



SECCIÓN CIENCIAS TÉCNICAS

Artículo original de investigación

Pronóstico de la magnitud del desplazamiento y el tiempo de estabilización del macizo geológico

Rafael Martínez Silva ^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-6466-6571>

¹ Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Pinar del Río Hermanos Saiz Montes de Oca. Pinar del Río, Cuba

² Academia de Ciencias de Cuba. La Habana, Cuba

Autor para la correspondencia: martinez@upr.edu.cu

Editor

Lisset González Navarro
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

Traductor

Darwin A. Arduengo García
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

RESUMEN

Introducción: El macizo geológico es el material en el que se realizan las construcciones superficiales o subterráneas para el desarrollo social. La presencia de la obra altera el campo natural de tensiones provocando desplazamientos en el macizo. **Objetivo:** Obtener un procedimiento simple que permita el pronóstico del tiempo necesario para la estabilización del macizo geológico. **Métodos:** Utilizando el método empírico de investigación se recopilaron observaciones de campo y laboratorio de obras subterráneas y superficiales, para obtener los datos necesarios que permiten confeccionar un procedimiento para el pronóstico de la magnitud del desplazamiento y el tiempo en que se estabiliza el macizo geológico. **Resultados:** Se pronostica el valor del desplazamiento para un tiempo, la calidad del macizo geológico y la tensión actuante correspondiente. **Conclusiones:** El carácter lineal que se fundamenta en la ecuación empírica que se obtiene al determinar los desplazamientos contra tiempo para cualquier macizo geológico y estos adquieren un valor máximo a partir del cual se estabilizan. El procedimiento se puede aplicar en excavaciones exploratorias, pilotos, taludes, en todas las obras en las cuales se puedan medir desplazamientos contra tiempo. **Palabras clave:** fluencia; relajación; reptación; sistema roca-fortificación

Forecasting of the magnitude of the displacement and the stabilization time of the Geological Massif

ABSTRACT

Introduction: The geological massif is the material on which surface or subway constructions are built for social development. The presence of the construction site alters the natural stress field causing displacements in the massif. **Objective:** To obtain a simple procedure that allows the forecast of the time needed for the stabilization of the Geological Massif. **Methods:** Using the empirical method of investigation, they were compiled field and laboratory observations of subway and surface works to obtain the necessary data to prepare a

procedure for the prognosis of the magnitude of the displacement and the time in which the Geological Massif stabilizes. **Results:** They are predicted the value of the displacement (Δ) for a time (t), the quality of the Geologic Massif and the corresponding acting stress (σ). **Conclusions:** The procedure can be applied in exploratory excavations, pilot excavations, slopes, in all works in which displacements against time can be measured.

Keywords: creep; relaxation; rock-fortification system

INTRODUCCIÓN

El macizo geológico es el material en el que se realizan las construcciones superficiales o subterráneas para el desarrollo social. Las formas diversas en que se encuentra responden a las principales fases mecánicas definidas por la mecánica de los cuerpos deformables (elástica, plástica, y fluyente). ⁽¹⁾ Las fases elástica y plástica trascurren en un tiempo relativamente corto, mientras que la fluyente, bajo la presencia de una carga constante, se prolonga en el tiempo hasta que se iguala a 0, ocurriendo lo que se conoce como relajación de las tensiones. Durante la relajación de las tensiones las deformaciones se detienen y se mantienen constante con el acumulado que se observa en ese instante. ⁽²⁾ Nabor Carrillo en el prefacio de La Mecánica de Suelos refiriéndose a la correspondencia entre Terzaghi y Casagrande señalaba:

“(…) en alguna carta me decía que una medida de la mecánica de los suelos es que caben quienes «gustan de soñar con soluciones perfectas en materiales ideales, y quienes se interesan mucho más en investigar las incertidumbres y complejidades de los materiales reales»”. ⁽³⁾

Terzaghi ha dicho, además, “quien solo conoce la teoría de la mecánica de suelos y carece de experiencia práctica puede ser un peligro público”. Boki BV, fundador de la cátedra de construcciones subterráneas y de minas del Instituto de San Petersburgo (Leningrado), se refería constantemente al control de la actividad práctica y escribió un artículo que traducido significa “En la mina es necesario el servicio de fortificación”. ⁽⁴⁾ Estos investigadores coinciden en la complejidad del macizo geológico (en suelos los primeros y el segundo en rocas).

