Edición Especial,

AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADA

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Boletín No. 4

POLITÉCNICO COLOMBIANO
JAIME ISAZA CADAVID

Calidad
académica y humana

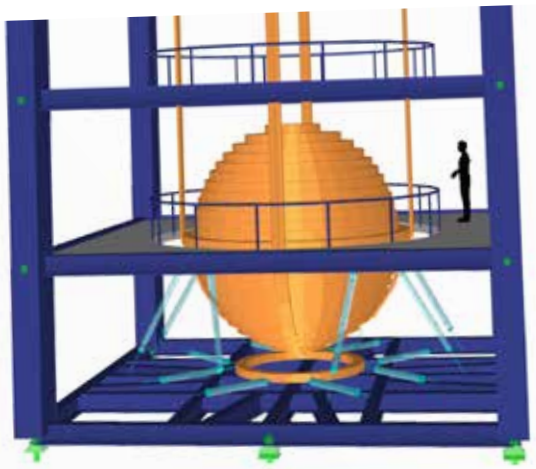
GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA

UNIDOS

VIGILADA MINEDUCACIÓN

AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADA

Por
Giovanni Martínez Martínez
Ingeniero Civil, Especialista en Estructuras, Magister en Ingeniería Sismoresistente, Candidato a Doctor en Ingeniería Civil, línea Ingeniería Sísmica
gjmartinez@elpoli.edu.co



Introducción

Las cargas que generan los eventos sísmicos y los fuertes vientos son fuerzas de la naturaleza que someten a las obras civiles a situaciones extremas, lo que provoca eventualmente la falla de las estructuras y en muchas ocasiones, la pérdida de vidas humanas.

Para enfrentar estas fuerzas de carácter aleatorio y de difícil predicción, la ingeniería estructural plantea normativas de diseño y construcción de obligatorio cumplimiento en la mayoría de los países del mundo, que permiten que las estructuras puedan resistir de manera adecuada las fuerzas impuestas. Y como la historia lo ha demostrado, algunas veces un buen diseño no es suficiente, por lo que la ingeniería sismoresistente desarrolla nuevas metodologías y dispositivos que ayuden a proteger aún más a las estructuras cuando se ven sometidas a acciones como los sismos y los vientos.

Para afrontar estos retos, aparecen mecanismos como los amortiguadores y controladores, agrupados como dispositivos pasivos, activos, semiactivos e híbridos, con diseños innovadores que contribuyen en gran medida a dar mayor seguridad y confianza a nuestras obras civiles.

Los amortiguadores pasivos son mecanismos externos que no necesitan de ninguna fuente de energía externa para su funcionamiento, y en ese punto radica su principal fortaleza. Este tipo de dispositivo refleja una porción de la energía del sismo que de otra forma hubiera sido disipada por la estructura en forma de daño, mediante un comportamiento inelástico. Entre los amortiguadores pasivos, se encuentran los amortiguadores de masa sintonizada, objeto de estudio.

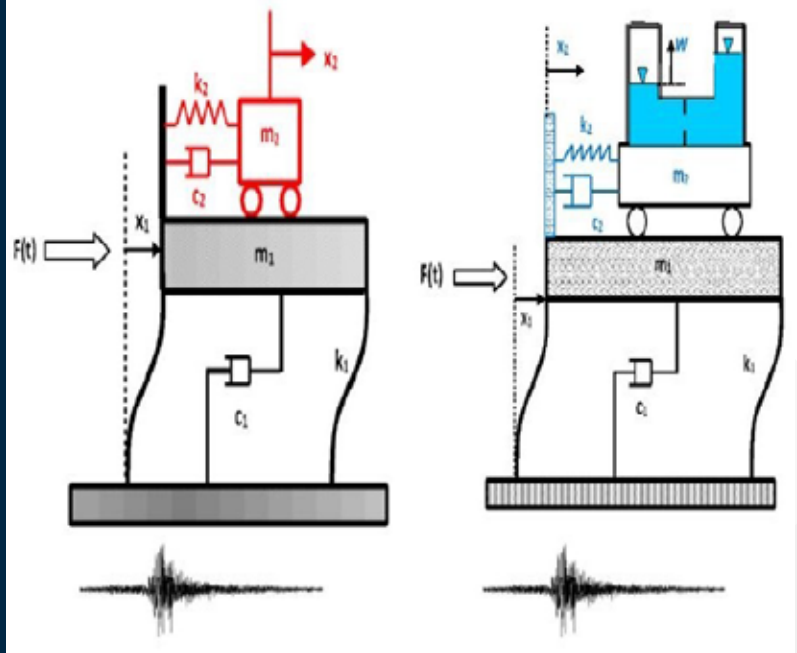
Amortiguador de masa sintonizada pasivo

El amortiguador pasivo de masa sintonizada o TMD (Tuned Mass Damper), es un dispositivo que puede ser modelado como un sistema de dos grados de libertad, el cual consiste básicamente en una masa unida a un resorte y a un amortiguador, cuyo propósito es atenuar las vibraciones y desplazamientos laterales de la estructura, en especial cuando el TMD se sincroniza con la frecuencia natural de la estructura.

