



MODELO DE ENFRIAMIENTO EN EL MÁRMOL TIPO CAFÉ TABACO MEDIANTE UNA PRUEBA DE ENFRIAMIENTO DE NEWTON

ADOLFO MANUEL MORALES TASSINARI¹, MARÍA ESPERANZA VELASCO ORDÓNEZ¹, JAIME RAMÍREZ PEÑA²

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez
Docente de Ingeniería Mecánica

Av. Tecnológico s/n, Col. Barrio San Sebastián Sección Primera
CP. 74690, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México

²Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez
Estudiante de Ingeniería Mecánica

Av. Tecnológico s/n, Col. Barrio San Sebastián Sección Primera
CP. 74690, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México

(Recibido 1 de febrero de 2018, para publicación 13 de febrero de 2019)

Resumen – El presente estudio tiene como propósito obtener el comportamiento de enfriamiento del mármol tipo Café Tabaco extraído de la cantera ubicada en Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, mediante una prueba de Enfriamiento de Newton. El resultado obtenido en este estudio es que el mármol tipo Café Tabaco extraído de la cantera tiene una constante de enfriamiento de -0.03555 . Además, la función de enfriamiento obtenida satisface en un 98.95% con los datos experimentales. Los resultados muestran que el mármol tipo Café Tabaco tiene una capacidad de llegar al equilibrio termodinámico en aproximadamente 140 minutos. Esto resulta importante conocerlo, ya que para el ciclo de calentamiento-enfriamiento-inmersión de las pruebas de cristalización de sales se menciona que las probetas se necesitan enfriar al medio ambiente durante aproximadamente 120 minutos, para evitar en lo posible un choque térmico superficial. De esta manera, se logra comprobar que este material tiene la capacidad de disipar el calor en este lapso de tiempo.

Palabras clave – Café Tabaco, comportamiento, enfriamiento de Newton, mármol.

1. INTRODUCCIÓN

Conocer el modelo de enfriamiento de un material pétreo permite conocer el comportamiento del material ante el cambio de temperatura que este material presente. Uno de los materiales pétreos más importantes por sus diversos usos es el mármol.

El mármol se define geológicamente como una roca metamórfica que consiste predominantemente de finos a pequeños granos de calcita recristalizada (CaCO_3) y/o dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), el cual tiene una textura relativamente uniforme con cristales finos variando desde muy largos a muy pequeños [1]. En la localidad de Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, existe una cantera de mármol tipo Café Tabaco que es una roca metamórfica de color café oscuro con vetas color claro sin un patrón de orientación que al ser pulida presenta una característica decorativa muy llamativa; además, tiene propiedades adecuadas para construcción. En la Fig. 1, se muestra una fotografía de la cantera; mientras que, en la Fig. 2, se muestra una fotografía del mármol tipo Café Tabaco.

En una investigación previa en esta cantera de mármol tipo Café Tabaco se determinó que presenta morfologías con cristales de hábito irregular, muy planas, curvas en formas masivas y compactas con una dimensión de $20\mu\text{m}$ a $150\mu\text{m}$; así mismo, morfologías con un tamaño de grano no regular, con superficies fracturadas y mayor rugosidad con una dimensión de $10\mu\text{m}$ constituidas principalmente por C, O, Ca y Mg. Además, se identificaron dos fases presentes en los estratos correspondiente a la calcita (CaCO_3) y dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] con un sistema cristalino romboédrico; además, por espectroscopia infrarroja se



Fig. 1. Fotografía de la cantera.



Fig. 2. Fotografía del mármol tipo Café Tabaco.

identificaron las tres bandas características del carbonato en 1419.10 cm^{-1} , 876.65 cm^{-1} y 727.44 cm^{-1} , así como las bandas características de la dolomita en 1040.14 cm^{-1} y 728 cm^{-1} [2].

