

# Cuantificación de la complejidad e impacto ambiental de túneles

Jorge Alonso Prieto Salazar\*

**Resumen:** Este artículo presenta los resultados de la cuantificación del impacto ambiental y la complejidad en el caso de túneles en términos energéticos. El análisis utiliza la primera ley de la termodinámica y las características mecánicas del material terreo supuesto elástico, isotrópico y homogéneo. Los resultados se presentan analítica y gráficamente y muestran la influencia de diversos parámetros geométricos y mecánicos en la complejidad y por tanto en el costo de los túneles.

**Abstract:** This paper presents quantitative results of the environmental impact and complexity of tunnels from an energy standpoint. The analysis uses the first law of thermodynamics and the mechanical characteristics of an earthy, supposedly elastic, isotropic and homogeneous material. The results, presented in both analytical and graphical form, show the influence of some geometric and mechanical parameters in the complexity, and therefore in the cost of tunnels.

## 1. Introducción

Las excavaciones subterráneas y en particular los túneles se han convertido en obras de ingeniería muy comunes en un país que como el nuestro se encuentra atravesado por tres imponentes cordilleras. El sector de carreteras es muestra palpable del auge actual de este tipo de excavaciones en Colombia. Como ejemplos se pueden citar la construcción presente de dos túneles de 4.5 y 2.3 kilómetros en la vía Bogotá-Villavicencio, el túnel de San Jerónimo de 4.6 kilómetros que une a Medellín con el Valle del Río Cauca y los 15 túneles del proyecto Tobía Grande-Puerto Salgar, dos de los cuales alcanzan 5.2 y 6.0 kilómetros respectivamente.[8] Adicionalmente, los recientes problemas surgidos por los derrumbes ocasionados en el principal túnel de abastecimiento de agua para la capital del país, subrayan la importancia funda-

\* Ingeniero Civil de la Universidad del Cauca, Master en Centrales Hidroeléctricas de la Pontificia Universidad Javeriana y Master of Science en Mecánica de Suelos y Sismología del Imperial College of Science, Technology and Medicine, Inglaterra. Profesor Asociado de la Pontificia Universidad Javeriana y Director del Departamento de Ingeniería Civil de la misma Universidad.

mental del tema de las excavaciones subterráneas en el momento presente. Por tanto, el entendimiento del comportamiento en términos de ingeniería de este tipo de obras es fundamental en un país de escasos recursos como el nuestro, ya que dicho conocimiento incrementa las posibilidades de diseñar y construir obras óptimamente económicas.

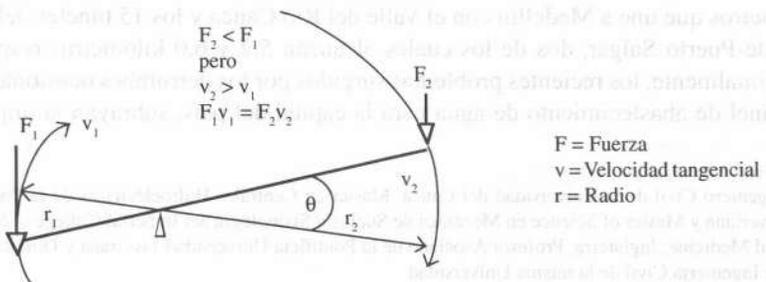
Ahora bien, el comportamiento de ingeniería de los túneles puede apreciarse mejor si se conoce el grado de complejidad de la obra en cuestión. El término complejidad fue introducido y cuantificado por el autor para el caso de excavaciones urbanas tales como sótanos de edificaciones[11], en términos energéticos. En ese caso, la complejidad depende de valores como el peso unitario de los materiales en cuestión y la geometría de la excavación. Aspectos tales como la influencia de una obra sobre las vecindades, las posibilidades de colapso o falla, el costo total, así como también el impacto ambiental generado por ella dependen directamente de la complejidad de la misma. Es por tanto, la complejidad una herramienta supremamente poderosa en la planeación, diseño y ejecución de una excavación subterránea.

No existía hasta el presente una manera de cuantificar la complejidad de un túnel dado, y por tanto no se encontraba disponible una manera racional analítica de identificar los parámetros que influyen en su valor. El presente artículo se dirige en esa dirección.

