



Mecánica *de* Materiales

Ingeniantes

Modelo de enfriamiento en el travertino tipo dorado tepexi mediante prueba de enfriamiento de Newton



Colaboración

Adolfo Manuel Morales Tassinari; Raúl Fuentes García; Marcos Manuel Azcaray Rivera, Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez

RESUMEN: El presente estudio tiene como propósito obtener el comportamiento de enfriamiento del travertino tipo Dorado Tepexi extraído del banco inferior de la cantera ubicada en San Juan Ixcaquixtla, Puebla, México, mediante una prueba de enfriamiento de Newton. El método de prueba consiste en calentar 12 probetas cúbicas con dimensión de 50 ± 0.5 mm a una temperatura de 60°C durante 16 horas, después medir la temperatura superficial de las probetas cada 20 min hasta su equilibrio termodinámico, finalmente dejar transcurrir el tiempo hasta completar un ciclo de 24 horas. Se realizan 10 ciclos de prueba para completar la prueba de enfriamiento de Newton. El resultado obtenido en este estudio es que el travertino tipo Dorado Tepexi extraído del banco inferior de la cantera tiene una constante de enfriamiento de -0.03565 ; además, el modelo de enfriamiento obtenido satisface en un 99.11% con los datos experimentales. Los resultados muestran que el travertino tipo Dorado Tepexi tiene una capacidad de llegar al equilibrio termodinámico en aproximadamente 140 minutos; por lo que, este es el tiempo que tarda para disipar el calor.

PALABRAS CLAVE: Constante de enfriamiento, dorado tepexi, modelo de enfriamiento, prueba de enfriamiento de Newton, travertino.

ABSTRACT: This study has a purpose to obtain the cooling behavior of the travertine type Dorado Tepexi extracted from the lower bench of the quarry located in San Juan Ixcaquixtla, Puebla, Mexico, through a Newton Cooling test. The test method consist of heating 12 cubic specimens with a size of 50 ± 0.5 mm at a temperature of 60°C for 16 hours, then measuring the surface temperature of the specimens every 20 min until their thermodynamic equilibrium, finally allowing time to complete a 24 hour cycle. 10 test cycles were performed to complete the Newton cooling test. The result obtained in this study is that the travertine type Dorado Tepexi extracted from the lower bank of the quarry has a cooling constant of -0.03565 ; in addition, the cooling model obtained satisfies 99.11% with the experimental data. The results show that the travertine type Dorado Tepexi has a capacity to reach the thermodynamic equilibrium in approximately 140 minutes; therefore, this is the time for dissipate the heat.

KEYWORDS: Constant cooling, cooling model, dorado tepexi, Newton cooling test, travertine.

INTRODUCCIÓN

La caracterización de materiales pétreos es un campo de conocimiento interdisciplinar que abarca el estudio de distintas propiedades; de esta forma, al conocer las propiedades de los materiales pétreos se puede mejorar los procesos de fabricación y determinar sus diferentes usos.

En la Ciudad de San Juan Ixcaquixtla, Puebla, México, existe una cantera de travertino tipo Dorado Tepexi que es una roca de color dorado claro y que al ser pulida presenta gran brillo; en la Figura 1, se muestra una fotografía del travertino tipo Dorado Tepexi:

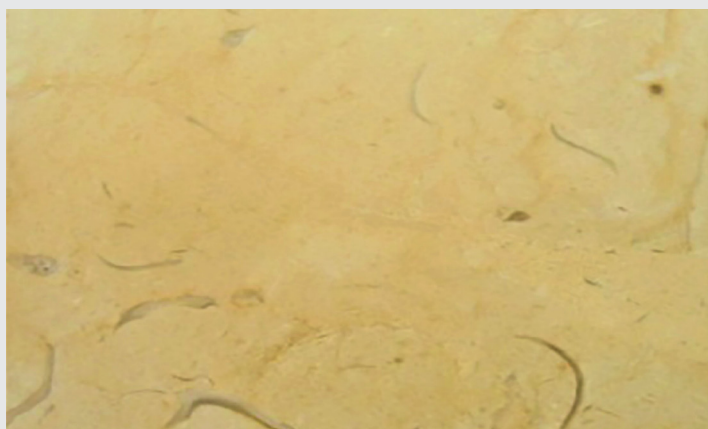


Figura 1. Travertino tipo Dorado Tepexi.