De los fenómenos que pueden modelarse a través de 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 [3]. Cuando un cuerpo se enfría en un medio a temperatura constante e inferior, el proceso térmico que se da es complejo y la pérdida de energía que origina el enfriamiento es una difícil superposición de fenómenos de radiación, convección y conducción; en cualquier caso, tal proceso de enfriamiento se produce debido a una transferencia energética del cuerpo al ambiente originada por la diferencia de temperaturas entre ambos y cuya velocidad depende del gradiente de temperatura entre el cuerpo y el ambiente [4]. Esto fue estudiado por Isaac Newton y se conoce como la Ley de Enfriamiento de Newton que establece que la razón con que cambia la temperatura de un objeto es proporcional a la diferencia entre su temperatura y la del medio que lo rodea [5]; de esta manera, su ecuación diferencial está dada por la ecuación (1):

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

Al resolver la ecuación (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 [6], dada por la ecuación (2):

$$T_{(t)} = T_m + (T_o - T_m)e^{kt} \quad (2)$$

Además, la constante de proporcionalidad k depende de las características físicas del cuerpo sometido a enfriamiento [7]. Sin embargo, en esta ecuación (2) no se toman en cuenta otros factores como podrían ser el calor generado por otros objetos diferentes del objeto de estudio inmersos en el medio ambiente como luces, personas, ordenadores, etc.; además, del calor generado o eliminado por medios forzados que afecten al medio ambiente como lo podría ser la calefacción o al aire acondicionado [3].

La presente investigación tiene como finalidad realizar una prueba de enfriamiento de Newton para determinar el coeficiente de enfriamiento y el modelo de enfriamiento del mármol tipo Café Tabaco de la cantera ubicada en Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México.

2. METODOLOGÍA

2.1. Obtención y preparación de las probetas de prueba

En la cantera se tomaron muestras representativas del mármol tipo Café Tabaco para que la empresa



a) Fotografía del lijado de probetas

b) Probetas con número de identificación

Fig. 3. Fotografías del lijado, pulido e identificación de las 12 probetas.



a) Horno precalentado

b) Probetas dentro del horno precalentado

Fig. 4. Fotografías del secado de las probetas.

Mármoles Tepeaca S.A. de C.V., procesara las probetas con dimensiones aproximadas de 50x50x50mm. Una vez procesadas las probetas, se pulieron y se seleccionaron 12 probetas con base en el color característico café oscuro y que en cada una de sus dimensiones tuviese 50 ± 0.5 mm. Finalmente, a cada una de las 12 probetas se le asignó un número para su identificación; en la Fig. 3, se muestra el proceso de preparación de las 12 probetas pulidas e identificadas.

2.2. Secado de las probetas

Se precalentó el horno de secado marca Memmert modelo UP 500 a una temperatura de 60°C , después la probetas de mármol tipo Café Tabaco se introdujeron al horno y se dejaron secando a una temperatura de $60 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 48 hora; en la Fig. 4, se muestran las fotografías del secado de las probetas.

Para garantizar que las 12 probetas estuviesen completamente secas, se pesaron dichas probetas en la hora 46, 47 y 48 con una báscula digital marca Mettler Toledo modelo PB3002-S DeltaRange® a una temperatura ambiente promedio de 22°C ; en la Fig. 5, se muestran dos fotografías del pesado de las probetas secas.

En la tabla 1, se muestran los valores de los pesos secos de las 12 probetas.

2.3. Medición de la temperatura superficial de las probetas

Después de obtener los pesos secos de las probetas, se midió su temperatura superficial con una cámara termográfica marca FLIR; en la Fig. 6, se muestran las fotografías de las temperaturas superficiales de las 12 probetas del ciclo 1 a las 08:20 horas:



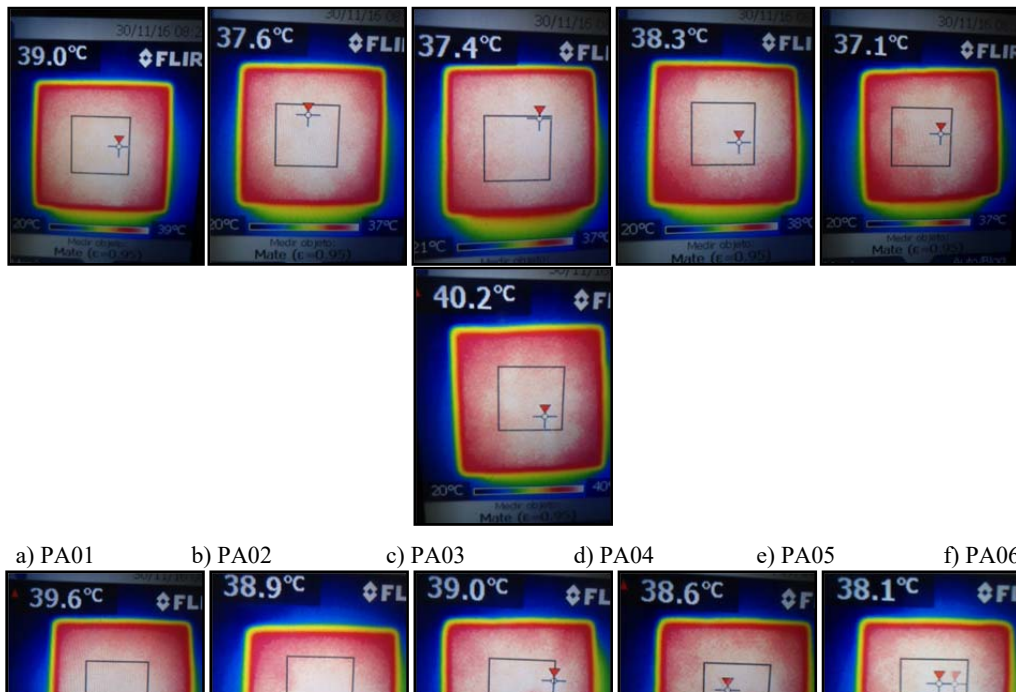
a) Probeta P01

b) Probeta P07

Fig. 5. Fotografías del peso seco de las probetas P01 y P07.

Tabla 1. Peso seco de las probetas P01a la P12.

Número de la Probeta	Peso Seco de Probetas (A) gramos	Número de la Probeta	Peso Seco de Probetas (A) gramos
P01	349.29	P07	351.37
P02	353.66	P08	341.17
P03	340.46	P09	343.06
P04	340.93	P10	347.76
P05	351.04	P11	338.72
P06	336.55	P12	355.01



Cada 20 minutos se midieron las temperaturas hasta que hubiese equilibrio termodinámico, esto se dio hasta las 10:40 horas. En la Fig. 7, se muestran las temperaturas superficiales de la probeta PA01 del ciclo 1 desde las 08:20 hasta las 10:40 horas tomadas cada 20 minutos.

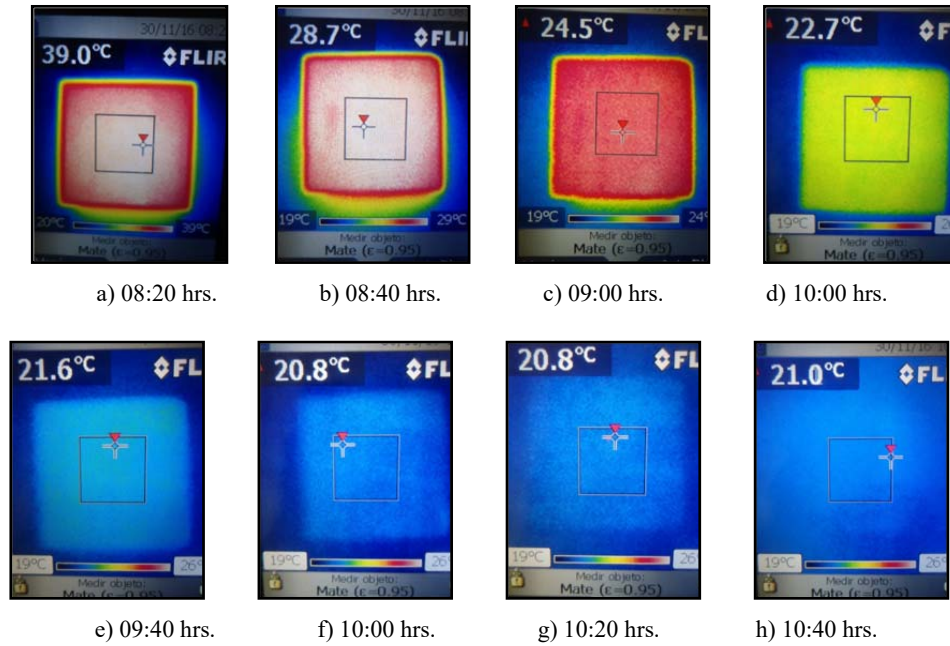


Fig. 7. Fotografías de las temperaturas superficiales de la probeta PA01 del ciclo 1 cada 20 minutos.

