

Análisis lineal time-history de edificios mediante funciones de transferencia derivadas de vibraciones ambientales.

Linear time-history analysis of buildings using transfer functions derived from ambient vibrations

Doctorando:

Francisco Alberto CALDERÓN

<https://orcid.org/0000-0001-8987-3905>

CeReDeTeC – Facultad Regional Mendoza – Universidad Tecnológica Nacional.

francisco.calderon@frm.utn.edu.ar

Director:

Gustavo PALAZZO

Resumen

Los modelos de elementos finitos (MEF) se utilizan ampliamente para evaluación sísmica de estructuras; sin embargo, su precisión se ve afectada por las incertidumbres en las propiedades de materiales, geometría, condiciones del suelo, interacción suelo-estructura, etc... y su desarrollo y calibración son laboriosos. Este estudio propone una alternativa rápida para edificios existentes basada únicamente en mediciones de vibraciones ambientales. El método determina la función de transferencia del edificio a partir de registros sincronizados del suelo y la cubierta, y la utiliza para predecir la respuesta estructural a la excitación dinámica mediante análisis en el dominio de la frecuencia. La metodología se aplicó a un edificio instrumentado de mampostería confinada y hormigón armado. Las funciones de transferencia obtenidas a partir de las vibraciones ambientales se utilizaron para predecir la respuesta a tres terremotos registrados y se compararon con un modelo de elementos finitos calibrado y con la respuesta real medida. El modelo de vibración ambiental con función de transferencia (TF-AVT) propuesto mostró una buena concordancia con las mediciones, con coeficientes de correlación de Pearson que oscilaron entre 0,847 y 0,987 y errores en el desplazamiento máximo inferiores al 10 % en todos los casos. Su rendimiento fue comparable al del método de elementos finitos calibrado, requiriendo un esfuerzo de modelado considerablemente menor. Estos resultados indican que las funciones de transferencia derivadas de las vibraciones ambientales pueden proporcionar una herramienta práctica y eficiente para la evaluación rápida de la respuesta sísmica lineal de edificios existentes.

Palabras clave Función de transferencia, Time History lineal, Vibraciones ambientales, Terremoto.

Abstract

Finite element models (FEMs) are widely used to evaluate the seismic response of structures; however, their accuracy is affected by uncertainties in material properties, geometry, soil conditions, and soil-structure interaction, and their development and calibration are often time-consuming. This study proposes a rapid alternative for existing buildings based solely on ambient vibration measurements. The method determines the building transfer function from synchronized ground and roof recordings and uses it to predict the structural response to dynamic excitation through frequency-domain analysis. The methodology was applied to an instrumented confined-masonry and reinforced-concrete building. Transfer functions obtained from ambient vibrations were used to predict the response to three recorded earthquakes and were compared with both a calibrated finite element model and measured data. The proposed transfer-function ambient-vibration (TF-AV) model showed good agreement with the measurements, with Pearson correlation coefficients ranging from 0.847 to 0.987 and errors in peak displacement below 10% for all cases. Its performance was comparable to that of the calibrated FEM while requiring substantially less computational effort. These results indicate that transfer functions derived from ambient vibrations can provide a practical and efficient tool for rapid linear seismic-response assessment of existing buildings.

Keywords: Transfer Function, Linear Time History, Ambient Vibrations, Earthquake.