En esta cantera se han realizado diversos estudios de caracterización para conocer las propiedades del travertino tipo Dorado Tepexi. De esta forma, se ha obtenido un coeficiente de absorción de 0.91% y una densidad de 2624 kg/m³ [1]; además, una resistencia a la compresión de 66 MPa [2]. También, se han realizado estudios degradativos en los que mediante cristalización de sales de cloruro de sodio se obtuvo un porcentaje de pérdida de peso del 0.80% [3] y un porcentaje de aumento en su rugosidad del 85.40% [4]; mientras que, mediante cristalización de sales de sulfato de sodio se obtuvo un porcentaje de pérdida de peso del 4.71% [5] y un porcentaje de aumento en su rugosidad del 155.93% [6].

La formulación de un modelo matemático implica identificar las variables causantes del cambio de un sistema [7]; es por esto que, de los fenómenos que pueden modelarse mediante ecuaciones diferenciales, es sin duda, el cambio de temperatura que experimenta cualquier cuerpo al estar en un medio ambiente que este a una temperatura diferente del primero [8].

Isaac Newton observó que al calentar al rojo un bloque de hierro, y tras retirarlo del fuego, el bloque se enfriaba más rápidamente cuando estaba muy caliente y más lentamente cuando su temperatura se acercaba a la temperatura del aire; por lo que, sus observaciones dieron lugar a lo que se conoce como Ley de Enfriamiento de Newton [9].

La Ley de Enfriamiento de Newton establece que la temperatura de un cuerpo cambia a una velocidad que es proporcional a la diferencia de las temperaturas entre el medio externo y el cuerpo [10]; de esta manera, su ecuación diferencial está dada por la Ec. (1):

$$\frac{dT}{dt} = k(T - T_m) \quad \text{Ec. (1)}$$

Al resolver la Ec. (1), se obtiene la Ecuación de Enfriamiento de Newton que establece que la temperatura de un objeto calentado disminuye de manera exponencial con el tiempo, hacia la temperatura del medio que lo rodea [11], dada por la Ec. (2):

$$T(t) = T_m + (T_o - T_m)e^{kt} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde t es el tiempo, T_o es la temperatura inicial del cuerpo, T_m es la temperatura ambiente y k es el coeficiente de enfriamiento. Así, la Ec. (2) describe la evolución temporal del sistema hacia el estado de equilibrio termodinámico [12].

El presente estudio tiene como finalidad realizar una prueba de enfriamiento de Newton para determinar el coeficiente de enfriamiento y obtener el modelo de enfriamiento del travertino tipo Dorado Tepexi de la cantera ubicada en San Juan Ixcaquixtla, Puebla, México. En este sentido, la importancia de este estudio radica en que al determinar el modelo de enfriamiento de este material permite conocer el comportamiento ante el cambio de temperatura que este material presente.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Laboratorio de Pruebas de Materiales del Centro de Competitividad y Tecnología para la Industria del Mármol perteneciente al Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez. Además, la empresa Industrias del Travertino S.A., procesó las probetas de travertino tipo Dorado Tepexi, seleccionadas de acuerdo al color característico dorado claro y cuya dimensión fuera de 50±0.5 mm en cada cara.

Los equipos empleados para este estudio fueron una pulidora marca MTI KJ GROUP modelo UNIPOL-820, un horno de secado marca MEMMERT modelo UP 500, una báscula digital marca METTLER TOLEDO modelo PB3002-S DELTARANGE, una cámara termográfica marca FLIR y un vernier análogo marca MITUTOYO.

Preparación de las Probetas.

Las 12 probetas se lijaron y pulieron en la pulidora para eliminar el exceso de rugosidad superficial proveniente del proceso de corte. Para el lijado se utilizaron lijas con tamaño de grano 240; mientras que, para el pulido se utilizaron lijas con tamaño de grano 600. En la Figura 2, se muestra una fotografía del lijado y pulido de las probetas:



Figura 2. Lijado y pulido de las probetas.