## 2. Energía y complejidad

Probablemente el concepto más poderoso desarrollado por el hombre es el de *Energía*, el cual tiene una tremenda capacidad unificadora, permitiendo de esta manera entender procesos muy distintos en todas las ramas del conocimiento humano bajo la misma óptica. Este concepto facilita por ejemplo el paso de la química a la física y de ésta a la biología y a la economía con la utilización de las mismas reglas generales. Esta facilidad para saltar de un área del conocimiento a otra, está ligada con que la idea fundamental que subyace en el concepto de Energía es la de *constancia en medio del cambio* [6]. Uno de los ejemplos más claros para ilustrar este hecho es el caso de las máquinas simples tales como la palanca. Como es evidente, con esta máquina es posible levantar o mover un peso o una fuerza localizada en un extremo, con la aplicación de una fuerza menor en el otro extremo. Sin embargo, esta importante ventaja es contrarrestada con el hecho de que el peso se levanta con una velocidad menor a la velocidad que es necesario imprimir en el otro extremo de la palanca, condición que se deduce de las propiedades geométricas del círculo, tal como lo muestra la Figura 1.

Figura 1. Constancia en medio del cambio en una palanca



Ejemplos como el de la palanca son abundantes en el mundo físico y muestran sencillamente que la naturaleza no otorga cosas gratis y que por tanto existe algo que se *conserva*. Este hecho fue plasmado en su concepción moderna por Lagrange en la Mecánica Analítica (1811). Lagrange mostró la existencia de una función dependiente de las coordenadas que al agregársele la energía cinética del sistema se mantiene constante con el tiempo. A esta función se le conoce hoy en día con el nombre de energía potencial del sistema. Esta idea fue reforzada por Hamilton [1] quien consideró lo que hoy llamamos energía mecánica del sistema como la suma de la energía potencial y la energía cinética. Sin embargo, para tener el cuadro completo del estado de un sólido es necesario conocer también su temperatura y el flujo de calor adquirido o cedido. Estos conceptos fueron clarificados por Joule en sus trabajos sobre la equivalencia mecánica del calor [3], dándole forma al moderno principio de la conservación de la energía o primera ley de la termodinámica, la cual establece que la diferencia entre los niveles de energía inicial y final en un cuerpo que pasa de un estado a otro es igual al trabajo ejercido por las fuerzas que actúan en el cuerpo más el calor suministrado durante el intervalo. Matemáticamente esta ley se expresa así:

$$(1) \quad \iiint (\delta T + \delta U) dV = \delta W + \delta Q$$

O también como:

$$(2) \quad \iiint \delta U dV = \delta W - \iiint \delta T dV + \delta Q$$

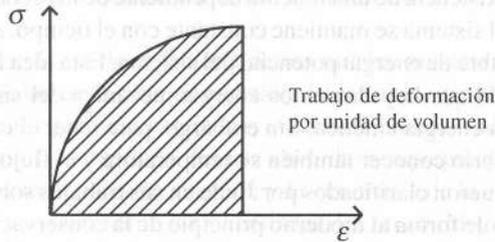
Donde  $\delta U$  es el incremento de energía intrínseca por unidad de volumen adquirido durante el intervalo de tiempo  $\delta t$ ,  $\delta T$  es el incremento de energía cinética por unidad de volumen adquirido durante el mismo intervalo de tiempo,  $\delta W$  es el trabajo realizado por las fuerzas durante el intervalo y  $\delta Q$  es el valor mecánico del calor suministrado durante el intervalo, mientras que  $V$  es el volumen del cuerpo.

Al calcular la tasa a la cual las fuerzas realizan trabajo y el cuerpo incrementa su energía cinética y haciendo uso de las ecuaciones de movimiento, Love [7] muestra que la diferencia entre el trabajo ejecutado por las fuerzas y el incremento en la energía cinética es igual al trabajo de deformación realizado por el cuerpo. En otros términos:

$$(3) \quad \delta W - \iiint \delta T dV = \iiint \begin{pmatrix} \sigma_x \delta \epsilon_x + \\ \sigma_y \delta \epsilon_y + \\ \sigma_z \delta \epsilon_z + \\ \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \\ \tau_{xz} \delta \gamma_{xz} + \\ \tau_{yz} \delta \gamma_{yz} \end{pmatrix} dV$$

En esta expresión, la integral de la derecha indica el valor del trabajo de deformación, el cual es causado por los esfuerzos normales,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , y los tangenciales o de corte,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ , cuando las deformaciones unitarias normales varían en las cantidades  $\delta \epsilon_x$ ,  $\delta \epsilon_y$ ,  $\delta \epsilon_z$  y las de corte en  $\delta \gamma_{xy}$ ,  $\delta \gamma_{xz}$ ,  $\delta \gamma_{yz}$ . Es entonces claro que el trabajo de deformación por unidad de volumen se encuentra dado por el área bajo la curva esfuerzo deformación de un material, como se aprecia en la Figura 2.