La presencia de la obra altera el campo natural de tensiones provocando desplazamientos en el macizo. El problema: pronosticar mediante un método simple de fácil aplicación el tiempo requerido para que el sistema macizo-fortificación se estabilice, permitiendo mediante formas constructivas la explotación racional de la obra. Hipótesis: el carácter lineal

de los desplazamientos en el tiempo para llegar a la estabilidad es independiente del tipo de macizo geológico. El objeto lo constituye el valor de carga externa y la magnitud de los desplazamientos en función del tiempo. Objetivo: obtener un procedimiento simple que permita el pronóstico del tiempo necesario para la estabilización del macizo geológico.

MÉTODOS

Utilizando el método empírico de investigación se recopilaron observaciones de campo y laboratorio de obras subterráneas y superficiales, para obtener los datos necesarios que permiten confeccionar un procedimiento para el pronóstico de la magnitud del desplazamiento y el tiempo (t) en que se estabiliza el macizo geológico. Las tareas: primera obtención de datos y segunda análisis de 2 métodos clásicos para pronosticar la fase fluyente

Obtención de los datos

Se obtienen en la década del 70 del siglo XX teniendo como sede la filial universitaria de Minas de Matahambre y a partir del convenio de colaboración entre la UIC-ENIA y la Universidad de Pinar del Río.

Observaciones en la Mina de Matahambre

La mina es la de mayor profundidad en Cuba y al mismo tiempo la que ofreció mayores posibilidades para la formación de mineros. Los estudiantes de las diferentes instituciones realizaban sus prácticas y se creó en ella la filial universitaria del mismo nombre. ⁽⁵⁾ La geología del yacimiento posee 2 tipos fundamentales de menas, Cobre y Polimetálica. ⁽⁶⁾ Las rocas encajantes se caracterizan desde el punto de vista mecánico en 3 tipos de macizos a) macizo I, areniscas; b) macizo II, intercalaciones de esquistos y areniscas; c) macizo III esquistos. Se construyeron estaciones de medición en las galerías con las características geológicas anteriormente descritas. El objetivo de las estaciones es determinar los desplazamientos que están ocurriendo en el macizo (verticales y horizontales) para definir la convergencia.

Para ello se introduce en el barreno un ancla adosada a una varilla que permite realizar las mediciones desde la galería. La velocidad de los desplazamientos hasta el cese de los mismos determina el período durante el cual se estabiliza el sistema macizo-fortificación. (figura 1)

La selección de las estaciones en areniscas sin fortificar se debe a que los otros macizos están fortificados y esto influye en el comportamiento de los desplazamientos. En la curva x/y que es la que mide la convergencia (relación entre los desplazamientos horizontales y verticales) hay una etapa inicial prácticamente recta hasta que se obtiene el desplazamiento máximo constante en el tiempo en días.

La carga sobre la fortificación se debe al estado tensional natural reinante en la obra colaboración entre la UIC-ENIA y la universidad de Pinar del Río. El convenio entre estas instituciones permite acceder al archivo técnico lo que facilita la obtención de información sobre ensayos de consolidación. Se tomaron los datos correspondientes al depósito de combustible en el municipio Los Palacios y la carga se aplica manualmente en el laboratorio (figura 2)

Las curvas desplazamientos-tiempos poseen las mismas características que las que se obtuvieron con anterioridad en la

Mina Matahambre. Hay una etapa inicial prácticamente recta hasta que se obtiene el desplazamiento máximo constante en el tiempo. Esta observación es importante porque demuestra que la fase fluyente se manifiesta igual en rocas y suelos.