La frecuencia natural del amortiguador TMD se diseña lo más cerca posible de la frecuencia natural del sistema principal (edificio, torre de energía, puente, etc.) provocando que el amortiguador vibre en resonancia, disipando la energía absorbida a través de los mecanismos propios del TMD. En resumen, los TMD sólo pueden ser diseñados a una sola frecuencia estructural, lo que constituye su principal desventaja. Este problema se puede subsanar en gran parte, ubicando varios TMD en diferentes posiciones y alturas, logrando con esto, tener varios TMD sintonizados a diferentes frecuencias.

La masa contenedora puede ser sólida o líquida y el recipiente contenedor de variada geometría. Entre los dispositivos de masa líquida se encuentran los TLCD (Tuned Liquid Column Damper), en la cual el tanque receptor tiene forma de U y los TLSD (Tuned Liquid Sloshing Damper), cuyo tanque receptor tiene geometría rectangular.

En la figura 1 se muestra la representación básica de un TMD pasivo, de donde se desprende el modelo matemático básico antes de incursionar en sistemas de varios grados de libertad. La estructura es un sistema de dos grados de libertad, donde la estructura principal con su masa, rigidez y amortiguamiento está unida a otro sistema (masa amortiguadora) con sus propias características. En la figura 1(a) la masa superior es sólida, comúnmente llamado TMD, y en la figura 1(b) la masa superior es líquida, con el tanque receptor en forma de U, más conocido como TLCD. En el TLCD, el amortiguamiento se presenta cuando el líquido en su recorrido dentro del recipiente se ve abruptamente frenado por una válvula de control en la sección horizontal.



(a) (b)

Figura 1 Esquema general de un amortiguador de masa pasivo: (a) TMD (b) TLCD

Donde:
m1, m2 = Masa de la estructura y de la masa amortiguadora respectivamente.
k1, k2 = Rigidez de la estructura y de la masa amortiguadora respectivamente.
c1, c2 = Constante de amortiguamiento de la estructura y de la masa amortiguadora respectivamente.
F(t) = Carga en la estructura (armónica, de sismo, constante, etc.)

El modelo matemático que describe el comportamiento del TMD o TLCD, se muestra en las ecuaciones (1) y (2). La ecuación (1) es para carga armónica en la estructura y la ecuación (2) es para carga de sismo.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Existen diferentes modelos de TMD sólido, cada uno cumpliendo una labor especifica. Matta y De Stefano (2009) muestran un resumen para varios tipos de estos dispositivos. Ver figura 2.

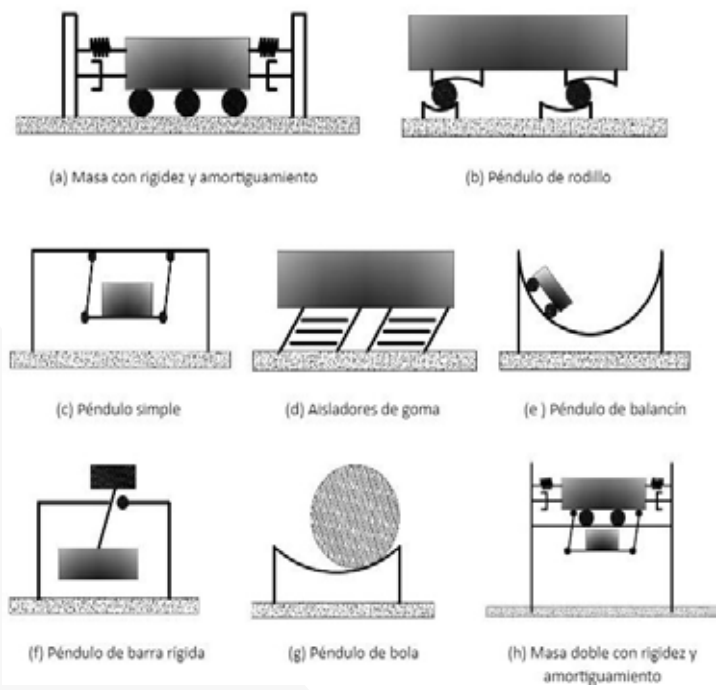


Figura 2 Modelos de TMD según Matta y De Stefano (2009)

El concepto de amortiguador de vibración sintonizado (Tuned Vibration Absorbers o TVA), fue introducido por primera vez por el alemán Hermann Frahm (1911), bajo la patente #989958 del 18 de abril de 1911, en los EEUU. Posteriormente, Ormondroyd y Den Hartog (1928), publican el artículo, The theory of dynamic vibration absorber, en el Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol. 49, pp. A9-A22, siendo este documento el punto de partida dentro de las publicaciones del siglo XX. Años más tarde, el mismo Den Hartog (1956), publica el libro Mechanical Vibrations, donde se muestran las aplicaciones en el campo de la industria de los amortiguadores de masa a través de modelos de uno y dos grados de libertad, derivando expresiones para el amortiguamiento óptimo, siendo esta una de las referencias bibliográficas más citadas.

(Luft (1979), plantea expresiones aproximadas para el diseño de los parámetros que conforman las expresiones del TMD. McNamara (1977), estudia de manera profunda, los alcances y bondades del TMD pasivo como sistema de dos grados de libertad en edificios altos. Ayorinde y Warburton (1980) y Warburton y Ayorinde (1980) tratan el tema general de los amortiguadores y sobre la optimización de los parámetros más importantes del TMD.