Para que las 12 probetas se identificaran durante la prueba de enfriamiento se les asignaron números; en la Figura 3, se muestra una fotografía de las 12 probetas numeradas:

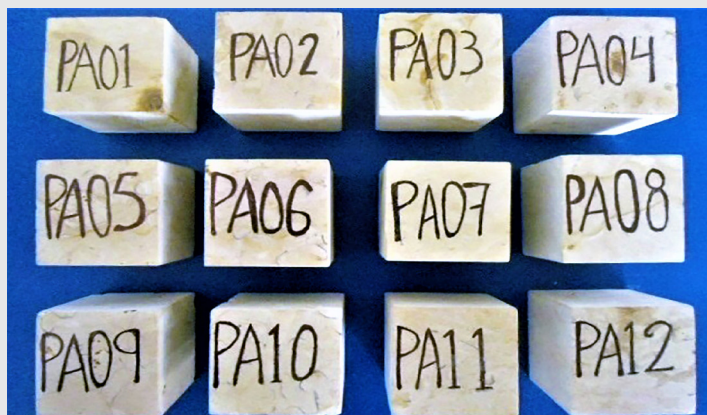


Figura 3. Probetas con número de identificación.

Secado Inicial de las Probetas.

Para iniciar la prueba de enfriamiento, se precalentó el horno de secado a una temperatura de 60 °C; después, se introdujeron las 12 probetas dentro del horno precalentado para que fueran secadas a una temperatura de 60 ± 2 °C durante 48 horas. En la Figura 4, se muestra una fotografía del secado de las 12 probetas:



Figura 4. Secado de las 12 probetas.

Para garantizar que las 12 probetas estuvieran secas, se pesaron con una báscula digital en la hora 46, 47 y 48 a temperatura ambiente; como en las tres horas las probetas tuvieron el mismo peso, entonces en la hora 48 las probetas estaban en condición seca. En la Figura 5, se muestra una fotografía del peso seco de la probeta PA01:



Figura 5. Peso seco de la probeta PA01.

Prueba de Enfriamiento de Newton.

Después, se midió la temperatura superficial de cada probeta con la cámara termográfica; en la Figura. 6, se muestra la fotografía de la temperatura de la probeta PA01 en el ciclo 1 a los 20 min:

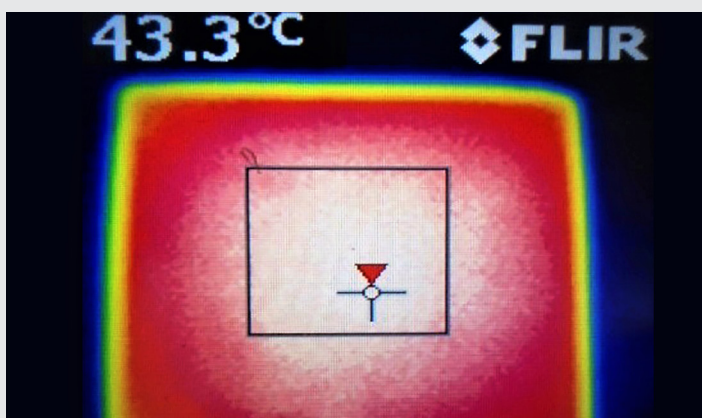


Figura 6. Temperatura de probeta PA01 a los 20 min.

Después de 20 min, se volvieron a medir las temperaturas superficiales de las 12 probetas; por lo que, en la Figura. 7, se muestra la temperatura superficial de la probeta PA01 del ciclo 1 a los 40 min.

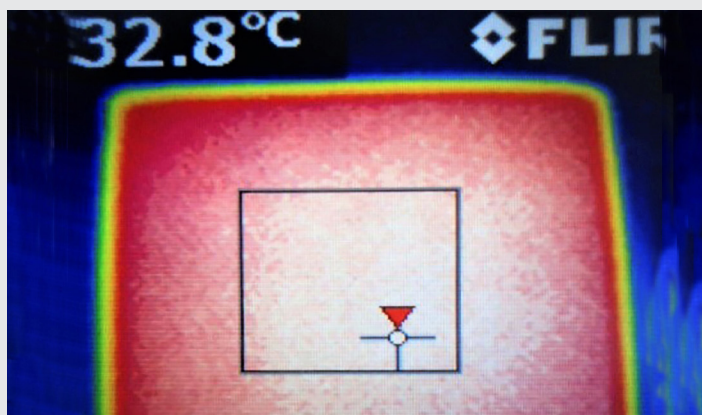


Figura 7. Temperatura de probeta PA01 a los 40 min.