Introducción

Los modelos de elementos finitos (MEF) constituyen la herramienta más utilizada para evaluar la respuesta sísmica de las estructuras. Sin embargo, su precisión depende de la correcta representación de muchos parámetros (propiedades de los materiales, geometría, condiciones de contorno, suelo, interacción suelo-estructura, etc...). Además, el desarrollo y la calibración requieren un considerable esfuerzo computacional y experimental. En edificios existentes, esta tarea resulta aún más compleja, ya que es necesario estimar con fiabilidad las frecuencias naturales, los modos de vibración, los coeficientes de amortiguamiento y las condiciones de apoyo. La necesidad de métodos de evaluación sísmica rápidos y confiables es particularmente importante en regiones con un gran número de edificios existentes. En la provincia de Mendoza (Argentina), aproximadamente 1.500 edificios escolares y cerca de 500.000 estudiantes; sin embargo, solo unos 400 fueron diseñados con normativas sísmicas modernas (Bay et al. 2019). En consecuencia, más de mil edificios podrían requerir una evaluación detallada de su vulnerabilidad o intervenciones, lo cual resulta ser preocupante (Rodgers, 2012; World Bank, 2019). En este contexto, realizar un análisis detallado mediante MEF para cada edificio resulta impracticable. Aunque se han desarrollado métodos de evaluación rápida, como inspecciones visuales e índices de vulnerabilidad (FEMA, 2015), estos proporcionan clasificaciones cualitativas y no permiten estimar directamente la respuesta dinámica de la estructura. Este trabajo propone una metodología alternativa basada en mediciones experimentales. La función de transferencia (FT) del edificio se identifica a partir de registros de vibración ambiental y posteriormente se utiliza para predecir la respuesta estructural frente a un movimiento sísmico dado. Mediante el análisis en el dominio de la frecuencia y la correspondiente transformación inversa al dominio del tiempo, es posible obtener aceleración, velocidad y desplazamiento. De este modo, la metodología permite realizar análisis dinámicos elásticos lineales a partir de datos experimentales, constituyendo una alternativa práctica y computacionalmente eficiente para la evaluación sísmica de grandes inventarios de edificios. Los métodos previamente propuestos para predecir la respuesta estructural mediante funciones de transferencia suelen identificar la FT a partir de registros sísmicos obtenidos en edificios instrumentados (Wei et al. ,2022). Aunque estos enfoques pueden ofrecer una elevada precisión, requieren instrumentación permanente y la ocurrencia de uno o varios terremotos para caracterizar las propiedades dinámicas de cada estructura. Estas condiciones limitan significativamente su aplicación a gran escala. A diferencia de estos métodos, la metodología propuesta obtiene la función de transferencia exclusivamente a partir de mediciones de vibración ambiental, lo que permite su aplicación a prácticamente cualquier edificio existente sin necesidad de registros sísmicos previos. A diferencia de los MEF, el procedimiento identifica directamente un modelo dinámico fundamentado en mediciones experimentales, eliminando la necesidad de construir y calibrar un modelo numérico antes de estimar la respuesta sísmica.

Desarrollo

La respuesta elástica de una estructura lineal sometida a una excitación dinámica arbitraria puede evaluarse tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. Para sistemas lineales, la respuesta en el dominio del tiempo se obtiene mediante la integral de convolución (Ec. (1)), mientras que, para un sistema de un grado de libertad (SDOF), la solución puede expresarse mediante la integral de Duhamel (Ec. (2)) (Chopra, 2014).

$$u(t) = \int_0^t p(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

$$u(t) = \frac{1}{mf_D} \int_0^t p(\tau) e^{-\zeta f_n(t-\tau)} \text{sen}[f_D(t - \tau)] d\tau \quad (2)$$

En el dominio de la frecuencia, la convolución se obtiene multiplicando la transformada de Fourier de la excitación por la función de respuesta en frecuencia de la estructura. La transformada de Fourier $P(f)$ de la función de excitación $p(t)$ se define como:

$$P(f) = \mathcal{F}[p(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{-ift} dt \quad (3)$$

Luego, la transformada de Fourier $U(f)$ de la respuesta estructural $u(t)$ viene dada por:

$$U(f) = H(f) P(f) \quad (4)$$

Donde la función de respuesta en frecuencia ($H(f)$) describe la respuesta del sistema (edificio) a una excitación armónica en el dominio de la frecuencia. Finalmente, la solución deseada $u(t)$ se obtiene mediante la transformada inversa de Fourier de $U(f)$.

