



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CAMPUS I

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo
Núm. : 04-2021-102515163300-203

Revista Digital

PAKBOL

ISSN: "en trámite"

Volumen I Número. 01 (2021) Julio-Diciembre



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

Dr. Carlos F. Natarém Nandayapa
Rector

Dra. Maria Eugenia Culebro Mandujano
Secretaría General

Dra. Guillermina Vela Román
Secretaria Académica

Dr. Arcadio Zebadúa Sánchez
Secretario de Identidad y Responsabilidad Social
Universitaria

Dra. María Guadalupe Rodríguez Galván
Directora General de Investigación y Posgrado

COMITÉ EDITORIAL

FACULTAD DE INGENIERÍA-UNACH

Dr. José Alonso Figueroa Gallegos
Presidente

Mtro. Fredy Humberto Caballero Rodríguez
Secretario Técnico

Dra. Daisy Escobar Castillejos
Integrante

Dr. Humberto Miguel Sansebastián García
Integrante

Dr. Hugo Alejandro Guillen Trujillo
Integrante

COMITÉ CIENTÍFICO INTERNO

Dra. Delva del Rocío Guichard Romero

Mtro. Juan José Muciño Porras

Dr. Miguel Ángel Aguilar Suárez

Dr. Moisés Nazar Beultelspacher

Mtro. Enrique Mario De Coss Gómez

Dr. Alexander López González

Dr. Hipólito Hernández Pérez

Mtro. Cristóbal Cruz Ruiz

Mtro. Julio César Villatoro Aguilar

Mtro. Jorge Alfredo Aguilar Carboney

Mtro. Robertony Cruz Díaz

Dr. Jesús Alejandro Cabrera Madrid

Dr. Daniel Hernández Cruz

Dr. Eber Alberto Godínez Domínguez

Dr. José Luis Pérez Díaz

COMITÉ CIENTÍFICO EXTERNO

Dr. Suhail Sharadqah

Tafila Technical University

Dr. José Luis Díaz Arévalo

Universidad Nacional de Colombia

Dr. Jesús Gracia Sánchez

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de
Ingeniería

Dra. Gabriela Buendía Abalos

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología
Avanzada del IPN (Cicata- Unidad Legaria).

Dra. Paola Alejandra Balda Álvarez

Universidad de San Buenaventura Medellín

Dr. Manuel Jara Díaz

Universidad Michoacana de San Nicolás De Hidalgo

Dr. Luciano Roberto Fernández Sola

Universidad Autónoma Metropolitana

Dr. José Escalante García

Cinvestav Unidad Saltillo

EQUIPO EDITORIAL

Dr. Humberto Miguel Sansebastián García

Editor responsable

Lic. Marcela Aguilar Aquino

Diseño web y Editorial

Mtro. Rodolfo Estrada Cruz

Desarrollo web y soporte técnico

Revista Digital Pakbal , Volumen I, Número 01, Julio-Diciembre 2021; es una publicación semestral editada por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas. Boulevard Belisario Domínguez KM. 1081, Terán, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. C.P. 29050, tels. 6178000 ext.1562 o ext. 5359. <http://revistas.unach.mx/index.php/pakbal>; revistapakbal@gmail.com Editor responsable: Dr. Humberto Miguel Sansebastián García. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo Núm. 04-2021-102515163300-203 ISSN: "en trámite", ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, soporte técnico de la Facultad de Ingeniería: Ing. Rodolfo Estrada Cruz, fecha de la última modificación: -- .

ÍNDICE

Elementos de cartografía y geodesia para ingenieros civiles.....	5
<i>José Luis Pérez Díaz, Jorge Alberto Cabrera Madrid, Eber Alberto Godínez Domínguez, Leopoldo Hernández Valencia.</i>	
Comparativo de los modelos paramétricos de espectros de diseño sísmico CFE 2015 y NTC 2020.....	15
<i>Juan Alberto Sánchez Hernández</i>	
Cálculo de la probabilidad falla de una viga continua.....	22
<i>Alejandro Ruiz Sibaja, Jorge A. Aguilar Carboney, Herman Daniel Nuriulú Alfonzo</i>	
Modelado y análisis de un marco de concreto reforzado bajo cargas de servicio.....	28
<i>Gelacio Juárez Luna, Eber Alberto Godínez Domínguez, Dayann Emilio Silva Lechuga.</i>	
Análisis de flujo en transporte público, región oriente de la Zona Metropolitana de Tuxtla Gutiérrez.....	33
<i>Gabriel Alejandro Ballinas Salazar; Ricardo Suárez Gomez ; Juan José Cruz Solís.</i>	

Todos los artículos firmados son responsabilidad del Autor (es). Las opiniones expresadas por los Autores no reflejan la postura del Editor de la publicación. Todos los artículos son de creación original del Autor, por lo que esta revista se deslinda de cualquier situación legal procedida por plagios, copias parciales o totales de otros artículos ya publicados y la responsabilidad legal recaerá directamente en el Autor del artículo. Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma de Chiapas.

Estimados Lectores..



Es un gusto compartir con todos nuestros colaboradores, autores y lectores, la nueva etapa de la Revista Pakbal que por más de 15 años estuvo en circulación de manera impresa y que hoy emigra a la digitalización.

Los constantes cambios en la manera de comunicarnos y difundir la información en este mundo globalizado permiten acortar distancias y tener un mejor alcance al público, y es el objetivo de esta nueva modalidad en la que se presenta la Revista Pakbal.

Pakbal continuará siendo una revista de publicaciones científicas y tecnológicas en el ámbito de la Ingeniería Civil en temas de: Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Construcción Sustentable, Desarrollo y Didáctica de la Matemática Educativa, Prevención de Desastres y Ciencia e Ingeniería.

Asimismo, y buscando siempre la calidad en su contenido Pakbal tendrá una publicación semestral. Por lo que los invitamos a participar con manuscritos originales en al menos 75% de su contenido; no deben haber sido publicados ni estar en proceso de evaluación o publicación por escrito en ningún otro medio (impreso o digital), ni en ningún otro idioma. Deberán presentar información novedosa, de interés y relevancia en cualquiera de las temáticas que abarca la revista, así como reportar resultados de estudios prácticos que fomenten el análisis y diseño de nuevos trabajos relacionados. También deben indicar las áreas de investigación para propiciar la transferencia de tecnología. La longitud de este tipo de contribuciones debe ser entre 2,000 y 3,000 palabras.

Pakbal pertenece a la comunidad de Ingeniería y es una revista cuya misión es contribuir en la divulgación y generación del conocimiento, ofreciendo investigaciones con temas que sean de utilidad en el quehacer profesional.

Estamos seguros de que continuaremos contando con su apoyo y preferencia para la mejora de esta revista y los invitamos a navegar en este nuevo espacio donde se alojará, parte esencial que da identidad a la Facultad.

Es por ello que nos complace presentarles en este primer número, cinco artículos de destacados profesores e investigadores de la Facultad y de distinguidos partícipes en áreas afines a la ingeniería.

De esta manera, agradecemos la participación de nuestros colaboradores y lectores en este primer número, una nueva etapa de la revista Pakbal, deseándoles un venturoso año nuevo.

“Por la Conciencia de la Necesidad de Servir”

Facultad de Ingeniería

ELEMENTOS DE CARTOGRAFÍA Y GEODESIA PARA INGENIEROS CIVILES

CARTOGRAPHY AND GEODESY ELEMENTS FOR CIVIL ENGINEERS

José Luis Pérez Díaz

Docente-Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH).

jose.perez@unach.mx,

Jorge Alberto Cabrera Madrid,

Maestro en Valuación Inmobiliaria.

jcabrera_madrid@hotmail.com

Eber Alberto Godínez Domínguez,

Docente-Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH).

eber.godinez@unach.mx,

Leopoldo Hernández Valencia,

Docente-Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH).

leopoldo.hernandez@unach.mx

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo presentar los fundamentos teóricos de las proyecciones cartográficas, basados en la forma y medidas de la Tierra que ofrece la ciencia de la Geodesia. En ingeniería civil, estos modelos cartográficos se aplican sobre la superficie terrestre para desarrollar los proyectos de obras civiles, donde radica el uso de la topografía y de la georreferenciación de los elementos de infraestructura existentes. Estos datos son obtenidos fácilmente mediante dispositivos como el GPS (Global Position System) que establece la ubicación precisa mediante coordenadas geodésicas o coordenadas UTM (Universal Transversa Mercator); sin embargo, es fundamental conocer los elementos teóricos para comprender las relaciones entre un sistema de coordenada geodésica y las proyecciones que resultan de los modelos para representar, en un plano bidimensional, cualquier punto sobre la superficie del esferoide de la Tierra mediante una técnica denominada, en el argot de la literatura matemática, como mapeo de funciones.

Palabras clave: Geodesia, cartografía, topografía, georreferenciación, mapeo de funciones.

ABSTRACT

The theoretical basis of cartographic projections, using Geodesy, based on the Earth's geometric shape and measurements are reported and discussed in this paper. In civil engineering, these cartographic models are applied on the earth's surface to develop civil works projects, where the use of topography and georeferencing of existing infrastructure elements is essential. Currently, available technology (e.g., GPS, Global Position System) facilitates these tasks through the precise location of geographical coordinates (latitude and longitude) or UTM (Universal Transverse Mercator) coordinates. However, it is essential to have the theoretical knowledge to fully understand the relationships between a geodetic coordinate system and the projections resulting from the models to represent, in a two-dimensional plane, any point on the surface of the Earth's spheroid, using a technique usually called, in the mathematical language, as function mapping.

Keywords: Geodesy, cartography, topography, georeferencing, function mapping.

INTRODUCCIÓN

El hombre desde los tiempos remotos siempre ha intentado describir la forma del mundo, había quienes pensaban que la Tierra era plana y sobre la bóveda celeste giraban los astros como el Sol, la Luna y las estrellas. Sin embargo, fueron los griegos con Aristóteles, de los primeros en sugerir que la forma del planeta debía ser una esfera, mediante la evidencia empírica de observar el horizonte y constatar la desaparición gradual de los navíos sobre la altamar. Eratóstenes, matemático griego de la antigüedad, basándose en esta idea de la Tierra en forma esférica, calculó el tamaño de la Tierra, empleando ingeniosamente la geometría con las sombras que se proyectaban en cierta época del año en dos ciudades diferentes, fallando en su intento de estimar el tamaño de la Tierra en alrededor del 1.6% menor de la medida real (Rapp, 1991).

En 1687, Isaac Newton formuló la Ley de Gravitación Universal en la que establece la relación entre la aceleración a la que caen y la distancia que los separa los objetos sobre la superficie de la Tierra del centro de la Tierra, por tanto, al determinar la aceleración de la gravedad, se observó que dicha aceleración variaba dependiendo de la ubicación del observador, deduciendo entonces que el radio de la Tierra no era igual en todos los puntos de la superficie terrestre, es decir la medida del radio sobre la línea del Ecuador es diferente a la medida del radio sobre la línea del eje polar y sugirió que esta variación se debía principalmente al efecto de rotación del globo terrestre sobre el eje polar.

Son muchos los hombres de ciencia que han contribuido en el desarrollo de la Geodesia para comprender y aplicar estos conocimientos en otras áreas del conocimiento. Así, podemos distinguir dos ciencias de la Tierra íntimamente ligadas entre sí y que resultan de carácter práctico dentro de la ingeniería, como son la geodesia geométrica y la cartografía.

Una definición moderna de Geodesia se encuentra en el texto *Geometric Geodesy* de Richard H. Rapp (Rapp, 1991) donde se define como “La Ciencia interdisciplinaria que utiliza medios espaciales y medios aéreos remotamente censados, y mediciones basadas en la Tierra para estudiar el tamaño y forma de la Tierra, los planetas y sus satélites, y sus cambios; para determinar en forma precisa posiciones y velocidades de puntos u objetos que se encuentran en la superficie u orbitando el planeta, dentro

de un sistema de referencia terrestre definido, y para utilizar este conocimiento a una variada gama de aplicaciones científicas y de ingeniería, usando las ciencias matemática, física, astronómica y computacional”.

Mientras que la cartografía la definen como “el conjunto de estudios y operaciones científicas y técnicas que intervienen en la formación o análisis de mapas, modelos en relieve y globos que representan la Tierra, parte de ella o cualquier otra parte del Universo” (Meynen, 1984).

Dentro de las representaciones cartográficas existen cinco proyecciones conformes de uso común por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística de México (Gómez Moreno, 2004), las cuales son:

- a) Mercator.
- b) Gauss- Kruger.
- c) Universal Transversa Mercator (UTM).
- d) Cónica de Lambert.
- e) Estereográfica (UPS).

El presente trabajo se enfoca en describir y analizar las relaciones geométricas que guardan entre el sistema de coordenadas geográficas (latitud y longitud) y el modelo matemático de proyección tipo cilíndrica de coordenadas UTM (Universal Transversa Mercator) por ser actualmente de uso generalizado globalmente y empleado por la mayoría de los equipos de GPS (Global Position System).

MODELO GEOMÉTRICO DEL ELIPSOIDE DE REVOLUCIÓN

El elipsoide de revolución es una representación idealizada de la forma de la Tierra, y matemáticamente se

$$1. \quad \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$$

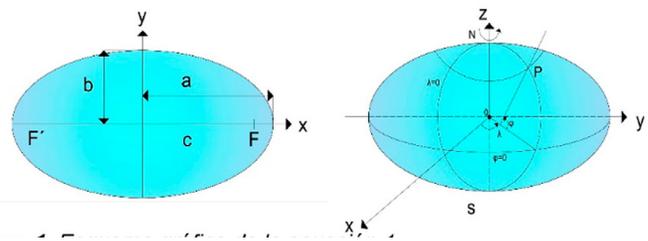


Figura 1. Esquema gráfico de la ecuación 1.

puede expresar mediante la siguiente ecuación:

Donde la superficie del globo terrestre se puede idealizar como un elipsoide de revolución que cumple con la ecuación 1, donde “a” representa la medida del radio ecuatorial (semi eje mayor de la elipse) y “b” representa la medida del radio polar semi eje menor de la elipse (Figura 1). Obviamente la superficie del globo terrestre no tiene las características para ser plana, pero dado que la curvatura de la Tierra es relativamente pequeña, es factible realizar mediciones como las proporcionadas por la topografía para fines prácticos de porciones de terreno de manera muy aproximada sin tomar en cuenta la curvatura de la Tierra.

Simplemente para fines de comparación, si el planeta fuera del tamaño de una pelota de 1.00 metro de diámetro, la montaña más alta como el Everest (8,848 metros) resultaría tan solo un montículo de 0.69 milímetros que sobresaldría de la superficie, mientras que la zona más profunda del océano, las Fosas Marianas en el Pacífico occidental se vería como una deformación de 0.86 milímetros, por lo que la ecuación del modelo teórico del elipsoide de revolución dentro de los rangos de valores prácticos resulta bastante ajustada a la curva real de la superficie terrestre.

