

# Modelo temporal de resistencia a la compresión para tierra vertida

EDGARDO JONATHAN SUÁREZ DOMÍNGUEZ<sup>1</sup>

YOLANDA GUADALUPE ARANDA JIMÉNEZ<sup>2</sup>

ELENA IZQUIERDO KULICH<sup>3</sup>

## RESUMEN

En el presente trabajo se determinó la resistencia a la compresión de un tipo de tierra vertida elaborada a partir de mezclas de un suelo arcillo, uno limoso y arena estabilizada con cemento y cal. Se propone un modelo matemático que describe la variación de dicha resistencia con respecto al tiempo. Se puede notar que dos parámetros son importantes para la validación del modelo de resistencia a la compresión: la resistencia final a los xx días y el segundo corresponde a una constante que se relaciona con la velocidad de endurecimiento del hormigón de tierra.

**Palabras clave:** hormigón de tierra, tierra vertida, resistencia a la compresión, modelo resistencia-tiempo.

<sup>1</sup> Químico Industrial y Arquitecto. Maestro en Ingeniería. Director de Investigación. Mexican Institute of Complex Systems, Tamaulipas, México. Correo electrónico: jsd@mics.edu.mx

<sup>2</sup> Arquitecta. Doctora en Arquitectura. Jefa del Departamento de Tutorías e investigadora, Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Campus Tampico-Madero, Circuito interior S/N. Tampico, Tamaulipas, México. Correo electrónico: yaranda@uat.edu.mx

<sup>3</sup> Ingeniera Química. Doctora en Ciencias técnicas. Profesora e investigadora. Departamento de Química-Física. Facultad de Química, Universidad de la Habana, Cuba. Correo electrónico: elenaik@fq.uh.cu

FECHA DE RECEPCIÓN: 19 ENERO DE 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 4 MAYO DE 2014

Cómo citar este artículo: Suárez Domínguez, E. J., Aranda Jiménez, Y. G. e Izquierdo Kulich, E. (2014). Modelo temporal de resistencia a la compresión para tierra vertida. *Épsilon* (23), 33-42.

## *Temporal Compressive Strength Model for Poured Earth*

### ABSTRACT

In this paper we determine the compressive strength of a type of poured earth made from mixtures of clay soil, loam soil and sand, stabilized with cement and lime. A mathematical model describing the resistance-time variation is proposed. It may be noted that two parameters are important for validating the compressive strength model: the final resistance at xx days, and, second, a constant related to the hardening rate of ground concrete.

**Keywords:** ground concrete, poured earth, compressive strength, resistance-time model.

---

### *Modelo temporário de resistência à compressão para terra vertida*

### RESUMO

Neste trabalho se determinou a resistência à compressão de um tipo de terra vertida elaborada a partir de misturas de um solo argiloso, um lodoso e areia, estabilizada com cimento e cal. Propõe-se um modelo matemático que descreve a variação desta resistência com respeito ao tempo. Pode-se notar que dois parâmetros são importantes para a validação do modelo de resistência à compressão: a resistência final aos xx dias e o segundo corresponde a uma constante que se relaciona com a velocidade de endurecimento do concreto de terra.

**Palavras chave:** concreto de terra, terra vertida, resistência à compressão, modelo resistência-tempo.

## Introducción

Las técnicas de construcción con tierra han sido conocidas desde hace milenios. En el pasado, este fue uno de los materiales predominantes en la arquitectura, principalmente en los climas cálidos y secos. Algunas de las ventajas que presenta este sistema son la disponibilidad, la versatilidad, sus bajo costo e impacto ambiental; además es accesible a todos los niveles poblacionales (Maniatidis y Walker 2008). Los materiales de construcción que emplean tierra pueden utilizarse de forma comprimida (Morris, Walker y Drupsteen, 2010), de lo cual se observan notables diferencias con respecto a materiales convencionales, como el concreto, en cuanto a la transmitancia de calor (Hall y Allinson, 2010).

