperaturas, el aire cercano a la placa es calentado por convección y tiende a subir, por lo que escapa por la abertura superior, aire relativamente más frío proveniente del ambiente toma su lugar entrando por el lado de la lámpara generando una corriente continua con velocidades de hasta 0.15m/s, este efecto explica el por qué la temperatura del aire se estabiliza más rápido que la de la placa así como también explica la diferencia tan amplia entre los valores de la temperatura de la placa y la del aire (15 °C).



**Figura 9.** Vectores de velocidad del aire dentro del sistema



Al comparar los valores de las temperaturas del aire se encontró que los valores predichos por la simulación también son más altos que los reales, sin embargo, la diferencia es menor, por ejemplo, para el sitio 6, el valor predicho es de 36 °C, una diferencia de 3 °C.

## Conclusiones

Se realizó el análisis del proceso del calentamiento de una placa metálica mediante un arreglo experimental y simulaciones por CFD, comparando los resultados entre ambos. Los resultados indican que, aunque las simulaciones no predijeron los valores numéricos de las temperaturas con exactitud, si lo hicieron para el comportamiento general de las variables. Esto indica que los modelos matemáticos utilizados en la simulación son los correctos, sin embargo puede haber fenómenos que no se tomaron en cuenta. El análisis de los vectores de velocidad mostró una corriente de aire generada por el calentamiento, la velocidad de 0.15 m/s puede no ser muy alta pero para un sistema tan pequeño sí es importante, esta corriente hace pasar el aire caliente pegado a las paredes lo que puede provocar que haya pérdidas de energía a través de estas debido a que son delgadas. El efecto final es que el calor escapa por las paredes y la zona abierta más rápidamente de lo que se tenía pensado inicialmente y al no considerarse, los coeficientes de transferencia de calor reales superan a los ingresados a la simulación, dando como resultado temperaturas más altas en la simulación que las reales. Las observaciones realizadas en este proyecto serán consideradas para ajustar los parámetros en la simulación y obtener mejores resultados en la siguiente etapa del proyecto.

## Referencias

1. Throne, J.L. (2008). *Understanding Thermoforming* (2ª. Edición). Munich, Alemania: Carl Hanser Verlag.
2. Lee, J.K., Virkler, T.L., Scott, C.E. (2001) Influence of initial sheet temperature on ABS thermoforming. *Pol. Eng. and Sci.* 41(10). Pag. 1830-1844



3. Wang, C.H., Nied, H.F. (1999). Temperature optimization for improved thickness control in thermoforming. *Jnl. Of Mat. Proc. & Man. Sci.* 8. Pag. 113-126
4. Hsiao, S. Kikuchi, N. (1999). Numerical and optimal design of composite thermoforming process. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 177. Pag. 1-34
5. Wiesche, S. (2004). Industrial thermoforming simulation of automotive fuel tanks. *Appl. Ther. Eng.* 24. Pag. 2391-2409
6. Makradi, A., Belouettar, S., Ahzi, S., Puissant, S. (2007). Thermoforming process of amorphous polymeric sheets: modeling and finite element simulations. *Jou. Of Appl. Pol. Sci.* 106. Pag. 1718-1724
7. Buffel, B., Mieghem, B., Bael, A., Desplentere, F. (2017). A combined experimental and modelling approach towards an optimized heating strategy in thermoforming of thermoplastics sheets. *Intern. Pol. Proc.* 32. Pag. 378-396
8. Cengel, Yunus A. (2004). *Transferencia de Calor* (2ª ed.). México, México: Mc Graw Hill.