Figura 2. Trabajo de deformación



Al reemplazar la ecuación (3) en la expresión (2), se obtiene:

$$(4) \quad \iiint \delta U dV = \iiint (\sigma_x \delta \epsilon_x + \dots) dV + \delta Q$$

Esta ecuación enuncia que la variación en los niveles de energía intrínseca de un cuerpo cuando éste cambia de estado es equivalente a la suma del trabajo de deformación producido durante el proceso más el calor adquirido durante el intervalo. La ecuación (4) es válida para cualquier tipo de material, independientemente de si es o no elástico, isótropo u homogéneo.

Por otra parte, y volviendo al caso de la ingeniería, es evidente que la construcción de una obra cualquiera produce un cambio en los niveles de energía en la naturaleza y específicamente en la zona de influencia de dicha obra. Dicho cambio es una consecuencia del trabajo aplicado por el hombre, el cual produce deformación en el área circundante y calor. Se puede entonces aplicar la ley universal de la conservación de la energía en la forma dada por la ecuación (4) para cuantificar el cambio producido en la naturaleza como un todo debido a la construcción de cualquier obra de ingeniería. La influencia de una obra en el ambiente vendrá entonces automáticamente dada por el valor del cambio que ella ocasiona en su entorno natural o lo que es lo mismo por el valor de la expresión (4). Al valor de este cambio se le da el nombre de *impacto ambiental* producido por la obra.

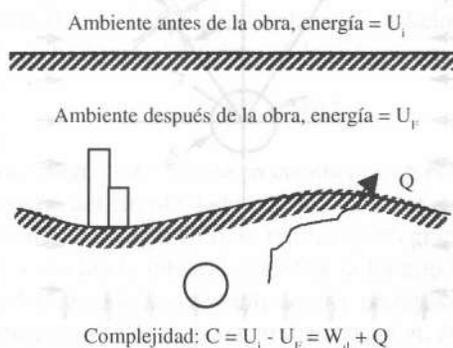
Adicionalmente, la totalidad de problemas que se presentan o se pueden presentar en la ejecución y etapa posterior de una obra dependen de la brusquedad, o mejor, del cambio inducido en la naturaleza por la obra. La única posibilidad de no generar problemas reales o potenciales, nótese que la palabra potencial se refiere a la energía, es no hacer nada. Por tanto, a la ecuación (4) se le puede dar el nombre de Complejidad, expresión esta que fue introducida y cuantificada en términos de un índice por el autor en la Norma de Excavaciones Urbanas de Santa Fe de Bogotá. [11] Es importante aclarar en este momento que a pesar de que la única manera de no afectar a la naturaleza es la de no variar sus niveles energéticos, el desarrollo del hombre implica necesariamente la interacción con la naturaleza y que de otra manera, sin interacción, sería imposible la vida.

Los conceptos anteriores se pueden precisar reescribiendo la ecuación (4) como:

$$(5) \quad C = W_d + Q$$

Donde  $C$  es la Complejidad o Impacto Ambiental,  $W_d$  es el trabajo de deformación y  $Q$  es el calor producido durante el proceso. La Figura 3 aclara estos conceptos.

Figura 3. Energía, ambiente y complejidad



### 3. Complejidad en túneles

Con el fin de representar el comportamiento de un túnel, se seleccionó un modelo elástico, lineal, isótropo, poroso y homogéneo. Un material así definido tiene la gran ventaja de facilitar los cálculos analíticos y de ilustrar cuantitativamente tendencias generales de comportamiento.

