



ESPECIALIDAD DE TECNÓLOGO EN MECATRÓNICA

“Análisis térmico de molde para manufactura de álabe de turbina hidrocínética.”

Informe de la Práctica de Entrenamiento Industrial

Nombre de la Institución:

CEMIE – Océano (Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano).

Presenta:

Estudiante: Javier Aldair Castillo Solís.

Tutor Académico: Dr. Carlos Rubio González.



Querétaro, Qro. Septiembre del 2018

AGRADECIMIENTOS.

A la vida, por permitirme explorar y estudiar sus maravillas a lo largo de todos estos años.

A mis padres y hermano, quienes han sido el motivo más importante para luchar y alcanzar cada una de mis metas, y a los que siempre estaré agradecido por su incondicional apoyo y cariño.

A mi asesor el Dr. Carlos Rubio González, quien me ha brindado una importante orientación académica para superar el desarrollo de este proyecto, y en lo personal, mejorar la visión de mí futuro.

A CIDESI y CONACYT, por la oportunidad de estudiar la Especialidad de Tecnólogo en Mecatrónica.

CONTENIDO.

	Página
Introducción	1
Planteamiento del Problema	2
Justificación	3
Objetivos	4
Marco Teórico	5
Metodología	13
Resultados	32
Conclusiones	39
Bibliografía	40
Anexos	41

INTRODUCCIÓN.

Actualmente en CIDESI se lleva a cabo el proyecto denominado “Desarrollo de materiales compuestos para aplicaciones marinas en dispositivos de conversión de energía hidrocínética” en el marco del CEMIE Océano (Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano). En dicho proyecto se elaborarán moldes RTM (por sus siglas en inglés, Resin Transfer Moulding) para la manufactura de los álabes de una turbina hidrocínética de aproximadamente 70 cm de longitud, además de realizar los análisis térmicos utilizando el programa ANSYS Workbench sobre la descripción del fenómeno de transferencia de calor; primero en un molde para la manufactura de especímenes para pruebas mecánicas mediante RTM y después una significativa reproducción en el molde para la manufactura de álabes de turbina hidrocínética.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Los análisis térmicos en los moldes para especímenes y para álabes de turbinas serán desarrollados para otorgar resultados que permitan su construcción de una manera más eficiente, definiendo la cantidad de resistencias necesarias, la tasa de calor entregada por las misma, y principalmente, lograr una temperatura homogénea en la superficie en contacto entre los moldes y el material compuesto. Esto es importante debido a que la manufactura de los mismos no es algo trivial, sino que requiere de un diseño adecuado en donde el estudio y los fenómenos (como el de transferencia de calor) sean descritos con precisión.

JUSTIFICACIÓN.

El desarrollo de este proyecto logrará optimizar el calentamiento del molde para la manufactura de álabe de turbina hidrocínética, definiendo la cantidad de calor suficiente para lograr que la superficie de contacto entre el molde y el material compuesto tenga una temperatura homogénea.

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

- Realizar un análisis térmico de molde para manufactura de álabe de turbina hidrocínética en el proceso de transferencia de resina RTM (Resin Transfer Moulding).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Determinar las dimensiones de las resistencias eléctricas sobre la geometría del molde.
- Determinar la tasa de transferencia de calor necesaria por cada resistencia eléctrica para mantener una temperatura homogénea a los 50 °C entre la pared de contacto del molde de proceso RTM y el compuesto resina-fibra.

MARCO TEÓRICO.

Proceso RTM (Resin Transfer Moulding).

El proceso RTM se define como un proceso de fabricación de molde cerrado a baja presión que permite obtener piezas de material compuesto en un amplio rango de complejidad y tamaño, así como elementos de altas propiedades mecánicas, y como su nombre lo indica, se le transfiere resina a la preforma de refuerzo (fibras) previamente colocadas en el molde. La geometría de la pieza queda determinada por la geometría del molde y la idea principal es que la resina fluya a través del molde hasta llenar completamente la cavidad. Finalmente, la resina y el refuerzo son curados y retirados del molde después de un tiempo determinado.

Este proceso es ideal para un nivel de producción bajo o mediano, como por ejemplo es rentable en la industria aeroespacial al fabricarse entre 50 y 500 piezas por año, en donde se requiere un alto rendimiento en lugar de un alto volumen de producción, aunque también resulta atractivo en la industria automotriz donde el volumen de producción puede llegar a ser de 50 mil piezas por año.

Gracias a estas características, el proceso se ha seleccionado para la fabricación de álabes de turbinas hidrocínicas, con el objetivo de asegurar la calidad y eficiencia del mismo en la aplicación que conlleve.

Transferencia de calor por conducción y convección.

Los análisis térmicos de este proyecto presentado básicamente son regidos por 3 condiciones de transferencia de calor, los cuales son la *conducción*, *convección* y *radiación*.

La energía calorífica se transmite desde las zonas de alta temperatura a las de baja temperatura, en un proceso que va acompañado de un cambio de entropía hasta que

alcanza, si es posible, el estado de equilibrio térmico caracterizado por una distribución uniforme de temperaturas.

La termodinámica de los procesos reversibles estudia la transferencia de energía en estos, pero siempre a lo largo de una sucesión de estados de equilibrio. Sin embargo, en un proceso de intercambio de calor entre cuerpos a distintas temperaturas, en tanto se mantenga una diferencia finita de temperaturas entre los mismos habrá un flujo irreversible de calor entre dichos cuerpos y no tendremos estados de equilibrio. Sin embargo, se puede tener estados en los que las variables macroscópicas del sistema no cambian con el tiempo, pero que no corresponden a estados de equilibrio sino a estados estacionarios en los que se mantienen constantes las temperaturas de los distintos cuerpos involucrados y el flujo de calor entre ellos. También podemos tener situaciones en las que el sistema está evolucionando con el tiempo, conocido como estado transitorio, como es el caso de la simulación descrita en este documento.

Transferencia de calor por conducción en placas planas.

La energía calorífica se transmite durante el contacto directo entre los cuerpos a distintas temperaturas y tiene lugar mediante choques o acoplamientos entre las moléculas del sistema, aunque no haya un movimiento macroscópico de las moléculas o el material sea transparente a la radiación.

Este tipo de fenómeno plantea que cuando existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, habrá una transferencia de energía de la zona de mayor a la de menor temperatura. Es decir, la energía es transferida por conducción y la rapidez de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura (Figura 1):

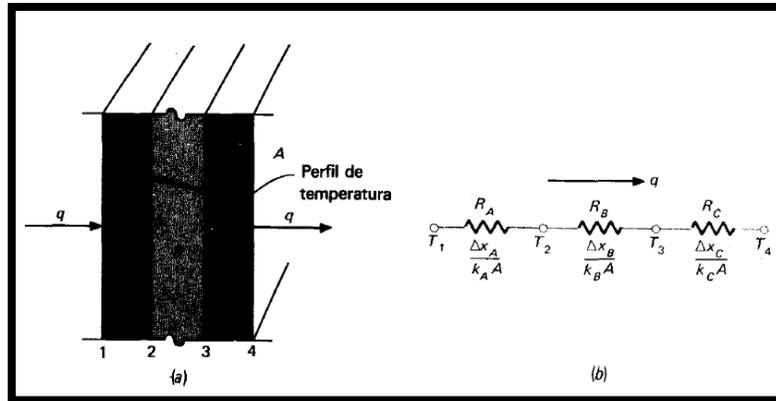


Figura 1.- Transferencia de calor por conducción.

En la ecuación 1, q (w) es la rapidez de transferencia de calor y $\frac{\partial T}{\partial x}$ ($\frac{^{\circ}C}{m}$) es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor, A (m^2) es el área transversal total al flujo de calor, la constante positiva k ($\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$) se le llama conductividad térmica del material y el signo negativo se inserta para que se cumpla con el segundo principio de la termodinámica que dice que el calor deberá fluir hacia abajo en la escala de temperatura.

$$\frac{q}{A} = -kA \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \dots (1)$$

Transferencia de calor por convección en placas planas.

Es este proceso de conducción superficial el que provoca en un fluido inicialmente en reposo y en contacto con una superficie a distinta temperatura, una diferencia de temperaturas en el mismo, originándose diferencias de densidad en el mismo que producirán a su vez un desplazamiento físico de materia a distintas temperaturas de unas zonas a otras, teniéndose convección.

La transferencia de calor por convección puede ser forzada cuando esta ayudada por el movimiento de las superficies en contacto con el fluido (llamada convección natural o libre), cuando se produce únicamente en virtud de una diferencia de densidades

causada por una diferencia de temperaturas. También puede venir acompañada de un cambio de fase, como ocurre durante la condensación o la ebullición, con unos intercambios de calor muy intensos.

Cuando un objeto caliente se deja en un medio que posee una temperatura menor que la temperatura de pared del objeto, entonces decimos que este se enfría o disipa calor por convección.

Este fenómeno se encuentra definido por la ley de enfriamiento de Newton (Figura 2):

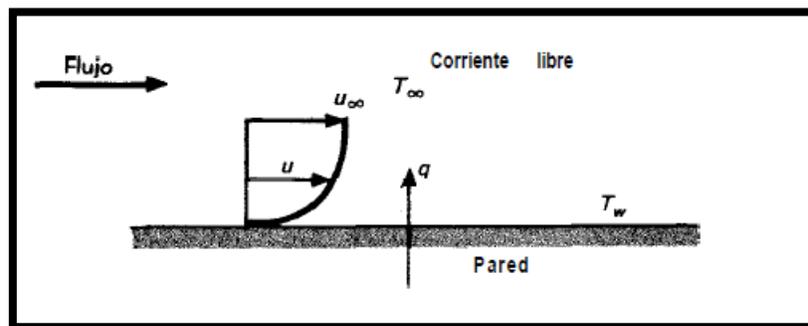


Figura 2.- Transferencia de calor por convección en placas planas.

En esta ley la rapidez q (w) de transferencia de calor está relacionada con la diferencia de temperatura total $T_w - T_\infty$ ($^{\circ}C$) entre la pared y el fluido, así como el área de superficie en contacto con el fluido A . A la variable h se le denomina el coeficiente de transferencia de calor por convección, la cual en algunos sistemas se puede obtener por medio de un cálculo analítico, pero para situaciones complejas esta se puede calcular de manera experimental.

$$q = hA(T_w - T_\infty) \dots (2)$$

Transferencia de calor por convección natural en placas planas y cilindros verticales.