No obstante, este concepto de elipsoide (modelo geométrico) no hay que confundirlo con el geoide que se debe más a las propiedades físicas de la Tierra, y que se define como el punto de equilibrio entre las fuerzas atractivas de la Tierra, las fuerzas gravimétricas del océano, la atracción de otros planetas o astros como la Luna, es decir el geoide se debe más a las propiedades de la fuerza de gravedad que ejerce el planeta sobre los objetos que están cerca de él.

En el presente artículo se hará empleo de las ecuaciones y propiedades geométricas del elipsoide de revolución por ser el sistema de referencia en que se basa el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en especial en los parámetros del WGS84 (World Geodetic System), según el cual el radio ecuatorial terrestre mide a=6,378,137.00 metros y el radio polar b=6,356,752.31424 metros.

ECUACIONES PARAMÉTRICAS DE LAS CURVAS MERIDIANAS

Suponiendo que en el plano XZ (Figura 2) ubicamos la curva de una elipse de cualquier meridiano, llamándoles

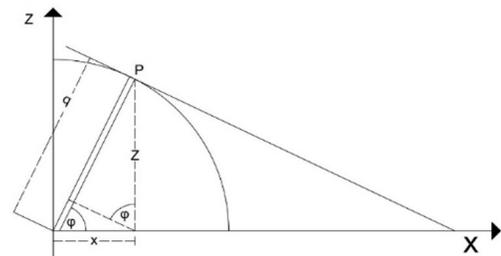


Figura 2. Esquema gráfico del Plano XZ.

meridianos a las curvas que parten del polo y atraviesan normalmente al plano del ecuador (plano X).

$$2. \frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$$

Sea la ecuación bidimensional en coordenadas cartesianas de la curva meridiana:

Entonces la pendiente de la tangente a cualquier

$$3. \frac{2x dx}{a^2} + \frac{2z dz}{b^2} = 0$$

$$4. z' = \frac{dz}{dx} = -\frac{b^2 x}{a^2 z}$$

punto de la curva, nos la proporciona la primera derivada

$$5. z' = \tan(90^\circ + \emptyset)$$

$$6. z' = -\frac{b^2 x}{a^2 z}$$

$$7. \tan(90^\circ + \emptyset) = -\frac{b^2 x}{a^2 z}$$

$$8. -\cot \emptyset = -\frac{b^2 x}{a^2 z}$$

$$9. \tan \emptyset = \frac{a^2 z}{b^2 x}$$

de z con respecto a x.

$$10. z = \frac{b^2}{a^2} x \tan \emptyset$$

De la figura 2

Despejando z

Se define a la excentricidad “e” de la elipse como la

$$11. e = \frac{c}{a}$$

relación entre la distancia focal “c” y el semi eje mayor de la elipse “a” (Lehmann, 1991).

$$12. c^2 = a^2 - b^2$$

$$13. e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

$$14. b^2 = \frac{a^2}{1 - e^2}$$

$$15. z = (1 - e^2) x \tan \emptyset$$

Donde "c" es la distancia focal de la elipse (por

$$16. \frac{x^2}{a^2} + \frac{(1 - e^2)^2 x^2 \tan^2 \emptyset}{a^2 (1 - e^2)} = 1$$

Pitágoras)

$$17. x = \frac{a \cos \emptyset}{\sqrt{1 - e^2 \sen^2 \emptyset}}$$

$$18. z = \frac{a(1 - e^2) \sen \emptyset}{\sqrt{1 - e^2 \sen^2 \emptyset}}$$

Sustituyendo en la ecuación 2 por "z" y "b":

Despejando el valor de x:

De esta manera se determinan las ecuaciones paramétricas de las curvas meridianas en función de la variable \emptyset que representa la latitud geocéntrica (ángulo que forma el paralelo con respecto al plano del ecuador).

RADIO DE CURVATURA DE LAS SECCIONES NORMALES DEL MERIDIANO

Las curvas de intersección de los planos normales y las superficies del elipsoide son llamadas "secciones normales". En geometría diferencial se demuestra (Do Carmo, 1976) que en cada punto hay dos secciones normales mutuamente perpendiculares cuyas curvaturas resultan ser las máximas y mínimas y son llamadas "secciones normales principales". Estas secciones principales son las "sección normal del meridiano" y "sección del primer vertical" (Krakiwsky, 1973) y los denotaran por M y N.

Igualmente, en el campo de la geometría diferencial se define al radio de curvatura de la sección normal del meridiano M en un punto de una curva al recíproco de la

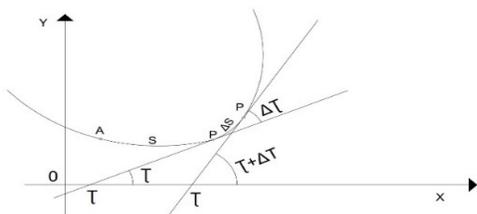


Figura 3. Esquema gráfico para obtener la Curvatura "K".

$$k = \frac{d\tau}{ds} = \frac{z''}{(1 + z'^2)^{3/2}}$$

curvatura en ese punto. Donde la curvatura "k" (Lipschutz, 1970) se define matemáticamente (Figura 3) como:

Luego, el radio de curvatura M se determina invirtien-

$$1. M = \frac{1}{k} = \frac{(1 + z'^2)^{3/2}}{z''}$$

$$\text{Si } z' = -\cot \emptyset$$

$$z'' = \frac{d}{dx}(-\cot \emptyset)$$

$$z'' = \frac{d}{d\emptyset}(-\cot \emptyset) \cdot \frac{d\emptyset}{dx}$$

$$\text{Si } x = \frac{a \cos \emptyset}{\sqrt{1 - e^2 \sen^2 \emptyset}}$$

$$\frac{dx}{d\emptyset} = \frac{a(1 - e^2) \sen \emptyset}{(1 - e^2 \sen^2 \emptyset)^{3/2}}$$

$$\frac{d\emptyset}{dx} = \frac{(1 - e^2 \sen^2 \emptyset)^{3/2}}{a(1 - e^2) \sen \emptyset}$$

$$z'' = \left(\frac{1}{\sen^2 \emptyset} \right) \frac{(1 - e^2 \sen^2 \emptyset)^{3/2}}{a(1 - e^2) \sen \emptyset}$$

do esta relación:

$$k = \frac{d\tau}{ds} = \frac{z''}{(1 + z'^2)^{3/2}}$$

Luego, el radio de curvatura M se determina invirti-

$$1. M = \frac{1}{k} = \frac{(1 + z'^2)^{3/2}}{z''}$$

Sustituyendo en la fórmula del radio de curvatura, M:
RADIO DE CURVATURA DEL PRIMER VERTICAL "N"

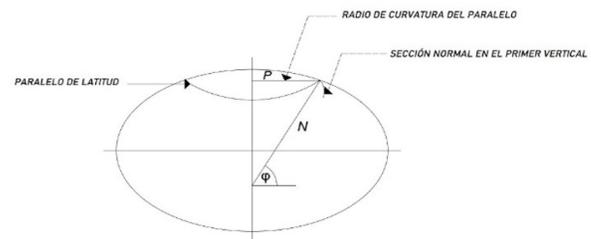


Figura 4. Esquema gráfico del radio de curvatura del primer vertical "N".

$$\cos \emptyset = \frac{p}{N}, \text{ donde } p = x \text{ (abscisa)}$$

Despejando N y sustituyendo p por x:

$$N = \frac{x}{\cos \emptyset}$$

$$3. N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sen^2 \emptyset}}$$

(FIGURA 4)

Este parámetro del radio de curvatura del primer vertical, N será posteriormente un parámetro indispensable para obtener las fórmulas de conversión de coordenadas.

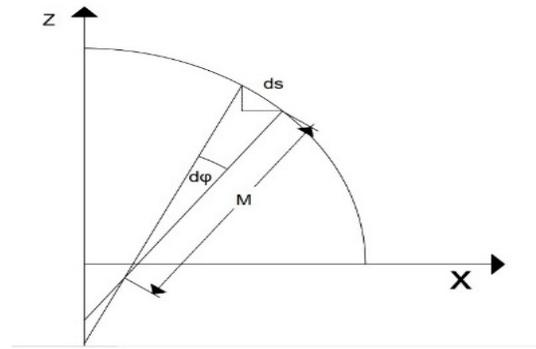


Figura 5. Esquema gráfico para obtener la Longitud del arco meridiano "S ϕ "

LONGITUD DEL ARCO MERIDIANO "S ϕ " (FIGURA 5)

$$dS_{\phi} = M d\phi$$

$$S_{\phi} = \int_0^{\phi} M d\phi$$

De la figura 5, se puede deducir que el diferencial de un arco meridiano es:

Sustituyendo la expresión para M (Ecuación 23), la

$$4. S_{\phi} = a(1 - e^2) \int_0^{\phi} \frac{d\phi}{(1 - e^2 \text{sen}^2 \phi)^{3/2}}$$

longitud del arco meridiano a partir del plano del ecuador hasta la latitud ϕ es:

La integral anterior se trata de un integral tipo elíptica, que no admite una solución exacta mediante funciones,

$$5. \frac{1}{(1 - e^2 \text{sen}^2 \phi)^{3/2}} = 1 + \frac{3}{2} e^2 \text{sen}^2 \phi + \frac{15}{8} e^4 \text{sen}^4 \phi + \frac{35}{16} e^6 \text{sen}^6 \phi + \dots$$

por lo que se empleará una serie binómica infinita para aproximarla, que al desarrollarla obtenemos:

$$\text{sen}^2 \phi = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\phi$$

$$\text{sen}^4 \phi = \frac{3}{8} - \frac{1}{2} \cos 2\phi + \frac{1}{8} \cos 4\phi$$

$$\text{sen}^6 \phi = \frac{5}{16} - \frac{15}{32} \cos 2\phi + \frac{3}{16} \cos 4\phi - \frac{1}{32} \cos 6\phi$$

Empleando las siguientes identidades trigonométricas, para eliminar las integraciones de potencias de senos:

$$6. \frac{1}{(1 - e^2 \text{sen}^2 \phi)^{3/2}} = A - B \cos 2\phi + C \cos 4\phi + \dots$$

Mediante el empleo de las identidades trigonométricas

$$A = 1 + \frac{3}{4} e^2 + \frac{45}{64} e^4 + \frac{175}{256} e^6 + \dots$$

$$B = \frac{3}{4} e^2 + \frac{15}{10} e^4 + \frac{525}{512} e^6 + \dots$$

$$C = \frac{15}{64} e^4 + \frac{105}{256} e^6 + \dots$$

cas anteriores se puede convertir la ecuación 6 en:

Donde:

No obstante, en los cálculos numéricos los términos se puede suprimir $e < \frac{1}{12}$ las potencias mayores de 4 para la excentricidad "e", en virtud que la excentricidad de la Tierra es pequeña, obteniéndose una rápida convergencia de la serie infinita requiriendo realmente pocos términos de la serie para obtener una mayor precisión para calcular

$$\int_0^{\phi} \frac{d\phi}{(1 - e^2 \text{sen}^2 \phi)^{3/2}} = A\phi - \frac{B}{2} \text{sen} 2\phi + \frac{C}{4} \text{sen} 4\phi - \dots$$

la longitud de cualquier arco meridiano.

Integrando la expresión 7, se tiene:

Se obtiene la siguiente fórmula para obtener la longitud del arco meridiano, a partir del plano del ecuador

$$7. S_{\phi} = a(1 - e^2) \left[A\phi - \frac{B}{2} \text{sen} 2\phi + \frac{C}{4} \text{sen} 4\phi \right]$$

hasta el ángulo ϕ que forma con el paralelo del punto (la-

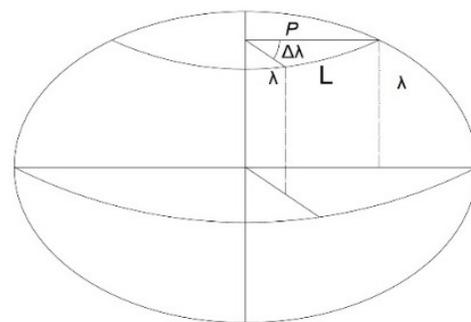


Figura 6. Esquema gráfico para obtener la longitud de un arco paralelo "S ρ ".

titud):

$$8. dS_p = N \cos \varnothing d\lambda$$

$$9. S_p = N \cos \varnothing \lambda$$

LONGITUD DE UN ARCO PARALELO "SP" (FIGURA 6)

Donde:

PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS

El tema de representar la superficie elipsoidal de la Tierra requiere de un proceso matemático, ya que por cuidadoso que sea el tratamiento de la información siempre se introducirá un tipo de distorsión para poder realizar la transformación de la superficie terrestre de forma curva a un plano. Para llevar a cabo esta representación los cartógrafos se auxilian de las proyecciones, es decir de los métodos para transferir la imagen curvilínea del globo terrestre a un plano bidimensional (Gómez More-

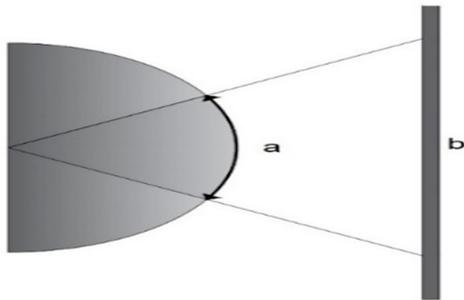


Figura 7. Esquema de una Proyección Cartográfica.

no, 2004). Para ejemplificar el caso de las proyecciones cartográficas se recurre a la Figura 7:

Se puede razonar que la distorsión se reduce si el plano cartográfico es tangente a la esfera, ya que en los puntos de tangencia la distorsión no existe y la unión de dichos puntos define las líneas de escala verdadera K_0 . Sin embargo, en realidad existen diferentes tipos de distorsiones que se pueden generar al proyectar el elipsoide de revolución a un plano.

Por consiguiente, una de las formas de clasificar las proyecciones es por las distorsiones que se generan o por las propiedades que conservan y dentro de las proyecciones las únicas propiedades que se conservan en todo plano cartográfico son las de conformidad y equivalencia (Snyder, 1987)

I. Por tipo de propiedades:

- a) Proyecciones equivalentes (conservan las distancias y áreas de las superficies representadas).

- b) Proyecciones conformes (conservan los ángulos que forman).

- c) Proyecciones afilácticas (No conservan ninguna de las propiedades anteriores).

II. Por tipo de superficie:

- A. *Proyecciones planas* (la superficie de referencia es un plano).

- d) Gnomónicas (las proyecciones tienen como punto de vista el centro de la Tierra).

- e) Estereográficas (tienen como punto de vista el punto diametral opuesto al punto de tangencia).

- f) Ortográficas (las proyecciones azimutales que tienen como punto de vista el infinito).

B. *Proyecciones cónicas*

- g) Normales (cuando coinciden con el eje de rotación de la Tierra).

- h) Transversas (el eje de simetría del cuerpo de referencia forma un ángulo recto con respecto al eje de rotación de la Tierra).