La definición de elasticidad implica automáticamente que en un ciclo de carga y descarga del material no hay ganancia o pérdida de calor, en otros términos, que el proceso es adiabático. Además, cuando el incremento de carga o descarga es gradual y se realiza manteniendo el equilibrio térmico con el ambiente, tampoco puede haber ganancia o pérdida de calor. Por tanto, las ecuaciones (4) y (5) se transforman en:

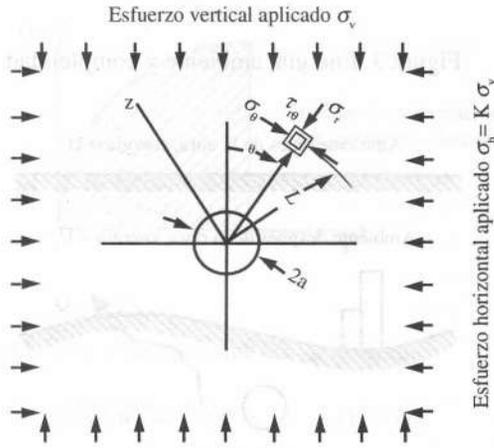
$$(6) \quad C = Wd = \iiint \delta U = \iiint (\sigma_x \delta \epsilon_x + \dots) dV$$

Esta expresión muestra que para materiales elásticos la complejidad o la variación total en la energía intrínseca es equivalente al trabajo de deformación ocurrido en la naturaleza durante el proceso. La ecuación (6) se simplifica teniendo en cuenta que en materiales lineales la variación dada por las cantidades  $\sigma_x \delta \epsilon_x$  se transforma en  $1/2 \sigma_x \epsilon_x$ , con lo que se obtiene:

$$(7) \quad C = Wd = \iiint \delta U = \iiint (1/2 \sigma_x \epsilon_x + \dots) dV$$

La ecuación (7) muestra que para el cálculo de la complejidad es necesario conocer los valores de los esfuerzos y las deformaciones unitarias impuestas al terreno por la obra de ingeniería. Por fortuna, para el caso de los túneles circulares en macizos infinitos y condición de *deformación plana* dichas soluciones se encuentran disponibles en forma explícita en coordenadas cilíndricas como las indicadas en la Figura 4. [2], [4], [9] y [10]

Figura 4. Coordenadas cilíndricas y esfuerzos alrededor de un túnel circular. (Redibujado de [4])



En coordenadas cilíndricas y teniendo en cuenta que el material es isótropo y asumiendo condiciones de deformación plana, la ecuación (7) se expresa así:

$$(8) \quad C = \iiint (1/2(\sigma_r \epsilon_r + \sigma_\theta \epsilon_\theta + \tau_{r\theta} \gamma_{r\theta})) dV$$

Siendo  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\tau_{r\theta}$  los esfuerzos radiales, tangenciales y de corte respectivamente, y  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_\theta$ ,  $\gamma_{r\theta}$  las deformaciones unitarias correspondientes. Recordando que al conocer los esfuerzos, también se conocen las deformaciones, la ecuación (8) puede escribirse sólo en términos de deformaciones unitarias o solo en términos de esfuerzos. Esta última fue la alternativa seleccionada en el presente artículo, para lo cual y teniendo en cuenta la isotropía del material fue necesario recordar que:

$$(9) \quad \begin{aligned} \epsilon_r &= [1/(2G)] [(1-\nu)\sigma_r - \nu\sigma_\theta] \\ \epsilon_\theta &= [1/(2G)] [(1-\nu)\sigma_\theta - \nu\sigma_r] \\ \gamma_{r\theta} &= (1/G) \tau_{r\theta} \end{aligned}$$

donde  $G = E/[2(1+\nu)]$ , módulo de rigidez, y  $\nu$  es la relación de Poisson. Reemplazando la ecuación (9) en la (8) se obtiene:

$$(10) \quad C = 1/(2G) \iiint \{ [(1-\nu)/2]\sigma_r^2 - \nu\sigma_r\sigma_\theta + [(1-\nu)/2]\sigma_\theta^2 + \tau_{r\theta}^2 \} dV$$

Esta ecuación expresa la complejidad o el cambio en la energía intrínseca como la integral de una función cuadrática de los esfuerzos, la cual es siempre positiva con el fin de asegurar la estabilidad del cuerpo en cuestión. Con el fin de evaluar dicha integral y como se explicó antes, es necesario conocer el valor de los esfuerzos en los alrededores del túnel los cuales tienen las siguientes expresiones para el caso de deformación plana [2]:

$$(11) \quad \sigma_r = 0.5\sigma_v[(1+K)(1-a^2/r^2) + (1-K)(1-4a^2/r^2 + 3a^4/r^4)\cos 2\theta]$$

$$\sigma_\theta = 0.5\sigma_v[(1+K)(1+a^2/r^2) - (1-K)(1+3a^4/r^4)\cos 2\theta]$$