Existen distintos tipos de sistemas constructivos con tierra, divididos en sistemas monolíticos —en los que encontramos la tierra vertida—, mampostería y sistemas mixtos —con estructuras de tierra— (Hall y Djerbib, 2004; Revuelta-Acosta *et al.*, 2010; Cid, Mazarrón y Cañas, 2011). La tierra vertida es un término reciente que se refiere a una mezcla dosificada de gravilla, arenas y limos, aglomerados por una arcilla, y que con frecuencia también se designa como hormigón de tierra adicionado con un estabilizante mineral, como la cal, para mejorar su resistencia a la compresión (Doat *et al.*, 1990; Houben y Guillard 1994).

Por otra parte, mientras que se ha estudiado con profundidad el comportamiento mecánico de materiales comunes como el cemento, los estudios relacionados con la tierra vertida aún son insuficientes. Aunque se han realizado estudios relacionados con el comportamiento de la resistencia a la compresión con respecto a la distribución de tamaño de partículas (Cid, Mazarrón y Cañas, 2011; Houben y Guillard, 1994), aún se requiere profundizar en el comportamiento de este parámetro con respecto a otros factores. En la actualidad en México se carece de procedimientos de normatividad apropiados referentes a la construcción con materiales basados en tierra, lo cual podría deberse a la variación en las propiedades de los suelos.

Desde el 2005 hasta la fecha, en la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU) de la Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT) se han desarrollado investigaciones experimentales con el objetivo de determinar la resistencia a la compresión, la abrasión y la durabilidad de elementos arquitectónicos basados en tierra vertida y obtenidos a partir de diversas técnicas constructivas como tapial y bloques de tierra comprimida (Aranda-Jiménez *et al.*, 2012). En el presente trabajo

se exponen los resultados experimentales obtenidos en relación con el comportamiento de la resistencia a la compresión con respecto al tiempo para materiales elaborados a partir de diferentes mezclas basadas en tierra vertida, y se propone un modelo matemático para la descripción de este comportamiento.

## Materiales y métodos

En este estudio se determinó la resistencia a la compresión de dos tipos de mezcla para la tierra vertida, las cuales se diferencian entre sí en uno de los componentes utilizados, y cuyas características se muestran en las tablas 1 y 2. El medrano corresponde a un suelo de Tampico, Tamaulipas, México, del tipo areno-limoso. Las mezclas se elaboraron mezclando mecánicamente en una revolvedora a 50 revoluciones por minuto (r. p. m.); se añadió primero el medrano y grava, luego la arcilla y el cemento y finalmente el agua, homogeneizando durante 5 min. A cada una de las mezclas se les determinó, por triplicado, la resistencia y la compresión con respecto al tiempo mediante pruebas en cilindros elaborados, curados y probados de acuerdo con las normas mexicanas NMX-C-160-ONNCE-2004 y NMX-C-83-ONNCE-2002. El proceso de curado, según la norma mencionada, consiste en verter en moldes de acero la mezcla, desmoldarla después de 24 h y sumergirlas completamente en agua durante el tiempo subsecuente. Para la presente investigación se retiraron del agua, se escurrieron y se probaron posterior a 7, 10, 14, 17, 20, 24 y 28 días.

Tabla 1. Mezcla 1: proporciones en peso para la elaboración de tierra vertida estabilizada con cemento

COMPONENTE	PROPORCIONES %(P/P)*		
	MEZCLA A1	MEZCLA A2	MEZCLA A3
Cemento Portland CPC30R	13,91	10,80	7,41
Arcilla	7,66	7,94	8,14
Medrano	30,20	31,29	32,59
Grava	37,67	39,02	40,50
Agua	10,56	10,94	11,35

\*Proporciones volumétricas tal como se emplean en la preparación de mezclas en la construcción.

Fuente: proporciones propuestas por los autores a partir de Aranda-Jiménez *et al.* (2012).

Tabla 2. Mezcla 2: proporciones en peso para la elaboración de tierra vertida estabilizada con cemento en presencia de cal

COMPONENTE	PROPORCIONES %(P/P)*		
	MEZCLA B1	MEZCLA B2	MEZCLA B3
Cemento	10,16	6,78	3,39
Cal	3,42	6,78	10,17
Arcilla	7,47	7,47	7,47
Medrano	29,88	29,89	29,90
Grava	36,71	36,71	36,69
Agua	12,36	12,37	12,37

\*Proporciones volumétricas tal como se emplean en la preparación de mezclas en la construcción.