En los cálculos analíticos de este proyecto en particular, se consideró que el modelo del molde se comporta como una placa plana que posee caras horizontales y verticales, así como algunas superficies curvas en vertical en contacto con un medio convectivo natural, es decir, el aire en contacto con la superficie del molde corre a una velocidad cercana a 0 m/s y a una temperatura ambiente (22 °C tentativamente). Por lo tanto, estas son las ecuaciones que rigen el estudio del fenómeno:

Numero de Grashof. - Número adimensional que expresa la relación entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas, la cual se utiliza en los cálculos de transferencia de calor por convección natural.

$$Gr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L^3\rho^2}{\mu^2} \dots (3)$$

Longitud característica. - Es la longitud (m) de las placas con caras horizontales sometidas a convección, y es el resultado del cociente entre el área de la placa y el perímetro de la misma. Para el caso de las placas y cilindros con caras verticales sometidas a convección, L es igual la altura de la misma.

$$L = \frac{A_p}{P_p} \dots (4)$$

Numero de Prandtl. - es un número adimensional proporcional al cociente entre la viscosidad cinemática y la difusividad térmica.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \dots (5)$$

Numero de Rayleigh.- es un número adimensional asociado con la transferencia de calor en el interior del fluido. Cuando el número de Rayleigh está por debajo de un cierto valor crítico, la transferencia de calor se produce principalmente por conducción;

cuando está por encima del valor crítico, la transferencia de calor se produce principalmente por convección.

$$Ra = Gr * Pr \dots (6)$$

Numero de Nusselt. - es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido se desplaza (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción.

$$Nu = \frac{hL}{k} = c * Ra^m \dots (7)$$

El cálculo del número de Nusselt (Nu) es resultado del valor del número de Rayleigh y dos coeficientes que adquieren su valor dependiendo del flujo, geometría y posición de cara expuesta a convección. Para fines de este proyecto el flujo es de tipo laminar debido a que el fluido de enfriamiento (aire) no será forzado a aumentar su velocidad, sino simplemente se dejará a condiciones naturales de flujo. En la Tabla 1 podemos observar dichos valores.

Tabla 1.- Valores de los coeficientes c y m en flujos laminares.

Flujo laminar	Ra	c	m
Cara plana horizontal superior caliente.	$1 \times 10^5 - 2 \times 10^7$	0.54	1/4
Cara plana horizontal inferior caliente.	$3 \times 10^5 - 3 \times 10^{10}$	0.27	1/4
Cara plana o cilíndrica vertical caliente.	$1 \times 10^4 - 1 \times 10^9$	0.59	1/4

Materiales utilizados en el proceso RTM para molde de espécimen y álabe de turbina hidrocínética.

Como parte de la simulación de transferencia de calor, enseguida se mencionan los diversos materiales a utilizar y las propiedades que Ansys Workbench requiere en su módulo "Transient Thermal" para la ejecución del mismo.

Acero SISA 4140 T. - Es una aleación de acero, enfriado al aceite y revenido con dureza de aproximadamente 28/34 HRC. Además, posee buena resistencia a la tensión, coeficiente de dilatación térmica de 0 a 500 (°C) entre 11.1e-6 y 13.9e-6 (mm/mm/°C) y con una composición química (%) de 0.4 de C, 0.9 de Mn, 0.3 de Si, 1 de Cr y 0.2 de Mo. [Hoja de datos de acero SISA]. En Tabla 2 se observan las propiedades más significativas de este elemento.

Tabla 2.- Propiedades físicas del acero SISA 4140 T.

Acero SISA 4140 T	
Densidad @ 20 - 100 °C, g/cc	7.85
Conductividad térmica @ 20 - 100 °C, W/(m·°C)	42
Calor específico @ 25 - 100 °C, J/(kg·°C)	473

Aire. - Las propiedades de este fluido que se muestran en la Tabla 3 es a 22 °C de temperatura, aunque para la prueba experimental en el molde para especímenes se consideró la temperatura real del laboratorio en donde se realizó la misma.

Tabla 3. - Propiedades físicas del aire.

Aire	
Densidad @ 22 °C, kg/m ³	1.196
Conductividad térmica @ 22 °C, W/(m·°C)	0.02529
Viscosidad cinemática @ 22 °C, m ² /s	1.5344e-5
Viscosidad dinámica @ 22 °C, kg/(m·s)	1.8346e-5
Difusividad térmica @ 22 °C, m ² /s	2.1008e-5

Resina Epolam 5015. - es un polímero termoestable de baja viscosidad diseñado para infusión, el cual se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador que permite

la selección de una vida útil adecuada al tamaño de la pieza que se está produciendo; además, posee resistencia a la corrosión, humedece o penetra con facilidad las fibras y posee buenas propiedades mecánicas. Como advertencia durante el proceso, el sistema Epolam 5015 debe ser curado aproximadamente por 2 horas a 50 ° C como mínimo para obtener la resistencia a la temperatura deseada y las mejores propiedades. En la Tabla 4 se muestran las propiedades de dicho polímero.

Tabla 4. - Propiedades físicas de la resina Epolam 5015.

Epoxi	
Proporción de mezcla, por peso	100
Apariencia	Líquida
Color	Ámbar (claro)
Viscosidad @ 25 °C, mPa.s	800
Densidad @ 25 °C, g/cc	1.15

Catalizador Epolam 5015. - es la sustancia que acelera o retarda la reacción química que, mezclada en proporciones preestablecidas con la resina logra la formación de un sólido con propiedades significativas. En la Tabla 5 se muestran las propiedades de dicho catalizador.

Tabla 5. - Propiedades físicas del catalizador Epolam 5015.

Amina	
Proporción de mezcla, por peso	30
Apariencia	Líquida
Color	Incoloro
Viscosidad @ 25 °C, mPa.s	12
Densidad @ 25 °C, g/cc	0.94

METODOLOGÍA.

La metodología de este proyecto considera dos etapas fundamentales:

- 1) Análisis térmico de un molde de RTM para la manufactura de una placa plana.
- 2) Análisis térmico del molde final para la manufactura del álabe de la turbina hidrocínética.

En ambos casos se requiere el desarrollo de análisis térmicos en estado transitorio mediante el software comercial ANSYS Workbench en el módulo Thermal Transient, con el fin de conocer las distribuciones de temperatura durante el calentamiento de los moldes previo a la inyección de la resina.

El análisis de transferencia de calor será validado con resultados experimentales en el molde de RTM para manufactura de especímenes, y los datos obtenidos del control en el mismo serán utilizados para el diseño del molde para la manufactura del álabe de la turbina hidrocínética.

Desarrollo de modelado y propiedades de molde para espécimen.

En la Tabla 6 y Figuras 3 (a-c) se observan las propiedades consideradas en Ansys Workbench de los elementos (tapas, resistencias y sensores) que forman parte del molde para el proceso RTM; así como la preforma de fibra de vidrio y el sello considerados en el interior del mismo.

Tabla 6. - Propiedades mecánicas de elementos de molde para espécimen.

Object Name	<i>Fibra de vidrio</i>	<i>Sello</i>	<i>Tapa inferior</i>	<i>Tapa superior</i>
State	Meshed			
Graphics Properties				
Visible	Yes			
Transparency	1			
Definition				
Suppressed	No			
Stiffness Behavior	Flexible			

Coordinate System	Default Coordinate System			
Reference Temperature	By Environment			
Reference Frame	Lagrangian			
Material				
Assignment	Fibra de vidrio E	Silicon Nitrate	Acero 4140 T	
Nonlinear Effects	Yes			
Thermal Strain Effects	Yes			
Bounding Box				
Length X	0.22 m	0.24825 m	0.31 m	
Length Y	3.e-003 m	8.25e-003 m	3.e-002 m	3.1e-002 m
Length Z	0.35 m	0.42825 m	0.48 m	
Properties				
Volume	2.31e-004 m ³	8.9843e-005 m ³	4.0044e-003 m ³	4.4383e-003 m ³
Mass	0.6006 kg	0.21562 kg	31.435 kg	34.84 kg
Centroid X	2.1848e-002 m			
Centroid Y	8.5742e-003 m	1.1074e-002 m	-5.1451e-003 m	2.5882e-002 m
Centroid Z	0.48 m		0.48113 m	0.47898 m
Moment of Inertia Ip1	2.4229e-003 kg·m ²	5.4788e-003 kg·m ²	0.62253 kg·m ²	0.66592 kg·m ²
Moment of Inertia Ip2	8.5535e-003 kg·m ²	7.832e-003 kg·m ²	0.88191 kg·m ²	0.93928 kg·m ²
Moment of Inertia Ip3	6.1316e-003 kg·m ²	2.3556e-003 kg·m ²	0.26351 kg·m ²	0.27882 kg·m ²
Statistics				
Nodes	9883	2654	110280	109613
Elements	4795	1008	71798	72053
Mesh Metric	None			

Object Name	<i>Resistencias</i>	<i>Sensores</i>
State	Meshed	Meshed
Graphics Properties		
Visible	No	Yes
Definition		
Suppressed	No	
Assignment	Copper	
Coordinate System	Default Coordinate System	
Bounding Box		
Length X	0.3048 m	0.31 m
Length Y	4.3673e-002 m	3.418e-002 m
Length Z	0.37267 m	0.24318 m
Properties		
Volume	1.5169e-004 m ³	4.3893e-006 m ³
Mass	1.355 kg	3.921e-002 kg
Centroid X	2.1848e-002 m	
Centroid Y	1.0793e-002 m	1.0574e-002 m

Centroid Z	0.48254 m	0.48 m
Moment of Inertia Ip1	0.5578 kg·m ²	1.6202e-002 kg·m ²
Moment of Inertia Ip2	0.58255 kg·m ²	1.676e-002 kg·m ²
Moment of Inertia Ip3	2.5009e-002 kg·m ²	5.7419e-004 kg·m ²
Statistics		
Nodes	18917	35195
Elements	10277	19238
Mesh Metric	None	

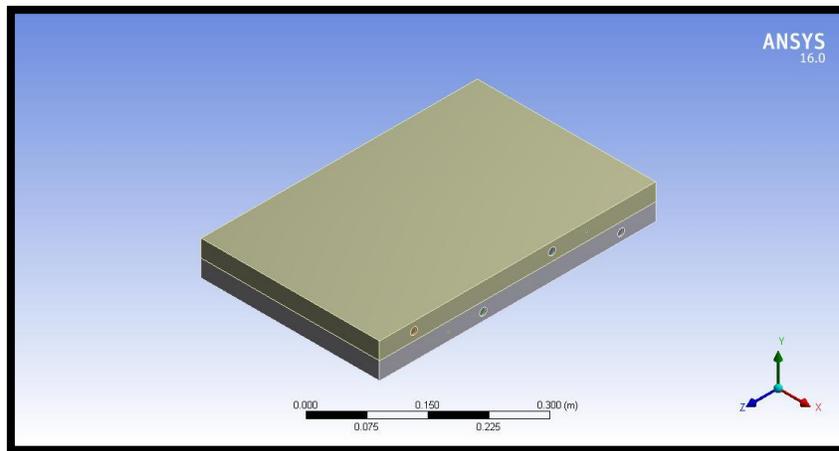


Figura 3a.- Vista isométrica de molde para espécimen.

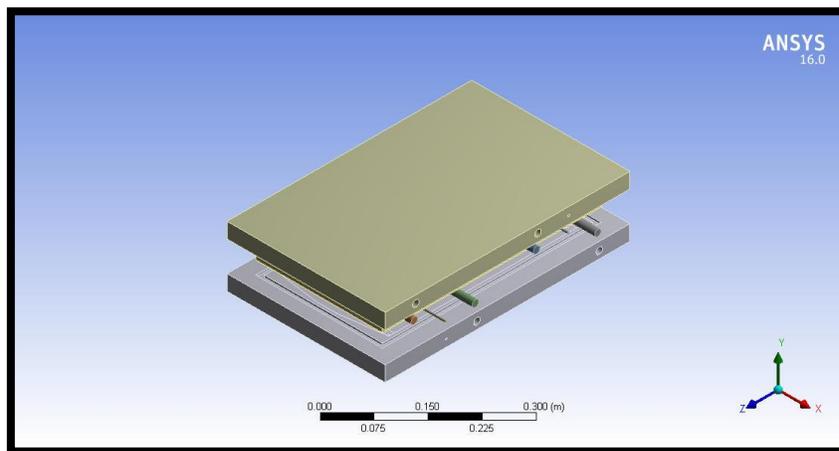


Figura 3b.- Vista isométrica con proyección de elementos de molde para espécimen.