$$\tau_{r\theta} = 0.5\sigma_v[(K-1)(1+2a^2/r^2 - 3a^4/r^4)\cos 2\theta]$$

Donde  $\sigma_v$  es el esfuerzo vertical existente,  $K$  es la relación entre el esfuerzo horizontal y el vertical,  $a$  es el radio del túnel, y  $r$  y  $\theta$  son las coordenadas. Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que en coordenadas cilíndricas el diferencial de volumen es:

$$(12) \quad dV = r dr d\theta dz$$

Para fijar los límites de integración se tiene en cuenta que en el sentido radial es necesario evaluar entre el valor del radio del círculo dado por  $a$ , y un valor  $pa$  hasta donde se considere la zona de influencia del túnel. Para el ángulo, se realiza la integración entre  $0$  y  $2\pi$ , mientras que para la profundidad, se evalúa la integral entre  $0$  y la longitud considerada del túnel,  $L$ . Finalmente y con base en las consideraciones anteriores y reemplazando las expresiones (11) y (12) en la (10), se obtiene como valor de la integral en cuestión, el valor de la complejidad o de la variación de la energía intrínseca o del impacto ambiental, la cantidad:

$$(13) \quad C = [1/(4G)](\pi a^2 L \sigma_v^2) [(1+K)^2 f_1(p) g_1(v) + (1-K)^2 f_2(p) g_2(v)]$$

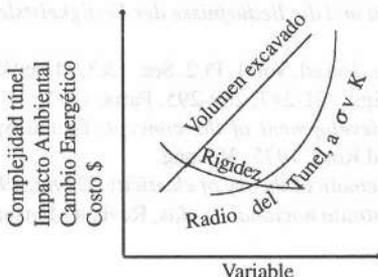
Donde  $f_1(p)$  y  $f_2(p)$  dependen del radio de influencia seleccionado,  $pa$ , y siempre alcanzan un valor constante, mientras que  $g_1(v)$  y  $g_2(v)$  dependen exclusivamente de la relación de Poisson. La expresión (13) puede escribirse en términos del volumen excavado,  $V = \pi a^2 L$ , como

$$(14) \quad C = [1/(4G)](V \sigma_v^2) [(1+K)^2 f_1(p) g_1(v) + (1-K)^2 f_2(p) g_2(v)]$$

#### 4. Discusión y resultados

La Figura 5 muestra la variación o influencia de las distintas variables en la complejidad de un túnel circular. Las abscisas muestran la variable en cuestión, rigidez, radio del túnel, esfuerzo vertical, etc., y las ordenadas indican la complejidad o el impacto ambiental o el cambio energético. Es muy importante notar que el flujo de dinero o costo siempre se dirige en sentido contrario al flujo de energía. Por ejemplo, al obtener combustibles para los automóviles es necesario enviar dinero al proveedor. Por esta razón, las ordenadas de la Figura 5 representan automáticamente el costo del túnel.

Figura 5. Influencia de distintos parámetros en la complejidad de túneles



En la Figura 5 se observa que por ejemplo la complejidad y por tanto el costo de las excavaciones disminuye al aumentar la rigidez de los materiales térreos encontrados. Además, la complejidad se incrementa de manera cuadrática al aumentar tanto el radio de la excavación como el esfuerzo vertical y el parámetro K. Adicionalmente, el volumen excavado incrementa linealmente la complejidad y por tanto el costo del túnel, condición que se demuestra analíticamente con los resultados del presente artículo.

Por otra parte, Hoek menciona que la circunstancia de que el valor de los esfuerzos radiales, tangenciales y de corte en el borde de un túnel,  $r=a$ , sea independiente del radio excavado según la ecuación (11), causó mucha confusión en el pasado por que podía pensarse que los problemas en los túneles no se incrementaban al aumentar el tamaño de la excavación, conclusión esta opuesta a la experiencia práctica. [2] Hoek atribuye esta aparente contradicción al hecho de que en la realidad los materiales no son elásticos y están fracturados. Sin embargo, los resultados obtenidos aquí y expresados en la ecuación (13) muestran que incluso en materiales homogéneos, no fisurados y elásticos, los problemas o la complejidad se incrementan con el cuadrado del radio o diámetro de la excavación. El aumento lineal de la complejidad con el incremento del volumen excavado encontrado en el caso de túneles circulares se encontró también en las excavaciones urbanas a cielo abierto. [11] Es bastante posible que en el caso de túneles de sección no circular se repita este resultado.