- i) Oblicuas (cuando no se cumplen ninguno de las anteriores).

C. *Proyecciones cilíndricas*

- j) Normales (cuando coinciden con el eje de rotación de la Tierra).

- k) Transversa (el eje de simetría del cuerpo de referencia forma un ángulo recto con respecto al eje de rotación de la Tierra).

- l) Oblicuas (cuando no se cumplen ninguno de las anteriores).

TEORIA MATEMÁTICA DE LAS PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS: EL CASO DE LA PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR (UTM)

El sistema nacional de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) es un sistema de proyección que, a diferencia del sistema de coordenadas geográficas, expresadas las longitudes y latitudes en grados angulares, las magnitudes en el sistema UTM se expresan en metros, teniendo como base de la proyección el elipsoide de referencia, en este caso el WGS84. La proyección transversa de Mercator es una variante de la proyección de Mercator ideado por el geógrafo flamenco Gerhard Kremer (más conocido por Gerardus Mercator), quien publicó su Carta del Mundo en 1569.

El sistema de coordenadas Transversa de Mercator resulta una proyección de acuerdo a la clasificación mencionada anteriormente del tipo cilíndrica, trans-

versa y conforme, es decir dentro de esta transformación se conservan los ángulos y las distancias, pero solo cuando se refieren cercano al ecuador, en cuanto a las demás latitudes se observa un factor de escala menor a 1, esto debido principalmente a una modificación al planteamiento original de Mercator, donde en lugar de hacer pasar un plano tangente al ecuador se hace pasar un plano secante a un meridiano central que corta a la superficie del elipsoide en dos puntos que comprende una zona meridional llamado husos.

El sistema UTM implica el uso de escalas no lineales para las coordenadas (X, Y) para asegurar que el mapa proyectado resulte conforme, por lo que el factor de escala en la dirección del paralelo y en la dirección del meridiano son iguales ($h=k$) en donde las curvas esféricas sobre la superficie terrestre, también denominadas loxodrómicas o líneas del rumbo (ya que corta todos los paralelos bajo el mismo ángulo) se representan como líneas rectas en el mapa y los meridianos se proyectan sobre el plano con una separación proporcional a la del modelo, habiendo equidistancia entre ellos, sin embargo, los paralelos se van separando a medida que se alejan del plano del ecuador.

En este sistema de coordenadas la Tierra se divide en 60 husos de 6° de longitud, cada huso se enumera con un número entre 1 y el 60, estando el primer huso limitado entre los meridianos 180° y 174° y centrado en el meridiano 177° Oeste. Cada huso tiene asignado un meridiano central, que es donde se sitúa el origen de coordenadas, junto con el ecuador, estos husos se enumeran en orden ascendente hacia el Este.

La teoría matemática para transformar coordenadas geográficas (esféricas) a coordenadas planas UTM (cartesianas) y viceversa, se conoce como mapeo dentro del campo de las funciones analíticas (en el plano de los números complejos). Técnicamente consiste en determinar una relación $f:A \rightarrow B$ biunívoca de A a B, empleando variable compleja $x+yi$ que se puede representar en un

$$\text{Si } z = x + yi \\ x + yi = f(\lambda + \varnothing i)$$

plano bidimensional mediante una rotación conforme (Marsden & Hoffman, 1996).

Obviamente se desconoce esta función de relación

$$x + yi = f(\lambda + \varnothing i) = f(\lambda_0 + \Delta\lambda + \varnothing i) \\ = i f(\varnothing) + \Delta\lambda \frac{df(\varnothing)}{d\lambda} - \frac{\Delta\lambda^2}{2!} i \frac{d^2 f(\varnothing)}{d\lambda^2} - \frac{\Delta\lambda^3}{3!} \frac{d^3 f(\varnothing)}{d\lambda^3} + \frac{\Delta\lambda^4}{4!} i \frac{d^4 f(\varnothing)}{d\lambda^4} \\ + \frac{\Delta\lambda^5}{5!} \frac{d^5 f(\varnothing)}{d\lambda^5} - \frac{\Delta\lambda^6}{6!} i \frac{d^6 f(\varnothing)}{d\lambda^6} + \dots$$

$f:A \rightarrow B$, pero se planteará una serie de Taylor para mapear dicha función de relación f :

Donde:

λ =es el meridiano de cualquier punto sobre la superficie (grados)

λ_0 =es el meridiano central del huso o zona UTM (grados)

$$\text{Huso} = \text{Zona}_{UTM} = 30 - \text{entero} \left(\frac{\lambda \text{ en grados}}{6} \right)$$

$$\lambda_0 = 183^\circ - 6 \times \text{Zona}_{UTM}$$

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$$

El huso de referencia se determina mediante la siguiente expresión, según el meridiano del lugar:

La diferencia entre el meridiano del lugar y el meridiano central del huso, en radianes.

De las fórmulas para longitud de arco de meridianos y paralelos, se tiene que por ser las coordenadas UTM una

$$dS_\varnothing = dS_p \\ dS_\varnothing = M d\varnothing \\ dS_p = N \cos \varnothing d\lambda \\ M d\varnothing = N \cos \varnothing d\lambda \\ \frac{d\varnothing}{d\lambda} = \frac{N \cos \varnothing}{M}$$

$$\text{Sea: } f(\varnothing) = S_\varnothing = \int M d\varnothing$$

$$f(\varnothing) = S_p = \int N \cos \varnothing d\lambda$$

$$\frac{df(\varnothing)}{d\varnothing} = \frac{dS_\varnothing}{d\varnothing} = M$$

$$\frac{df(\varnothing)}{d\lambda} = \frac{dS_p}{d\lambda} = N \cos \varnothing$$

$$\frac{df(\varnothing)}{d\lambda} = \frac{df}{d\lambda} = N \cos \varnothing$$

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{df}{d\lambda} \right) = \frac{d}{d\varnothing} (N \cos \varnothing) \cdot \frac{d\varnothing}{d\lambda}$$

$$\frac{d^2 f(\varnothing)}{d\lambda^2} = \frac{d}{d\varnothing} (N \cos \varnothing) \cdot \frac{N \cos \varnothing}{M}$$

proyección conforme debe cumplir con la proporcionali-

$$\frac{d}{d\varnothing} (N \cos \varnothing) = -M \sin \varnothing$$

$$\frac{d^2 f(\varnothing)}{d\lambda^2} = -\frac{N}{2} \sin 2\varnothing$$

$$\frac{d^3 f(\varnothing)}{d\lambda^3} = \frac{d}{d\varnothing} \left(\frac{d^2 f}{d\lambda^2} \right) \frac{d\varnothing}{d\lambda}$$

$$\frac{d^3 f(\varnothing)}{d\lambda^3} = -\frac{1}{2} \frac{d}{d\varnothing} (N \sin 2\varnothing) \cdot \frac{d\varnothing}{d\lambda}$$

$$\frac{d^3 f(\varnothing)}{d\lambda^3} = -\frac{1}{2} [N' \sin 2\varnothing + 2N \cos 2\varnothing] \frac{N}{M} \cos \varnothing$$

$$N' = \frac{dN}{d\varnothing} = (N - M) \tan \varnothing, \text{ (Thomas, 1952)}$$

dad al tratarse de una proyección conforme:

$$\frac{d^3 f(\varnothing)}{d\lambda^3} = -\frac{N}{2} [(N-M) \tan \varnothing \sin 2\varnothing \cos \varnothing + 2N \cos 2\varnothing \cos \varnothing] \cdot \frac{1}{M}$$

$$\frac{d^3 f(\varnothing)}{d\lambda^3} = -\frac{N}{2} [(N-M) \sin \varnothing \sin 2\varnothing + 2N \cos 2\varnothing \cos \varnothing] \cdot \frac{1}{M}$$

$$\frac{d^3 f(\varnothing)}{d\lambda^3} = -\frac{N}{4} \left[\left(\frac{N}{M} + 1 \right) \cos 3\varnothing + \left(\frac{3N}{M} - 1 \right) \cos \varnothing \right]$$

$$\frac{d^4 f(\varnothing)}{d\lambda^4} = \frac{d}{d\varnothing} \left(\frac{d^3 f}{d\lambda^3} \right) \frac{d\varnothing}{d\lambda}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^4 f(\varnothing)}{d\lambda^4} = & -\frac{1}{4} N' \left[\left(\frac{N}{M} + 1 \right) \cos 3\varnothing + \left(\frac{3N}{M} - 1 \right) \cos \varnothing \right] \frac{N \cos \varnothing}{M} \\ & - \frac{1}{4} N \left[\left(\frac{N}{M} \right)' \cos 3\varnothing - 3 \left(\frac{N}{M} \right) \right. \\ & \left. + 1 \right] \sin 3\varnothing + 3 \left(\frac{N}{M} \right)' \cos \varnothing - \left(\frac{3N}{M} - 1 \right) \sin \varnothing \left] \frac{N \cos \varnothing}{M} \end{aligned}$$

Donde:

$$\frac{d}{d\varnothing} \left(\frac{N}{M} \right) = \left(\frac{N}{M} \right)' = \frac{-2(N-M)}{M} \tan \varnothing \quad (\text{Thomas, 1952})$$

$$\frac{d^4 f(\varnothing)}{d\lambda^4} = -\frac{N}{8} \left[2 \left(-1 + \frac{N}{M} + 4 \frac{N^2}{M^2} \right) \sin 2\varnothing + \left(1 + \frac{N}{M} + 4 \frac{N^2}{M^2} \right) \sin 4\varnothing \right]$$

$$\frac{d^5 f(\varnothing)}{d\lambda^5} = \frac{d}{d\varnothing} \left(\frac{d^4 f}{d\lambda^4} \right) \frac{d\varnothing}{d\lambda}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^5 f(\varnothing)}{d\lambda^5} = & \frac{N}{16} \left[2 \left(1 - 2 \frac{N}{M} + 13 \frac{N^2}{M^2} - 4 \frac{N^3}{M^3} \right) \cos \varnothing \right. \\ & \left. + \left(-3 + 2 \frac{N}{M} - 3 \frac{N^2}{M^2} + 44 \frac{N^3}{M^3} \right) \cos 3\varnothing + \left(1 + 2 \frac{N}{M} - 7 \frac{N^2}{M^2} + 28 \frac{N^3}{M^3} \right) \cos 5\varnothing \right] \end{aligned}$$

$$\frac{d^6 f(\varnothing)}{d\lambda^6} = \frac{d}{d\varnothing} \left(\frac{d^5 f}{d\lambda^5} \right) \frac{d\varnothing}{d\lambda}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^6 f(\varnothing)}{d\lambda^6} = & -\frac{N}{32} \left[\left(5 - 6 \frac{N}{M} - 91 \frac{N^2}{M^2} + 364 \frac{N^3}{M^3} - 136 \frac{N^4}{M^4} \right) \sin 2\varnothing + 4 \left(-1 + \frac{N^2}{M^2} - 28 \frac{N^3}{M^3} \right) \right. \\ & \left. + 88 \frac{N^4}{M^4} \right] \sin 4\varnothing + \left(1 + 2 \frac{N}{M} + 33 \frac{N^2}{M^2} - 196 \frac{N^3}{M^3} + 280 \frac{N^4}{M^4} \right) \sin 6\varnothing \end{aligned}$$

Operando esta expresión con las ecuaciones para M y N:

Donde:

Igualando en la expresión de la serie de Taylor los tér-

$$x = \Delta\lambda \frac{df(\varnothing)}{d\lambda} - \frac{\Delta\lambda^3}{6} \frac{d^3 f(\varnothing)}{d\lambda^3} + \frac{\Delta\lambda^5}{120} \frac{d^5 f(\varnothing)}{d\lambda^5} + \dots$$

$$y = f(\varnothing) - \frac{\Delta\lambda^2}{2} \frac{d^2 f(\varnothing)}{d\lambda^2} + \frac{\Delta\lambda^4}{24} \frac{d^4 f(\varnothing)}{d\lambda^4} - \frac{\Delta\lambda^6}{720} \frac{d^6 f(\varnothing)}{d\lambda^6} + \dots$$

minos, relacionando las partes reales para x, y las imaginarias para y:

Como $\Delta\lambda < 1/19$ al calcular los términos de potencias mayores o igual a 4, arrojarían valores muy pequeños e insignificantes para la sumatoria de la serie, se concluye que la serie es rápidamente convergente y se podría escribir sin perder exactitud en las expresiones reducidas,

$$x \approx N\Delta\lambda \cos \varnothing + \frac{N}{24} \Delta\lambda^3 \left[\left(3 \frac{N}{M} - 1 \right) \cos \varnothing + \left(\frac{N}{M} + 1 \right) \cos 3\varnothing \right]$$

$$y \approx S_\varnothing + \frac{N}{4} \Delta\lambda^2 \sin 2\varnothing - \frac{N}{192} \Delta\lambda^4 \left[2 \left(-1 + \frac{N}{M} + 4 \frac{N^2}{M^2} \right) \sin 2\varnothing + \left(1 + \frac{N}{M} + 4 \frac{N^2}{M^2} \right) \sin 4\varnothing \right]$$

sustituyendo previamente por las derivadas del orden correspondiente:

En donde M y N, son los radios de curvatura normal

y del primer vertical, respectivamente y S_\varnothing es la longitud del meridiano misma que se puede obtener con mucha aproximación reduciendo la expresión en virtud que la excentricidad de la Tierra $e < 1/12$ es relativamente pequeña y los términos de potencias mayores de 4 en la serie

$$S_\varnothing \approx a(1-e^2) \left[\left(1 + \frac{3}{4}e^2 + \frac{45}{64}e^4 \right) \varnothing - \left(\frac{3}{8}e^2 + \frac{15}{20}e^4 \right) \sin 2\varnothing \right]$$

trigonométrica se pueden omitir por ser numéricamente insignificantes:

Por convención dentro de este sistema de coordenadas a los meridianos de longitud Oeste, para evitar coordenadas negativas lo convinieron en sumarle el valor de 500,000 a la coordenada X, y para el caso de las regiones con latitudes al Sur sumarle al valor de Y en 10,000,000.