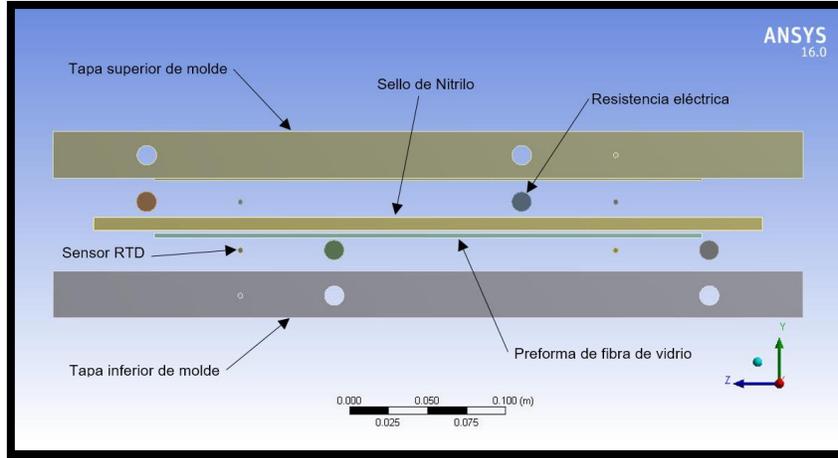


Figura 3c.- Vista frontal con proyecciones de elementos de molde para espécimen.

Propiedades de la malla de molde para espécimen.

En la Tabla 7 y Figuras 4 (a-b) se especifica el tipo de mallado definido para el análisis térmico del molde, en donde se optó por elementos finitos tetraédricos debido a la geometría de dicho molde y un tamaño de 0.02 m (máximo) contra 0.002 m (mínimo), suficiente para compensar el tiempo de simulación en la plataforma ANSYS Workbench y obtener resultados significativos. Cabe mencionar que previo a elegir las formas y dimensiones se ejecutaron otras opciones (como utilizar elementos hexaedros y de tamaños más pequeños) en donde se observaron minúsculas variaciones en el resultado, pero con una extensión prolongada de tiempo de simulación.

Tabla 7. - Propiedades de mallado de molde para espécimen.

Object Name	<i>Patch Conforming Method</i>	<i>Body Sizing</i>
State	Fully Defined	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	12 Bodies	
Definition		
Suppressed	No	
Method	Tetrahedrons	
Algorithm	Patch Conforming	
Element Midside Nodes	Use Global Setting	
Type		Element Size

Element Size		2.e-002 m
Behavior		Soft
Curvature Normal Angle		Default
Growth Rate		Default
Local Min Size		Default (2.e-003 m)

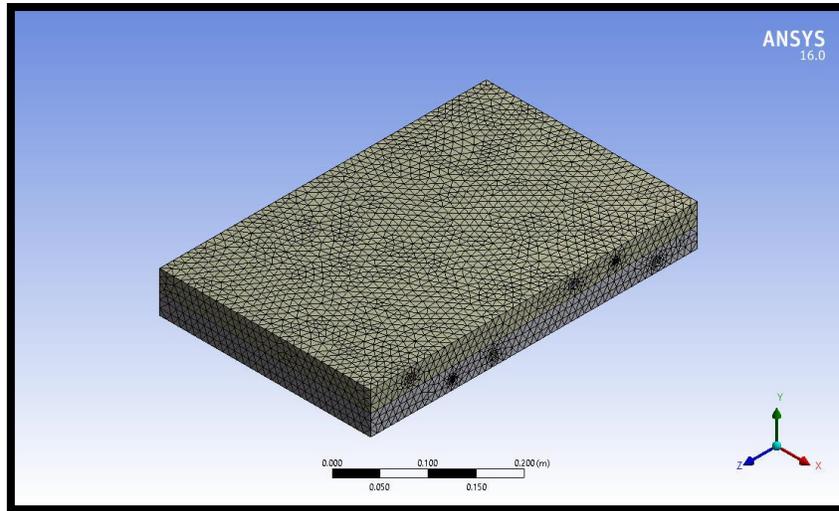


Figura 4a.- Vista isométrica de mallado de molde (completo) para espécimen.

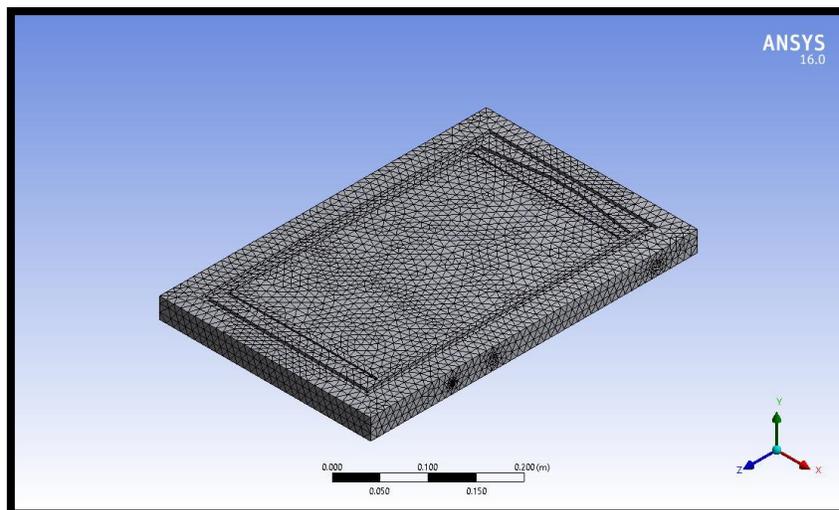


Figura 4b.- Vista isométrica de mallado de molde (tapa inferior) para espécimen.

Condiciones de frontera (flujo de calor por convección en cara horizontal superior).

En las Figuras 5 (a-b) se muestran la gráfica e imagen con la primera condición de frontera de la cara horizontal superior del molde para espécimen. Dicha gráfica muestra la relación de cambio entre la temperatura de película (promedio entre la temperatura de superficie y temperatura ambiente) y el coeficiente de convección resultante.

El cálculo de dicho coeficiente de convección se realizó previa y estrictamente en base a las ecuaciones presentadas por el autor Mc. Adams (Tabla 1), que son resultado de pruebas experimentales para la obtención del número de Nusselt en placas planas y cilindros verticales sometidos a un flujo de calor constante y una temperatura de película variable.

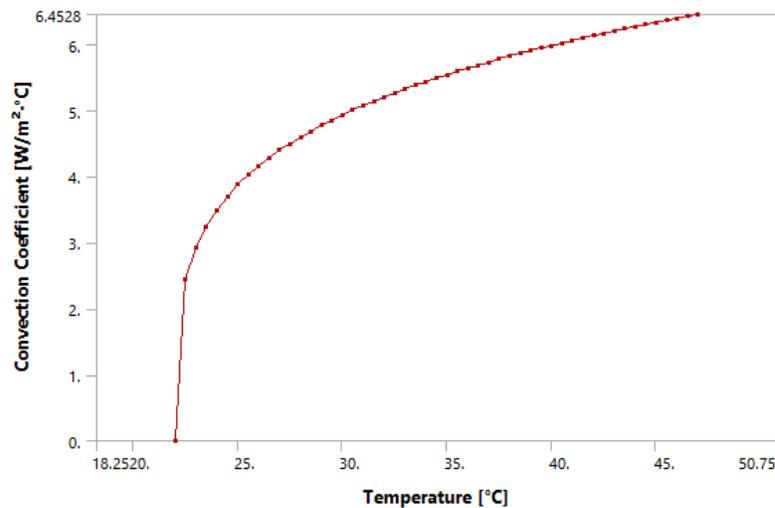


Figura 5a.- Gráfica de temperatura de película vs coeficiente de convección h (cara horizontal superior).

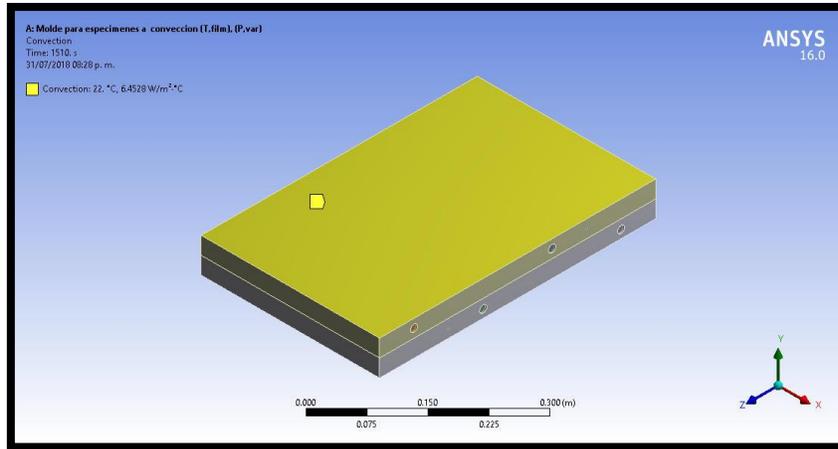


Figura 5b.- Selección de cara horizontal superior de molde para espécimen.

Condiciones de frontera (flujo de calor por convección en cara horizontal inferior).

Para el cálculo del coeficiente de convección h en la cara horizontal inferior, el número de Nusselt cambia y los valores reflejan una disminución en sus valores; eso es debido a que los efectos del aire en esta cara se reducen debido a que el aire primero tiene contacto con la cara horizontal superior y las caras verticales, para después con una reducida capacidad de absorción de calor se dirige hacia la cara inferior por efecto de la gravedad. En las Figuras 6 (a-b) se ilustran estas condiciones.

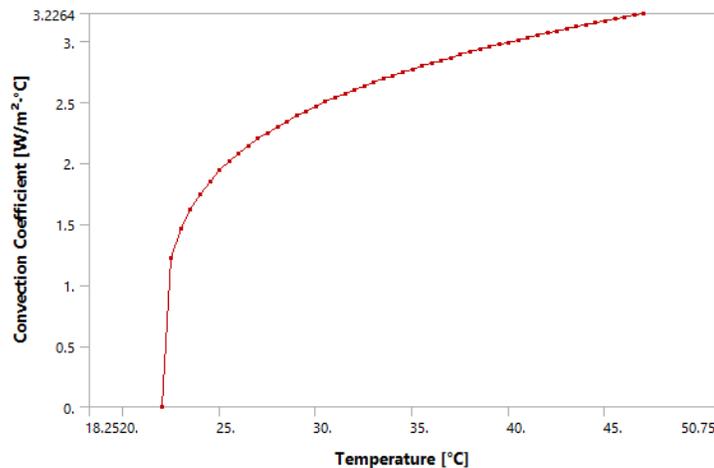


Figura 6a.- Gráfica de temperatura de película vs coeficiente de convección h (cara horizontal inferior).