Fuente: proporciones propuestas por los autores a partir de Aranda-Jiménez *et al.* (2012).

## Resultados y discusión

Los resultados experimentales obtenidos para cada una de las muestras analizadas se presentan en la tabla 3. La incertidumbre del método fue del 2 % y se encontró que el comportamiento de la resistencia a la compresión con respecto al tiempo tuvo un comportamiento exponencial que se estabiliza con el tiempo, lo cual representa una posible velocidad de cristalización en los primeros días, lo que se corresponde con el incremento temporal de la resistencia con respecto al tiempo de estructuras de hormigón tradicionales.

Tabla 3. Valores obtenidos para las componentes del modelo a. (arriba) para la mezcla 1 y b. (abajo) para la mezcla 2

MUESTRA	A	K	r2	ERROR ESTÁNDAR
1A	14,746	0,133536	99,5836	3,41124
2A	13,218	0,0843621	99,285	3,70287
3A	42,492	0,0710774	96,2404	2,64031
MUESTRA	A	K	r2	ERROR ESTÁNDAR
1B	8,104	0,262753	96,704	5,60478
2B	2,869	0,271525	91,9985	3,02393
3B	0,502	0,12879	94,2933	0,458604

Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de analizar estos resultados, se propone un modelo matemático que considera que la resistencia a la compresión es el resultado de la ocurrencia de procesos físicos y químicos complejos interrelacionados entre sí como resultado del incremento de la presión. En este sentido, existen procesos cuya ocurrencia disminuye la resistencia, mientras que otros la incrementan. Suponiendo en este caso que la cinética global es de primer orden, la ecuación diferencial que describe este proceso está dada por:

$$\frac{dR}{dt} = -kR + C \dots \quad (1)$$

$$R(0) = 0 \dots \quad (2)$$

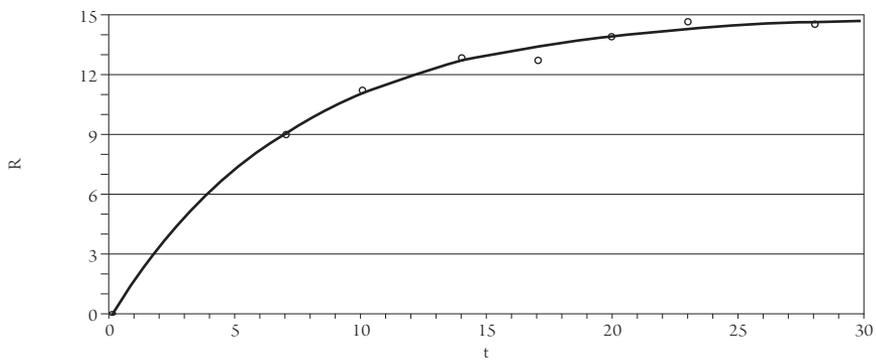
Donde  $R$  representa la resistencia mecánica a la compresión en MPa y  $t$  es el tiempo en días, y  $k$  y  $C$  son constantes que deben ser determinadas experimentalmente. La ecuación diferencial (1) tiene como solución analítica exacta:

$$R = A[1 - \exp(-kt)] \dots \quad (3)$$

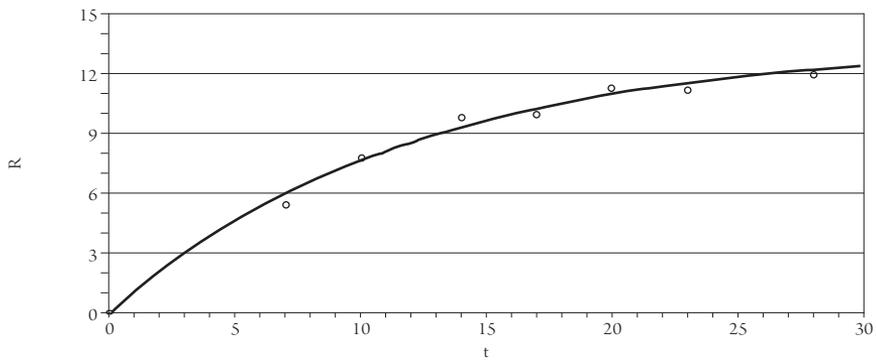
de la cual:

$$A = \frac{c}{k} \dots \quad (4)$$

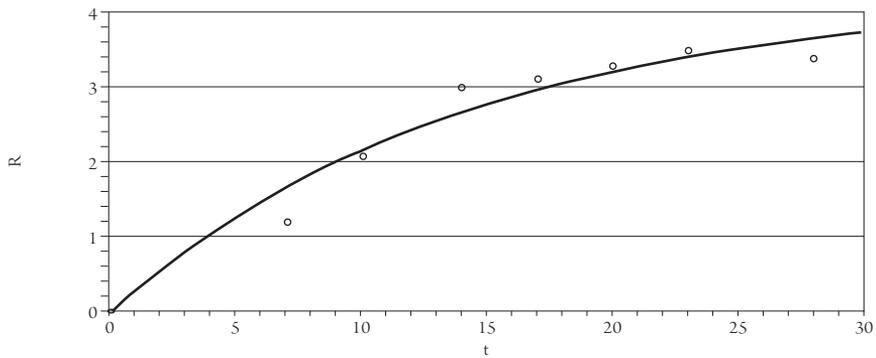
Para determinar los parámetros del modelo a partir de los resultados experimentales se utilizó el método de regresión no lineal de Marquardt, mediante el cual se alcanzó la convergencia de la estimación para ambas muestras y un estadístico de Durbin Watson superior a un 95 % que indicó que no existe autocorrelación de los residuos, para todos los casos, respectivamente. Los resultados obtenidos de los ajustes estadísticos se muestran en las figuras 1 y 2. Como el valor del coeficiente de regresión es mayor al 90 %, en todos los casos el modelo fue aceptado. El comportamiento de los resultados experimentales y los predichos se muestra en las figuras 1 y 2.



a)



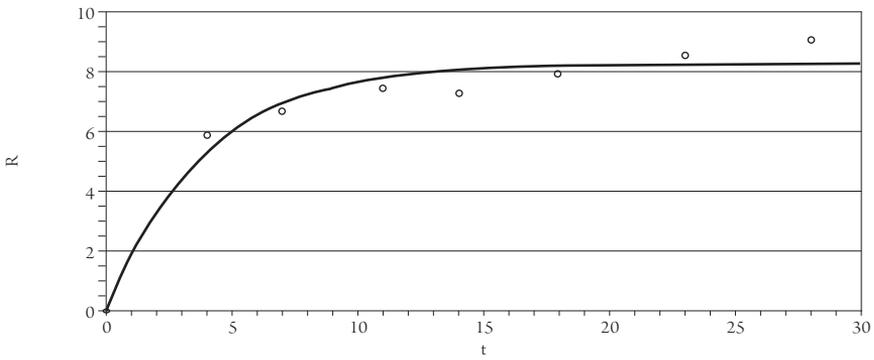
b)



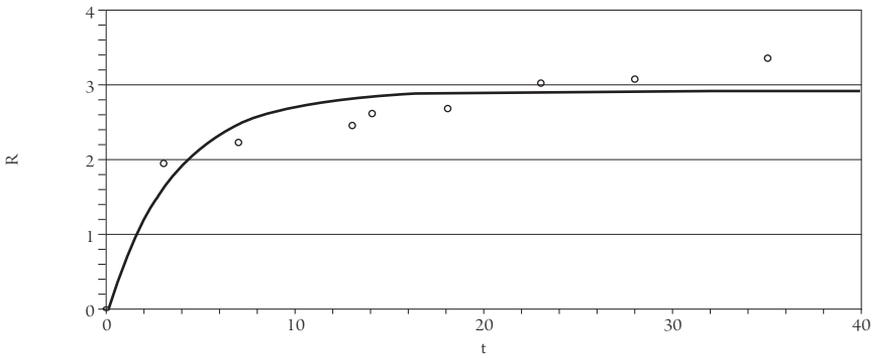
c)

Figura 1. Resultados de resistencia en MPa (eje y) con respecto al tiempo, en días (eje x) para las mezclas con cemento para a) 13,91, b) 10,18 y c) 7,41