CONVERGENCIA DE MERIDIANOS Y

Sea un punto de coordenadas (\varnothing, λ) donde la figura representa el plano de proyección con O'N como eje de las ordenadas y O'E como el eje de las abscisas del plano cartesiano y por otra parte A'Ng representa el Norte de la cuadrícula y A'Eg el Este de la cuadrícula son las líneas paralelas a los ejes y que pasan por el punto A'. La transformada del meridiano es la línea A'B' y la del paralelo la línea A'C'. El ángulo γ es la convergencia de meridianos en

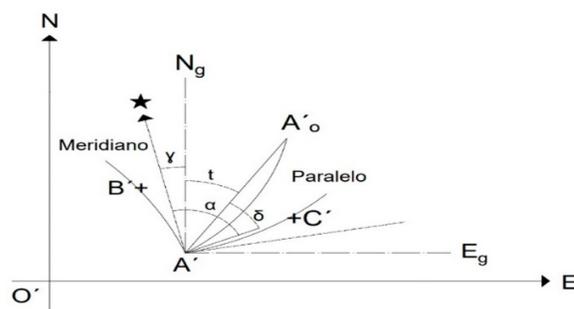


Figura 8. Esquema gráfico de convergencia de meridianos γ .

el punto A' y se mide desde la transformada del meridiano en el sentido de las agujas del reloj (Figura 8).

$$\tan \gamma = \frac{dx/d\lambda}{dy/d\lambda}$$

$$\tan \gamma = \frac{dx/d\varnothing}{dy/d\varnothing}$$

$$\gamma = \arctan \left(\frac{dx/d\varnothing}{dy/d\varnothing} \right)$$

Matemáticamente se define la convergencia de meridianos como (Thomas, 1952):

Las diferenciales tanto de $\frac{dx}{d\phi}$ como de $\frac{dy}{d\phi}$, se pueden obtener de las series de Taylor, calculando las derivadas con respecto a la variable ϕ que durante el desarrollo se obtuvieron. No se escriben las expresiones por ser extensas, pero numéricamente son factibles de obtenerlas porque las series son rápidamente convergentes.

FACTOR DE ESCALA UTM, K

A la hora de diseñar un mapa es necesario tener en cuenta el fin para el que va ser empleado, este fin conlleva a la elección del tipo de proyección, así como la escala a la que se va representar el mapa. Además, los topógrafos e ingenieros civiles no solo trabajan con coordenadas sino con los elementos geométricos realizando la mayoría de las veces mediciones directamente sobre mapas o

$$K_o = \frac{dS}{dS_p}$$

$$K_o = \frac{dS}{d\lambda} \bigg/ \frac{dS_p}{d\lambda}$$

$$K_o = \frac{\sqrt{\left(\frac{dx}{d\lambda}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\lambda}\right)^2}}{N \cos \phi} \text{ (Thomas, 1952)}$$

$$K_o = \frac{1}{N \cos \phi} \cdot \frac{dy}{d\lambda} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dy} \frac{d\lambda}{d\lambda}\right)^2}$$

$$K_o = \frac{1}{N \cos \phi} \cdot \frac{dy}{d\lambda} \cdot \sqrt{1 + (\tan \gamma)^2}$$

$$K_o = \frac{1}{N \cos \phi} \cdot \frac{dy}{d\phi} \cdot \frac{d\phi}{d\lambda} \cdot \sec \gamma$$

$$K_o = \frac{\sec \gamma}{M} \cdot \frac{dy}{d\phi}$$

los planos donde la escala gráfica es importante dejarlo indicada. Para las proyecciones, se determina el factor de escala mediante la siguiente expresión matemática:

CONCLUSIONES

El estudio de las representaciones de la superficie de la Tierra por medio de modelos o mapas en un plano bidimensional es realizado mediante las proyecciones cartográficas, para las cuales se requieren algunas técnicas de matemáticas avanzadas, mismas que son parte de la formación básica durante los primeros semestres de las

carreras de ingeniería, por lo cual posibilita aplicar estos conocimientos para construir modelos de representación cartográfica.

Las aplicaciones de estas herramientas teóricas permiten construir modelos de representación gráfica de la Tierra como la de Universal Transversa Mercator (UTM), Gauss-Kruger, la Cónica de Lambert, Estereográfica (UPS) o inclusive la Transversa Modificada Ejidal (TME) empleada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para el procesamiento de datos y medición de los ejidos en México.

Al comprender estos diferentes modelos de representación, el manejo de la convergencia angular y el uso de escalas de representación, así como la conversión de un sistema de coordenadas geográficas a otra; permiten la acertada interpretación para el procesamiento y elaboración de planos ingenieriles, el trazo de línea base para los levantamientos topográficos, el replanteo de poligonales, de líneas de conducción o transmisión y proporcionar al personal de campo que ejerce la ingeniería, la topografía y la arquitectura los elementos teóricos en que se fundamenta los datos que se plasman en los planos y que frecuentemente generan confusión acerca de estos sistemas de coordenadas.

El que existan potentes herramientas digitales como Google Maps, Google Earth o los dispositivos portátiles GPS que disponen de estos algoritmos que proporciona esta teoría y además de ofrecer increíbles posibilidades como suelen ser interactivas y la puedas llevar consigo a cualquier sitio, no debemos olvidar que detrás de ella sigue vigente la cartografía y que en cada una de ellas, sigue siendo necesario el uso de las proyecciones cartográficas y de las demás técnicas propias de la cartografía, que finalmente como bien decía Claudio Ptolomeo “...*Estas cosas pertenecen a la más noble y a la más bella de las aventuras intelectuales, el mostrar la inteligencia humana por medio de las matemáticas...*”

REFERENCIAS

- Do Carmo, M. (1976). *Differential Geometry of Curves and Surfaces*. New Jersey: Prentice Hall.
- Gómez Moreno, R. A. (2004). *Guía de Proyecciones Cartográficas*. México: Instituto Nacional de Geografía y Estadística.
- Krakiwsky, E. J. (1973). *Conformal Maps Projections in Geodesy*. Canada: University of New Brunswick.
- Lehmann, C. (1991). *Geometría Analítica*. México: Limusa.
- Lipschutz, M. (1970). *Differential Geometry*. Co, USA: Mc Graw Hill Book.
- Marsden, J., & Hoffman, M. (1996). *Basic Complex Analysis*. New York: W. H. Freeman.
- Meynen, E. (1984). *Multilingual Dictionary of Technical Terms in Cartography*. French and Europeans Pubns.
- Rapp, R. (1991). *Geometric Geodesy*. Ohio, USA: Ohio State University.
- Snyder, J. (1987). *Map Projections a Working Manual*. Washington, D. C.: Geological Survey.
- Thomas, P. (1952). *Conformal Projections in Geodesy and Cartography*. Washington, D. C.: Government Printing Office.

COMPARATIVO DE LOS MODELOS PARAMÉTRICOS DE ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO CFE 2015 Y NTC 2020

COMPARISON OF THE PARAMETRIC MODELS OF SEISMIC DESIGN SPECTRA CFE 2015 AND NTC 2020

Juan Alberto Sánchez Hernández ¹

Miembro de la Comisión de Estructuras del Colegio de Ingenieros Civiles de Chiapas A.C. (CICCH).
proyest.ingenieria@gmail.com

RESUMEN

México, un país con alta sismicidad requiere desarrollar normativas municipales que tomen lo mejor de las ya desarrolladas a fin de que reflejen las condiciones de sitio y permitan asegurar estructuralmente la infraestructura que en estas localidades se desarrollan. Lo anterior nos lleva a analizar las normas y manuales emitidos por los dos principales referentes a nivel nacional en materia sísmica, y particularmente en el desarrollo de espectros de diseño sísmico, es decir el Instituto de Investigaciones Eléctricas y Energías Limpias (INEEL) representada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Gobierno de la Ciudad de México a través de sus Normas Técnicas complementarias aplicables únicamente a la Ciudad de México.

Como resultado del análisis comparativo realizado sobre puntos ubicados en la Ciudad de México se determinó que ambas metodologías presentan consideraciones a favor y en contra, siendo de ellas la de CFE la más conservadora.

Palabras clave: Espectros Sísmicos, amortiguamiento, redundancia, ductilidad, sobre resistencia.

ABSTRACT

Mexico, a country with high seismicity, needs to develop municipal regulations that take the best of those already developed in order to reflect the site conditions and allow structurally assuring the infrastructure that is being developed in these localities. The foregoing leads us to analyze the standards and manuals issued by the two main references at the national level in seismic matters, and particularly in the development of seismic design spectra, that is, the Institute for Electrical and Clean Energy Research (INEEL) represented by the Federal Electricity Commission (CFE) and the Government of Mexico City through their complementary Technical Standards applicable only to Mexico City.

As a result of the comparative analysis carried out on points located in Mexico City, it was determined that both methodologies present considerations in favor and against, of which the CFE is the most conservative.

Keywords: Seismic spectra, damping, redundancy, ductility, over resistance.

INTRODUCCIÓN

A raíz de los sismos de septiembre del 2017, ocurridos en las costas de Chiapas y alrededores de Puebla, el interés por el estudio de los espectros sísmicos y su determinación ha tomado nueva relevancia.

En el 2015, la CFE a través del Instituto de Investigaciones Eléctricas y Energías Limpias (INEEL) emitió la actualización a su Manual de Obras Civiles, Capítulo de Diseño

Sísmico (CFE, 2015) el cual tiene aplicación para todas aquellas obras de infraestructura eléctrica en el país, siendo este hecho el que ha permitido que el mismo manual sirva de referencia para algunos códigos y reglamentos de construcción a nivel municipal en México. Inclusive las Normas Técnicas Complementarias (NTC) de Ciudad de México (CDMX) en el apartado de Análisis Sísmico menciona a manera de comentario la aplicación del manual de CFE en su capítulo de sismos, para las estructuras industriales.

Uno de los grandes aportes del Manual de CFE desde el 2008 (CFE, 2008), fue sin duda la inclusión del programa PRODISIS (INEEL-CFE, 2015) que considera el peligro sísmico para generar espectros de respuesta en roca, es decir las probabilidades de que determinadas aceleraciones fueran excedidas por los eventos sísmicos de las regiones sismogénicas para cada punto de la geografía nacional de acuerdo con el grado de influencia gobernada por la magnitud y distancia del movimiento.

En diciembre del 2017, se publicaron las nuevas normas de CDMX (Gaceta de CDMX, 2017) mismas que entrarían en vigor de forma progresiva en el 2018, estas normas incluían una novedosa forma de elaborar los espectros sísmicos a partir de una zonificación continua del suelo basado en parámetros dinámicos de la metrópoli a diferencia de la anterior edición de la normativa que se refería más a clasificaciones zonificadas por áreas y parámetros basado en capacidades. Dicha norma incluye, al igual que la de CFE, el programa SASID (CDMX-IIUNAM, 2017) que permite evaluar el espectro sísmico para las condiciones de sitio de cada punto ciudadano.

En el 2020 las NTC de CDMX (NTC S, 2020, pág. Cap. 3), incluyeron comentarios y aclaraciones de la propuesta metodológica vertida en la normativa y el SASID también tomó en cuenta los efectos del hundimiento regional para proyectar los espectros transparentes y con estos parámetros que requerían ser actualizados de manera continua también se vino la necesidad de incluir el programa en un servidor de internet que permitiera dichas intervenciones periódicas para ser considerado en los análisis de las edificaciones.

Ambos modelos, de CFE y las NTC de CDMX, fueron elaborados por autoridades en materia sísmica en México, pero debidos a la base conceptual de cada modelo, no es fácil apreciar las similitudes, si las hay, entre los resultados de cada uno y en donde se bifurcan.

El presente trabajo, considerando la Ciudad de México como referencia, realiza un comparativo a nivel pa-

ramétrico tanto de los modelos transparentes, como de los utilizados para considerar los efectos inelásticos en dichos espectros con la intención de poder tener una mejor percepción de los alcances y limitaciones de cada uno que pudieran ser aprovechados en el desarrollo de modelos paramétricos en la provincia que den oportunidad al desarrollo de reglamentos municipales confiables.

COMPARATIVOS DE LOS MODELO PARAMETRICO DE ESPECTROS SISMICOS.

El modelo de (CFE, 2015, pág. Secc. 3.1), considera una curva envolvente en cuatro partes cuyos límites intermedios y parámetros de forma están definidos por periodos característicos asociados al tipo de suelo en el que las estructuras se encuentran desplantadas, esto es muy acorde con las tendencias internacionales (ASCE 7-16, 2016). En tanto que las (NTC S, 2020, pág. Cap. 3) plantean la envolvente en solo tres secciones, las cuales han logrado cubrir la amplia variedad de espectros generados por la densa red acelerográfica distribuida en la ciudad de México.

La meseta espectral de los espectros de (CFE, 2015) está vinculada a la aceleración máxima en roca (aor) obtenida a partir de un estudio de peligro sísmico para distintos periodos de retorno, desarrollada a través de dos factores que modelan el comportamiento del suelo y el de la estructura, dependiendo de su ubicación geográfica y tipo de suelo subyacente, el cual también es modelado de forma paramétrica intentando estimar los periodos del suelo que definen los puntos de inflexión (T_a , T_b y T_c) de la envolvente espectral a través de características basadas en una microzonificación. En el caso de las NTC los parámetros del suelo corresponden a interpolaciones discretas basadas en los puntos cuyos datos han podido extraerse de la nutrida red acelerográfica y los diversos estudios del subsuelo de la ciudad.

Los coeficientes de caída de las curvas (k y r) de (CFE, 2015), tratan de vincularse a parámetros físicos como lo es la relación entre el periodo del suelo y la estructura, así como a la configuración de espectros físicos de referencia, tal como ocurre con el coeficiente k de las NTC2020 aplicado a su última rama.

En cuanto al amortiguamiento, las ecuaciones de las curvas se plantean de manera original considerando el 5%, lo cual es similar al modelo usado por las (NTC S, 2020), no obstante, la formulación de la función de ajuste por amortiguamiento $\beta(T_e, \zeta)$, de (CFE, 2015) es

más sencilla que la planteada por las NTC2020 (Reyes, Miranda, Ordaz, & Meli P., 2002). Esta función es importante para realizar adecuaciones a las curvas espectrales con el fin de considerar el uso de nuevas tecnologías de disipación de energía y materiales de construcción.

En general la configuración de los espectros elásticos transparentes de ambas formulaciones resulta para similares puntos de inflexión y meseta espectral, también similares en sus primeras dos ramas, mostrándose más conservador el modelo de (CFE, 2015) para las ramas posteriores.

En figuras siguientes (Figura 1, 2 y 3) se presenta un comparativo teórico entre ambos modelos, considerando la misma aceleración sísmica en el suelo basal (a_0r) y en la meseta $c=452.50$ cm/s², con T_a , y T_b , determinados de acuerdo con el modelo de suelos del Manual de CFE. En el gráfico, la ordenada espectral representa el porcentaje de la aceleración de gravedad considerada por el espectro. En dicho comparativo se observa la similitud en el trazo de los espectros transparentes generado por ambos modelos a nivel paramétrico.

COMPORTAMIENTO ESPECTRAL INELÁSTICO.