## 5. Conclusiones

Los conceptos cambio energético, complejidad, impacto ambiental y costo son análogos. La cuantificación exacta del impacto ambiental es posible utilizando solamente la primera ley de la termodinámica y las leyes de comportamiento mecánico de los materiales involucrados. En el caso de túneles circulares y materiales sencillos, la complejidad depende directamente del volumen excavado, los esfuerzos aplicados y el coeficiente de presión lateral, entre otros. Para el caso de materiales más complejos, es necesario tener en cuenta aspectos tales como el diaclasamiento, la dirección general de los estratos, la presión de poros y la heterogeneidad. Futuras investigaciones deben realizarse en esa dirección.

## Referencias

- [1] Hamilton, W.R. *On a general method in dynamics*. Trans. Roy. Soc. Pt. II, 247-257, London, 1834.
- [2] Hoek, E. and E.T. Brown. *Excavaciones subterráneas en roca*. México: Mc-Graw Hill, 1985. 634 pág.
- [3] Joule, J.P. *On the calorific effects of magneto-electricity, and on the mechanical value of heat*. *Phil. Magazine*. Ser. 3 vol. XXIII págs. 263, 347 and 435. London, 1843.
- [4] Kirsch, G. *Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre*. Veit: VDI, Vol. 42-28, 797-807. 1898.
- [5] Lagrange, J.L. *Mécanique Analytique*. 2nd ed, Vol. 1, Pt.2, Sec. 1&3, Mme Ve Courcier, Imprimeurs-Librairie pour les Mathématiques, págs. 221-247, 289-295. Paris, 1811.
- [6] Lindsey, R.B. *Energy: Historical development of the concept*. Edited by R.B. Lindsey Brown University. Dowden: Hutchinson and Ross, 1975. 369 pág.
- [7] Love, A.E.H. *A treatise on the Mathematical theory of elasticity*. Dover, 1944. 643 pág.
- [8] Notivías. *Organo informativo del instituto nacional de vías*, Revista Mensual, Año 3, No. 30, Santa Fe de Bogotá, julio 1997.

- [9] Obert, L. and W.I. Duvall. *Rock mechanics and the design of structures in rock*. New York: John Wiley, 1967.
- [10] Poulos, H.G. and E.H. Davis. *Elastic solutions for soil and rock mechanics*. New York: John Wiley, 1974. 411 pág.
- [11] Sociedad Colombiana de Geotecnia y Departamento Administrativo de Planeación Distrital. Norma de excavaciones de Santa Fe de Bogotá. Santa Fe de Bogotá: 1996.

## Testing and Evaluation of Out-of-Plane Strength of Unreinforced Masonry Infill

Abstract: The out-of-plane strength of unreinforced masonry infill is tested under various loading conditions. The test results are compared with the theoretical predictions based on the elastic theory of plates. The test results show that the out-of-plane strength of unreinforced masonry infill is significantly lower than the theoretical predictions. The test results also show that the out-of-plane strength of unreinforced masonry infill is significantly lower than the in-plane strength of unreinforced masonry infill.

Keywords: Out-of-plane strength, unreinforced masonry infill, testing, evaluation, elastic theory of plates.

The out-of-plane strength of unreinforced masonry infill is tested under various loading conditions. The test results are compared with the theoretical predictions based on the elastic theory of plates. The test results show that the out-of-plane strength of unreinforced masonry infill is significantly lower than the theoretical predictions. The test results also show that the out-of-plane strength of unreinforced masonry infill is significantly lower than the in-plane strength of unreinforced masonry infill.

The out-of-plane strength of unreinforced masonry infill is tested under various loading conditions. The test results are compared with the theoretical predictions based on the elastic theory of plates. The test results show that the out-of-plane strength of unreinforced masonry infill is significantly lower than the theoretical predictions. The test results also show that the out-of-plane strength of unreinforced masonry infill is significantly lower than the in-plane strength of unreinforced masonry infill.

The out-of-plane strength of unreinforced masonry infill is tested under various loading conditions. The test results are compared with the theoretical predictions based on the elastic theory of plates. The test results show that the out-of-plane strength of unreinforced masonry infill is significantly lower than the theoretical predictions. The test results also show that the out-of-plane strength of unreinforced masonry infill is significantly lower than the in-plane strength of unreinforced masonry infill.