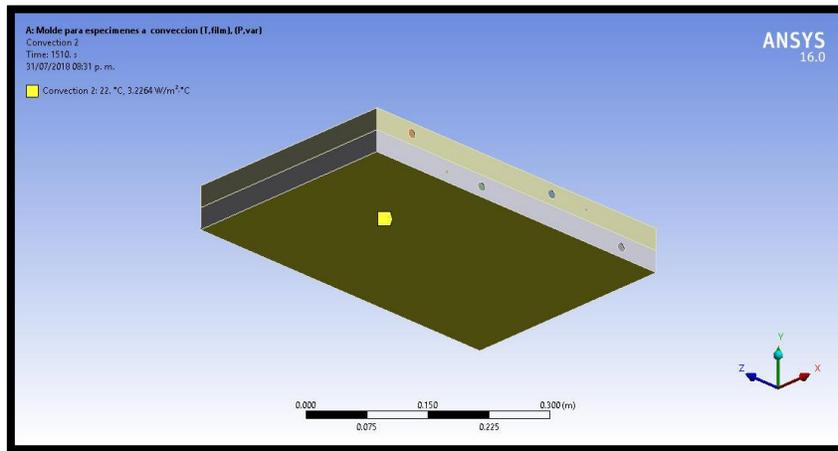


Figura 6b.- Selección de cara horizontal inferior de molde para espécimen.

Condiciones de frontera (flujo de calor por convección en caras verticales).

En todas las caras verticales el efecto convectivo del aire es el mismo, debido a que el flujo de calor que escapa por estas superficies depende de la altura e independientemente del ancho de las mismas. Esto es debido también al efecto de gravedad, ya que se ve reducida su influencia en estas caras por estar a 90° del flujo de calor, es decir, permite con mayor facilidad el flujo del mismo por estas superficies. En las Figuras 7 (a-b) se ilustran estas condiciones.

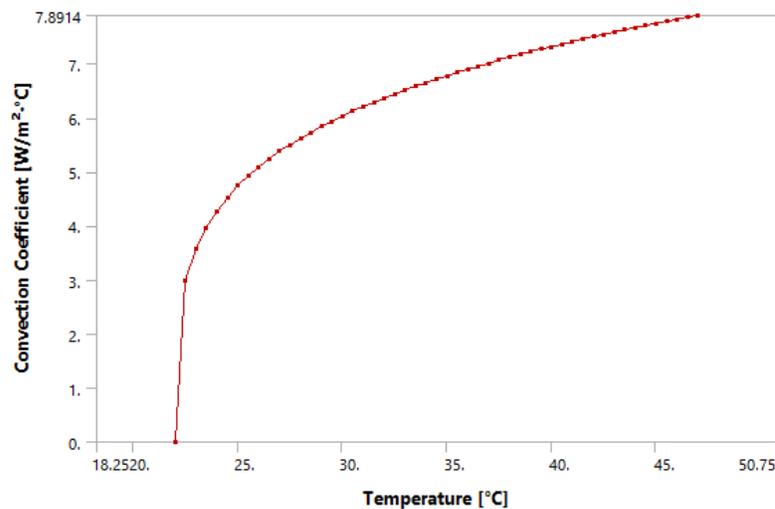


Figura 7a.- Gráfica de temperatura de película y coeficiente de convección h (caras verticales).

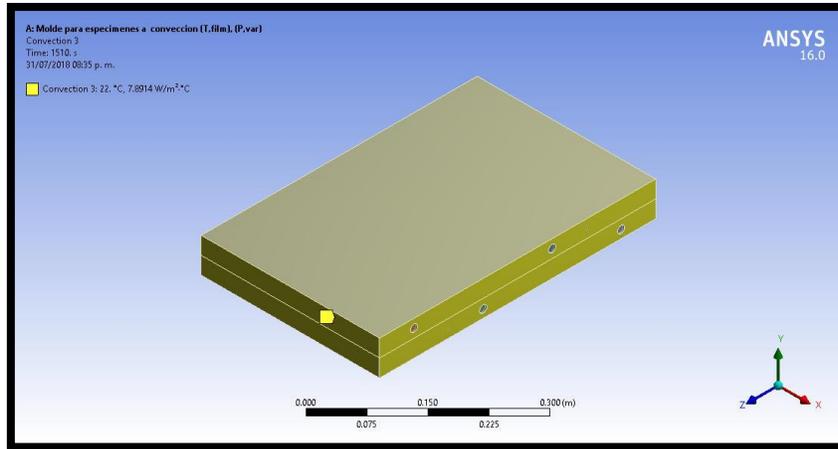


Figura 7b.- Selección de caras verticales de molde para espécimen.

Condiciones de frontera (flujo de calor por conducción sobre caras en contacto entre el molde y resistencias eléctricas).

Ahora, en estas condiciones de frontera se establecen los flujos de calor por unidad de área [W/m^2] suministrados a las caras que se encontraran en contacto con las resistencias eléctricas en un tiempo límite de 1510 s.

Los valores dados en la Figura 8a fueron obtenidos de forma experimental (Anexo 1) en pruebas realizadas en el molde para especímenes, gracias a la adquisición de datos a través de sensores RTD's y un controlador PID. La condición de control fue mantener la temperatura de superficie del molde en contacto con la fibra de vidrio aproximadamente a $50^{\circ}C$ (temperatura ideal para el curado de la mezcla epoxi-fibra). En la Figura 8b se muestran las caras sometidas a este fenómeno.

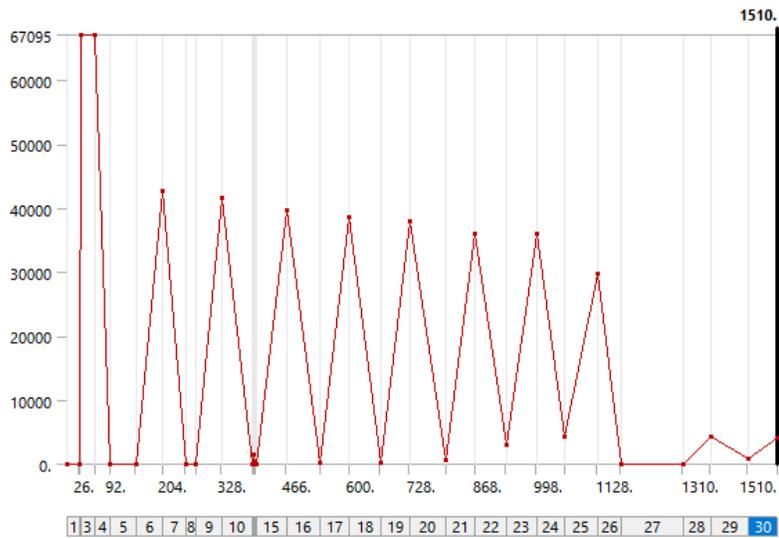


Figura 8a.- Gráfica de tiempo (s) vs flujo de calor (W/m²) en caras verticales de molde para espécimen.

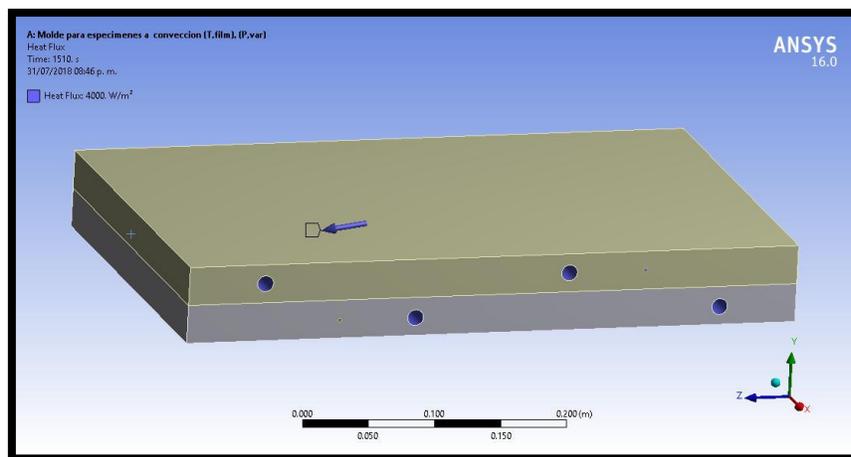


Figura 8b.- Selección de caras en contacto con resistencias eléctricas de molde para espécimen.

Modelado y propiedades de molde para álabe de turbina hidrocínética en pruebas con 11, 9 y 7 resistencias.

En la Tabla 8 se observan las propiedades consideradas en Ansys Workbench de los elementos que forman parte del molde para el proceso RTM; así como la preforma de fibra de vidrio y el sello en el interior del mismo, y que son parte de la estructura en el análisis de calentamiento previo a la inyección de resina epóxica. En las Figuras 9

(a-c) se muestran las vistas isométricas de los 3 diferentes diseños del molde a 11, 9 y 7 resistencias.

Tabla 8. - Propiedades de elementos de molde para álabe.

Object Name	Sello de silicon	Molde tapa superior	Molde tapa inferior	Alabe de turbina hidrocínética
State	Meshed			
Graphics Properties				
Visible	Yes			
Transparency	1			
Definition				
Suppressed	No			
Stiffness Behavior	Flexible			
Coordinate System	Default Coordinate System			
Reference Temperature	By Environment			
Material				
Assignment	Silicon Nitrate	Acero 4140 T		Fibra de vidrio E
Nonlinear Effects	Yes			
Thermal Strain Effects	Yes			
Bounding Box				
Length X	0.29953 m	0.36959 m	0.36967 m	0.25132 m
Length Y	6.e-003 m	4.5188e-002 m	5.9863e-002 m	0.13362 m
Length Z	0.75727 m	0.82427 m		0.67427 m
Properties				
Volume	8.3488e-005 m ³	5.9232e-003 m ³	7.3478e-003 m ³	1.3096e-003 m ³
Mass	0.20037 kg	46.497 kg	57.681 kg	3.4049 kg
Centroid X	-1.6984e-002 m	-1.9218e-002 m	-1.2931e-002 m	-2.3035e-002 m
Centroid Y	-3.0247e-002 m	-1.0349e-002 m	-4.8024e-002 m	-2.6101e-002 m
Centroid Z	0.84729 m	0.85268 m	0.85668 m	0.88446 m
Moment of Inertia Ip1	1.113e-002 kg·m ²	2.3106 kg·m ²	2.657 kg·m ²	6.6002e-003 kg·m ²
Moment of Inertia Ip2	1.7236e-003 kg·m ²	2.6326 kg·m ²	3.0563 kg·m ²	7.003e-002 kg·m ²
Moment of Inertia Ip3	1.2853e-002 kg·m ²	0.32995 kg·m ²	0.41334 kg·m ²	7.6364e-002 kg·m ²
Statistics				
Nodes	1696	52183	64547	13599
Elements	578	32268	40017	7062
Mesh Metric	None			

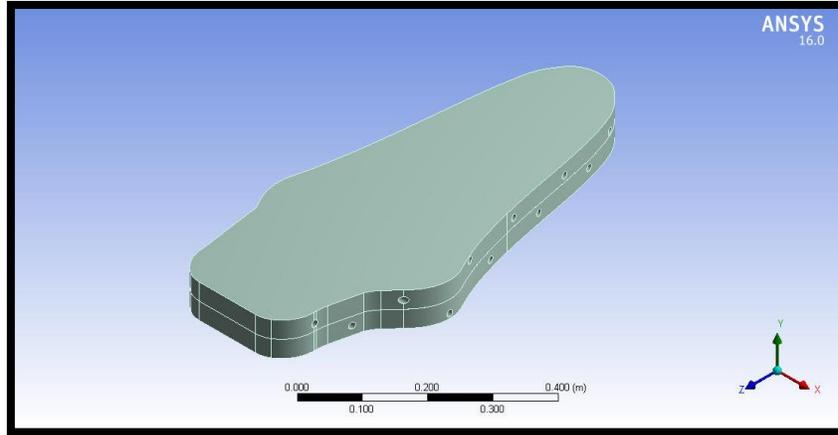


Figura 9a.- Vista isométrica de molde para álabes con 11 resistencias.