El análisis estructural actual se basa en modelos elásticos en los que introducir adecuaciones que permitan considerar su funcionamiento dentro del rango plástico aun resultan complejo, por esa razón se prefiere afectar los espectros transparentes mediante factores que aluden

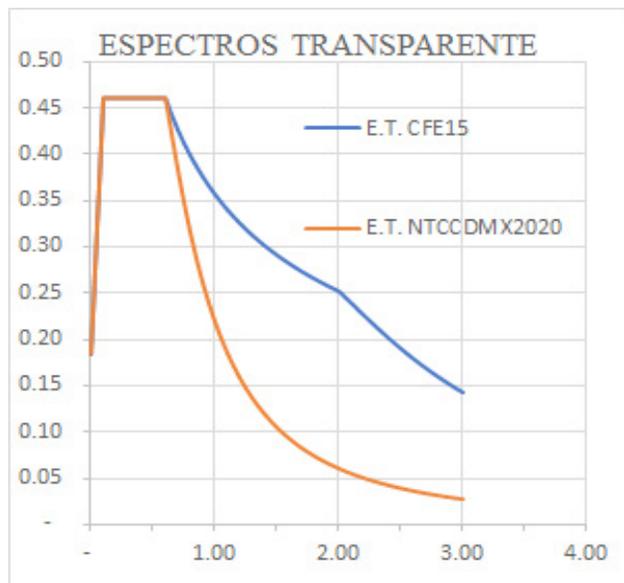


Figura 1. Espectro Transparente modelado sobre Región Sísmica C, suelo tipo I (elaboración propia).

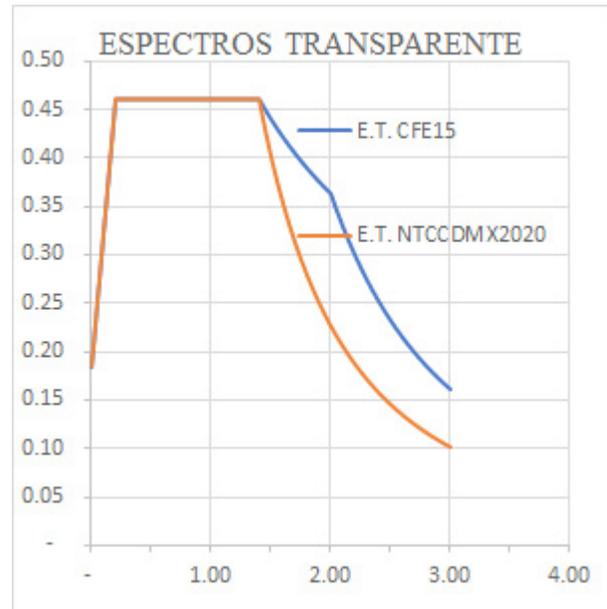


Figura 2. Espectro Transparente modelado sobre Región Sísmica C, suelo tipo II (elaboración propia).

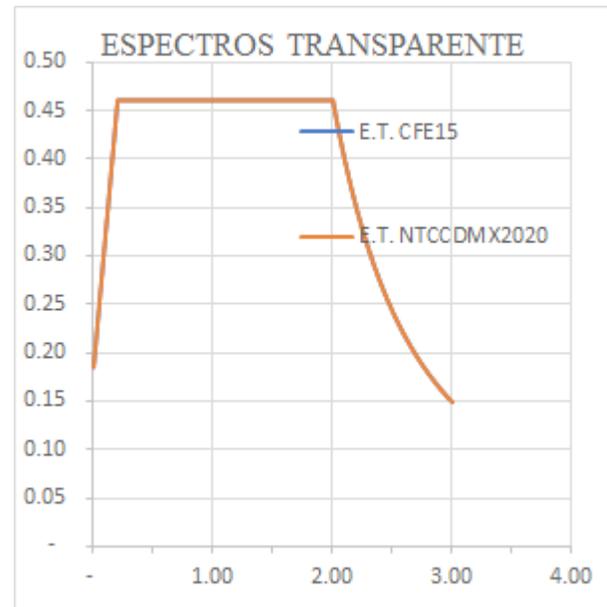


Figura 3. Espectro Transparente modelado sobre Región Sísmica C, suelo tipo III (elaboración propia).

la posibilidad de la estructura de incurrir en este rango para soportar solicitaciones superiores. De esta manera, cuando la estructura diseñada para un espectro reducido es sometida a las demandas reales del espectro original, la sobre demanda es absorbida a través de la ductilidad, la sobre resistencia y la redundancia estructural implícita en un sistema bien estructurado.

No obstante, el comportamiento de las estructuras dentro del rango inelástico resulta aún complejo de definir y cada grupo de investigadores sugieren alternativas para su consideración basados en las experiencias que resultan de eventos catastróficos que al ser re-evaluados pueden llegar a estimar hasta qué punto de demanda y/o desplazamiento presentaron la falla que los llevó al colapso.

Para poder comparar las formulaciones de (CFE, 2015) y las (NTC S, 2020), se eligió un terreno tipo II, en la zona sísmica C, congruente con los parámetros de (CFE, 2015), a fin tener un punto de similitud en ambos modelos. Así mismo se consideraron como datos de entrada las mismas aceleraciones en roca (a_{0r}) y en la meseta espectral (c), descrito en párrafos anteriores. De esta forma el comportamiento espectral transparente resulta ser el mismo que el reflejado en la figura 2.

Los parámetros base fueron los siguientes:
 $a_{0r} = 181.00 \text{ cm/s}^2$; $c = 452.50 \text{ cm/s}^2$; $T_a = 0.20 \text{ s}$; $T_b = 1.40 \text{ s}$; $T_c = 2.00 \text{ s}$; $k = 1.00$; $r = 2/3$.

En tanto que los coeficientes que modelan el comportamiento inelástico utilizados fueron básicamente los siguientes:

Para CFE2015: $Q = 2.00$; $R_o = 2.00$; $\rho = 1.25$.

Para NTC2020: $Q = 2.00$; $R_o = 2.00$; $k_1 = 0.80$.

Tratando con estos valores representar a la mayor parte de las estructuras en nuestro territorio nacional, conformado principalmente por edificaciones de mampostería.

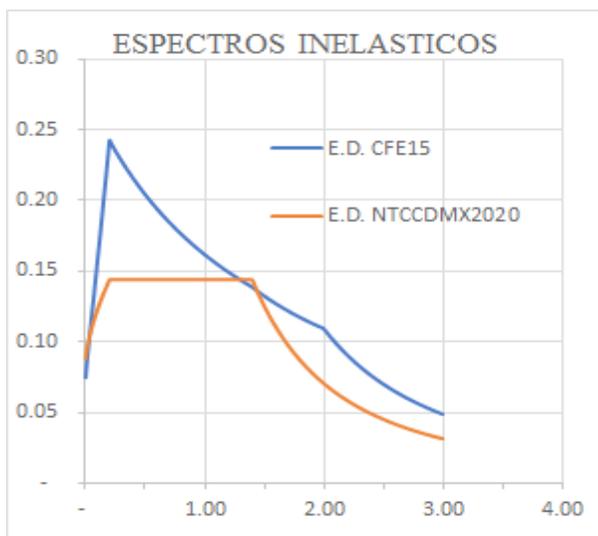


Figura 4. Espectro Inelástico Zona C, Terreno II, con parámetros $Q=2$, $R_o=2$ (elaboración propia).

Como resultado se obtuvieron espectros inelásticos donde podemos observar que el modelo de (CFE, 2015) continúa siendo más conservador que el correspondiente a las NTC2020, inclusive en toda su extensión.

EFICIENCIA DE LA MICROZONIFICACIÓN DE SUELOS CFE2015 PARA CDMX.

Evidentemente las (NTC S, 2020) y el SASID poseen valores que definen los límites de los segmentos de la curva espectral envolvente de una manera más precisa que los de la microzonificación generalizada de (CFE, 2015), pero en vista de su conservador planteamiento, ¿qué tan eficiente resulta para cubrir los parámetros reales de los suelos de CDMX? Ese cuestionamiento llevó a comparar algunos puntos dentro de la geografía de CDMX con la finalidad de obtener los parámetros y conciliar los mismos con los resultados del SASID con los del PRODISIS para las mismas ubicaciones.

Las coordenadas analizadas fueron:

- 1.- latitud 19.32, longitud -99.18
- 2.- latitud 19.42, longitud -99.15

En estos puntos las aceleraciones en roca y de la meseta, así como los parámetros límite de las envolventes (T_a , T_b , T_c , k y r) fueron obtenidos según las metodologías propias del Manual de CFE y las NTC de CDMX, respectivamente para cada formulación, en su defecto de acuerdo con los programas PRODISIS y SASID.

Aparentemente los resultados en esta primera ubicación (Figura 5) con microzonificación estimada como tipo II, para el PRODISIS y el suelo particular de CDMX establecido en el SASID, muestran que los espectros transparentes y el inelástico resultaron similares en cuanto a los límites espectrales, no obstante, es conveniente notar que las aceleraciones de roca y suelo que definen las mesetas resultan muy diferentes. Nótese también, en línea punteada en rojo, la disposición de periodo natural del terreno en el sitio (T_s), obtenido del SASID.

En la segunda ubicación para el modelo (CFE, 2015), se eligió un terreno tipo III, en la misma región sísmica C, dentro de la geografía de CDMX, con los siguientes resultados:

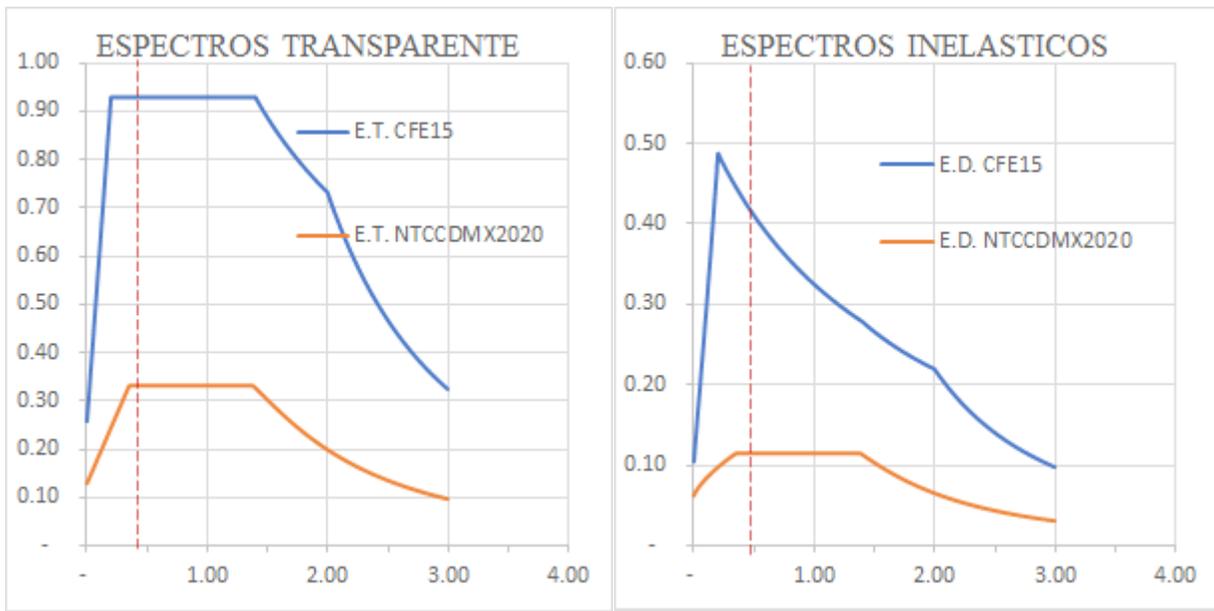


Figura 5. Comparativa de espectros transparentes y reducidos bajo condiciones de sitio, ubicación 1 (elaboración propia).

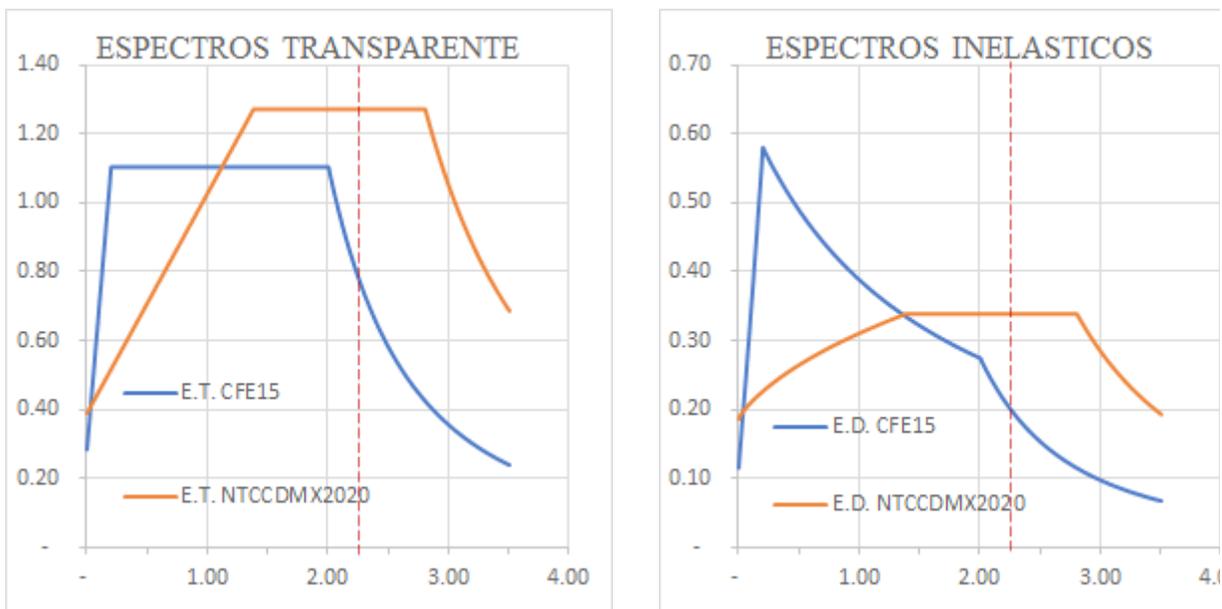


Figura 6. Comparativa de espectros transparentes y reducidos bajo condiciones de sitio, Ubicación 2 (elaboración propia).

Podemos apreciar que, en la zona del lago, la parametrización de la microzonificación de (CFE, 2015) pudiera no estar reflejando una configuración espectral segura, ya que las mesetas de los valores reales se encuentran desfasados y no cubren el periodo del suelo, esto lo notamos porque en las gráficas adicionalmente se indicó el periodo fundamental del suelo mediante una línea punteada.

Los modelos del SASID si se apegan a las configuraciones sísmicas representativas de cada zona dentro del territorio de CDMX.