Después de tomar las temperaturas, las probetas se dejaron a temperatura ambiente hasta completar 8 horas, concluyendo así un ciclo.

2.4. Repetición del ciclo

El ciclo de prueba de enfriamiento de Newton inició calentando las probetas en el horno a una temperatura de $60 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 16 horas, después se midieron las temperaturas superficiales desde las 08:20 hasta las 10:40 horas cada 20 minutos, finalmente se dejaron reposando hasta completar las 8 horas. Este ciclo de 24 horas, se realizó durante 10 ciclos.

3. RESULTADOS

3.1. Temperaturas superficiales de las probetas

En la tabla 2, la tabla 3, la tabla 4, la tabla 5 y la tabla 6, se muestran los valores de las temperaturas de las 12 probetas durante los 10 ciclos de la prueba de enfriamiento.

3.2. Obtención del Modelo Matemático del Enfriamiento de Newton

En tabla 7, se muestra el concentrado de las temperaturas promedio obtenidas de la tabla 2, la tabla 3, la tabla 4, la tabla 5 y la tabla 6.

Sustituyendo la condición inicial $T_{(t=0 \text{ min})} = 60^\circ\text{C}$ y la temperatura promedio del medio ambiente $T_m = 20.3^\circ\text{C}$ en la ecuación 2, se obtiene la ecuación 3.

$$\begin{aligned}
 T_{(t)} &= T_m + (T_o - T_m)e^{kt} \\
 &= 20.3 + (60 - 20.3)e^{kt} \\
 T_{(t)} &= 20.3 + 39.7e^{kt}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Ahora sustituyendo la condición $T_{(t=20 \text{ min})} = 39.8^\circ\text{C}$ en la ecuación 3, se obtiene la constante k :

Tabla 2. Temperatura superficial de las 12 probetas del ciclo 1 y del ciclo 2.

No.	Ciclo 1 Temperatura (°C)								Ciclo 2 Temperatura (°C)							
	08:20	08:40	09:00	09:20	09:40	10:00	10:20	10:40	08:20	08:40	09:00	09:20	09:40	10:00	10:20	10:40
P01	39.0	28.7	24.5	22.7	21.6	20.8	20.8	21	39.5	29.9	26.0	22.8	18.6	21.4	21.2	21.3
P02	37.6	30.6	25.4	23.7	22.1	21.4	21.3	21.1	40.5	31.0	26.0	23.6	22.3	21.5	22.0	21.3
P03	37.4	29.2	25.4	23.5	22.2	21.6	21.5	21.2	40.7	30.9	25.8	23.2	22.2	21.5	21.3	21.6
P04	38.3	29.1	24.9	23.0	21.9	21.1	21.1	21.2	39.5	30.0	25.7	23.2	22.2	21.5	21.7	21.7
P05	37.1	29.5	25.3	24.0	22.8	21.5	21.3	21.3	40.0	30.4	25.9	23.6	22.1	21.5	21.5	21.6
P06	40.2	28.7	24.5	22.9	22.3	21.2	21.4	22.7	38.9	29.6	24.9	22.9	22.4	21.3	21.4	22.0
P07	39.6	30.3	25.8	23.4	22.7	21.4	21.4	21.8	39.6	30.3	26.2	23.6	22.4	21.6	21.5	21.8
P08	38.9	30.4	26.3	23.6	22.5	21.5	21.3	21.8	38.8	30.0	25.8	23.6	22.0	21.6	21.6	21.5
P09	39.0	29.9	25.3	23.2	22.2	21.6	21.4	21.7	38.4	29.5	25.3	22.8	21.7	21.3	21.4	21.5
P10	38.6	30.0	25.6	23.4	22.1	21.5	21.4	21.6	38.9	30.0	26.1	23.1	22.0	21.8	21.5	21.5
P11	38.1	30.3	25.6	23.7	22.5	21.6	21.6	21.6	38.7	29.8	25.4	23.1	22.1	21.5	21.4	21.6
P12	37.3	29.7	25.2	23.1	22.0	21.6	21.5	21.4	38.1	29.5	25.1	22.8	22.0	21.7	21.5	21.5
Prom	38.4	29.7	25.3	23.4	22.2	21.4	21.3	21.5	39.3	30.1	25.7	23.2	21.8	21.5	21.5	21.6

Tabla 3. Temperatura superficial de las 12 probetas del ciclo 3 y del ciclo 4.