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(f) P(f) e^{ift} df \quad (5)$$

donde $U(f)$ es la transformada de Fourier de la respuesta estructural, $H(f)$ es la función de respuesta en frecuencia y $P(f)$ es la transformada de Fourier de la excitación, todas expresadas en el dominio de la frecuencia (Chopra, 2014). Para series temporales discretas, la función de transferencia se estima comúnmente en el dominio de la frecuencia utilizando los estimadores H1 o H2 basados en densidades espectrales de potencia. En este estudio, se adoptó el estimador H1 debido a que se supone que la excitación ambiental contiene ruido de medición principalmente en la salida. Por otro lado, una forma equivalente de estimar la función de respuesta en frecuencia es mediante la función de transferencia (FT) determinada por la ecuación (6) o la ecuación (7). Donde $S_{yx} = S_{xy}$ es el espectro de densidad de potencia cruzado entre la salida $y(t)$ y la entrada $x(t)$; S_{xx} es el espectro de densidad de potencia de la señal de entrada y S_{yy} es el espectro de densidad de potencia de la señal de salida. Estos estimadores dan buenos resultados para el caso de señales con ruido (Bendat & Piersol, 2010).

$$H_1(f) = \frac{S_{yx}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (6)$$

$$H_2(f) = \frac{S_{yy}(f)}{S_{xy}(f)} \quad (7)$$

La metodología propuesta se basa en la suposición de que la función de transferencia (FT) de un edificio existente puede identificarse a partir de mediciones de vibraciones ambientales. Se requieren dos registros de aceleración sincronizados: uno adquirido en la superficie del suelo cerca de la estructura, que representa el movimiento de entrada, y otro adquirido en la parte superior del edificio, que representa la respuesta estructural. Utilizando estas señales sincronizadas, la función de transferencia del edificio se estima a partir del estimador H1 o H2 (Ecs. (6) y (7)). A diferencia de los modelos de elementos finitos, la metodología propuesta no requiere la definición de la geometría, las propiedades de los materiales, las condiciones de contorno ni la calibración. En cambio, estas características están implícitamente incorporadas en la función de transferencia identificada a partir de las mediciones de vibraciones ambientales, que captura el comportamiento dinámico medido de la estructura.

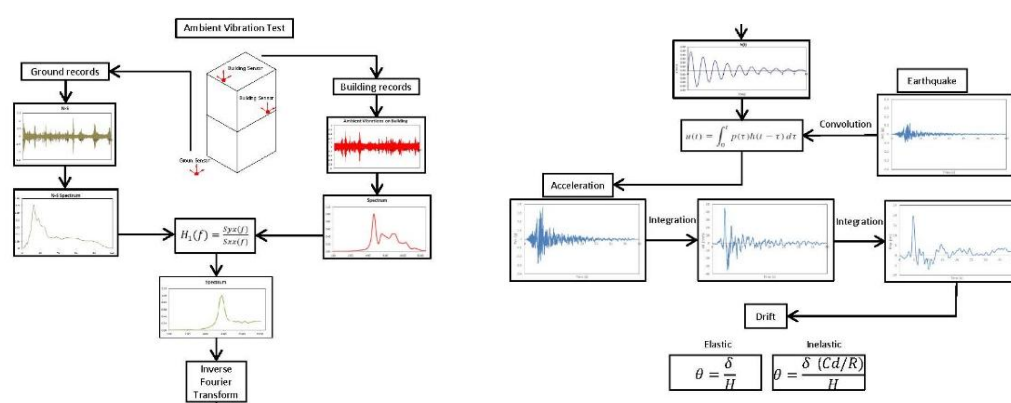


Figura 1. Esquema del método propuesto.

En consecuencia, la función de transferencia identificada puede considerarse un modelo dinámico basado en mediciones que permite predecir la respuesta estructural lineal a excitaciones sísmicas arbitrarias. Esta característica hace que la metodología propuesta sea particularmente adecuada para la evaluación sísmica rápida de grandes inventarios de edificios existentes, donde el desarrollo de modelos computacionales suele ser poco práctico. Una vez identificada la función de transferencia, se obtiene la función de respuesta a un pulso unitario correspondiente, $h(t)$, aplicando la transformada inversa de Fourier a $H(f)$. La respuesta estructural a cualquier excitación dinámica arbitraria, como un terremoto, se puede calcular mediante la convolución del movimiento de entrada con la función de respuesta a un pulso en el dominio del tiempo. El flujo