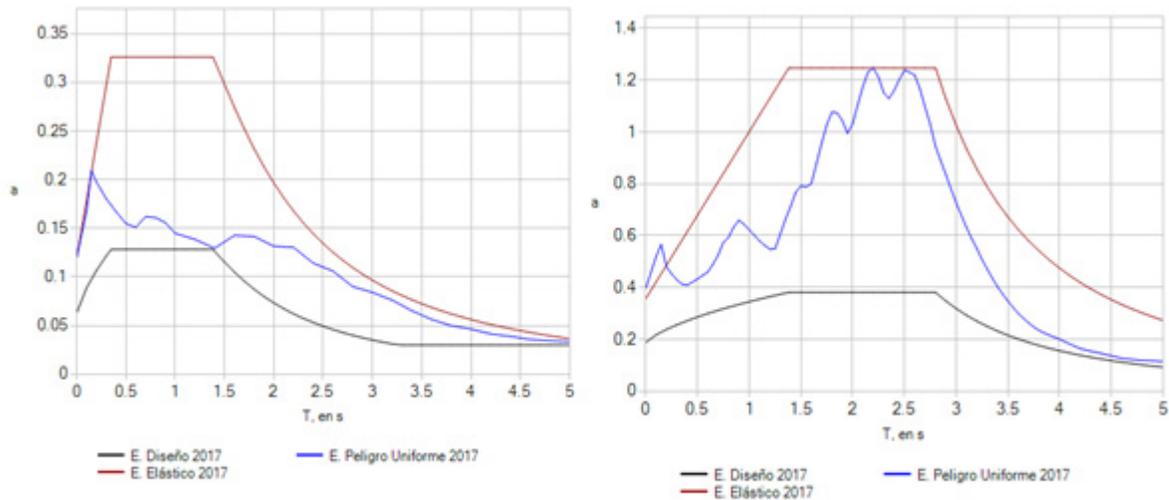


Figura 7. Espectros transparentes y de sitio generados directamente por el programa SASID Ubicación 1 y 2.

CONCLUSIÓN

De este análisis podemos concluir que el modelo (CFE, 2015) y por tanto del programa PRODISIS resultan en espectros sísmicos más conservadores que el modelo propuesto por las (NTC S, 2020) y el SASID, tanto a nivel transparente como inelástico, para su uso genérico. Con excepción de las particularidades del suelo de CDMX, en las que los espectros transparentes generados por el SASID son más acordes con los espectros históricos.

Sin embargo, la diferencia entre ambos criterios, salvando lo referente a número de segmentos del espectro y el amortiguamiento, se encontró en el modelado de la ductilidad y el de la sobrerresistencia, que son la base de los espectros inelásticos. Y estas diferencias posiblemente se deben a la influencia del particular suelo de la CDMX, que afecta los desplazamientos y el periodo estructural y que podrían estar influenciados por los resultados obtenidos en diversos estudios analíticos realizados en osciladores elasto-plásticos con base rígida y flexible (Huerta Ecatl, 2015, pág. 31) en las que se subestima la demanda, no obstante el modelo de interacción suelo estructura (ISE) planteado Pérez Rocha y Avilés en (2003) y (2007) y que ha sido tomado en cuenta por el Manual de CFE (CFE, 2015) es el que mejor interpreta las observaciones realizadas por Miranda y Bertero (1994) en cuanto al comportamiento de las frecuencias estruc-

turales con ISE. Por lo que, para el resto de la república se antoja mayor idoneidad al modelo paramétrico de ductilidad y sobrerresistencia propuesto por (CFE, 2015) para su adopción generalizada, tal como lo mencionan, de acuerdo con su estudio, Romero Maldonado, Tena Colunga, y Nangullasmú Hernández (2017, pág. 15).

También se detecta un área de oportunidad en el pico del espectro inelástico de (CFE, 2015), a fin de direccionarlo al centro del rango de la meseta, debido que es la zona en que resulta más probable que se encuentre el período del suelo y por tanto la posibilidad de frecuencias en resonancia que demanden mayor capacidad, para lo cual podría resultar útil el enfoque originalmente planteado en el Manual de Obras Civiles (CFE, 2008).

Una de las ventajas más significativas del SASID, resulta ser el hecho de estar referido a parámetros específicos de sitio y el PRODISIS en cambio en una microzonificación arbitraria propuesta de manera genérica a fin de poder cubrir la mayor parte de los suelos en toda la República Mexicana.

Desde esta perspectiva, la adopción de una propuesta de tres segmentos, como los espectros de las NTC, con parámetros de comportamiento inelástico conservadores, como los de CFE, resulta mayormente atractiva para provincia debido al tamaño y rigidez de sus edificaciones, máxime si se puede contar con parámetros de sitio.

TRABAJOS CITADOS

- ASCE 7-16. (2016). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. Reston, Virginia, US: American Society of Civil Engineers. doi:978-0-7844-1424-8
- CDMX-IIUNAM. (2017). SASID 4.0.2.0. Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID).
- CFE. (2008). Manual de Diseño de Obras Civiles, Capítulo C.1.3 Diseño por Sismo. México: IIE.
- CFE. (2015). Manual de Diseño de Obras Civiles, Capítulo C.1.3 Diseño por Sismo. México: INEEL.
- Gaceta de CDMX. (15 de Dic de 2017). Gaceta de CDMX 2017. Acuerdo por el que se modifican las Normas Técnicas Complementarias.
- Huerta Ecatl, J. E. (2015). Tesis: Evaluación de la Interacción Dinámica Suelo-Estructura en el Comportamiento Inelástico de un Edificio de Concreto Reforzado. México: Universidad Autónoma Metropolitana (Azcapotzalco).
- INEEL-CFE. (2015). PRODISIS 4.1. Programa de Diseño Sísmico. México.
- Miranda, E., & Bertero, V. (1994). Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design. *Earthquake Spectra*, 10, 357-379.
- NTC S. (9 de Jun de 2020). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismos con comentarios.
- Pérez Rocha, L., & Aviles, J. (2003). Evaluación de efectos de interacción en resistencias inelásticas. *Revista de Ingeniería Sísmica* No.69, 45-71.
- Pérez Rocha, L., & Avilés, J. (2007). Análisis de Daño en Estructuras con Apoyo Flexible. *Revista de Ingeniería Sísmica* No.77, 89-111.
- Reyes, C., Miranda, E., Ordaz, M., & Meli P., R. (2002). Estimación de Espectros de Aceleraciones Correspondientes a Diferentes Períodos de Retorno para las Distintas Zonas Sísmicas de la Ciudad de México. *Revista de Ingeniería Sísmica* No.66, 95-121.
- Romero Maldonado, T., Tena Colunga, A., & Nangullasmú Hernández, H. d. (2017). Determinación de Factores Globales de Diseño Sísmico para Marcos Dúctiles con Columnas SRC. XXI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Guadalajara, Jalisco: SMIS.

CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD FALLA DE UNA VIGA CONTINUA CALCULATION OF THE PROBABILITY OF FAILURE OF A CONTINUOUS BEAM

J. Alejandro Ruiz Sibaja,

*Docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas,
asibaja@unach.mx,*

Jorge A. Aguilar Carboney ,

*Docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas,
jaguilar@unach.mx*

Herman Daniel Nuriulú Alfonso

Consultor en ingeniería, dannyel_wolf25@hotmail.com

RESUMEN

Este trabajo presenta la evaluación de la probabilidad de falla de una viga continua de dos claros y tres apoyos. El análisis estático de la estructura se realiza para una carga móvil y sus líneas de influencia se obtienen para momento flector. A continuación, se calcula el momento de actuación máximo en la viga. Posteriormente, se utiliza la teoría de la sección transformada para evaluar el momento resistente de la estructura. Mediante el álgebra de variables aleatorias se realiza el análisis probabilístico del modelo, se encuentran las resistencias y tensiones promedio, se estima su índice de confiabilidad y se calcula su probabilidad de falla.

Palabras clave: Puente peatonal, confiabilidad estructural, índice de confiabilidad, líneas de influencia.

ABSTRACT

This work presents the evaluation of the failure probability of a continuous beam with two spans and three supports. The static analysis of the structure is carried out for a mobile load and its influence lines are obtained, for bending moment. The maximum actuation moment on the beam is then calculated. Subsequently, the theory of the transformed section is used to evaluate the resistant moment of the structure.

By means of the algebra of random variables, the probabilistic analysis of the model is carried out, the average resistances and tensions are found, its reliability index is estimated, and its failure probability is calculated.

Keywords: Pedestrian bridge, structural reliability, reliability index, influence lines.

INTRODUCCIÓN

Un puente peatonal es un medio de conexión de vías que permite el cruce de personas en calles y avenidas de alto flujo vehicular sin interferir en el tránsito de los vehículos. Estas estructuras pueden ubicarse en dichas vías o también en sitios donde el tránsito de personas se hace difícil tal como en ríos, valles, montañas, etc. (Zuluaga Ruiz, 2015). Al estar sometidos a cargas móviles, en los puentes peatonales se generan reacciones, fuerzas cortantes y momentos flexionantes, que estas estructuras deben de resistir con base en un dimensionamiento adecuado.

Tradicionalmente, el estudio del comportamiento de los sistemas estructurales se lleva a cabo mediante un cálculo determinista en el que las variables y parámetros pertinentes al problema tienen valores definidos, esto es, que se trabaja con sus valores medios, en consecuencia, el resultado de este tipo de análisis resulta en un valor único. Un cálculo determinista implica un conocimiento completo del proceso bajo estudio, lo cual es una simplificación de la realidad física del problema.

Una mejor aproximación a esta realidad es un tratamiento probabilista. En este enfoque se tiene en cuenta

las incertidumbres asociadas a las variables y parámetros pertinentes al problema; el tratamiento más sencillo permite cuantificar el margen de seguridad mediante la probabilidad de falla p_f del sistema, la cual se obtiene mediante el cálculo de un índice de confiabilidad estructural. A esta aproximación se le conoce como Método de Confiabilidad de Primer Orden (FORM, por sus siglas en inglés); este método ha probado ser eficaz para estimar con rapidez, la seguridad estructural de manera efectiva y precisa (Dudzik y Radoń, 2016). Existen métodos más refinados para el cálculo de la probabilidad de falla de una estructura, tal como el Método de Confiabilidad de Segundo Orden (SORM), y el Método del Muestreo Importante (ISM). Sin embargo, el FORM ha mostrado su validez para el estudio de confiabilidad de estructuras con comportamiento elástico y para estos sistemas produce resultados similares al SORM y al ISM.

En Tuxtla Gutiérrez existen 41 puentes peatonales (Talavera, 2021), cuya revisión estructural conviene realizar puesto que, como consecuencia del crecimiento de la ciudad, ha aumentado el uso de estas estructuras en los últimos años. Mediante el modelo propuesto, se dispondrá de una herramienta de cálculo para una revisión preliminar de los puentes existentes, y en caso necesario, recomendar acciones correctivas para mejorar algunos aspectos que no estén considerados en el proyecto original.

En este trabajo se aplica una aproximación de primer orden (FORM) para revisar la resistencia de un puente peatonal ante la acción de cargas móviles. La metodología consiste en determinar, para la estructura estudiada, la línea de influencia de momento flexionante, y a partir de esta función se estima el momento actuante máximo. Enseguida, mediante las características geométricas y del material, se calcula el momento resistente máximo. A continuación, se definen las variables aleatorias que intervienen en el cálculo y se obtienen la resistencia media del material y el esfuerzo medio actuante. Acto seguido se evalúa el margen de seguridad y a través de este resultado se calcula el índice de confiabilidad de la estructura. Finalmente, se encuentra la probabilidad de falla de la viga continua. La metodología se aplica al caso de un puente peatonal existente y se comentan los resultados alcanzados.

METODOLOGÍA

Se considera una viga continua de dos claros iguales y

tres apoyos, tal como se muestra en la figura 1.

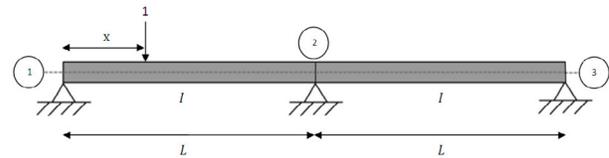


Figura 1. Modelo de cálculo de una viga continua de dos claros y tres apoyos (Nuriulú, 2017).

Para este modelo se calcularán las líneas de influencia para los tramos 1-2 y 2-3, como se describe a continuación.

Línea de influencia de momento flexionante para el tramo 1-2.

Se considera una carga $P = 1$, a una distancia variable x , a partir de apoyo 1 (figura 2), así mediante el método de las secciones, se plantea el equilibrio para el tramo 1-2:

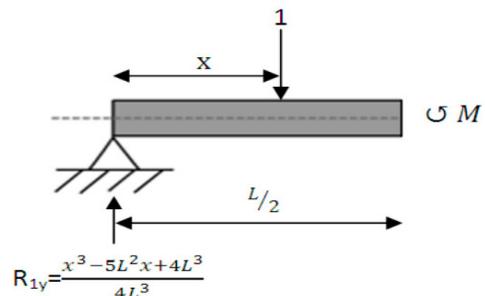


Figura 2. Modelo para el cálculo de la línea de influencia del tramo 1-2 (Nuriulú, 2017).

$$+\circlearrowleft \sum M = 0 \quad 0 \leq x \leq L/2 \tag{1}$$

$$-(R_{1y})\left(\frac{L}{2}\right) + 1\left(\frac{L}{2} - x\right) + M = 0 \tag{2}$$

$$M = \left(\frac{x^3 - 5L^2x + 4L^3}{4L^3}\right)\left(\frac{L}{2}\right) - \left(\frac{L}{2} - x\right) \tag{3}$$

Resulta finalmente la línea de influencia para el tramo en estudio:

$$M = \frac{x^3 + 3L^2x}{8L^2} \tag{4}$$

Línea de influencia de momento flexionante para el tramo 2-3

De la misma manera, se considera una carga P = 1, a una distancia variable x, a partir de apoyo 1 (figura 3), de esta manera, mediante el método de las secciones, se establece el equilibrio para el tramo 2-3:

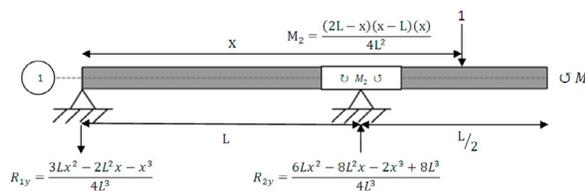


Figura 3. Modelo para el cálculo de la línea de influencia del tramo 1-2 (Nuriulú, 2017).

$$+ \cup \sum M = 0 \quad L \leq x \leq 2L \tag{5}$$

$$(R_{1y})\left(\frac{3L}{2}\right) - (R_{2y})\left(\frac{L}{2}\right) + 1\left(\frac{3L}{2} - x\right) + M = 0 \tag{6}$$

$$M = \left(\frac{-9Lx^2 + 6L^2x + 3x^3}{8L^2}\right) + \left(\frac{6Lx^2 - 8L^2x - 2x^3 + 8L^3}{8L^2}\right) + \left(-\frac{3L}{2} + x\right) \tag{7}$$

Al desarrollar esta expresión se obtiene la línea de influencia para el tramo 2-3:

$$M = \frac{8L^3 - 2L^2x - 3Lx^2 + x^3}{8L^2} \tag{8}$$

Momento actuante para un puente peatonal existente.