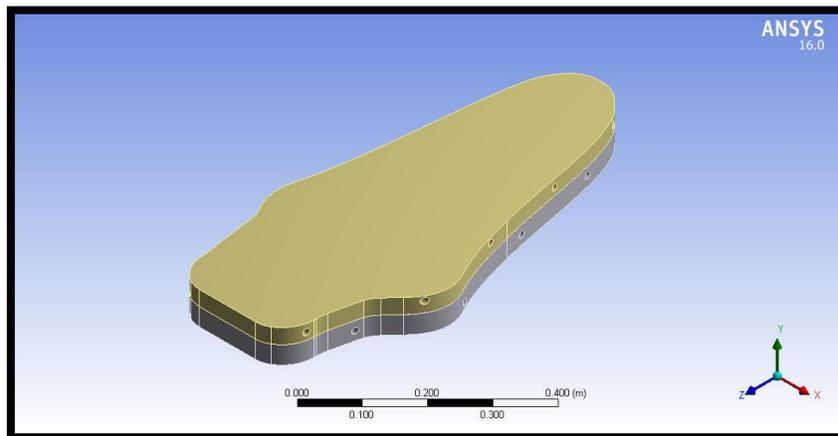


Figura 9b.- Vista isométrica de molde para álabes con 9 resistencias.

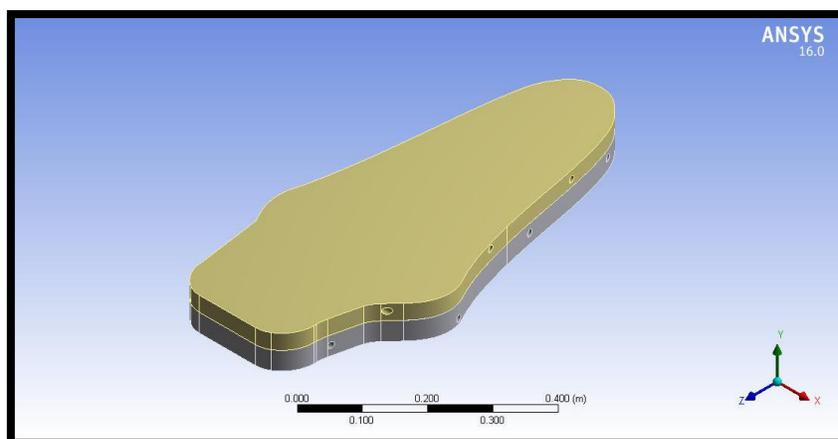


Figura 9c.- Vista isométrica de molde para álabes con 7 resistencias.

Propiedades de la malla de molde para álabe.

En la Tabla 9 se especifica el tipo de mallado definido el análisis térmico del molde, en donde se optó por elementos finitos tetraédricos debido a la geometría de dicho molde y un tamaño de 0.02 m (máximo) y 0.002 m (mínimo) suficiente para compensar el tiempo de simulación en la plataforma ANSYS Workbench y obtener resultados significativos. Cabe mencionar que previo a elegir las formas y dimensiones se realizaron otras opciones (como utilizar elementos hexaedros y de tamaños más pequeños) en donde se observaron minúsculas variaciones en el resultado, pero con una extensión prolongada de tiempo de simulación. En las Figuras 10 (a-b) se muestran las vistas del mallado seleccionado.

Tabla 9.- Propiedades de mallado de molde para álabe.

Object Name	Patch Conforming Method	Body Sizing
State	Fully Defined	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	8 Bodies	
Definition		
Method	Tetrahedrons	
Algorithm	Patch Conforming	
Element Midside Nodes	Use Global Setting	
Type		Element Size
Element Size		2.e-002 m
Behavior		Soft

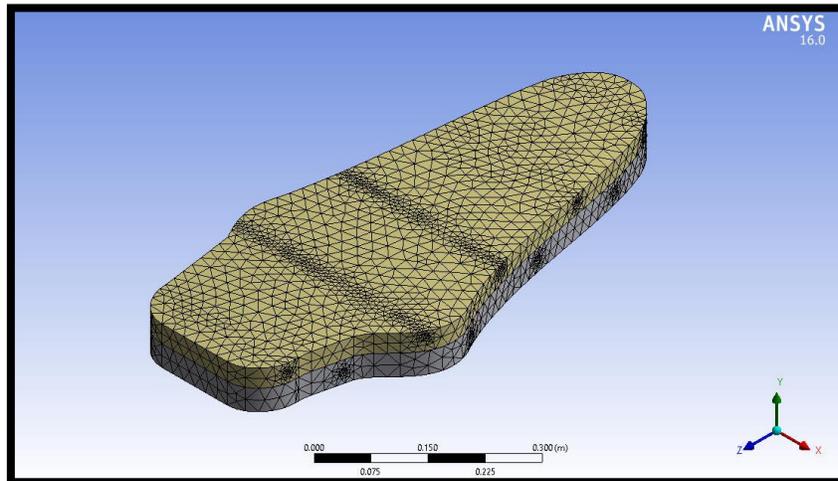


Figura 10a.- Vista isométrica de mallado de molde (completo) para álabe.

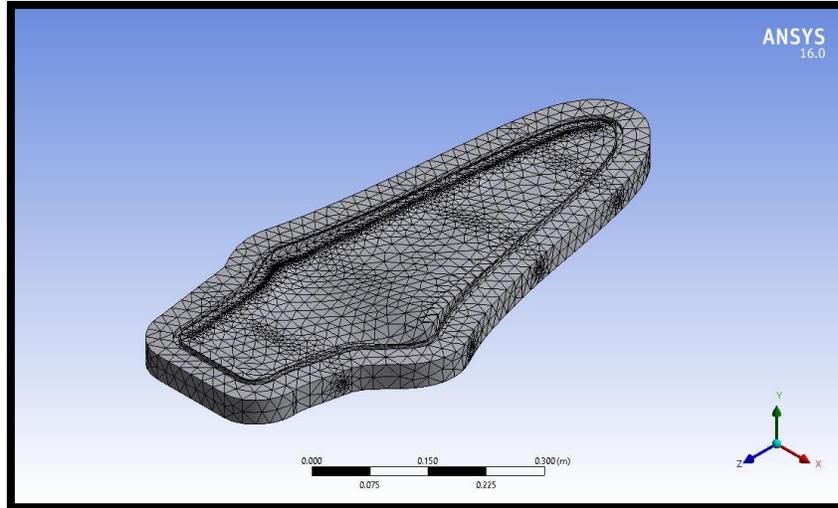


Figura 10b.- Vista isométrica de mallado de molde (tapa inferior) para álabe.

Condiciones de frontera (flujo de calor por convección en cara horizontal superior).

En las Figuras 11 (a-b) se muestran la gráfica e imagen con la primera condición de frontera de la cara horizontal superior del molde para álabe de turbina hidrocínética. Dicha gráfica muestra la relación de cambio entre la temperatura de película (promedio entre la temperatura de superficie y temperatura ambiente) y el coeficiente de convección resultante.

El cálculo de dicho coeficiente de convección se realizó previa y estrictamente en base a las ecuaciones presentadas por el autor Mc. Adams (Tabla 1), que son resultados de pruebas experimentales para la obtención del número de Nusselt en placas planas sometidas a un flujo de calor constante y una temperatura de película variable.

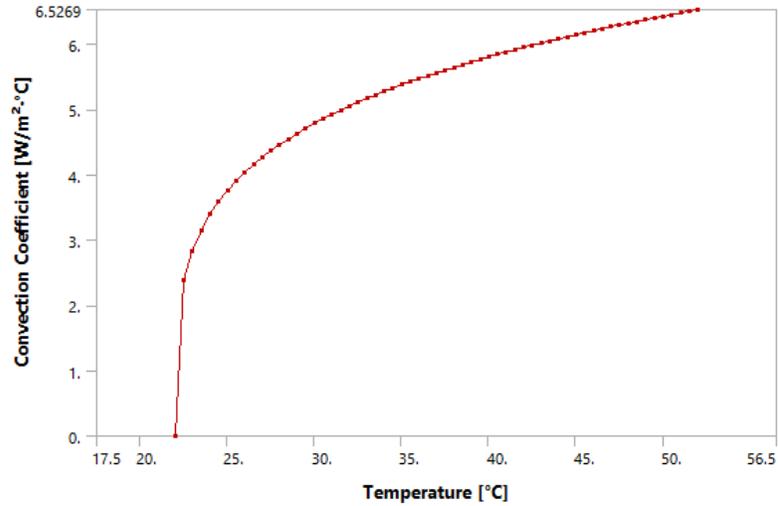


Figura 11a.- Gráfica de temperatura de película vs coeficiente de convección h (cara horizontal superior).

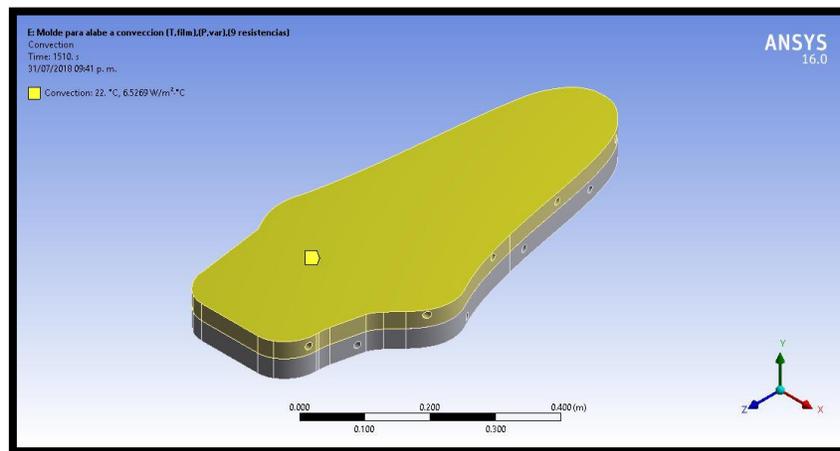


Figura 11b.- Selección de cara horizontal superior de molde para espécimen.

Condiciones de frontera (flujo de calor por convección en cara horizontal inferior).

Para el cálculo del coeficiente de convección h en la cara horizontal inferior el número de Nusselt cambia y los valores reflejan una disminución en sus valores; eso es debido a que los efectos del aire en esta cara se reducen debido al hecho de que el fluido primero tiene contacto con la cara horizontal superior y las caras verticales, para

después con una reducida capacidad de absorción de calor se dirige hacia la cara inferior por efecto de la gravedad. En las Figuras 12 (a-b) se ilustran estas condiciones.