de trabajo completo de la metodología propuesta se ilustra en la Figura 1. Finalmente, la respuesta de aceleración calculada se integra para obtener los historiales de velocidad y desplazamiento correspondientes en las ubicaciones donde se instalaron los acelerómetros. Se desarrolló una rutina de MATLAB para implementar el procedimiento propuesto utilizando la función integrada *tffestimate* (The MathWorks, 2022), que estima la función de transferencia a partir de las densidades espectrales de potencia cruzada y automática calculadas mediante el método de Welch (Welch, 1967). Antes de estimar la función de transferencia, tanto los registros de aceleración de entrada como de salida se filtraron paso banda alrededor de la frecuencia fundamental del edificio en la dirección analizada. La frecuencia fundamental se puede determinar utilizando MATLAB o software libre como Geopsy. En este estudio, se adoptó un filtro paso banda Butterworth de sexto orden con frecuencias de corte que van de $0,5f$ a $1,5f$, donde f representa la frecuencia fundamental de la estructura. Para el edificio del caso de estudio, la frecuencia fundamental identificada fue de 7,67 Hz, lo que resultó en un rango de filtrado de 4 a 10 Hz.

Descripción del Edificio del Caso de Estudio

El edificio considerado en este estudio es uno de los tres edificios idénticos que conforman las residencias universitarias de la UTN- FR Mendoza. Mendoza se ubica en una de las regiones de mayor riesgo sísmico de Argentina donde viven actualmente a más de 1.000.000 de personas. El sistema estructural consta de muros de mampostería confinada y losas de hormigón armado. Dos de estos edificios se instrumentaron con acelerómetros para realizar estudios comparativos, ya que uno cuenta con aislamiento sísmico (Tronello & Sarrasin, 2012; Stuardi et al., 2007). Los edificios se construyeron sobre tres niveles de losas de hormigón armado. Se desarrolló un modelo de elementos finitos en SAP2000 (SAP2000, 2008). Los muros y forjados se modelaron con elementos de lámina, las vigas y columnas con elementos de pórtico y las cimentaciones como apoyos fijos. El hormigón se modeló con un módulo de Young (E_c) de 27.500 MPa y una masa de 2.300 kg/m³. La mampostería se modeló con un módulo de Young (E_m) de 2.750 MPa y una masa de 1.600 kg/m³.

Medición de vibraciones ambientales y modelos de función de transferencia

El 31 de julio de 2024 se realizaron pruebas de vibración ambiental (PVA) para generar un modelo de función de transferencia. Para ello, se tomaron dos puntos de medición: uno en la azotea del edificio y otro en el suelo, a unos 5 m del mismo. Se utilizaron acelerómetros Kinematics Basalt, equipados con un sensor triaxial interno (Kinematics, 2004). Estos sensores permiten configurar el rango de aceleración y la frecuencia de muestreo, con un coeficiente de amortiguación del 70 % y una frecuencia natural de 200 Hz. Las mediciones se realizaron a una frecuencia de muestreo de 200 Hz. Los acelerómetros se configuraron para medir de forma continua y registraron datos cada 10 minutos. La duración de la medición en cada punto (suelo y edificio) fue de aproximadamente 120 minutos. Se seleccionaron tres sismos para realizar el análisis de la historia temporal del edificio en SAP2000 y el modelo TF-AVT (prueba de vibración ambiental con función de transferencia). La Tabla 1 resume las características de los sismos considerados en este estudio. Dos de estos sismos son de origen subductivos frente a la costa de Chile, con una profundidad de aproximadamente 22 km (U.S.G.S., 2010; U.S.G.S., 2015). El tercero es un sismo cortical (falla inversa) con una profundidad de 28 km, ubicado en la provincia de San Juan, Argentina (U.S.G.S., 2009). El modelo TF-AVT se desarrolló con base en la medición de vibraciones ambientales.

Tabla 1. Registros sísmicos utilizados.

Sismo	Distancia	Mw	Fecha	PGA
San Juan 2009	117	5.3	03/11/2009	12.55
Chile 2010	515	8.8	27/02/2010	16.19
Chile 2015	302	8.3	09/16/2015	24.07

Resultados

Para validar la metodología propuesta, las respuestas estructurales obtenidas por el modelo TF-AVT se compararon con el modelo de elementos finitos y las mediciones reales obtenidas durante los tres sismos. Los resultados obtenidos mediante el modelo TF-AVT (aceleraciones) se integraron numéricamente dos veces para obtener los desplazamientos y, posteriormente, se realizó una corrección de la línea base. Luego, los desplazamientos se compararon con los resultados del modelo de elementos finitos. La Figura 2 muestra el desplazamiento del modelo AVT y el desplazamiento real (calculado mediante la integración de la aceleración medida) para el sismo de Chile de 2010. Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (R) para cuantificar la concordancia entre las predicciones del modelo AVT y los desplazamientos medidos. Los resultados muestran una alta correlación con las mediciones, con un R de Pearson de 0,847 para el terremoto de San Juan de