No.	Ciclo 3 Temperatura (°C)								Ciclo 4 Temperatura (°C)							
	08:20	08:40	09:00	09:20	09:40	10:00	10:20	10:40	08:20	08:40	09:00	09:20	09:40	10:00	10:20	10:40
P01	41.3	30.3	26.0	20.6	19.7	21.4	21.4	21.5	41.6	29.0	22.2	21.2	18.9	18.2	19.7	18.9
P02	42.1	31.5	27.2	24.4	22.9	22.2	22.1	22.0	41.7	31.6	26.6	23.8	22.5	21.8	18.7	17.7
P03	41.8	30.7	26.1	24.0	22.5	22.0	22.1	21.8	41.7	31.4	26.3	23.4	22.5	21.9	20.4	21.2
P04	41.0	30.6	26.1	23.4	22.4	21.7	21.7	22.0	41.1	31.2	26.0	23.8	22.8	22.1	21.6	21.5
P05	41.7	31.5	26.9	24.5	23.0	21.8	21.7	22.0	41.6	31.5	26.3	23.6	22.8	21.7	21.7	21.4
P06	40.2	30.2	26.2	23.4	22.9	21.5	21.9	22.0	41.1	30.3	25.3	23.1	22.1	22.1	21.3	21.3
P07	40.8	30.6	26.4	23.4	22.8	22.0	21.4	22.0	40.9	31.8	26.6	2.2	22.7	21.7	22.0	21.9
P08	40.5	31.2	26.5	24.2	22.6	21.9	21.3	21.9	41.3	31.2	26.3	23.7	22.3	22.2	22.0	21.4
P09	40.2	30.5	26.5	23.6	22.7	21.7	21.3	21.9	40.5	30.7	25.6	23.8	22.3	22.1	21.4	21.8
P10	40.4	31.4	26.5	23.6	22.7	21.7	21.6	22.0	40.5	31.3	26.9	23.9	22.8	21.7	21.9	21.6
P11	40.2	31.0	26.9	24.2	22.5	22.0	21.7	21.7	39.8	30.7	25.6	23.4	22.7	22.4	21.5	21.5
P12	39.9	30.7	26.0	23.8	22.8	21.8	21.5	21.8	39.7	30.4	25.4	23.6	23.0	21.7	21.9	21.9
Prom	40.8	30.9	26.4	23.6	22.5	21.8	21.6	21.9	41.0	30.9	25.8	21.6	22.3	21.6	21.2	21.0

Tabla 4. Temperatura superficial de las 12 probetas del ciclo 5 y del ciclo 6.

No.	Ciclo 5 Temperatura (°C)								Ciclo 6 Temperatura (°C)							
	08:20	08:40	09:00	09:20	09:40	10:00	10:20	10:40	08:20	08:40	09:00	09:20	09:40	10:00	10:20	10:40
P01	40.9	27.0	25.0	18.9	18.7	21.6	21.6	18.9	38.1	26.5	24.6	22.3	20.9	21.0	17.3	18.2
P02	41.4	31.4	25.8	23.2	22.2	21.7	21.4	21.0	41.0	30.4	25.1	23.1	21.8	21.1	20.6	17.1
P03	41.0	31.0	25.8	23.1	22.4	21.4	21.3	21.0	40.4	30.1	25.2	22.4	22.1	21.4	20.7	19.9
P04	40.5	30.4	25.2	22.8	21.6	21.3	20.9	21.5	40.3	29.5	25.2	22.3	21.7	21.7	20.7	20.1
P05	40.9	31.4	26.0	24.0	22.3	21.9	21.2	21.5	40.8	29.9	25.4	22.9	21.6	21.5	21.1	20.1
P06	40.4	30.3	25.1	23.3	22.0	21.5	21.2	21.0	39.6	29.1	25.1	22.0	21.2	21.1	20.3	20.3
P07	40.8	31.3	26.2	23.3	22.8	22.0	21.5	21.5	40.3	30.1	25.2	22.4	22.1	21.3	20.6	20.4
P08	40.5	30.5	26.0	23.3	22.6	21.6	21.3	21.6	39.4	30.1	25.1	22.6	21.8	21.6	21.0	20.8
P09	39.6	30.0	26.2	23.3	22.4	22.0	21.8	21.1	39.3	29.7	24.8	22.3	21.6	21.5	20.8	20.5
P10	39.9	30.7	25.3	24.0	22.3	21.6	21.8	21.3	39.1	29.9	24.9	22.7	21.5	21.0	20.5	20.7
P11	39.5	30.1	25.4	23.9	22.2	21.3	21.9	21.4	38.8	28.9	24.7	22.3	22.0	21.1	20.6	20.7
P12	39.3	29.9	25.3	23.0	22.8	21.9	21.2	21.9	39.0	29.2	24.9	22.7	21.5	21.1	20.6	20.5
Prom	40.4	30.3	25.6	23.0	22.0	21.7	21.4	21.4	39.7	29.5	25.0	22.5	21.7	21.3	20.4	20.3