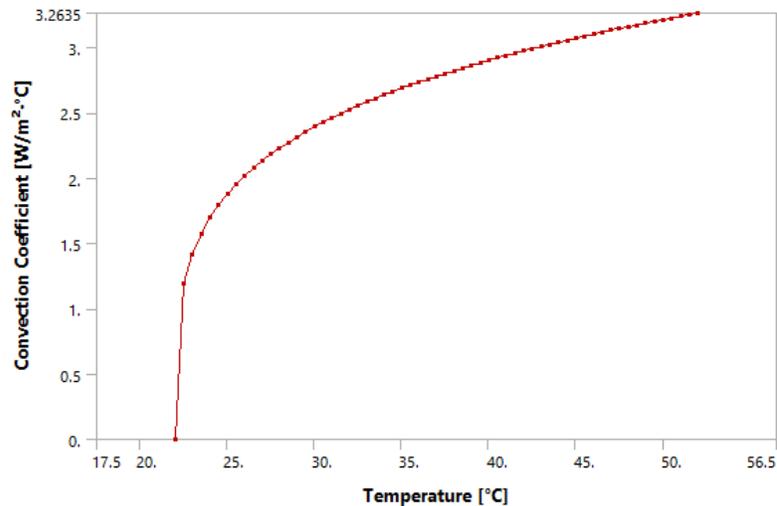


Figura 12a.- Gráfica de temperatura de película vs coeficiente de convección h (cara horizontal inferior).

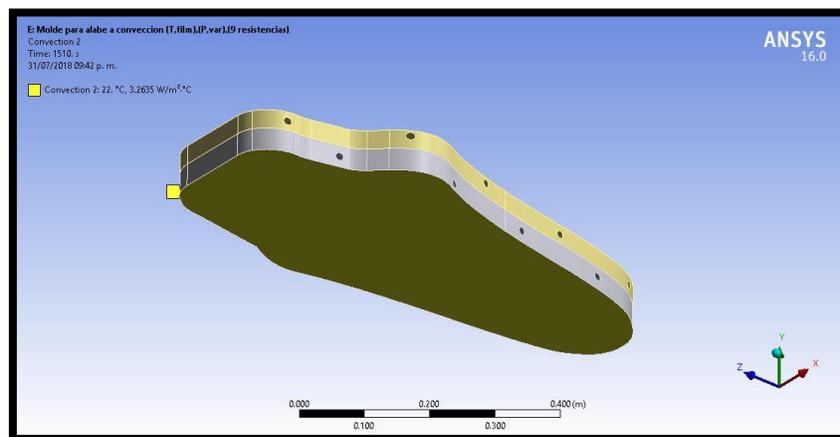


Figura 12b.- Selección de cara horizontal inferior de molde para álabe.

Condiciones de frontera (flujo de calor por convección en caras verticales).

En todas las caras verticales el efecto convectivo del aire es el mismo, debido a que el flujo de calor que escapa por estas superficies depende de la altura independientemente del ancho. Esto es debido también al efecto de gravedad, ya que se ve reducido su influencia en estas caras por estar a 90° del flujo de calor, es decir,

permite con mayor facilidad el flujo del mismo por estas superficies. En las figuras 13 (a-b) se ilustran estas condiciones.

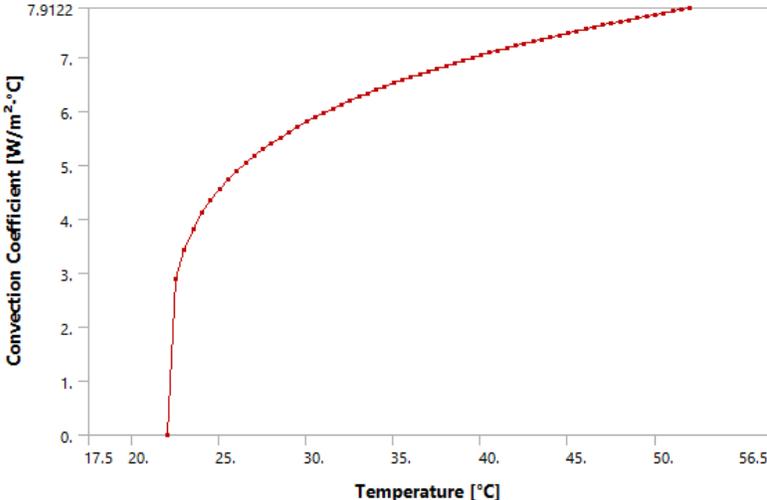


Figura 13a.- Gráfica de temperatura de película vs coeficiente de convección h (caras verticales).

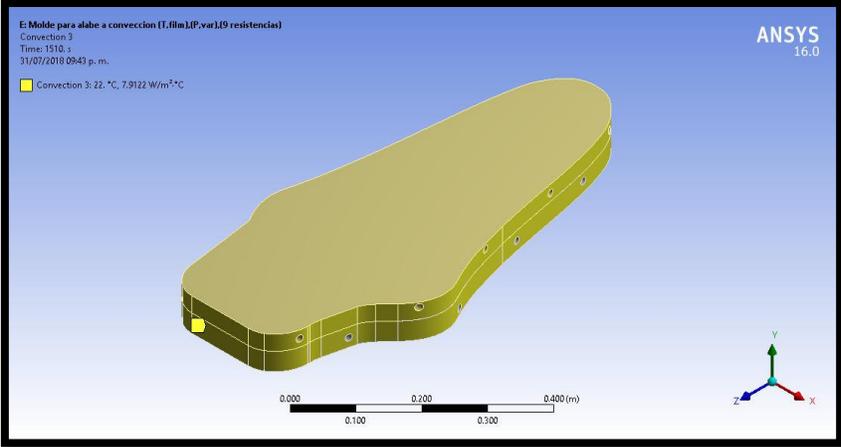


Figura 13b.- Selección de caras verticales de molde para álabes.

Condiciones de frontera (flujo de calor por conducción sobre caras en contacto entre el molde y resistencias eléctricas).

Ahora, en estas condiciones de frontera se establecen los flujos de calor por unidad de área [W/m^2] suministrados a las caras que se encontraran en contacto con las resistencias eléctricas en un tiempo límite de 1510 s.

Los valores dados en la Figura 14a fueron obtenidos de forma experimental (Anexo 1) en pruebas realizadas en el molde para especímenes, gracias a la adquisición de datos a través de sensores RTD's y un controlador PID. Estos fueron programados bajo una estricta condición, la cual era mantener la temperatura de superficie del molde en contacto con la fibra de vidrio aproximadamente a $50^{\circ}C$ (temperatura ideal para el curado de la mezcla epoxi-fibra). En la figura #b se muestran las caras sometidas a este fenómeno.

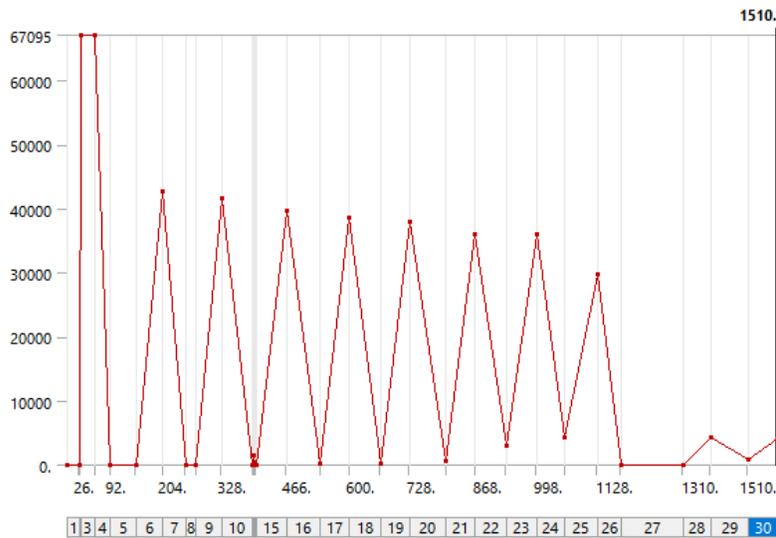


Figura 14a.- Gráfica de tiempo (s) vs flujo de calor (W/m^2) en caras verticales de molde para álabe.

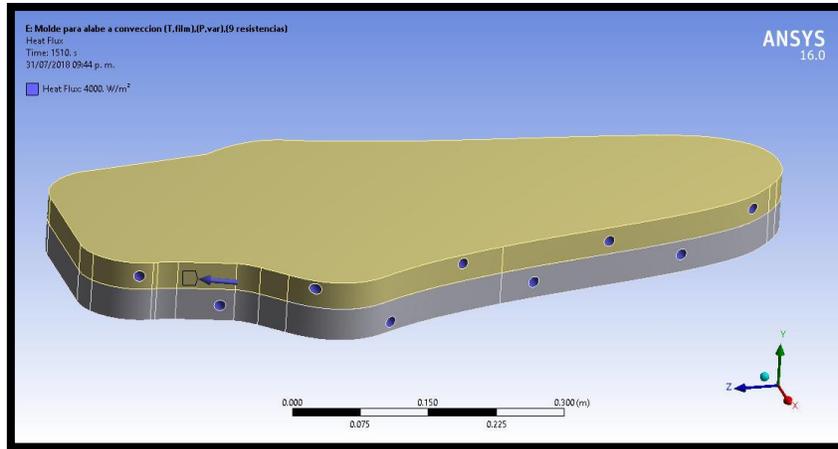


Figura 14b.- Selección de caras en contacto con resistencias eléctricas de molde para álabe.

RESULTADOS.

Distribución de temperatura en molde para especímenes.

En este punto se muestran los resultados del desarrollo del proyecto, que muestra la distribución de temperatura a los 1510 segundos y a lo largo de las superficies del molde para especímenes. En las Figuras 15 (a-c) se muestran las vistas isométricas de la distribución de temperatura, en donde se observan el valor mínimo (54.012 °C) y máximo (56.806 °C).

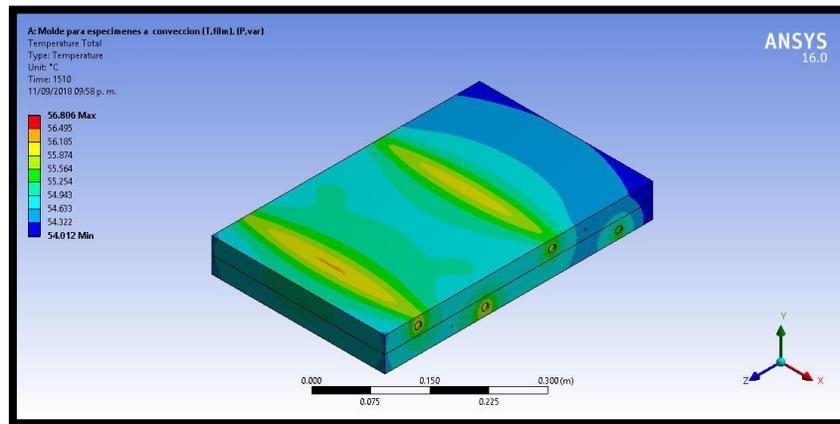


Figura 15a.- Vista isométrica de distribución de temperatura en molde para especímenes (completo).