2009, de 0,987 para el de Chile de 2010 y de 0,984 para el de Chile de 2015 (Hinkle, 2003). El terremoto de San Juan de 2009 mostró desplazamientos de 0,073 cm en una dirección y 0,0652 cm en la otra, determinados mediante la integración de las aceleraciones medidas. El modelo de elementos finitos (MEF) mostró desplazamientos de 0,07 cm y 0,061 cm, mientras que el modelo TF-AVT mostró desplazamientos de 0,072 cm en ambas direcciones. El modelo MEF tuvo un error promedio del 5,25 %, y el modelo TF-AVT tuvo un error promedio del 5,65 %. El terremoto de Chile de 2010 produjo desplazamientos de 4,29 cm en una dirección y 3,84 cm en la otra, determinados mediante la integración de las aceleraciones medidas. El modelo MEF mostró desplazamientos de 4,73 cm y 4,15 cm, mientras que el modelo TF-AVT mostró desplazamientos de 4,73 cm en una dirección y 4,15 cm en la otra. El modelo de elementos finitos (MEF) presentó un error promedio del 9,2 %, mientras que el modelo TF-AVT tuvo un error promedio del 9,25 %. El terremoto de Chile de 2015 produjo desplazamientos de 1,47 cm en una dirección y 1,43 cm en la otra, determinados mediante la integración de las aceleraciones medidas. El modelo MEF mostró desplazamientos de 1,52 cm y 1,47 cm, mientras que el modelo TF-AVT mostró desplazamientos de 1,56 cm en ambas direcciones. El modelo MEF presentó un error promedio del 3,10 %, y el modelo TF-AVT tuvo un error promedio del 7,60 %.

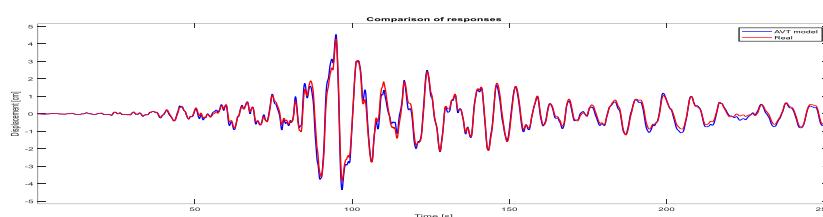


Figura 2. Comparación entre las series temporales de desplazamiento medidas y predichas por TF-AV (Chile 2010). El coeficiente de correlación de Pearson indica una excelente concordancia ($R=0,987$).