Análisis de 2 métodos clásicos para pronosticar la fase fluyente

Teoría lineal de la herencia (rocas)

La solución que se explica fue realizada en el Instituto de Geomecánica de Leningrado (San Petersburgo). La teoría lineal de la herencia surgió a finales del siglo XIX y se desarrolló durante el XX, dentro de corchetes expresa el comportamiento de las tensiones con el tiempo y en general tiene la forma de la teoría lineal de la elasticidad (1):

$$\xi(t) = \frac{1}{E_0} \left[\sigma_0(t_0) + \int_0^t \delta(t_0 - t)^{-\alpha} \sigma(t) dt \right] \quad (1)$$

$$\sigma = E \times \xi \quad (2)$$

t) instante en que se ejecuta la medición

to) instante inicial

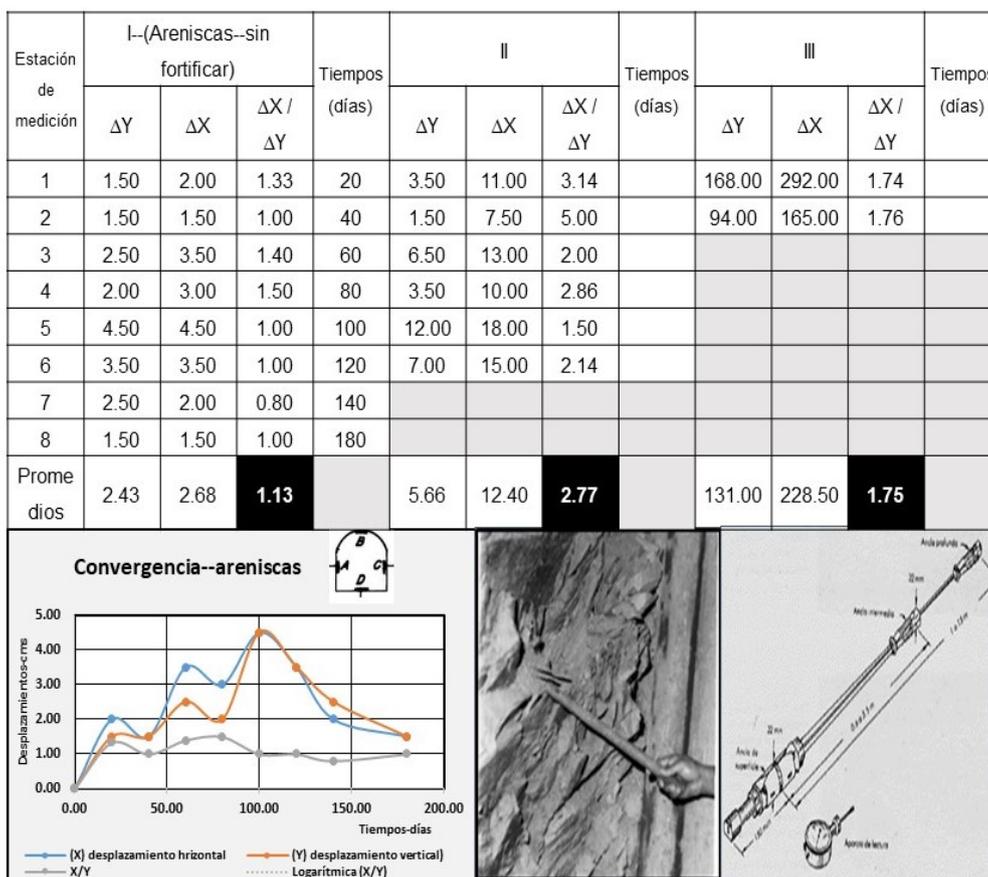


Fig. 1. Estación de medición en el macizo de areniscas (sin fortificar)