Kwok (1984), propone en sus estudios aumentar el amortiguamiento en edificios por medio de los TMD. Kitamura et al. (1988) muestran el proceso de análisis y diseño del Chiba Port Tower (Tokio, Japón), una estructura de acero de 125 metros de altura con dos TMD en su parte superior. Sakai et al. (1989) son pioneros en tratar el tema del amortiguador de columna líquida TLCD (Tuned Liquid Colum Damper). Balendra et al. (1995) estudian el tema de la efectividad del TLCD como amortiguador. Kareem et al. (1999) presentan un breve resumen con las primeras estructuras a nivel mundial que se potenciaron haciendo uso del TMD.

Li y Liu (2002) estudian la optimización de los parámetros de múltiples TMD en un edificio. Por su parte, Ricciardelli et al. (2003) someten un edificio a cargas de viento y con tres tipos de amortiguadores: un TMD pasivo, un TMD semiactivo y un TMD híbrido. Borgues Carneiro et al. (2008) realizan el estudio paramétrico de múltiples TMD utilizando masas interconectadas, mientras que Sgobba y Marano (2010) diseñan de manera lineal los TMD ubicados en estructuras con comportamiento no lineal. Gutiérrez y Adeli (2013), presentan un estudio amplio y actualizado de las estructuras a nivel mundial con TMD como amortiguador.

Lin et al. (2014) hacen una comparación de los resultados hallados entre los modelos analíticos y los modelos experimentales usando TMD. Raveesh y Sahana (2015), realizan una revisión bibliográfica de los TMD pasivos, y desarrollan un ejercicio que consiste en la modelación de un edificio en SAP2000 v15 añadiéndole un TMD mediante un artificio de modelación y comparando los resultados hallados con los de la modelación numérica convencional para este tipo de dispositivos. Meena et al. (2016) plantean la optimización de los parámetros del TMD por medio de métodos analíticos y del efecto de la presencia de múltiples TMD. Kaveh et al. (2015), Nigdeli et al. (2016a y 2016b) y Yazdi et al. (2016) optimizan los parámetros del TMD por medio de técnicas heurísticas, metaheurísticas y evolutivas, buscando la máxima eficiencia del amortiguador. Zhou et al. (2016) elaboran un estudio para comprobar la efectividad del TMD en edificios de baja y mediana altura sometidos a sismos.

Garrido y Serrazin (2017), analizan la efectividad del TMD en los recientes sismos en Chile. Altunişik et al. (2018) realizan un estudio experimental del TLCD sometido a diferentes excitaciones. Ata y Kamel (2018) desarrollan un análisis numérico del efecto combinado de un TMD clásico traslacional y un TMD tipo péndulo. Cetin y Aydin (2019), proponen una nueva función de transferencia y como técnica numérica para encontrar los parámetros óptimos, la evolución diferencial. Rahmani y Konke (2019), analizan el uso de múltiples TMD para el control sísmico de edificios altos sometidos a cargas de sismo

Los Pozos y Gómez (2019), estudiaron el comportamiento estructural de un monumento de 115 m de altura, equipado con diez TMDs y sometido a cargas simuladas de viento y de sismo. Huergo y Fernández (2019), desarrollaron un modelo discreto equivalente para el análisis dinámico en el dominio del tiempo de edificios de gran altura con base fija y muros de cortante, con la presencia de varios amortiguadores de masa sintonizada distribuidos en toda su altura.

(Stanikzai et al. (2020) investigaron la respuesta de un TMD ubicados a diferentes alturas, en un edificio con base aislada. Dai et al. (2020) determinaron los parámetros óptimos de un TMD para mitigar los efectos de los vórtices de agua en las pilas de un puente. Ok (2020), analizó el acoplamiento de un TMD para el control de las vibraciones de edificios iguales adyacentes. Abbasi y Moradi (2020), determinaron los parámetros óptimos de un TMD por medio de la técnica metaheurística, enjambre de partículas (en inglés PSO o Particle Swarm Optimization), para el control de las vibraciones en las líneas de transmisión de una torre de de energía.

Meng et al. (2020), propusieron una metodología para diseñar e implementar un TMD, para amortiguar los modos de flexión y torsión de los tableros de los puentes suspendidos. Banerjee y Ghosh (2020), determinaron los parámetros óptimos de un TMD para reducir la respuesta estructural, aplicando la técnica numérica de los algoritmos genéticos.

Jin et al. (2021) presentaron el estudio de un proceso de optimización de un TMD, para controlar los movimientos laterales y las fuerzas de amarre, de un túnel flotante sumergido, bajo excitaciones sísmicas. Soltani y Deraemaeker (2021), desarrollaron un estudio comparativo entre el TMD clásico de amortiguador y resorte con el TMD tipo péndulo, y sometidos ambos modelos a diferentes excitaciones.

Zhao et al. (2021) realizaron pruebas en mesa vibratoria, de un modelo a escala 1:8, con y sin TMD, para validar la eficacia de una torre de transmisión bajo excitaciones sísmicas e investigar su mecanismo de amortiguación. Pourzangbar y Vaezi (2021), implementaron la optimización por enjambre de partículas (PSO) para determinar las propiedades óptimas de un sistema de amortiguación tipo viscoso, de un amortiguador de masa sintonizado tipo péndulo y de un sistema

Tabla 1 Estructuras con TMD (Gutiérrez y Adeli, 2013)