Tabla 5. Temperatura superficial de las 12 probetas del ciclo 7 y del ciclo 8.

No.	Ciclo 7 Temperatura (°C)								Ciclo 8 Temperatura (°C)							
	08:20	08:40	09:00	09:20	09:40	10:00	10:20	10:40	08:20	08:40	09:00	09:20	09:40	10:00	10:20	10:40
P01	37.5	28.7	22.1	19.7	21.2	20.9	18.0	20.9	40.2	26.6	24.5	19.6	21.3	21.1	21.2	21.1
P02	40.4	30.3	25.0	22.0	21.9	21.3	20.9	21.3	40.9	30.5	25.8	23.3	22.2	21.3	21.6	21.4
P03	40.4	29.5	24.9	23.1	21.4	21.0	21.2	21.6	40.6	30.6	26.2	23.2	22.1	21.1	21.4	21.1
P04	40.2	29.4	24.5	22.6	21.4	21.3	21.7	21.6	40.1	29.3	24.7	22.4	21.7	20.9	21.0	21.5
P05	40.8	31.4	26.2	23.8	22.2	22.0	21.5	22.0	41.0	31.0	26.3	23.4	22.8	21.5	21.7	21.4
P06	40.8	29.7	25.6	23.4	22.2	21.2	21.1	21.5	39.9	29.5	25.5	22.5	21.7	21.1	21.4	21.5
P07	39.7	28.8	24.8	22.4	21.7	21.2	21.1	21.1	40.2	30.2	25.9	23.5	22.0	21.7	21.4	21.3
P08	39.7	29.0	24.8	22.8	22.3	21.5	22.0	21.4	39.6	30.2	26.4	23.2	22.1	21.4	21.1	21.3
P09	39.4	28.4	24.5	22.9	22.1	21.0	21.4	21.6	38.9	29.3	25.0	22.5	21.6	21.8	21.5	21.3
P10	39.0	28.1	24.8	22.4	21.6	21.0	20.7	20.8	39.1	29.5	25.2	23.8	22.4	21.2	21.5	21.2
P11	38.3	28.2	24.5	22.3	21.4	20.9	21.2	20.8	39.2	29.7	25.5	23.1	22.3	21.3	21.2	21.4
P12	38.3	28.1	24.1	22.3	21.2	20.8	21.3	20.9	38.9	29.3	25.1	22.7	21.6	21.3	21.1	21.1
Prom	39.5	29.1	24.7	22.5	21.7	21.2	21.0	21.1	39.9	29.6	25.5	22.8	22.0	21.3	21.3	21.5

Tabla 6. Temperatura superficial de las 12 probetas del ciclo 9 y del ciclo 10.