En la Figura 8, se muestra la temperatura superficial de la probeta PA01 del ciclo 1 a los 120 min:

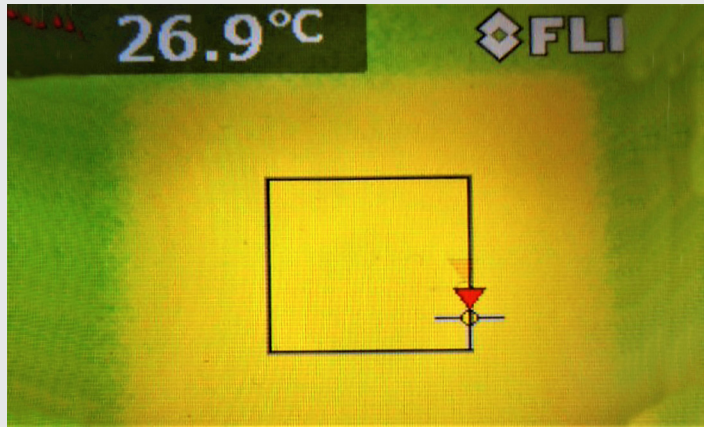


Figura 8. Temperatura de probeta PA01 a los 120 min.

En la Figura 9, se muestra la gráfica de las temperaturas promedio de los 10 ciclos:

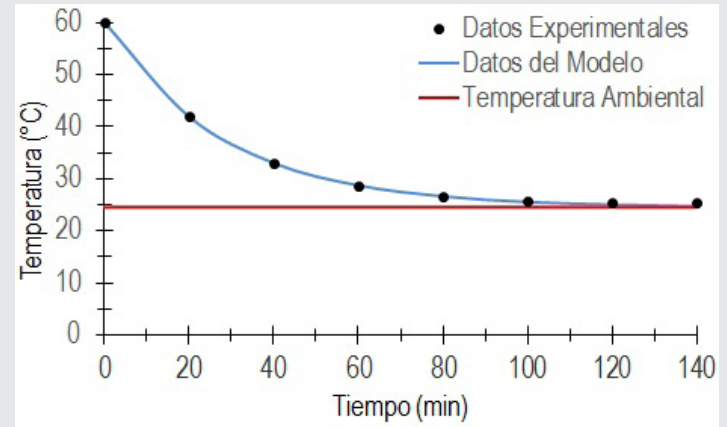


Figura 9. Gráfica de temperaturas promedio.

Después de obtener las temperaturas superficiales de las 12 probetas, se dejaron a temperatura ambiente hasta completar un ciclo de 24 horas. Cabe hacer mención que, todas las temperaturas superficiales de las probetas se obtuvieron a temperatura ambiente.

Repetición de Ciclos de la Prueba.

El ciclo de la prueba de enfriamiento se repitió calentando las 12 probetas en el horno a una temperatura de 60 ± 2 °C durante 16 horas, después se midieron las temperaturas superficiales cada 20 min hasta llegar a su equilibrio termodinámico, finalmente se dejaron las probetas a temperatura ambiente hasta completar las 24 horas. La prueba de enfriamiento se dio por terminada cuando se completaron 10 ciclos.

RESULTADOS

En Tabla 1, se muestra el concentrado de las temperaturas promedio obtenidas de las prueba de enfriamiento de las 12 probetas en los 10 ciclos:

Tabla 1. Concentrado de las temperaturas promedio.