Nombre	Estructura	Altura(m)	Pisos	Ciudad	Año	Tipo	Peso (Ton)
CN Tower	Torre	553	-	Toronto, Canadá	1975	2 TMD	18
John Hancock	Edificio	241	60	Boston, MA, USA	1976	4 TMD	600
Citycorp Center	Edificio	278	59	New York, USA	1978	1 TMD	370
Sydney Tower	Torre	305	-	Sydney, Australia	1980	2 TMD	220
Chiba Port Tower	Torre	125	4	Chiba, Japón	1986	2 TMD	10 y 15
Yokohama Marine	Torre	101.3	-	Yokohama, Japón	1987	TLCD	1,7
Gold Tower	Torre	158	-	Chiba, Japón	1988	16 TLCDs	10
Fukuoka Tower	Torre	234	2	Fukuoka, Japón	1989	2 TMD	25-30
Kyobashi Center	Edificio	33	11	Tokyo, Japón	1989	2 TMD	5
BASF	Chimenea	100	-	Antwerp, Belgium	1992	TMD	8,5
P&G Japan Headqu.	Edificio	131	31	Kobe, Japón	1993	3 TMD	270
Tokyo Inter. Airport	Torre	77.6	-	Tokyo, Japón	1993	TLCD (1400 unidades)	0,025 c/u
Hotel Burj-Al-Arab	Edificio	321	90	Dubai, U.A.E.	1997	11 TMD	5 c/u
Petronas Twin	Edificio	451.9	88	Kuala L., Malasia	1997	12 TMD	0,08 c/u
Park Tower	Edificio	252.2	67	Chicago, IL, USA	2000	TMD	300
The Trump World	Edificio	262.4	72	New York, USA	2001	TMD	600
Taipei 101	Edificio	449	101	Taipei, Taiwan	2004	2 TMD	730 y 4,5
Bloomberg Tower	Edificio	245.6	54	New York, USA	2004	TMD	600
Millennium Tower	Mástil	284	60	Dubai, UAE	2005	TMD	0,3
Aspire Tower	Torre	300	36	Doha, Qatar	2006	TMD Péndulo	140
Comcast Center	Edificio	297.1	57	Philadelphia, USA	2008	TMD	1300
Canton Tower TV	Torre	600	85	Guangzhou, China	2010	ATMD y TMD (piso 85)	50 y 600
Estela de la Luz	Torre	104	-	Mexico City	2010	8 TMD	3
Tokyo Skyt. Tower	Torre	634	-	Tokyo, Japón	2012	TMD	100

En la tabla No 1 se puede apreciar la recopilación que elaboraron Gutiérrez y Adeli (2013), sobre las estructuras más importantes a nivel mundial que utilizan como amortiguador, un TMD de masa sólida o líquida.

En la figura 3, Sahoo (2015), muestra una recopilación gráfica de algunas de las estructuras mencionadas en la tabla 1, todas ellas estructuras emblemáticas y muy

con un amortiguador de masa sintonizada TMD.

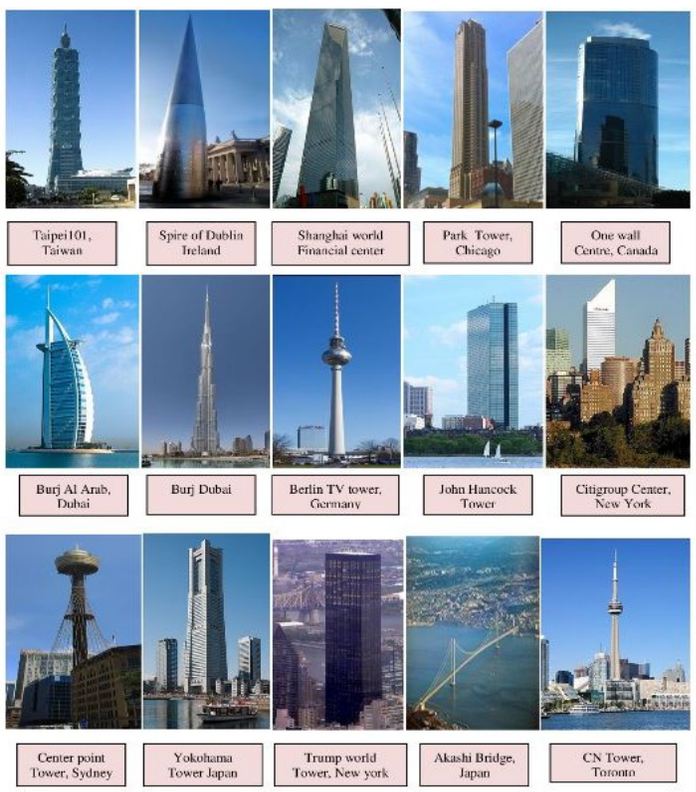


Figura 3 Estructuras construidas o repotenciadas con TMD (Sahoo, 2015)

Referencias

Abbasi, M. H., & Moradi, H. (2020). Optimum design of tuned mass damper via PSO algorithm for the passive control of forced oscillations in power transmission lines. SN Applied Sciences, 2(5), 1-15.

Altunişik, A. C., Yetişken, A., and Kahya, V. (2018). Experimental study on control performance of tuned liquid column dampers considering different excitation directions. Mechanical Systems and Signal Processing, 102, 59-71.

Ata, A. A., and Kamel, A. G. (2018). Numerical evaluation of the effect of combined pendulum Tuned Mass Damper on a basic vibrating system. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, (4), 270.

Ayorinde, E. O. and Warburton, G. B. (1980). Minimizing structural vibrations with absorbers. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 8, 219–236.