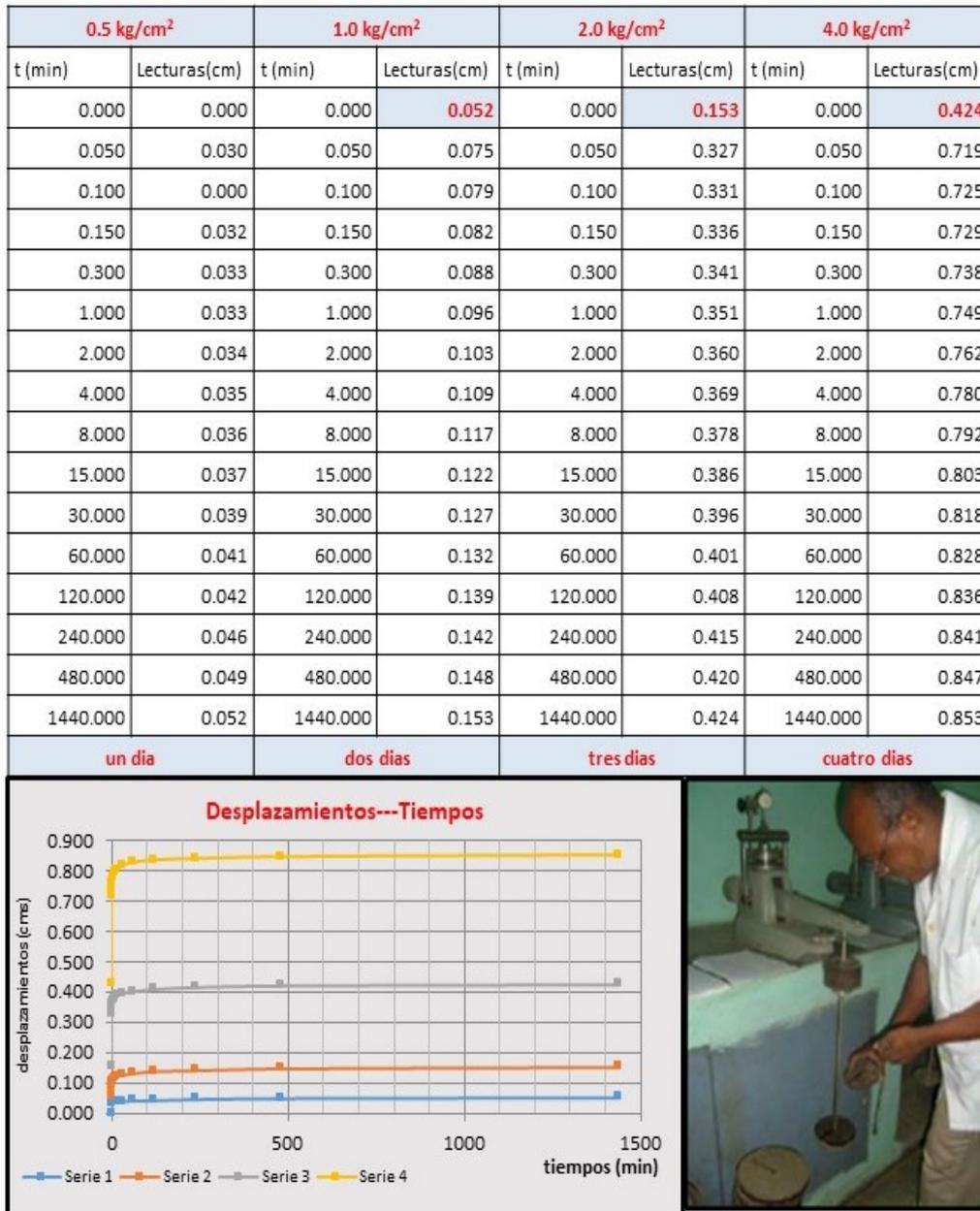


Fig. 2. Curvas desplazamientos-tiempos en minutos para 4 escalones de carga

$\xi(t)$ deformación en un tiempo (t)

$\sigma(t)$ tensión en un tiempo (t)