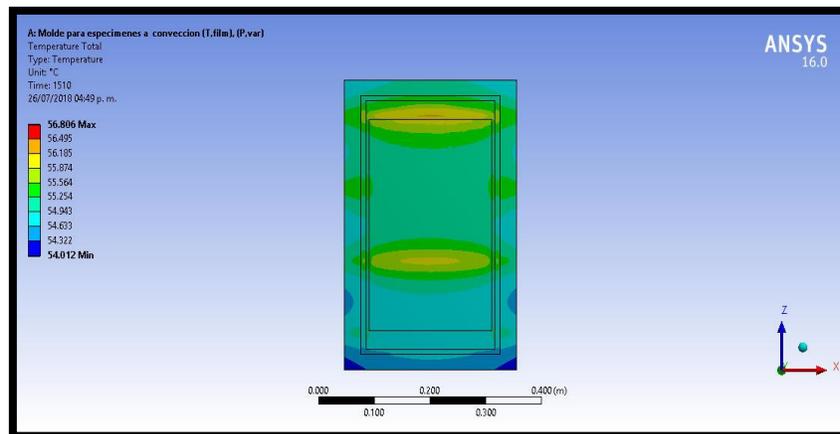


Figura 15b.- Vista isométrica de distribución de temperatura en molde para especímenes (tapa inferior).

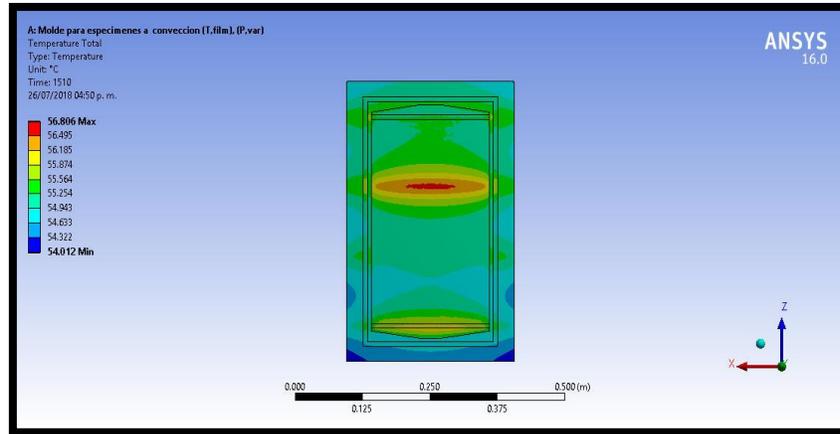


Figura 15c.- Vista isométrica de distribución de temperatura en molde para especímenes (tapa superior).

Como parte del análisis, se establecieron puntos para monitorear la temperatura en las superficies superior e inferior de las tapas del molde. Esto con la intención de obtener gráficas que muestren el tiempo en que dicha superficie logre una distribución uniforme de temperatura. En la Figura 16 se muestran los puntos elegidos sobre las superficies, y en las Figuras 17 (a-b) las gráficas que muestran las líneas de tiempo (con distinto código de colores) que denotan la relación de los puntos elegidos y la temperatura que poseen en cada instante de tiempo.

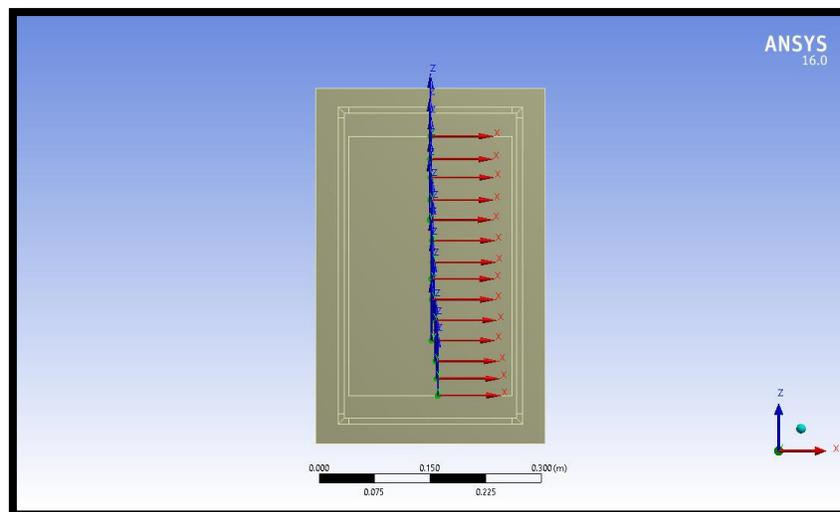


Figura 16. - Puntos sobre superficie de tapa superior del molde para espécimen.

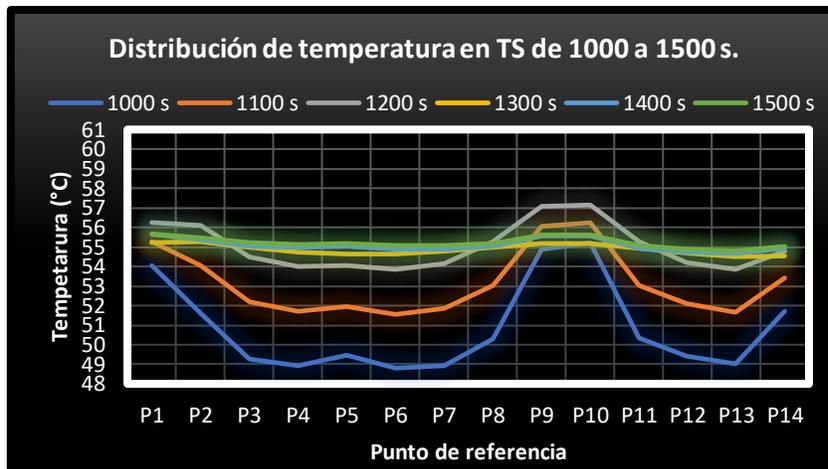


Figura 17a. - Gráfica de temperatura en distintos puntos en tapa superior de molde para espécimen.

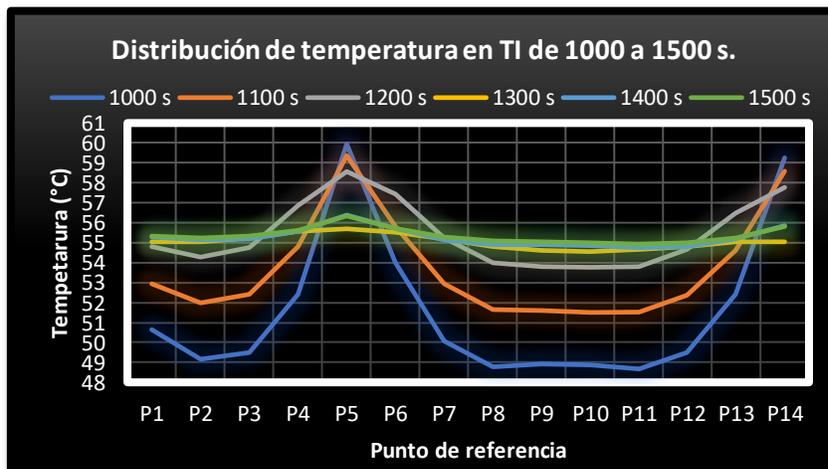


Figura 17b. - Gráfica de temperatura en distintos puntos en tapa inferior de molde para espécimen.

Trasladando los mismos valores de control de temperatura del molde para espécimen hacia al molde para álabe de turbina hidrocínética, se lograron obtener resultados de la distribución de temperatura a los 1510 segundos y a lo largo de las superficies en contacto con la preforma de fibra de vidrio. En las Figuras 18 (a-c) se muestran las vistas isométricas (tapas inferiores) del molde de la distribución de temperatura, en donde se observan el valor mínimo (64.142 °C) contra el máximo (76.568 °C) del diseño de 11 resistencias, valor mínimo (61.458 °C) contra el máximo (65.958 °C) del diseño de 9 resistencias y valor mínimo (49.041 °C) contra el máximo (57.283 °C) del diseño de 7 resistencias.

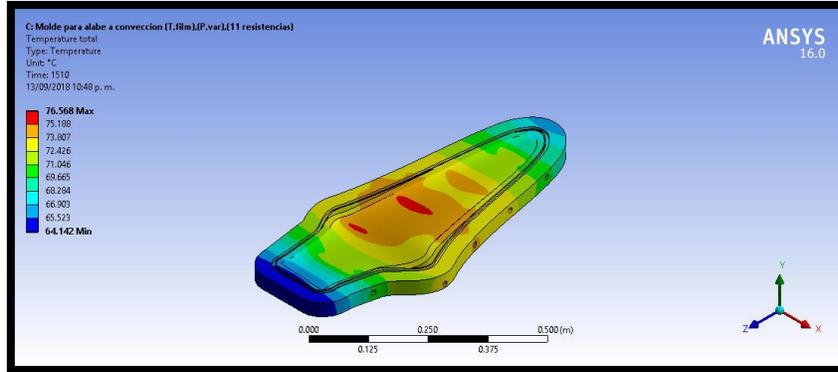


Figura 18a.- Vista isométrica de distribución de temperatura en molde de 11 resistencias para álabes.

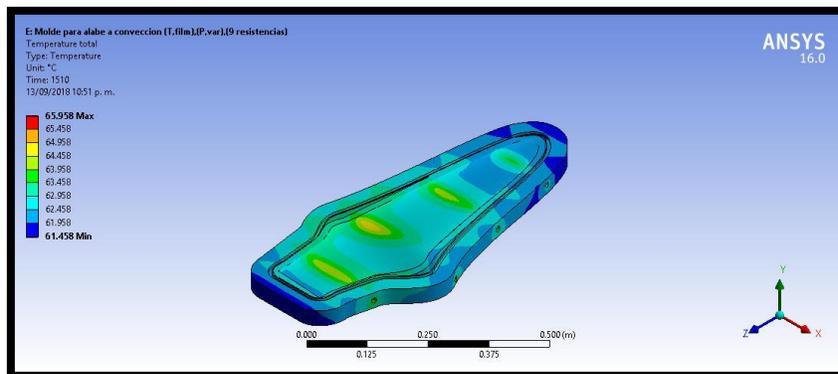


Figura 18b.- Vista isométrica de distribución de temperatura en molde de 9 resistencias para álabes.

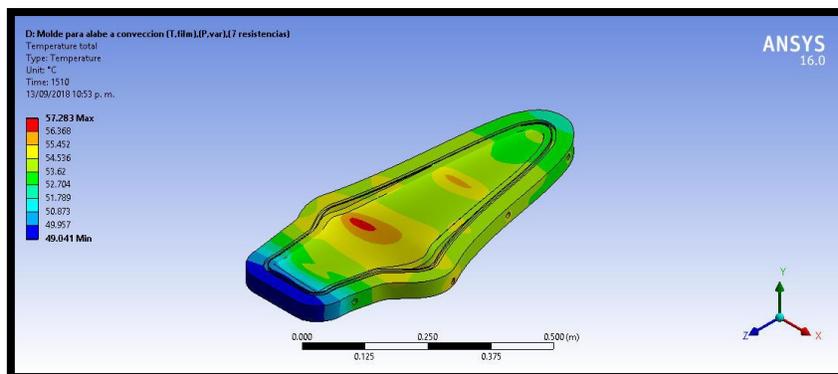


Figura 18c.- Vista isométrica de distribución de temperatura en molde de 7 resistencias para álabes.

Siguiendo el mismo criterio que en el molde para espécimen, ahora se establecen puntos para monitorear la temperatura en las superficies superior e inferior de las tapas del molde para álabes de turbina hidrocínica. Esto con la intención de obtener gráficas que muestren el tiempo en que dicha superficie logre una distribución uniforme de

temperatura. En la Figura 19 se muestran los puntos elegidos sobre las superficies, y en las Figuras 20 (a-b) las gráficas de los diseños de 11, 9 y 7 resistencias que muestran las líneas de tiempo (con distinto código de colores) que denotan la relación de los puntos elegidos y la temperatura que poseen en cada instante de tiempo.