Se considera el puente peatonal situado en el Boulevard Belisario Domínguez, frente al Campus I de la Universidad Autónoma de Chiapas (figura 4):

Se realizaron aforos del tránsito peatonal, para determinar la carga media sobre el puente. Los aforos se realizaron durante tres días hábiles consecutivos, durante los cuales se registró el número de personas, que transitan por el puente en las horas pico - de 7 a 15 horas-



Figura 4. Puente peatonal en el Boulevard Belisario Domínguez frente al Campus I de la UNACH (Nuriulú, 2017).

se estimaron los pesos de aquellas y posteriormente se obtuvieron las medidas de tendencia central; en la tabla 1 se resume el resultado de los aforos realizados:

Tabla 1. Estadísticas de los aforos realizados.

Medidas de tendencia central	Peso (kg)
Promedio	66.30
Varianza	72.18
Desviación estándar	8.50

A partir de la línea de influencia para momento flexionante (ecuación 4), del tramo 1-2, puede estimarse el momento flexionante máximo en ese tramo, al multiplicar las ordenadas de la línea de influencia por 66.30 kg, el peso medio obtenido en los aforos (figura 5).

Se supuso que cinco personas atraviesan el puente al mismo tiempo, y como se aprecia en la figura 5, la línea de influencia de mayor ordenada se encuentra a la mitad del tramo 1-2. Las cargas móviles se colocaron a

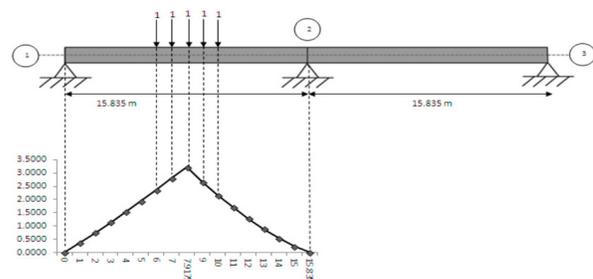


Figura 5. Carga móvil sobre el tramo 1-2 del puente peatonal (Nuriulú, 2017).

una distancia de un metro entre ellas situando a una de las personas en la mayor cota de la línea de influencia. Enseguida, el momento total se obtiene al multiplicar las ordenadas de la línea de influencia por 66.30 kg, esto es:

$$M = 66.30 \text{ kg} \times (2.3577 \text{ m} + 2.7960 \text{ m} + 3.2165 \text{ m} + 2.6559 \text{ m} + 2.1660 \text{ m})$$

$$M = 874.6362 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

La estructura es simétrica en geometría y carga, en consecuencia, para el tramo 2-3, se obtiene el mismo momento actuante.

Cálculo del momento resistente del puente peatonal.

Se registraron las dimensiones geométricas de una sección transversal del puente, y se anotaron los materiales que la componen. En la figura 6 se muestra esta sección transversal. La zona sombreada es la capa de concreto del puente, por debajo de esta capa, aparece una lámina de acero con espesor de un milímetro.

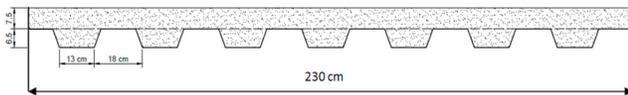


Figura 6. Sección transversal no representativa del puente peatonal (Nuriulú, 2017).

El momento resistente de esta sección se calculó, mediante la teoría de la sección transformada (Beer et al., 2018), para los siguientes datos: $n = 12.074$, $A_{\text{transf}} = 353.7682 \text{ cm}^2$, $\sigma = 250 \text{ kg/cm}^2$, $I = 38175.7479 \text{ cm}^4$, $\bar{y} = 5.2022 \text{ cm}$, de esta manera:

$$M = \frac{\sigma I}{y} = \frac{(250)(38175.7479)}{5.2022} = 18345.9632 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Cálculo probabilista.

En la tabla 2 se definen las variables aleatorias para la carga, el material y la geometría del puente (Nuriulú 2017):

Tabla 2. Variables aleatorias consideradas para el cálculo probabilista.

Variable aleatoria	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación
P (T)	0.0663	0.0085	0.1282
σ (m)	0.247	0.0327	0.1498
L (m)	15.835	0.15835	0.01
b (cm)	230.00	2.30	0.01
h (cm)	14.00	0.14	0.01

El momento actuante calculado previamente, se considera una variable aleatoria, para cual el valor medio es:

$$\bar{M} = 874.6362 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

El coeficiente de variación de esta variable aleatoria, se calcula de acuerdo con (Haugen, 1968):

$$\delta_Z^2 = \delta_X^2 + \delta_Y^2 \tag{9}$$

En este caso las variables aleatorias x , y , z se corresponden con las variables aleatorias de la carga P , longitud L y momento flexionante M , en consecuencia:

$$\delta_M^2 = \delta_P^2 + \delta_L^2$$

$$\delta_M^2 = (0.1282)^2 + (0.01)^2$$

$$\delta_M = 0.1285$$

El coeficiente de variación es la relación entre la desviación estándar y la media, por lo tanto, conocidos el coeficiente de variación del momento, y su valor medio, puede calcularse su desviación estándar de acuerdo con:

$$\sigma_{\bar{M}} = (\delta_M)(\bar{M}) \tag{10}$$

Al sustituir datos resulta:

$$\sigma_{\bar{M}} = (0.1285)(874.6362 \text{ T} \cdot \text{cm}) = 11.2391 \text{ T} \cdot \text{cm}$$

La desviación estándar del módulo de sección, es función del producto de dos variables aleatorias, por lo tanto, tal desviación se calcula de acuerdo con (Bignoli, 1986):

$$\sigma_m^2 = \left(\frac{\partial f m}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{\bar{x}_i}^2 + \left(\frac{\partial f m}{\partial y_j}\right)^2 \sigma_{\bar{y}_j}^2 \quad (11)$$

El módulo de sección es función de la base, b, y la altura, h, por lo tanto, la expresión (11), resulta:

$$\sigma_s^2 = \left(\frac{\partial s}{\partial b}\right)^2 \sigma_b^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial h}\right)^2 \sigma_h^2 \quad (12)$$

Se puede demostrar (Nuriulú, 2017), que el módulo de sección para el puente peatonal, puede calcularse como:

$$s = \left(\frac{b}{3}\right) \frac{(h - 8.7978)^3}{h - 5.2022} + 353.7682(h - 5.2022) \quad (13)$$

En consecuencia, al incorporar en la expresión (12), los datos pertinentes, se consigue:

$$\sigma_s^2 = \left[\frac{(h - 8.7978)^3}{(3)(h - 5.2022)}\right]^2 (2.3\text{cm})^2 + \left[(b) \frac{(h - 8.7978)^2}{h - 5.2022} - \frac{b(h - 8.7978)^3}{3(h - 5.2022)^2} + 353.7682\right]^2 (0.14\text{cm})^2$$

Tras realizar operaciones, se obtiene finalmente:

$$\sigma_s = 129.6367 \text{ cm}^3$$

Enseguida, se puede calcular el coeficiente de variación para el módulo de sección, como se muestra a continuación:

$$\delta_s = \frac{\sigma_s}{s} = \frac{129.6367 \text{ cm}^3}{4339.238 \text{ cm}^3} = 0.02988$$

Por otra parte, el valor medio del esfuerzo flexionante es:

$$\sigma = \frac{M}{S} = \frac{87.46362 \text{ T} - \text{cm}}{4339.238 \text{ cm}^3} = 0.02015 \frac{\text{T}}{\text{cm}^2}$$

La desviación estándar de este esfuerzo se calcula a partir de la expresión (11):

$$\sigma_\sigma^2 = \left(\frac{\partial M}{\partial S}\right)^2 \sigma_S^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial M}\right)^2 \sigma_M^2 \quad (14)$$

De lo cual resulta:

$$\sigma_\sigma^2 = \left(-\frac{M}{S^2}\right)^2 \sigma_S^2 + \left(\frac{1}{S}\right)^2 \sigma_M^2$$

En esta expresión se incorporan los datos correspondientes y se obtiene:

$$\sigma_\sigma^2 = \left(-\frac{87.46362 \text{ T} - \text{cm}}{(4339.238 \text{ cm}^3)^2}\right)^2 (16805.6642 \text{ cm}^6) + \left(\frac{1}{4339.238 \text{ cm}^3}\right)^2 (126.3174 \text{ T}^2 - \text{cm}^2)$$

Al llevar a cabo operaciones, la desviación estándar del esfuerzo flexionante resulta:

$$\sigma_\sigma = 0.002659 \text{ T/cm}^2$$

El coeficiente de variación de este esfuerzo se calcula de la siguiente manera:

$$\delta_\sigma = \frac{\sigma_\sigma}{\sigma} = \frac{0.002659}{0.02015} = 0.132$$

A continuación, se calcula el valor medio del margen de seguridad, el cual se define como la diferencia entre la resistencia media del concreto y el esfuerzo medio que ocurre en el material:

$$\bar{m} = \bar{U} - \bar{A} = \sigma_U - \sigma \quad (15)$$

La media y la desviación estándar de la resistencia del concreto, se obtienen de González y Robles (2005):

$$\sigma = (\sigma_U; \sigma_{\bar{U}}) = \left(0.247 \frac{\text{T}}{\text{cm}^2}; 0.0327 \frac{\text{T}}{\text{cm}^2}\right)$$

Así, al incorporar datos en la expresión (15) resulta:

$$\bar{m} = 0.247 - 0.02015 = 0.22685 \frac{\text{T}}{\text{cm}^2}$$

Con este resultado, se procede al cálculo de la desviación estándar del margen de seguridad.

$$\sigma_m^2 = \left(\frac{\partial}{\partial U} \bar{U} - \bar{A}\right)^2 \sigma_{\bar{U}}^2 + \left(\frac{\partial}{\partial A} \bar{U} - \bar{A}\right)^2 \sigma_\sigma^2 (1)^2 \sigma_{\bar{U}}^2 + (-1)^2 \sigma_\sigma^2$$

$$\sigma_m^2 = \left(0.0327 \frac{\text{T}}{\text{cm}^2}\right)^2 + \left(0.002659 \frac{\text{T}}{\text{cm}^2}\right)^2$$

$$\sigma_m = 0.0328 \frac{\text{T}}{\text{cm}^2}$$

A continuación, se obtiene el coeficiente de variación para el margen de seguridad:

$$\delta_{\bar{m}} = \frac{\sigma_{\bar{m}}}{\bar{m}} = \frac{0.0328}{0.22685} = 0.1446$$

Finalmente, se obtiene el inverso del coeficiente de variación del margen de seguridad, de lo cual resulta el índice de confiabilidad:

$$\beta_m = \frac{1}{\delta_{\bar{m}}} = \frac{1}{0.1446} = 6.91556$$

El índice de confiabilidad representa la probabilidad acumulada para la distribución normal, así en las tablas que describen el área acumulada busca el valor de β_m , que en este caso es igual a 1.

$$P_f = 1 - P_{\text{acumulada}} = 1 - 1 = 0$$

Es oportuno mencionar que este cálculo no incluye casos de carga y combinaciones que definan un estado límite de falla. En este entendido se observa que, para la carga móvil considerada, la probabilidad de falla es nula.

CONCLUSIONES

Se ha realizado el cálculo de la confiabilidad estructural de un puente peatonal existente. Se consideraron incertidumbres en la carga, la geometría y los materiales del sistema estructural. El estudio se llevó a cabo únicamente para la carga móvil, no se consideraron otro tipo de cargas.

El modelo de puente se realizó, mediante una simulación para la cual interesa conocer, la resistencia media del concreto y el esfuerzo medio que ocurre en el material. El tratamiento incluye la obtención de líneas de influencia, que se aleatorizan al considerar a la carga móvil como una variable aleatoria, con media y desviación estándar. También se consideraron aleatorias la geometría y el material del puente; de esta manera, se calcularon el momento actuante y el momento resistente.

Con base en estos momentos se evaluaron la resistencia media del concreto y el esfuerzo medio que ocurre en el material, para obtener así el margen de seguridad $\bar{m} = \bar{U} - \bar{A} = \sigma_{\bar{U}} - \sigma$, y con este resultado se calculó el índice de confiabilidad estructural $\delta_{\bar{m}} = \sigma_{\bar{m}}/\bar{m}$. Finalmente, se obtuvo la probabilidad de falla de la estructura mediante la definición $P_f = 1 - P_{\text{acumulada}}$; se encontró que el

tránsito simultáneo de cinco personas sobre la estructura, no ocasiona su falla.

La aproximación propuesta puede mejorarse, si se consideran otras aproximaciones para el cálculo del índice de confiabilidad, tales como el índice de seguridad central y el índice de seguridad central normal (Bignoli, 1986). También podría considerarse un tren de cargas con un mayor número de cargas móviles, a fin de encontrar la condición para la cual el puente puede ver comprometida su seguridad estructural.

La aplicación sistemática de estas técnicas, al estudio probabilista de puentes peatonales, permitirá establecer políticas de gestión y seguridad de estos sistemas, con enfoque en la evaluación de riesgos estructurales.

REFERENCIAS

- Beer, F., Jhonston, Jr., E. R., DeWolf, J. T., Mazurek, D. F. (2018). *Mecánica de Materiales* (6ª Ed.). Mc Graw-Hill Interamericana.
- Bignoli, A. J. (1986). *Introducción al cálculo de la confiabilidad de las estructuras civiles*. El Ateneo.
- Dudzik, A. y U. Radoń. "La evaluación de la fiabilidad para la construcción industrial de acero". *Avances en mecánica: cuestiones teóricas, computacionales e interdisciplinarias* (2016): 163-166.
- González Cuevas, O, Robles Fernández-Villegas, F. (2005). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*. Limusa.
- Haugen, E. B. (1968). *Probabilistic Approaches to Design*. John Wiley and Sons.
- Nuriulú Alfonso, H. D. (2017). *Análisis de un puente peatonal por el método de líneas de influencia y cálculo de la probabilidad de falla*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, Campus I. Universidad Autónoma de Chiapas.
- Singer, F. L., Pytel, A. (1982). *Resistencia de Materiales*. (3ª Edición). Harla.
- Talavera, A. (junio 14, 2021). "Puentes peatonales, en desuso". *Cuarto Poder de Chiapas*. <https://www.cuartopoder.mx/chiapas/puentespeatonalesendesuso/205904>
- Zuluaga Ruiz, J. F. (31 de agosto de 2015). *Puentes peatonales, vitales para la seguridad vial*. <https://blog.segurossura.com.co/articulo/movilidad/puentes-peatonales-vitales-seguridad-vial>.

MODELADO Y ANÁLISIS DE UN MARCO DE CONCRETO REFORZADO BAJO CARGAS DE SERVICIO

MODELING AND ANALYSIS OF A REINFORCED CONCRETE FRAME UNDER SERVICE LOADS.

*Gelacio Juárez Luna,
Docente-investigador, Departamento de Materiales- Universidad Autónoma Metropolitana.*

Email: gjl@azc.uam.mx

Eber Alberto Godínez Domínguez

Docente-investigador, Facultad de Ingeniería- Universidad Autónoma de Chiapas.