E0) módulo de Young instantáneo

La solución de la ecuación consiste en obtener además del módulo de Young instantáneo, los parámetros (α y δ) en el laboratorio. (figura 3 izquierda). Para el ensayo se utiliza una batería de prensas (9 en total) a las cuales se suministra la carga a través de pistones de diferentes diámetros lo que permite el régimen de carga desde: (0,1-0,9) (σ_c)i (resistencia a compresión de la roca intacta)

$$\frac{\Delta_{24} - \Delta_1}{\Delta_1 - \Delta_{10 \text{ minutos}}} \quad (3)$$

Las deformaciones se miden con intervalos de 10 min durante 1 h y posteriormente cada 1h hasta completar las 24 h. Los (Δ) se refieren a (24 y 1) h, con estos valores se determinan los parámetros (A) (B) y (α).

$$\delta = \frac{(\Delta_{24} - \Delta_1)(1 - \alpha)}{A \times \Delta_1 - B \times \Delta_{24}} e^{1 - \alpha} \quad (4)$$

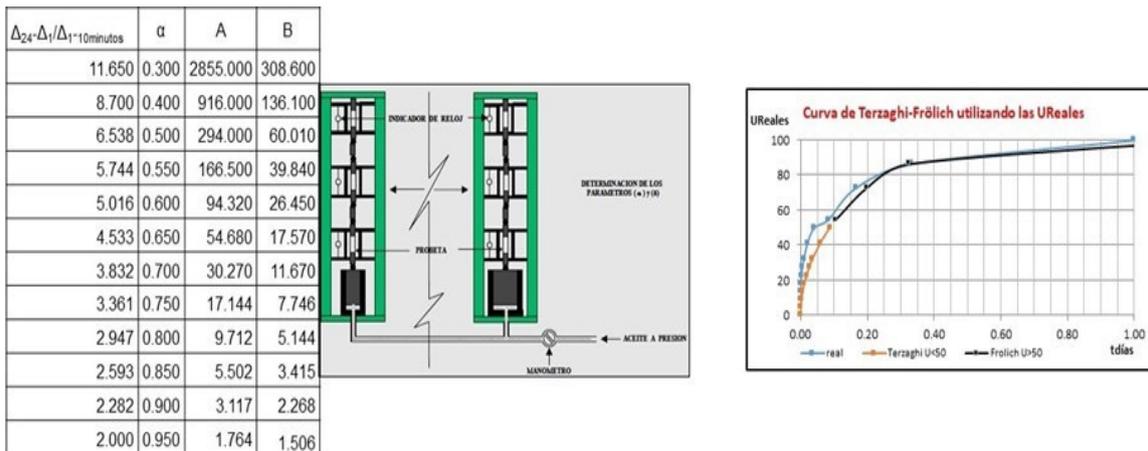


Fig. 3. Cálculo de los parámetros (α-A-B) izquierda-Terzaghi y Frölich (derecha)

$$E_0 = \frac{4Ph \left(1 + A \frac{\delta}{1-\alpha}\right)}{\pi d^2 \Delta_{24}} \times 10^4 \text{ MP}_a \quad (5)$$

d-h-P) diámetro, altura y carga inicial aplicada a la muestra respectivamente (figura 3, izquierda)

Segundo: solución de Terzaghi (suelos)

La ecuación primaria para la solución del problema:

*

$\Delta\sigma$ -representa el escalón de carga

m_v -coeficiente de compresibilidad volumétrica para el escalón de carga (inverso de E_m módulo edométrico)

H_p -la altura promedio de la probeta (en el laboratorio) o el espesor del estrato (en el campo)

$\frac{U\%}{100}$ se expresa en función del factor tiempo (T)

Durante el desarrollo de la ecuación el factor tiempo (T) es función del tiempo real (t), el espesor del estrato (H el coeficiente de consolidación (cv) y este al mismo tiempo del coeficiente de permeabilidad (k), el módulo (E_m) y el peso específico del agua (γ_w) como puede observarse en las expresiones

$$U(\%) = 100 \left[1 - \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{8}{(n+1)^2 \pi^2} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 T}{4}} \right] \quad (7)$$

$$T = \frac{k(1+e)t}{a_v \gamma_w H^2} \quad (8)$$

$$c_v = \frac{k(1+e)}{a_v \gamma_w} = \frac{k}{m_v \gamma_w} = \frac{k E_m}{\gamma_w} \quad (9)$$

$$T = c_v \frac{t}{H^2} \rightarrow \rightarrow \frac{T}{t} = \frac{c_v}{H^2} \quad (10)$$