No.	Ciclo 9 Temperatura (°C)								Ciclo 10 Temperatura (°C)							
	08:20	08:40	09:00	09:20	09:40	10:00	10:20	10:40	08:20	08:40	09:00	09:20	09:40	10:00	10:20	10:40
P01	40.0	29.5	25.1	23.8	21.9	21.4	21.0	21.4	41.1	30.4	26.2	23.5	22.4	21.6	20.9	21.5
P02	40.2	29.9	25.5	23.4	22.2	22.2	21.4	21.4	39.5	30.5	26.0	23.1	22.6	22.1	17.7	21.3
P03	40.3	29.9	25.6	23.6	22.3	21.6	21.5	21.6	39.6	30.4	26.4	23.0	22.4	22.0	18.9	21.1
P04	39.7	29.5	25.4	22.5	22.2	21.4	21.2	21.4	39.6	29.9	26.4	23.6	22.3	21.7	21.3	21.9
P05	40.0	30.3	25.6	23.3	22.1	21.5	21.4	21.7	38.6	30.4	26.0	23.2	22.1	21.7	21.5	21.3
P06	40.9	30.8	25.7	23.7	22.3	21.9	21.8	21.8	39.6	29.7	26.2	23.1	21.9	21.5	21.3	21.6
P07	40.3	29.8	24.7	22.7	21.8	20.9	21.2	22.0	39.3	29.7	26.5	23.7	22.5	21.5	21.9	20.9
P08	41.2	30.7	26.1	23.8	22.1	21.5	21.4	21.3	39.4	31.4	25.8	23.6	21.8	21.5	21.3	21.5
P09	41.0	30.0	25.7	23.3	22.1	21.4	21.5	21.2	39.9	30.2	26.2	23.3	22.2	21.7	21.5	21.4
P10	40.5	29.9	25.0	22.7	21.7	21.2	21.2	21.6	40.9	30.9	26.3	23.8	22.4	21.3	21.0	21.2
P11	41.8	30.4	25.7	23.2	22.2	21.8	21.4	21.5	40.5	31.3	23.6	23.6	19.6	17.7	21.3	21.2
P12	41.3	29.9	22.8	23.1	21.9	21.5	17.8	21.6	41.5	30.5	27.0	21.6	22.2	18.6	21.0	18.9
Prom	40.6	30.7	25.2	23.3	22.1	21.5	21.1	21.5	40.0	30.7	26.1	23.3	22.0	21.0	20.8	21.2

Tabla 7. Temperaturas promedios de los 10 ciclos.

Tiempo (hora)	Temperatura (°C)										
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10	Prom
08:00	60.0	60.0	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.0
08:20	38.4	39.3	40.84	40.96	40.39	39.68	37.50	40.20	40.00	41.10	39.8
08:40	29.7	30.1	30.85	30.93	30.33	29.45	28.70	26.60	29.50	30.40	29.7
09:00	25.3	25.7	26.44	25.76	25.61	25.02	22.10	24.50	25.10	26.20	25.2
09:20	23.3	23.2	23.59	21.63	23.01	22.50	19.70	19.60	23.80	23.50	22.4
09:40	22.2	21.8	22.46	22.28	22.03	21.65	21.20	21.30	21.90	22.40	21.9
10:00	21.4	21.5	21.81	21.63	21.65	21.28	20.90	21.10	21.40	21.60	21.4
10:20	21.3	21.5	21.64	21.18	21.43	20.40	18.00	21.20	21.00	20.90	20.9
10:40	21.5	21.6	21.88	21.01	21.14	19.94	20.90	21.10	21.40	21.50	21.2

$$T(t) = 20.3 + 39.7e^{kt}$$

$$39.8 = 20.3 + 39.7e^{k(20)}$$

$$\frac{39.8 - 20.3}{39.7} = e^{k(20)}$$

$$0.491183879 = e^{20k}$$

$$\ln(0.491183879) = 20k$$

$$k = -0.03555$$

Por lo que, sustituyendo la constante k en la ecuación 3, se obtiene el modelo de enfriamiento del mármol tipo Café Tabaco, dado por la ecuación 4:

$$T(t) = 20.3 + 39.7e^{-0.03555t} \quad (4)$$

3.3. Comparación del modelo obtenido contra los resultados experimentales

En la tabla 8, se muestra la comparación entre los valores obtenidos mediante el experimento y los valores obtenidos mediante el modelo de enfriamiento; mientras que en la Fig. 8, se muestran las gráficas comparativas.

Tabla 8. Resultados comparativos.