Número de Ciclos	Temperaturas promedio (°C)						
	20 min	40 min	60 min	80 min	100 min	120 min	140 min
1	43.1	32.8	29.3	27.4	26.7	26.5	26.8
2	40.9	33.7	29.6	27.9	27.3	27.0	27.0
3	42.7	33.7	29.8	28.4	27.3	26.9	26.9
4	41.3	34.0	30.7	28.2	27.2	27.8	27.2
5	42.5	33.0	28.2	25.7	24.5	23.9	23.6
6	40.0	31.4	27.6	26.3	25.7	25.7	25.5
7	41.9	34.0	29.9	28.1	27.1	26.7	26.4
8	41.1	32.3	27.9	27.0	24.8	24.4	24.0
9	40.7	32.3	27.9	25.7	24.9	24.8	24.7
10	43.1	32.8	29.3	27.4	26.7	26.5	26.8
Promedio	41.9	32.9	28.5	26.7	25.7	25.5	25.3

Ahora, mediante la condición inicial $T(t=0)=60^{\circ}\text{C}$ y el promedio de la temperatura del medio ambiente $T_m=24.5^{\circ}\text{C}$, se hace una sustitución de estas temperaturas en la Ec. (2), para obtener la Ec. (3):

$$T_0 = 24.5 + 35.5e^{kt} \quad \text{Ec. (3)}$$

De esta manera, se sustituye la condición de temperatura $T(t=20 \text{ min})=41.9^{\circ}\text{C}$ dentro de la Ec. (3), para obtener la constante k:

$$\begin{aligned}
 T_0 &= 24.5 + 35.5e^{kt} \\
 41.9 &= 24.5 + 35.5e^{k(20)} \\
 \frac{41.9 - 24.5}{35.5} &= e^{20k} \\
 0.490140845 &= e^{20k} \\
 \ln(0.490140845) &= \ln(e^{20k}) \\
 -0.71306249 &= 20k \\
 k &= -0.03565
 \end{aligned}$$

Por lo que, el coeficiente de enfriamiento del travertino tipo Dorado Tepexi extraído de la cantera de San Juan Ixcaquixtla, Puebla, México, es de -0.03565. Para obtener la Ecuación de Enfriamiento del Travertino tipo Dorado Tepexi se sustituye el coeficiente de enfriamiento en la Ec. (3), obteniéndose la Ec. (4):

$$T_{(t)} = 35.5e^{-0.03565t} + 24.5 \quad \text{Ec. (4)}$$

Una vez obtenida la ecuación de enfriamiento del travertino tipo Dorado Tepexi, se realizó una comparación entre el promedio de las temperaturas obtenidas en el experimento y las temperaturas dadas por la Ec. 4.

En la Tabla 2, se observan los resultados de este análisis:

Tabla 2. Resultados comparativos.

Tiempo (min)	Temperatura del Experimento (°C)	Temperatura del Modelo (°C)	Porcentaje de Error (%)
0	60.0	60.0	0.00
20	41.9	41.9	0.00
40	32.9	33.0	0.92
60	28.5	28.7	0.70
80	26.7	26.6	0.37
100	25.7	25.5	0.78
120	25.5	25.0	1.96
140	25.3	24.7	2.37
Promedio			0.89

En la Tabla 2, se muestra que el error promedio es de 0.89 %; por lo que, la Ec. (4) tiene un ajusté del 99.11% a las temperaturas del experimento.

Ahora en la Figura 10, se observan las gráficas de las temperaturas superficiales obtenidas experimentalmente y las temperaturas superficiales obtenidas del modelo de enfriamiento dado por la Ec. (4):

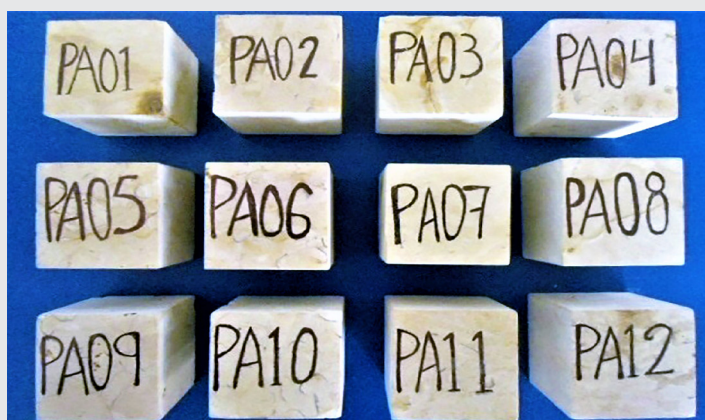


Figura 10. Gráficas comparativas de los datos experimentales y el modelo de enfriamiento

Como se observa en la Figura 10, la gráfica de los datos del modelo tiene gran similitud con los datos experimentales; por lo que, el modelo de enfriamiento obtenido predice adecuadamente los datos obtenidos por el experimento.