Terzaghi comparó los porcentajes de consolidación con los datos reales y observó, su curva es más real para los valores $U < 50\%$. Tal observación fue resuelta junto con Frölich surgiendo la solución conjunta que tiene el nombre de ambos. Las curvas resultantes se obtienen utilizando ambas expresiones y se observa como coinciden prácticamente para los valores menores y mayores de 50 para Terzaghi y Frölich respectivamente. (ver figura 3-derecha)

En los métodos estudiados es necesario destacar las observaciones siguientes:

$$* \quad S_t = H_p \times \Delta\sigma \times m_v \times \frac{U(\%)}{100} \text{ ecuación general de asentamiento (6)}$$

Tabla 1. Ecuaciones de Terzaghi y Frölich

Terzaghi	Frölich
$T = \pi/4 ((U\%)/100)^2$	$T = 1,781 - 0,933 \log^{10}(100-U)$
$U_{\text{Reales}} < 50$	$U_{\text{Reales}} > 50$

- los procedimientos se fundamentan en la obtención de los desplazamientos contra tiempos de las probetas de ensayo;
- el carácter lineal que se observa en los diferentes medios y procedimientos antes de alcanzar el valor máximo a partir del cual se estabiliza;
- la semejanza en las curvas de Terzaghi en el laboratorio y las de la Mina de Matahambre en condiciones de campo.
- Ambos métodos ofrecen dificultades en su aplicación y el resultado:
 - el primero por el volumen de muestras necesarias que solo se consigue en macizos competentes en los cuales prácticamente el desplazamiento no existe (observe el caso de las areniscas en la Mina Matahambre, ver figura 1)
 - el segundo debido a que cuando aumenta la potencia del estrato el valor del desplazamiento (Δ) aumenta, lo cual no se corresponde con la realidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Solución empírica

Seleccionar las variables o la combinación de las mismas para el cálculo resulta una tarea compleja. La variable dependiente se identifica con la incógnita y en este caso es el desplazamiento (ΔH) el cual para dar respuesta al problema se relaciona con las variables tiempo (t), la relación de vacíos (e) y la carga actuante (σ).

El medio en que se ejecuta la obra influye en la velocidad de los desplazamientos y tomando el criterio de Valeri Davidovich Lomtadze profesor del Instituto de Minas de Leningrado su clasificación eminentemente práctica se identifica con el macizo geológico en los siguientes términos: rocas, semi-rocas, suelos coherentes, suelos granulares. El macizo geológico en los ensayos se identifica con suelos coherentes que son muy compresibles y el indicador físico que los caracteriza es: (e-relación de vacíos).

$$\Delta H(\text{desplazamientos}) = f(t, e_t, \sigma)_{(10)}$$

los valores de tiempo y carga (t y σ) representan datos que se obtienen directamente, no así la relación de vacíos (e_t) el cual se debe calcular para cada tiempo (t) (11)

$$e_t = e_0 - \frac{\Delta H_M}{H_S} \quad (11)$$

e_0 -relación inicial de vacíos

ΔH_M -desplazamiento de la muestra para el tiempo (t)

H_S -altura del sólido de la probeta de ensayo

Se procesaron los datos utilizando el criterio de (t) Stu-

dent realizándose los cálculos con el tabulador electrónico se obtuvo la ecuación (12):⁽⁶⁾

★★

La ecuación que se obtiene no tiene carácter universal, pero si las variables que la forman:

t-tiempos

e-relación de vacíos para un tiempo t

σ -solicitud de carga

Las lecturas de los desplazamientos en el laboratorio se realizan para intervalos de tiempo determinados en el día (15 en total) y se continúa al día siguiente con los valores acumulados para el siguiente escalón de carga (4 en total: (0,5-1,0-2,0-4,0) kg/cm² que responden al criterio del proyectista. Es evidente que para la comparación de los datos calculados y los reales se utilicen los valores acumulados debido a que los valores de la relación de vacíos se calcularon para un (t). La figura 4 muestra los datos calculados en marrón y los reales en azul (ver figura 4).