Garrido, B. and Serrazin, M. (2017). Effectiveness of Tuned Mass Dampers (TMD) for earthquake protection in chilean buildings. 16th World Conference on Earthquake Engineering 16WCEE, Chile, Paper N° 1077, Registration Code: S-J1464334224, Volume 16.

Gutierrez Soto, M. and Adeli, H. (2013). Tuned Mass Dampers. Archives of Computational Methods in Engineering. 20(4), pp.419-431.

Huergo, I. F., & Hernández, H. (2019). Coupled shear-flexural model for dynamic analysis of fixed-base tall buildings with tuned mass dampers. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 28(17), e1671

Jin, C., Chung, W. C., Kwon, D. S., & Kim, M. (2021). Optimization of tuned mass damper for seismic control of submerged floating tunnel. Engineering Structures, 241, 112460.

Kaveh, A., Mohammadi, S., O. Khadem, O., Keyhani, A. and Kalatjari, V.R. (2015). Optimum parameters of tuned mass dampers for seismic applications using charged system search. IJST, Transactions of Civil Engineering, Vol. 39, No. C1, pp 21-40, Shiraz University

Balendra, T., Wang, C. M. and Cheong, H. F. (1995). Effectiveness of tuned liquid dampers for vibration control of towers. Engineering Structures, 17(9), 668-75.

Banerjee, S., & Ghosh, A. D. (2020, September). Optimal Design of Tuned Mass Damper for Base-Excited Structures. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 936, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.

Borgues Carneiro, R., Moreira Ávila, S. and Vital de Brito, J. (2008). Parametric study on multiple tuned mass dampers using interconnected masses. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 8(01), 187-202.

Cetin, H., and Aydin, E. (2019). A New Tuned Mass Damper Design Method based on Transfer Functions. KSCE Journal of Civil Engineering, 23(10), 4463-4480.

Dai, J., Xu, Z. D., & Gai, P. P. (2020). Parameter determination of the tuned mass damper mitigating the vortex-induced vibration in bridges. Engineering Structures, 221, 111084.

Garrido, B. and Serrazin, M. (2017). Effectiveness of Tuned Mass Dampers (TMD) for earthquake protection in chilean buildings. 16th World Conference on Earthquake Engineering 16WCEE, Chile, Paper N° 1077, Registration Code: S-J1464334224, Volume 16.

Gutierrez Soto, M. and Adeli, H. (2013). Tuned Mass Dampers. Archives of Computational Methods in Engineering. 20(4), pp.419-431.

Kareem, A., Kijewski, T. and Tamura, Y. (1999). Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications. Wind and Structures, 2(3), pp.201-251.

Kitamura, H., Fujita, T., Teramoto, T. and Kihara, H. (1988). Desing and Analysis of a tower structure with a Tuned Mass Damper. Ninth world Conference on earthquake engineering, Tokyo-Kyoto, August 2-9, Vol VIII, 415-420.

Kwok, K. C. S. (1984). Damping Increase in Building with Tuned Mass Damper. Journal of Engineering Mechanics, 110(11), 1645-1649.

Referencias

of Classical Methods, International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2016), AIP Conf. Proc. Vol 1863, 540004-1–540004-4

Nigdeli, S. M., Bekdas, G. and Yang, X. (2016). Optimum Tuning of Mass Dampers for Seismic Structures Using Flower Pollination Algorithm. International Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1, 264-268

Ok, S. Y. (2020). Tuned mass damper asymmetric coupling system for vibration control of adjacent twin buildings. Advances in Structural Engineering, 23(5), 954-968.

Pourzangbar, A. y Vaezi, M. (2021). Optimal design of brace-viscous damper and pendulum tuned mass damper using Particle Swarm Optimization. Applied Ocean Research, 112, 102706.

Pozos-Estrada, A., and Gómez, R. (2019). Parametric study of the use and optimization of tuned mass dampers to control the wind-and seismic-induced responses of a slender monument. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 28(13), e1633.

Rahmani, H. and Könke, C. (2019). Seismic Control of Tall Buildings Using Distributed Multiple Tuned Mass Dampers. Advances in Civil Engineering, 2019.

Raveesh R. M. and Sahana T. S. (2015). Effect of Tuned Mass Dampers on Multistore RC Framed Structures. International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 3 Issue 8, ISSN: 2278-0181, pp. 1115-1125.

Ricciardelli, F., Pizzimenti, D. and Mattei, M. (2003). Passive and active mass damper control of the response of tall buildings to wind gustiness. Engineering Structures, 25, 1199–1209.

Sahoo, P. (2015). Experimental and Numerical Study on Tuned Mass Damper in Controlling Vibration of Frame Structures.

Sakai, F., Takaeda, S. and Tamaki, T. (1989). Tuned liquid column damper- new type device for suppression of building vibrations. Proc. Int. Conf. on Highrise Buildings, Nanjing, China, pp. 926-931.

Sgobba, S. and Marano, G. C. (2010). Optimum design of linear tuned mass dampers for structures with nonlinear behaviour. Mechanical Systems and Signal Processing, 24(6), 1739-1755.

Soltani, P. y Deraemaeker, A. (2021). Pendulum tuned mass dampers and tuned mass dampers: Analogy and optimum parameters for various combinations of response and excitation parameters. Journal of Vibration and Control, 10775463211003414.