CONCLUSIONES

Las conclusiones del presente estudio respecto del travertino tipo Dorado Tepexi extraído del banco inferior de la cantera ubicada en San Juan Ixcaquixtla, Puebla, México, son:

- El coeficiente de enfriamiento de este material es de -0.03565; además, el modelo de enfriamiento se da mediante la ecuación:

$$T_{(t)} = 35.5e^{-0.03565t} + 24.5 \quad \text{Ec. (4)}$$

-El modelo de enfriamiento obtenido cumple satisfactoriamente con los datos obtenidos por el experimento, ya que existe un porcentaje promedio de error del 0.89% entre las temperaturas obtenidas experimentalmente y las temperaturas obtenidas por el modelo; de esta manera, se concluye que la función obtenida describe en un 99.11% el comportamiento de enfriamiento.

-Los investigadores interesados en continuar con este tipo de investigaciones podrían estudiar el comportamiento de calentamiento de este material mediante una prueba de enfriamiento; además, se pueden determinar algunas propiedades como la resistencia a la flexión, la resistencia a la abrasión y el índice de fricción.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Morales, A., Flores, S. Y Hernández, J. (2015). *Determinación de las propiedades de absorción y densidad de la roca caliza travertino tipo dorado tepexi*. Ingeniantes, 1(1), 08-14.

[2] Morales, A., Cruz, P., Azcaray, M. Y Servín, A. (2016). *Determinación de la resistencia a la compresión de la roca caliza travertino tipo dorado tepexi*. En Academia Journal (Ed.), *Memoria del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Celaya 2016*, Vol.8, No. 5 (pp. 4076-4081). Celaya, Guanajuato, México: Autor.

[3] Morales, A., Flores, S., Luna, E., Hernández, J. Y Servín, A. (2016). *Estudio comparativo de la alteración del peso en la roca caliza travertino tipo dorado tepexi mediante prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio*. Revista Electrónica en Ingeniería Mecánica ITQU@NTUM, (28), 1-17.

[4] Morales, A., Velasco, M. Y Hernández, J. (2016). *Estudio comparativo de la alteración de la rugosidad en la roca caliza travertino tipo dorado tepexi mediante una prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio*. Ingeniantes, 2(1), 36-43.

[5] Morales, A., Guevara, J., Martínez, C., Servín, A. Y Hernández, J. (2016). *Estudio comparativo de la alteración del peso en la roca caliza travertino tipo dorado tepexi mediante prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio*. Revista Electrónica en Ingeniería Mecánica ITQU@NTUM, (29), 24-41.

[6] Morales, A., Velasco, M., Cruz, P. Y Hernández, J. (2017). *Comparación en la rugosidad de la*

roca caliza travertino tipo dorado tepexi mediante prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio. En Instituto Politécnico Nacional (Ed.), *Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (CNIES 2017)*, (pp. 1-9). Zacatenco, Ciudad de México, México: Autor.

[7] García, E. Y Reich, D. (2015). *Ecuaciones diferenciales: Una nueva visión*. México, D.F.: Patria.

[8] Jiménez Zamudio J. J. Y López García, J. (2005) *Métodos analíticos para ecuaciones diferenciales ordinarias*. Ciudad Universitaria, México: FES Acatlán, UNAM.

[9] Aguilar Villa, Gloria Y Clavero García, Carmelo. (2014). *Matemáticas III: Ecuaciones diferenciales, series de Fourier y aplicaciones*. Zaragoza, España: Prensas de la Universidad de Zaragoza.

[10] Gómez, J., Razo, J. Y Guerrero, V. (2014). Ley de enfriamiento de Newton de orden fraccionario. *Investigación y Ciencia*, (61), 12-18.

[11] Sullivan, M. (2013) *Algebra y trigonometría*. México: Pearson Educación.

[12] Barragán, D. (2009). Producción de entropía y ley de enfriamiento de Newton. *Ingeniería e Investigación*, 29(2), 88-93.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Industrias del Travertino S.A., por procesar las probetas cúbicas de Travertino tipo Dorado Tepexi. Además, agradecen al Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez por prestar sus instalaciones y equipo para la realización de la prueba de enfriamiento.