Conclusiones

Este estudio propuso y validó una metodología para predecir la respuesta sísmica lineal de edificios existentes utilizando una función de transferencia obtenida a partir de mediciones de vibración ambiental. El modelo de Función de Transferencia de Vibración Ambiental (TF-AVT) propuesto se validó con registros reales de terremotos y un modelo de elementos finitos calibrado desarrollado en SAP2000. Los resultados demostraron que la metodología propuesta reproduce con precisión la respuesta estructural en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento, alcanzando coeficientes de correlación de Pearson entre 0,847 y 0,987 y errores de desplazamiento inferiores al 10 % para la respuesta máxima. La concordancia general obtenida es comparable a la lograda con el modelo de elementos finitos calibrado. Una de las principales ventajas de la metodología propuesta es la considerable reducción del tiempo necesario para el modelado y análisis estructural. A diferencia de los enfoques convencionales de elementos finitos, el modelo TF-AVT no requiere información detallada sobre la geometría estructural, las propiedades de los materiales, las condiciones de contorno, las condiciones del suelo ni calibración. En cambio, el comportamiento estructural se representa mediante una función de transferencia identificada directamente a partir de mediciones de vibración ambiental, lo que hace que la metodología sea particularmente atractiva para la evaluación sísmica rápida de grandes inventarios de edificios existentes. La metodología es aplicable a análisis elásticos lineales de estructuras cuya respuesta sísmica está regida principalmente por el modo de vibración fundamental. Dado que la función de transferencia se identifica a partir de mediciones de vibración ambiental, los cambios en las propiedades dinámicas causados por las condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad o la humedad del suelo, se incorporan naturalmente al modelo identificado (Calderón et al, 2015). Sin embargo, la metodología no pretende reproducir el comportamiento estructural no lineal asociado con terremotos severos o daños estructurales, y se requiere investigación adicional para evaluar su aplicabilidad a edificios más altos o estructuras con una participación significativa de modos superiores. Finalmente, aunque el presente estudio estimó la función de transferencia en una sola ubicación, la metodología puede extenderse fácilmente a múltiples puntos de medición en toda la estructura. Esto permitiría evaluar el comportamiento dinámico local, la respuesta torsional, la irregularidad vertical y la respuesta sísmica de componentes no estructurales críticos. Además, al combinar los desplazamientos lineales estimados con factores de amplificación de desplazamiento basados en códigos y coeficientes de modificación de respuesta, como la relación C_d/R adoptada en las normas de diseño sísmico (ASCE/SEI, 2022), la metodología propuesta también podría proporcionar estimaciones rápidas de la deriva entre pisos, ofreciendo una herramienta práctica para evaluaciones de vulnerabilidad sísmica a gran escala de los parques de edificios existentes.

Referencias

- ASCE/SEI. (2022). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures* (ASCE/SEI 7-22). American Society of Civil Engineers.
- Bay, C., Palazzo, G., & Prados, J. (2019). Diseño basado en desplazamiento para disipadores de energía empleado en refuerzo de edificios escolares. *Mecánica Computacional*, 37, 129–138.
- Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2010). *Random data: Analysis and measurement procedures* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Calderón, F., Palazzo, G., Roldan, V., Deraemaeker, A., & Tondreau, G. (2015). Changes of dynamic properties in an ancient masonry building due to environmental conditions. En *Proceedings of the International Operational Modal Analysis Conference* (Vol. 112, pp. 313–321). IOMAC 2015.
- Chopra, A. K. (2014). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (4th ed.). Pearson Education Limited.
- Federal Emergency Management Agency. (2015). *Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A handbook* (FEMA P-154, 3rd ed.). U.S. Department of Homeland Security.
- Hinkle, D. E., Wiersma, W., & Jurs, S. G. (2003). *Applied statistics for the behavioral sciences* (5th ed.). Houghton Mifflin.
- Kinematics. (2004). *Kinematics strong motion analysis*.
- Rodgers, J. E. (2012). Why schools are vulnerable to earthquakes. En *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal.
- Stuardi, J., Massa, J., & Giró, J. (2007). Measured and predicted seismic response of two similar buildings, one with rigid foundation and the other with a base control system. *Mecánica Computacional*, 26, 2870–2880.
- The MathWorks, Inc. (2022). *MATLAB* (Version 9.13.0 [R2022b]) [Computer software]. MathWorks.
- Tornello, M. E., & Sarrazin, M. (2012). Base-isolated building with high-damping spring system subjected to near-fault earthquakes. *Earthquakes and Structures*, 3(3), 315–337. <https://doi.org/10.12989/eas.2012.3.3.315>
- U.S. Geological Survey. (2010). *Chile—Bio-Bio earthquake*. Earthquake Hazards Program. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official20100227063411530_30
- U.S. Geological Survey. (2015). *Chile—Illapel earthquake*. Earthquake Hazards Program. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20003k7a>
- U.S. Geological Survey. (2009). *San Juan, Argentina earthquake*. Earthquake Hazards Program. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000guv1>
- Wei, L., Dong, Y., & Tian, H. (2022). Prediction of structural dynamic response based on transfer function. *Vibroengineering PROCEDIA*, 43, 34–38. <https://doi.org/10.21595/vp.2022.22588>
- Welch, P. D. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), 70–73. <https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>
- World Bank. (2019). *Fragility and vulnerability assessment guide*. Global Program for Safer Schools.
- SAP2000. (2008). *SAP2000 structural analysis program* [Computer software]. Computers and Structures, Inc.