Stanikzai, M. H., Elias, S., Matsagar, V. A., & Jain, A. K. (2020). Seismic response control of base-isolated buildings using tuned mass damper. Australian Journal of Structural Engineering, 21(1), 310-321.

Warburton, G. B. and Ayorinde, E. O. (1980). Optimum absorber parameters for simple systems. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 8(3), 197-217.

Yazdi, H., Saberi, H., Saberi, H. and Hatami, F. (2016). Designing optimal tuned mass dampers using improved harmony search algorithm. Advances in Structural Engineering, 19(10), pp.1620-1636.

Zhou, Z., Najm, H., Vasconez, R., (2016). Effectiveness of Tuned Mass Dampers in Mitigating Earthquake Ground Motions in Low and Medium Rise Buildings. Journal of Engineering and Architecture, Vol. 4, No. 2, pp. 11-22

APUNTES DE GEOTECNIA

Por: Carlos Andrés Ordóñez Ante
Ingeniero Geólogo
Especialista en Mecánica de Suelos y Cimentaciones
Magíster en Ingeniería – Geotecnia
Docente Asociado
Facultad de Ingenierías PCJIC
Ingeniero Asesor y Consultor en Geotecnia
caordonez@elpoli.edu.co

El Servicio Geológico Mexicano define La Geotecnia como la rama de la Ingeniería que se ocupa del estudio de la interacción entre las construcciones y el terreno. Se encarga del estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes de la Tierra (suelo y rocas por debajo de la superficie), con el objetivo de diseñar las cimentaciones para estructuras tales como edificios, puentes, centrales hidroeléctricas, estabilizar taludes, construir túneles y carreteras, etc. Por tanto, es una disciplina de la Ingeniería Civil en conjunto con la Ingeniería Geológica guardando una relación directa con el terreno.

La geotecnia tiene un impulso importante a nivel mundial en el año 1925, con la publicación del libro “ERDBAUMECHANIC”, considerado en la actualidad como el nacimiento de la mecánica de suelos, y además obra inicial de Karl Terzaghi, quien es reconocido universalmente como el Padre de la Mecánica de Suelos, en esta publicación se establecieron una serie de principios básicos que permitieron darle un manejo técnico a los problemas de Ingeniería de Suelos. Más adelante en 1943, Terzaghi presenta grandes avances en la mecánica de suelos con la publicación del libro “Theoretical Soil Mechanics”, luego en 1948 se publica “Soil Mechanics in Engineering Practice” de K. Terzaghi y R. B. Peck, posteriormente y hasta la fecha se publican variados trabajos de numerosos investigadores que han desarrollado temas como la mecánica de suelos parcialmente saturados, la dinámica de suelos, modelaciones geotécnicas, entre otros.

El Servicio Geológico Mexicano define La Geotecnia como la rama de la Ingeniería que se ocupa del estudio de la interacción entre las construcciones y el terreno. Se encarga del estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes de la Tierra (suelo y rocas por debajo de la superficie), con el objetivo de diseñar las cimentaciones para estructuras tales como edificios, puentes, centrales hidroeléctricas, estabilizar taludes, construir túneles y carreteras, etc. Por tanto, es una disciplina de la Ingeniería Civil en conjunto con la Ingeniería Geológica guardando una relación directa con el terreno.

La geotecnia tiene un impulso importante a nivel mundial en el año 1925, con la publicación del libro “ERDBAUMECHANIC”, considerado en la actualidad como el nacimiento de la mecánica de suelos, y además obra inicial de Karl Terzaghi, quien es reconocido universalmente como el Padre de la Mecánica de Suelos, en esta publicación se establecieron una serie de principios básicos que permitieron darle un manejo técnico a los problemas de Ingeniería de Suelos. Más adelante en 1943, Terzaghi presenta grandes avances en la mecánica de suelos con la publicación del libro “Theoretical Soil Mechanics”, luego en 1948 se publica “Soil Mechanics in Engineering Practice” de K. Terzaghi y R. B. Peck, posteriormente y hasta la fecha se publican variados trabajos de numerosos investigadores que han desarrollado temas como la mecánica de suelos parcialmente saturados, la dinámica de suelos, modelaciones geotécnicas, entre otros.

Estambul, 2001; Osaka, 2005; Alejandría, 2009; Paris, 2013; Seúl, 2017.

A partir de la 16th Conferencia Internacional, celebrada en Osaka, estas conferencias internacionales cambian de nombre por el que actualmente se conocen: Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Las memorias de estos eventos son una invaluable fuente de consulta y muestran de manera asombrosa el avance de la Ingeniería Geotécnica a través de los años, para los interesados, se pueden consultar a través del siguiente enlace: www.issmge.org/publications/online-library.

Además de estas conferencias se celebran a nivel mundial una gran cantidad de eventos académicos de tipo regional y nacional, (Suramericana, Panamericana, Asiática, Europea, Colombiana, Chilena, Argentina, Brasilera, entre muchas otras).

Clasificación y caracterización geotécnica

Debido a los procesos que intervienen en la formación del suelo, sumado a la gran variedad de problemas geotécnicos asociados a él, tales como los suelos expansivos, los suelos colapsables, el fenómeno de licuación, las manifestaciones de inestabilidad (reptación – creep), además de la gran heterogeneidad de estos materiales, no es posible establecer generalizaciones ni comportamientos particulares aceptados para todos los suelos, en cuanto a su perfil de meteorización, sus propiedades de ingeniería, todas estas consideraciones contribuyen a que los resultados de investigaciones, además de las modelaciones matemáticas particulares, tengan siempre un alcance limitado. Por lo anterior, una adecuada recomendación geotécnica depende de un buen diagnóstico inicial que permita identificar el comportamiento geotécnico del material que se analiza a partir de una adecuada caracterización geotécnica del mismo.