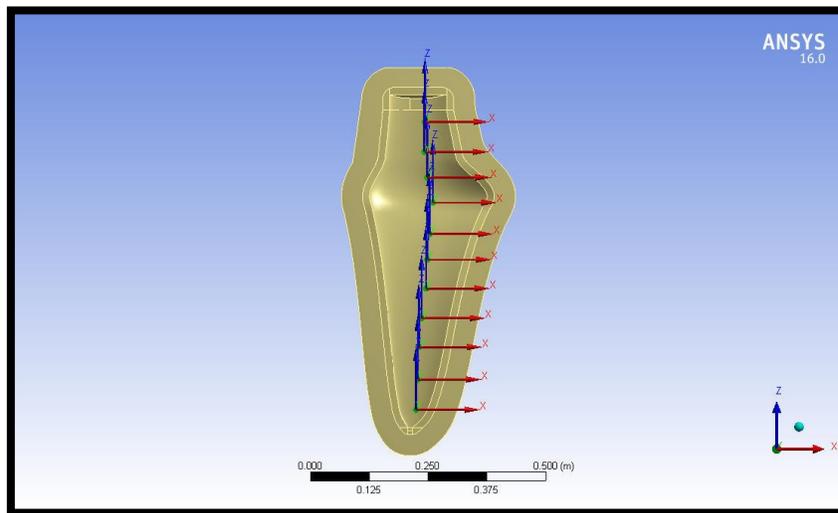


Figura 19. - Puntos sobre superficie de tapa superior del molde para álabe.

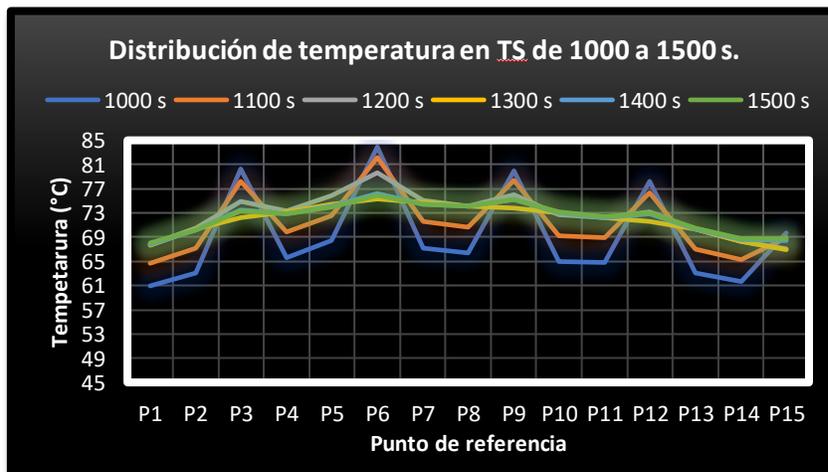


Figura 20a. - Gráfica de temperatura en distintos puntos en tapa superior de molde para álabe de 11 resistencias.

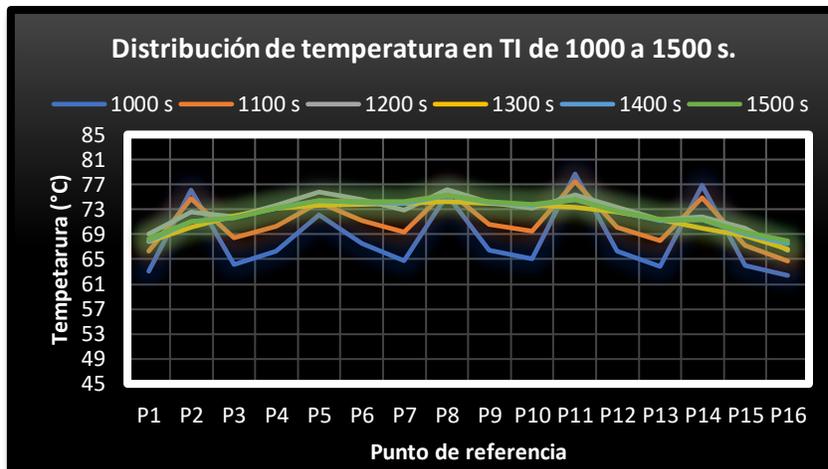


Figura 20b. - Gráfica de temperatura en distintos puntos en tapa inferior de molde para álabe de 11 resistencias.

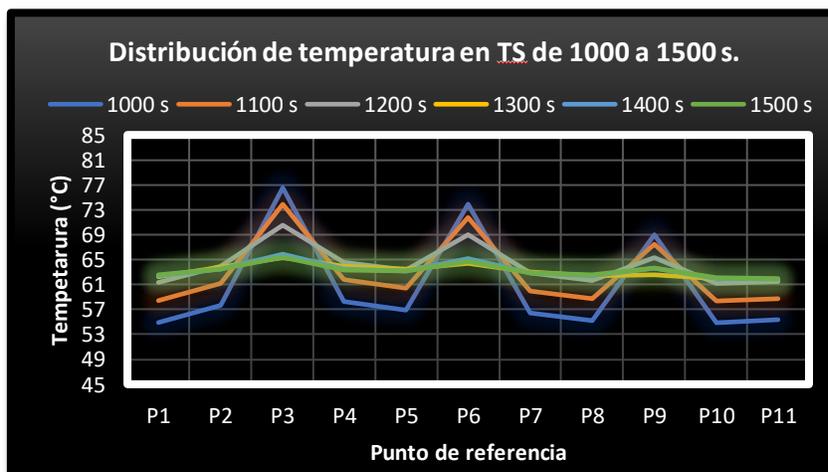


Figura 20c. - Gráfica de temperatura en distintos puntos en tapa superior de molde para álabe de 9 resistencias.

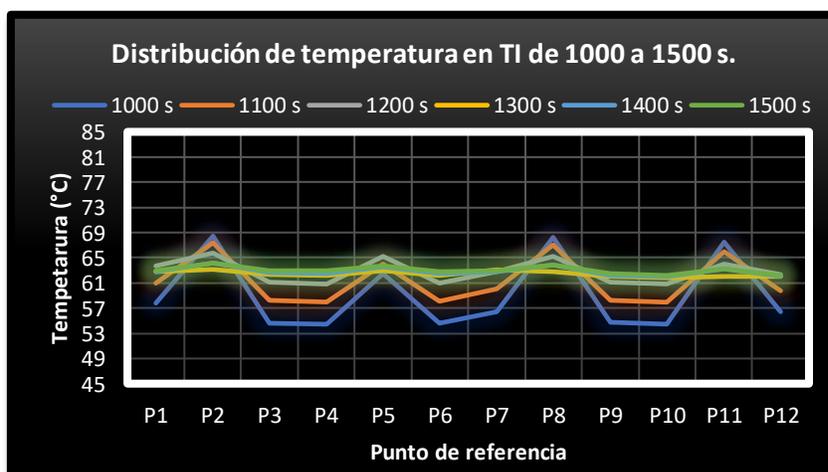


Figura 20d. - Gráfica de temperatura en distintos puntos en tapa inferior de molde para álabe de 9 resistencias.

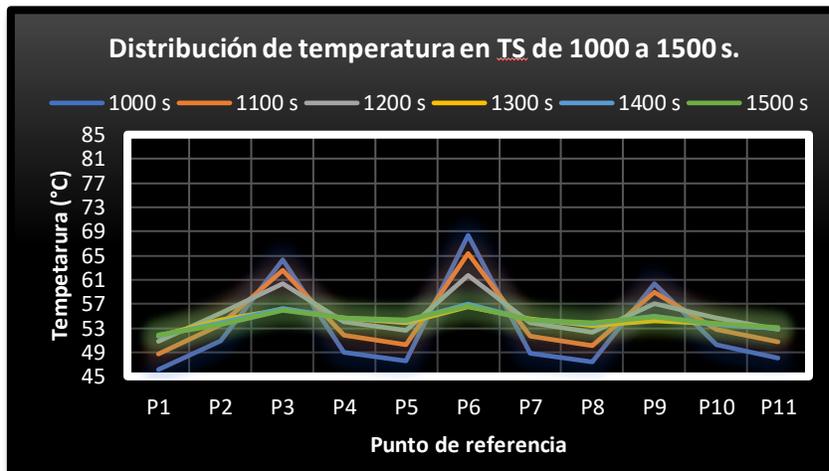


Figura 20e. - Gráfica de temperatura en distintos puntos en tapa superior de molde para álabe de 7 resistencias.

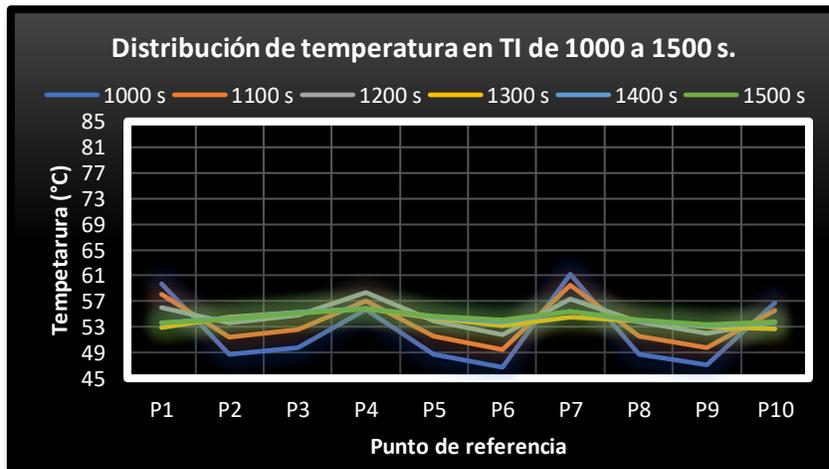


Figura 20f. - Gráfica de temperatura en distintos puntos en tapa inferior de molde para álabe de 7 resistencias.

CONCLUSIONES.

- ▶ El análisis térmico precisa que se puede lograr una temperatura estable en la superficie de contacto entre el molde (de espécimen o álabe) y la preforma de fibra de vidrio.
- ▶ Se logró determinar el mejor diseño con las dimensiones y posiciones correctas para las resistencias eléctricas en el interior del molde para álabe de turbina hidrocínética.
- ▶ Se determinó que, con una tasa de calor de $67,095 \text{ W/m}^2$ y con un diseño de 9 resistencias se puede tener la mejor estabilidad de temperatura en el molde para manufactura álabe de turbina hidrocínética.

BIBLIOGRAFÍA.

J.P. Holman. (1998). Transferencia de Calor. España: Mc Graw Hill.

Henry Mc Adams. (1985). Heat Transmission. New York: Mc Graw Hill.

Acero SISA. (2018). Acero 4140T. 2018, de SISA Sitio web: <http://sisa1.com.mx/wp-content/uploads/Acero-SISA-4140T-Tratado-y-Revenido.pdf>

Axson. (2018). Product Range. 2018, de Axson Product Range Sitio web: https://www.professionalplastics.com/professionalplastics/content/downloads/Axson_ProductRange.pdf

Y. A. Cengel & M. A. Boles. (2012). Termodinámica. México: Mc Graw Hill.

ANEXOS.

Anexo 1. - Prueba experimental en molde para especímenes.