Tiempo (min)	Temperatura del Experimento (°C)	Temperatura del Modelo (°C)	Porcentaje de Error (%)
0	60.0	60.0	0.00
20	39.8	39.8	0.00
40	29.7	29.9	0.67
60	25.2	25.0	0.79
80	22.4	22.6	0.89
100	21.9	21.4	2.28
120	21.4	20.9	2.34
140	20.9	20.6	1.43
Promedio			1.05

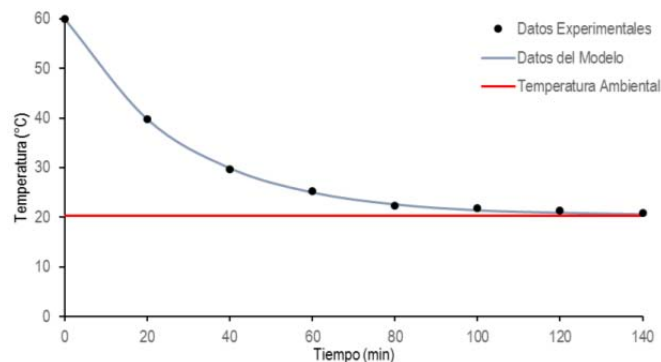


Fig. 8. Gráficas comparativas.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se estudió el comportamiento de enfriamiento del mármol tipo Café Tabaco extraído de la cantera ubicada en Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México. Los resultados de la investigación muestran que coeficiente de enfriamiento de este material es de -0.03555; además, el modelo de enfriamiento se da mediante la ecuación (5):

$$T_{(t)} = 39.7e^{-0.03555t} + 20.3 \quad (5)$$

De acuerdo con los resultados obtenidos, el modelo de enfriamiento cumple satisfactoriamente con los datos obtenidos por el experimento, ya que con base en la tabla 8, existe un porcentaje promedio de error del 1.05% entre las temperaturas obtenidas experimentalmente y las temperaturas obtenidas por el modelo. De esta manera, se concluye que la función obtenida describe en un 98.95% el comportamiento de enfriamiento.

Los investigadores interesados en continuar con este tipo de investigaciones podrían estudiar el comportamiento de calentamiento de este material. Además, existe un abundante campo todavía por explorarse en lo que se refiere a algunas propiedades como la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y la resistencia a la abrasión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez por el financiamiento otorgado y prestar las instalaciones y equipos necesarios; además, agradecen a la empresa Mármol Tepeaca S.A. de C.V., por procesar las probetas para la realización de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] Marble Institute of America, *Marble and Onyx*, Marble Institute of America, United States of America (2011)
- [2] Tlatempa, M., Estrada, R., Rubio, E., Rodríguez-Lugo, V., "Caracterización Microestructural de Mármol de la cantera Café Tabaco procedente de Tepexi de Rodríguez, Puebla", *Acta Microscópica*, **20**(1), 60-65 (2011)
- [3] López García, J., Jiménez Samudio, J.J., *Métodos Analíticos para Ecuaciones Diferenciales Ordinarias*, Editorial FES Acatlán, México (2005)
- [4] Fraile Delgado, J.J., García Hourcade, J.L., García Montes, J., Rodríguez de Ávila, C., Rubio Regueiro, J.L., "Estudio Experimental de Procesos de Calentamiento y Enfriamiento. Resultados e Implicaciones Didácticas". *Enseñanza de las Ciencias*, **15**(3), 329-342. (1997)
- [5] Zill, D.G., *Ecuaciones Diferenciales con Aplicaciones de Modelado*, Editorial Thomson, México (2002)
- [6] Sullivan, J., *Algebra y Trigonometría*, Editorial Pearson Educación, México D.F. (2006)
- [7] Pita Ruiz, C.J., *Ecuaciones Diferenciales, Una Introducción con Aplicaciones*, Editorial Limusa México (1989)

COOLING MODEL IN THE MARBLE TYPE CAFPE TABACO THROUGH A NEWTON COOLING TEST

Abstract – This study has a purpose to obtain the cooling behavior of the marble type Café Tabaco extracted from the quarry located in Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, Mexico, through a Newton's Cooling test. The result obtained in this study is that the marble type Café Tabaco extracted from the quarry has a cooling constant of -0.03555. In addition, the cooling function obtained satisfies in 98.95% with the experimental data. The results show that the marble type Café Tabaco has a capacity to reach the thermodynamic equilibrium in approximately 140 minutes. This is important to know, since for the heating-cooling-immersion cycle of the salt crystallization tests it is mentioned that the specimens need to cool to room temperature for about 120

minutes, to avoid as far as possible a superficial thermal shock. In this way, it is possible to verify that this material has the capacity to dissipate the heat in this time lapse.

Keywords – Café Tabaco, Behavior, Newton's cooling, Marble.