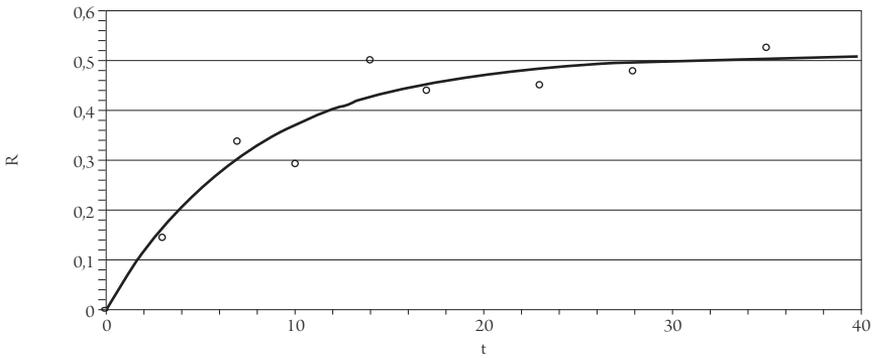
Fuente: elaboración propia.



a)



b)



c)

Figura 2. Resultados de resistencia en MPa (eje y) con respecto al tiempo, en días (eje x) para las mezclas con cal para a) 3,42, b) 6,78 y c) 10,17

Fuente: elaboración propia.

## Conclusiones

El modelo proporcionado se acopla correctamente a los resultados experimentales. Es importante señalar que este modelo, al ser utilizado para conocer la resistencia a la compresión que tendrán mezclas de tierra vertida, permite reducir los experimentos en laboratorio de dichas mezclas. Con este modelo pueden tomarse decisiones aproximadas conociendo la resistencia proporcionada requerida en cierto tiempo, de tal manera que los procesos de curado de las probetas de tierra vertida, en laboratorio, pueden reducirse sustancialmente.

Es recomendable ampliar este estudio con mayores concentraciones para tratar de relacionar el porcentaje de cemento añadido con el valor de la constante  $k$ , o de  $R$ . Por otro lado, el estudio del beneficio social que implica utilizar material vernáculo con sistemas constructivos tradicionales debe ser potencializado.

## Referencias

- Aranda-Jiménez, Y. G., González-Defelice A. A., Roux-Gutierrez R., Espuna-Mujica J.A., Arvizu-Sánchez, E. (2012). *Tierra vertida. Hormigón verde. Estudio de los materiales componentes, su dosificación, interacción y puesta en obra de dos contextos. Informe Técnico*. Programa de cooperación bilateral México-Argentina. Conacyt-Mincyt.
- Cid, J., Mazarrón, F. R. y Cañas, I. (2011). Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de la Construcción*, 63(523), 159-169.
- Doat P., Hays A., Houben H., Matuk S. y Vitoux F. (1990). *Construir con tierra* (tomo I). Bogotá: Fondo Rotario.
- Hadjri, K., Osmani, M., Baiche, B. y Chifunda, C. (2007). Attitudes towards earth building for zambian housing provision. *Engineering Sustainability*, 160(3), 141-149.
- Hall, M. y Djerbib, Y. (2004). Rammed earth sample production: Context, recommendations and consistency. *Construction and Building Materials*, 18(4), 281-286.
- Hall, M. R. y Allinson, D. (2010). Transient numerical and physical modelling of temperature profile evolution in stabilised rammed earth walls. *Applied Thermal Engineering*, 30(5), 433-441.
- Houben, H. y Guillard, H. (1994). *Earth construction. A comprehensive guide*. Londres: ITDG Publishing.
- Maniatidis, V. y Walker, P. (2008). Structural capacity of rammed earth in compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3), 230-238.

- Morris, H., Walker, R. y Drupsteen, T. (2010). Observations of the performance of earth buildings following the September 2010 Darfield earthquake. *Bulletin Of The New Zealand Society For Earthquake Engineering*, 43(4), 393-404.
- Revuelta-Acosta, J. D., Garcia-Diaz, A., Soto-Zarazua, G. M., Rico-Garcia E. (2010). Adobe as a sustainable material: A thermal performance. *Journal of Applied Sciences (Faisalabad)*, 10(19), 2211-2216.