Los tiempos se acumulan en minutos (1440 para cada día) y se obtiene una curva que en cada escalón de carga adquiere la forma de las obtenidas individualmente para las observaciones realizadas en la Mina Matahambre (rocas) y las de Los Palacios en el laboratorio (suelos).

Pronóstico del valor de los desplazamientos

En la expresión

$$(\Delta H_{\text{desplazamientos}} = 0,45 + 0,000001t - 0,77e_t + 0,01\sigma) \quad (12)$$

se observa que los coeficientes de las variables se presentan en forma descendente desde (e) como máximo seguido por (σ) hasta (t) mínimo. Tal sucesión se corresponde con la importancia de cada una de las variables. Los cálculos se realizan para 15 momentos, tal y como se efectúan las observaciones en el laboratorio (figura 5)

El cómputo se realiza con los valores calculados de (e_t) para cada escalón de carga. Los valores de la relación de vacío son bajos descienden de (0,5893-0,5263) y la tensión aplicada todo lo contrario aumenta (0,50-4,00) lo que indica que la probeta se ha ido comprimiendo. Se debe recordar que el suelo es más compresible a medida que aumenta la relación de vacío.

La velocidad de los desplazamientos ($\Delta H/\Delta t$) depende de la tensión aplicada, el tiempo va disminuyendo a medida que esta aumenta de 260 pasa a 200, en el gráfico se observa el salto para cada escalón de carga. Se pronostica el valor del desplazamiento (Δ) para un tiempo (t), la relación de vacíos (e) y la tensión (σ) correspondiente. Para su aplicación se confeccionaron las hojas de cálculo que se encuentran disponibles en el repositorio internacional de datos de investigación Zenodo.⁽⁷⁾

$$\text{★★} \quad \Delta H(\text{desplazamientos}) = 0,45 + 0,000001t - 0,77e_t + 0,01\sigma \quad (12)$$