La clasificación se puede entender como un ordenamiento de los suelos en grupos con propiedades y aptitudes similares, mientras que la caracterización es el diagnóstico de su comportamiento como respuesta a una solución geotécnica en particular, por lo tanto, la clasificación establece la naturaleza de los suelos, la caracterización infiere su comportamiento.

En las primeras décadas del siglo XX, la geotecnia centra su atención en formaciones geológicas localizadas en climas templados y particularmente, en sedimentos no meteorizados o de bajo grado de meteorización, desarrollando métodos de clasificación a partir de la distribución y el tamaño de las partículas y la plasticidad, lo que da origen al conocido Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y también el sistema American Association of State Highway Officials (AASHTO), que agrupan los suelos de acuerdo al tamaño de las partículas en suelos gruesos y suelos finos, ambos sistemas se basan en dos propiedades índices de los suelos: los límites de Atterberg y la distribución granulométrica. Cuando se aplican estas clasificaciones a suelos residuales, es normal encontrar inconsistencias entre la clasificación asignada y el comportamiento esperado del suelo en cuanto a su aspecto mecánico e hidráulico, esto debido a la naturaleza de este tipo de materiales, debido a que son suelos formados por procesos de meteorización química y con características particulares, asociadas a sus procesos de origen y de formación, donde el aspecto mineralógico juega un papel preponderante en su comportamiento ingenieril.

Con el fin de mejorar la identificación y la caracterización de los suelos residuales, en el año de 1981, se desarrolla en Brasil un nuevo sistema de clasificación, propuesto por Nogami y Villibor denominado Miniatura Compactada Tropical (MCT). Esta clasificación se basa en pruebas de laboratorio sobre cuerpos de prueba compactados y de dimensiones reducidas, llamado mini-MCV, (Mini moisture condition value, que traduce al español como valor de condición de humedad y consiste en realizar ensayos de compactación a mini cuerpos de prueba, para obtener la clasificación MCT), para agrupar los suelos tropicales, de acuerdo a sus peculiaridades, asociadas a su comportamiento mecánico e hidráulico. Posteriormente, el método fue evolucionando hasta llegar a convertirse en un método más rápido, simplificado y normalizados, denominado MCT – rápido o método de las pastillas (Nogami y Villobor, 1994, citado por Meza V. 2013). Este método agrupa los suelos tropicales en dos grandes grupos: suelos lateríticos y suelos no lateríticos, consiste básicamente en el moldeo de cuerpos de prueba en forma de pastillas, en un anillo con dimensiones de 20 mm de diámetro y 5 mm de altura, se toman medidas de contracción diametral (Ct), luego de ser humedecidas y secadas, además se mide la resistencia a la penetración de las pastillas de suelo a una aguja patrón. Este método tiene el inconveniente de que no todos los suelos que son formados fuera de las áreas templadas del planeta, son lateríticos.

valores inferiores a 10 µg/m3, recomendados por la OMS para la protección de la salud de la población, con excepción de la primera semana de la epidemia (tercera semana de marzo con el pico más alto el día 25) en la cual se presentaron los mayores aportes de incendios de Venezuela y Brasil y algunas al norte del país, permitiendo evaluar el aporte significativo de estas fuentes del orden del 27 %.

Formaciones superficiales

Las formaciones superficiales están definidas en la tierra por las diferentes geoformas que definen los paisajes, poseen diferentes propiedades de ingeniería y es importante conocerlas en la ingeniería civil porque en ellas desarrollamos los diferentes proyectos de construcción e infraestructura.

De acuerdo al tipo de suelo que se tenga en un sitio determinado, además de los diferentes procesos que han actuado en su formación, se tienen las siguientes formaciones superficiales:

1. **Depósitos Gravitacionales**: corresponden a los suelos formados por antiguos desprendimientos de masa o deslizamientos, donde el principal agente de transporte ha sido la gravedad en combinación con el agua, de acuerdo a su composición se pueden dividir en flujos de escombros y flujos de lodo.

Flujos de Escombros: corresponden a los depósitos gravitacionales en los cuales se tiene un porcentaje superior al 50% de fragmentos de roca con relación a la matriz de suelo que auto soporta dichos fragmentos. En la ciudad de Medellín se tienen flujos de escombros en los sectores de El Poblado, Manrique, Robledo, entre otros, donde el material parental que ha contribuido a su origen es variable, correspondiendo a rocas metamórficas tipo Anfibolitas – Esquistos- Neis (sector de Robledo, Envigado, Sabaneta), rocas ígneas tipo Dunitas – Gabros (sectores del Poblado, Manrique).

Flujos de Lodo: Corresponden a los depósitos gravitacionales en los cuales se tiene un porcentaje inferior al 50% de fragmentos de roca con relación a la matriz de suelos que auto soporta dichos fragmentos. Este tipo de formación superficial se puede encontrar en los municipios de La Estrella y Caldas, donde el material parental que ha contribuido a su origen han sido las rocas verdes de la Formación Quebrada Grande.