Fig. 4. Gráfico de los datos reales y calculados

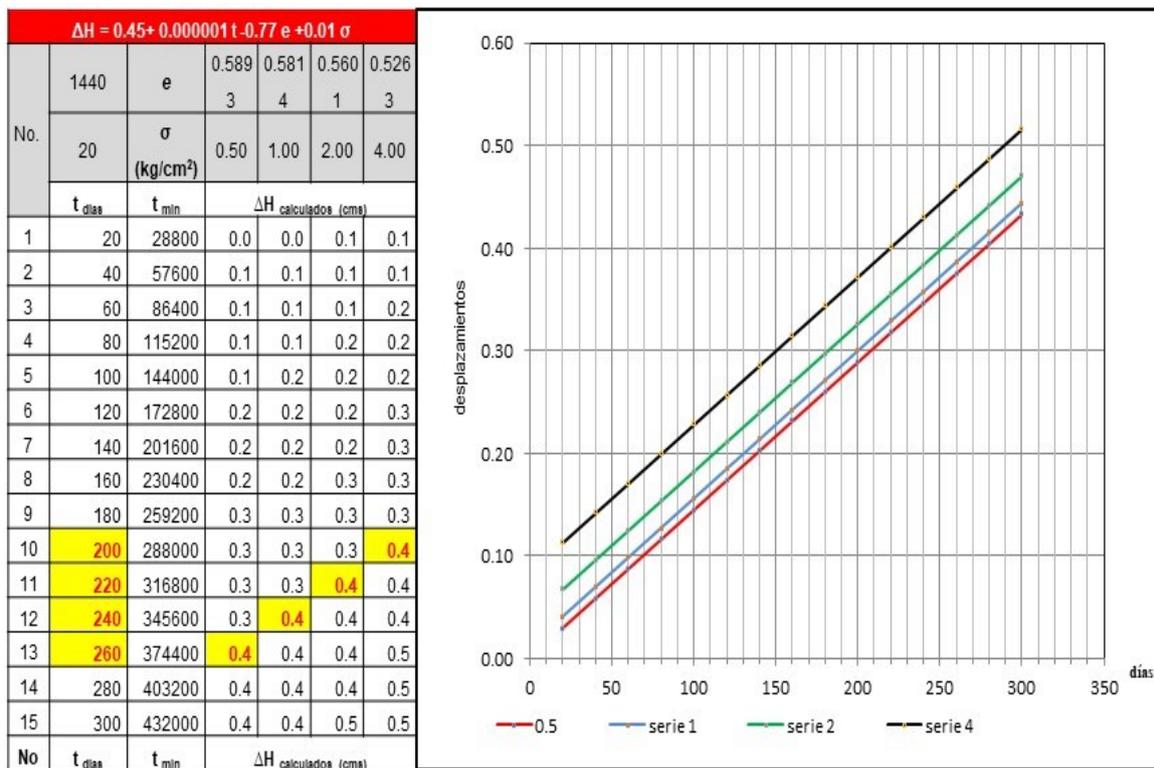


Fig. 5. Pronóstico de los desplazamientos

Conclusiones

El carácter lineal que se fundamenta en la ecuación empírica que se obtiene al determinar los desplazamientos contra tiempo para cualquier macizo geológico y estos adquieren un valor máximo a partir del cual se estabilizan. El procedimiento se puede aplicar en excavaciones exploratorias, pilotos, taludes, en todas las obras en las cuales se puedan medir desplazamientos contra tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Martínez Silva R. La Geomecánica en las Construcciones (Internet). EDUNIV Editorial Universitaria; 2023 (citado 20 feb 2024). Disponible en: <http://repositorio.eduniv.cu/items/show/3826>
2. Martínez Silva R. La Estabilidad del Macizo Geológico Red Universitaria Cuba <http://catalogo.reduniv.edu.cu> EDUNIV ISBN 978-959-16-2624-0 pp86, (Internet). Habana Cuba: 2015 (citado 20 feb 2024). Disponible en: <https://rc.upr.edu.cu/>
3. Juárez Badillo E, Rico Rodríguez A. Mecánica de Suelos. Limusa Noriega Editores: México. 1976
4. Boki B. V, Fridlian AA. Na Chagtie Huchno Sluchba Kriplenja, Chatnoe Stroit Moscú No 3 1967.
5. Martínez Silva R. Construcciones Subterráneas. Premio Anual de la Academia de Ciencias de Cuba, (Internet). 2000 (citado 20 febrero 2024). Disponible en: <https://rc.upr.edu.cu/>
6. Pavlof CP, Jlebnikof AV, Matematicheskaja Statistika b Marhde-reiscon Dele, Instituto de Minas de Leningrado.1983 p 75.

7. Martínez Silva R. Procedimiento para el pronóstico de la magnitud del desplazamiento y el tiempo de estabilización del Macizo Geológico - Archivos Complementarios. Zenodo; 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11085586>

Recibido: 29/04/2024

Aprobado: 23/05/2025

Conflictos de intereses

El autor declara que no existen conflictos de intereses con la investigación presentada.

Financiamientos

No se utilizó financiamiento específico para realizar la investigación presentada.

Cómo citar este artículo

Martinez Silva R. Procedimiento para el pronóstico de la magnitud del desplazamiento y el tiempo de estabilización del Macizo Geológico. An Acad Cienc Cuba [Internet] 2025 [citado en día, mes y año];15(2):e1585. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1585>

El artículo se difunde en acceso abierto según los términos de una licencia Creative Commons de Atribución/Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0), que le atribuye la libertad de copiar, compartir, distribuir, exhibir o implementar sin permiso, salvo con las siguientes condiciones: reconocer a sus autores (atribución), indicar los cambios que haya realizado y no usar el material con fines comerciales (no comercial).[©] Los autores, 2025.