Figura 1 Flujo de Escombros sector de Santa Elena Medellín
Seminario Redemtoris Mater

Figura 2 Flujo de Lodo sector Nor-Occidental de la ciudad
de Medellín (Hospital Mental de Bello)

2. **Depósitos Aluviales**: corresponden a suelos formados por la acción de ríos y/o quebradas, se caracterizan por poseer un material grueso granular propio de suelos friccionantes, poseen una alta permeabilidad, una buena capacidad de soporte, se dividen en las siguientes categorías:

Terrazas
Llanuras de inundación
Conos de deyección

En la ciudad de Medellín se pueden encontrar este tipo de suelos en los lugares próximos a ríos y quebradas, generalmente se tienen suelos tipo gravo areno limosos que incluyen fragmentos y bloques de rocas en diferentes grados de meteorización y en proceso de cementación.

Figura 3 Depósito Aluvial en proceso de meteorización y cementación
Sector de Santa Fe de Antioquia

3. **Depósitos Lacustre**s: corresponden a suelos formados por la acumulación y posterior sedimentación de suelos fino granulares tipo limo y/o arcilla, su ambiente de depositación es tranquilo y propio de cuerpos de agua tales como lagos.

(

Figura 4 Suelos sedimentarios fino granulares de origen lacustre
Municipio de Sonsón Antioquia

Figura 5 Suelos sedimentarios arcillosos de origen lacustre
Municipio de Sonsón Antioquia

4. **Depósitos Eólicos**: corresponden a suelos finos transportados por el viento tipo cenizas volcánicas. En Medellín este tipo de suelos provienen del complejo volcánico Ruiz Tolima, se encuentran diseminados de manera discontinua en algunas laderas del Valle de Aburra. Estos materiales poseen una humedad característica en general superior al 100%, son materiales muy porosos y con una alta relación de vacíos. En la figura 6 La ceniza volcánica se localiza justo debajo de la capa vegetal enterrada de color negro, que se encuentra cubierta por un lleno de origen antrópico con 1.0 m de espesor aproximado.

Foto 6
Se aprecia el horizonte de ceniza volcánica de color pardo
completamente agrietado producto de la desecación que han experimentado los materiales. La ceniza volcánica se localiza justo debajo de la capa vegetal enterrada de color negro, que se encuentra cubierta por un lleno de origen antrópico con 1.0m de espesor aproximado

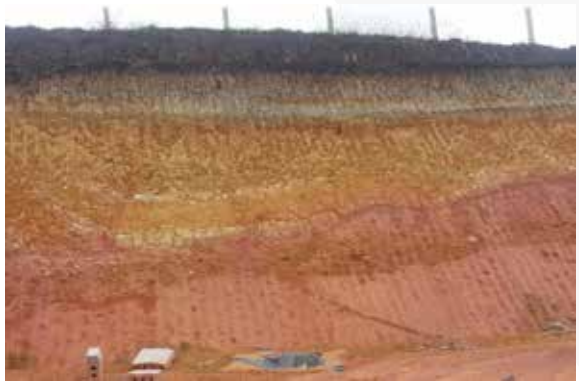


Foto 7
Perfil de Meteorización de un Suelo Residual producto de la descomposición del Batolito Antioqueño. Se observa debajo de la ceniza volcánica el Horizonte IA de color amarillo y textura limo arcillosa, debajo de este y de color rojo se tiene el Horizonte IB, transición al Horizonte IC denominado Saprolito

5. **Depósitos Antrópicos:** dentro de este tipo de suelos tenemos los llenos formados por materiales muy heterogéneos y variado espesor, estos geomateriales poseen poca capacidad de soporte.

6. **Suelos Residuales** formados en el sitio "In Situ": estos geomateriales son formados por la meteorización química de una roca parental preexistente. Esta descomposición da origen a un perfil de meteorización generalmente bien desarrollado y ordenado, el cual permite dividir las capas de suelos en horizontes con diferentes características. En la figura 7 se observa el Perfil de Meteorización de un Suelo Residual producto de la descomposición del Batolito Antioqueño, cuerpo ígneo de origen intrusivo, localizado al oriente del departamento de Antioquia, subyaciendo el horizonte de ceniza volcánica, se encuentra el Horizonte IA de color amarillo y textura limo arcillosa, debajo de este y de color rojo se tiene el Horizonte IB, llamado de transición al Horizonte IC denominado Saprolito.

Ejercicio: describir la Formación Superficial y los diferentes Horizontes de Suelo que se pueden observar en la siguiente figura, tomada en un apique realizado en la sede del municipio de Rionegro del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, con el fin de ejecutar el estudio de suelos para definir el tipo de cimentación para los llamados laboratorios móviles de mecánica de suelos de la institución.

Referencias:

Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2016). Presentación del plan DEERE, D.U.; PATTON, F.D. (1971). "Slope stability in residual soils". Proceedings of the Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Juan (Puerto Rico). Vol. 1 pp 87- 170

HINCAPIE J. (1992). "Geotecnia de Suelos Tropicales". Seminario Internacional de Geotecnia, Universidad Eafit, Medellín, Colombia.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. Mecánica de Suelos. New York, John Wiley & Sons.

MEZA V. (2013). "Guía de Laboratorio de Mecánica de Suelos". Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

ORDOÑEZ C.A. (2020). "Apuntes del Curso de Cimentaciones" P.C.J.I.C. E

ORDOÑEZ C.A. (2020). "Archivo Fotográfico y de Estudios Geotécnicos Realizados".