Email: eber.godinez@unach.mx

Dayann Emilio Silva Lechuga

*Graduado de Maestría, Maestría en Ingeniería Estructural,
Departamento de Materiales- Universidad Autónoma Metropolitana.*

Email: dayann.emilio@gmail.com

RESUMEN

Se estudia un marco de concreto reforzado bajo cargas de servicio en el Intervalo no-lineal. El concreto se malló con elementos finitos hexaedros de ocho nodos. Por otra parte, el acero de refuerzo se malló con elementos unidimensionales con dos nodos, considerando acoplamiento perfecto entre el acero de refuerzo y el concreto. Se concluye que el modelado numérico es una herramienta útil para el diseño y reforzamiento de elementos y sistemas estructurales.

Palabras clave: Elementos finitos, concreto reforzado, modelado numérico, daño.

ABSTRACT

A reinforced concrete frame under service loads is studied in the non-linear range. The concrete is meshing using hexahedra finite elements with eight nodes. Whereas, steel reinforcement is meshing using unidimensional elements with two nodes, in which perfect bond between concrete and steel was assumed. It is concluded that numerical modeling is a suitable tool for the design and strengthening of structural elements and systems.

Keywords: Finite elements, reinforced concrete, numerical modeling, damage.

INTRODUCCIÓN

La mecánica computacional es de utilidad para modelar estructuras desde su comportamiento lineal hasta el intervalo no-lineal, y en su caso el colapso. El modelado numérico proporciona las zonas donde iniciará el agrietamiento o plastificación de los materiales. Además, permite conocer la evolución del daño, el cual puede ocurrir como agrietamiento, líneas de deslizamiento o fracturas, dependiendo del tipo de material.

En este artículo se utiliza el programa de elementos finitos Midas Fea (MidaSoft), licencia académica para la Universidad Autónoma Metropolitana, para la solución numérica de un marco de concreto reforzado de dos niveles, que resulta de interés dentro del campo de la ingeniería civil. En todos los casos se utilizan elementos finitos sólidos hexaédricos de ocho nodos para mallar el concreto y elementos tipo barras para mallar el acero de refuerzo. Los elementos tipo barra se colocaron a lo largo de los bordes de los elementos sólidos, conectándose en sus nodos extremos. Se utilizó una superficie de daño con diferentes umbrales en tensión y en compresión para representar el comportamiento constitutivo del concreto, mientras que el endurecimiento del acero de refuerzo se idealiza con un modelo de plasticidad unidimensional de Von Mises.

METODOLOGÍA

Mallado

Primeramente, la geometría del concreto y del acero de

refuerzo del marco se realizó en el programa AutoCAD. Posteriormente, el modelo se importó en el programa de elementos finitos MidasFEA (MidaSoft, 2019). El concreto se malló con elementos finitos sólidos tipo hexaedro de ocho nodos, como se muestra en la Figura 1a. Este elemento modela de manera distribuida el agrietamiento en tensión y aplastamiento en compresión. Por otra parte, el acero de refuerzo longitudinal y transversal se malló con elementos finitos tipo barra, el cual es unidimensional, como se muestra en la Figura 1b. A este elemento unidimensional se le asignó el modelo de plasticidad de Von Mises. Ambos elementos finitos tienen tres grados de libertad traslacional por nodo, así como la capacidad de representar deformaciones grandes.

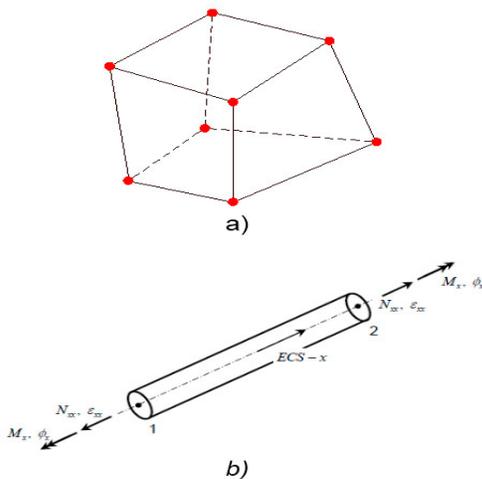


Figura 1. Elementos finitos: a) hexaedro y b) unidimensional (adaptado de MidasFEA, 2021)

Modelos constitutivos

Para modelar el comportamiento del concreto se utilizó un modelo de agrietamiento distribuido, el cual fue introducido por Rashid (1968), en el que el daño se distribuye en el dominio de los elementos finitos. En el comportamiento del concreto se considera el ablandamiento por deformación después de alcanzar el esfuerzo último; el cual se idealizó con una función lineal, como se muestra en la Figura 2. Para modelar el acero de refuerzo se utilizó un modelo de plasticidad con superficie de fluencia de Von Mises, en el cual se asume el mismo umbral en tensión y compresión. El endurecimiento se idealizó como una función bilineal, como se muestra en la Figura 3.

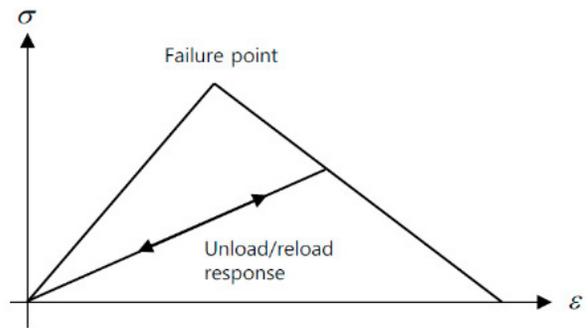


Figura 2. Modelo constitutivo del concreto con ablandamiento por deformación (tomado de MidasFEA, 2021)

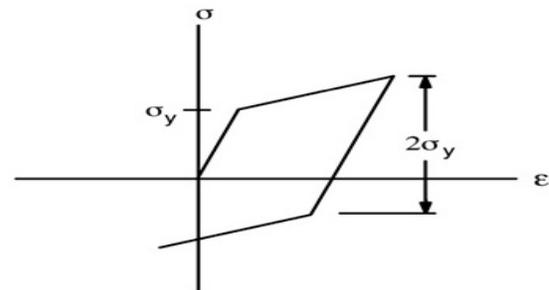


Figura 3. Modelo constitutivo del acero con endurecimiento (tomado de MidasFEA, 2021)

MODELADO DE MARCO DE CONCRETO

Se modeló un marco de concreto reforzado, ensayado experimentalmente por Chan et al. (2000), el cual fue sometido a ensayos de carga lateral incremental. El marco tiene una altura de 364.2 cm, incluida la altura del pasador de acero que forma parte de la base rígida, y una longitud de 338 cm de claro (Figura 4a), el marco es sometido a carga axial de 200 kN en cada columna y a una carga lateral de 200 kN (Figura 4b). Las columnas del marco tienen una sección transversal de 25x37.5 cm, reforzadas con tres barras longitudinales del número 6 ($\phi=3/4''=19\text{mm}$) en el lecho superior e inferior, así como dos barras longitudinales del número 6 colocadas en el centro de la columna y estribos del número 3 ($\phi=3/8''=9.5\text{mm}$) espaciado a cada 15 cm. Las vigas tienen una sección transversal de 25x35 cm, reforzadas con tres barras longitudinales del número 6 ($\phi=3/4''=19\text{mm}$) en lecho superior e inferior, con una distribución de estribos igual al empleado en las columnas, como se muestra en la Figura 4c.

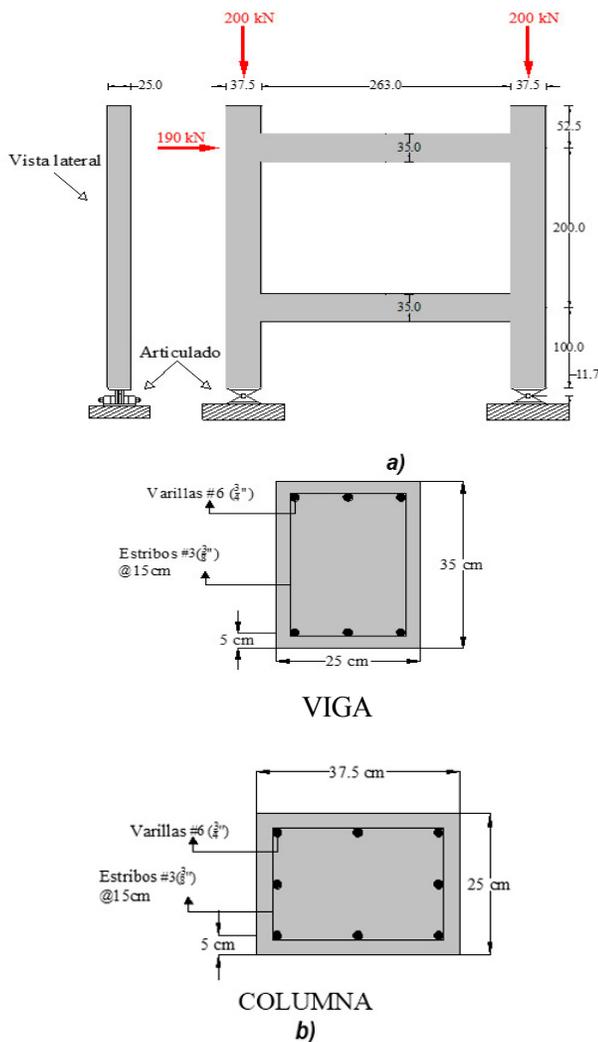
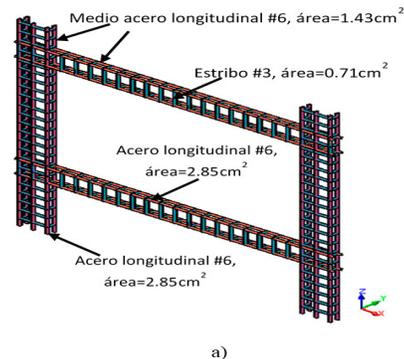


Figura 4. Marco: a) geometría, condición de apoyos y cargas y b) armados de las secciones transversales.

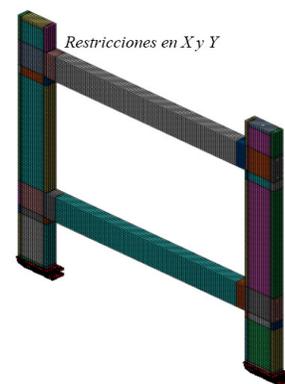
Las propiedades mecánicas del concreto consideradas en el marco son: módulo de elasticidad $E_c=160,095.45$ kgf/cm², relación de Poisson $\nu=0.2$, esfuerzo máximo a tensión $\sigma_{ut}=27.45$ kgf/cm², esfuerzo máximo a compresión $\sigma_{uc}=274.55$ kgf/cm². Asimismo, para el acero de refuerzo: $E_a=2,039,432.40$ kgf/cm², esfuerzo de fluencia $f_y=3,263.09$ kgf/cm², relación de Poisson $\nu_a=0.3$, esfuerzo máximo a compresión $\sigma_{uc}=5,302.50$ kgf/cm², módulo de endurecimiento por deformación $H=29,277.00$ kgf/cm² y la deformación a la que inicia el endurecimiento por deformación es de 2.20%.

En la Figura 5 se muestra el acero de refuerzo del marco realizado en el programa AutoCAD, condiciones de apoyo, acoplamiento entre el concreto y el acero y el mallado tridimensional (3D) formado de elementos

hexaedros de ocho nodos con ocho puntos de integración de Gauss con el programa midas FEA. Como se comentó, el acero de refuerzo se modeló con elementos tipo barra (elementos unidimensionales con comportamiento del material bilineal) y se supone adherencia perfecta entre el concreto y el acero. Las vigas se mallaron con 14 divisiones en su peralte y las columnas con 16 divisiones; el tamaño aproximado de los elementos es de 2.5 cm, tratando de mantener la relación de aspecto de 1. Con estas divisiones de los peraltes, respectivamente, se garantiza una solución suficiente aproximada, pues Godínez-Domínguez et al. (2015) utilizaron 14 divisiones para mallar el peralte de vigas, obteniendo resultados suficientemente aproximados con los experimentales. Por simetría del marco en geometría, cargas y en condiciones de apoyo, se modeló únicamente la mitad del marco para reducir el tiempo computacional. En el plano medio cortado por el eje de simetría se restringieron los grados de libertad perpendiculares al plano, pues el desplazamiento en esta dirección se asume que es cero. Los otros dos grados de libertad se asignaron libres.



a)



b)

Figura 5. Modelado de $\frac{1}{2}$ del marco: a) acero de refuerzo, b) mallado con acoplamiento entre el concreto y acero en midas FEA.

Para la obtención de la respuesta estructural, se inducen fuerzas aplicadas gradualmente (Figura 4a) en las columnas y lateralmente en el marco. En la Figura 6 se muestran las curvas de la carga contra el desplazamiento lateral en el primer y segundo nivel del marco, obtenidos con el programa midas FEA y los reportados por Chan et al. (2000). En general, los resultados numéricos son congruentes con los resultados experimentales; las pequeñas diferencias en la respuesta se deben a que no se modeló la pérdida de adherencia entre el concreto y el acero cuando la carga lateral excede la fluencia; sin embargo, se logra reproducir con buena precisión el comportamiento del marco. Es importante mencionar que la convergencia de los análisis numéricos de elementos de concreto reforzado es compleja debido al comportamiento constitutivo de los materiales, pues el concreto presenta una pendiente negativa y el acero una pendiente positiva en el intervalo no-lineal.

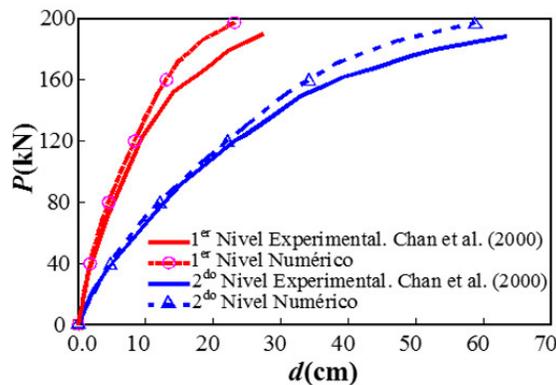


Figura 6. Curvas de la carga contra el desplazamiento.

En la Figura 7a se muestran los desplazamientos horizontales en el eje longitudinal del marco, donde se observa que el desplazamiento mayor ocurre en la parte superior, como se esperaba, debido a las cargas laterales impuestas en la parte superior. En la Figura 7b se observa la ocurrencia del agrietamiento; en color azul intenso se tienen las zonas donde inició el agrietamiento, donde se desarrollan por completo las grietas, tal que ya no transmiten carga; en color rojo intenso se observan las grietas que ocurren al final y en el resto de los colores se muestran las grietas parcialmente abiertas. En la Figura 7c se muestran los esfuerzos desarrollados en el acero de refuerzo, cuyas zonas más esforzadas ocurren en las esquinas, donde alcanzan el esfuerzo de fluencia, en color azul intenso la fluencia se alcanza en compresión y en color rojo la fluencia ocurre en tensión.

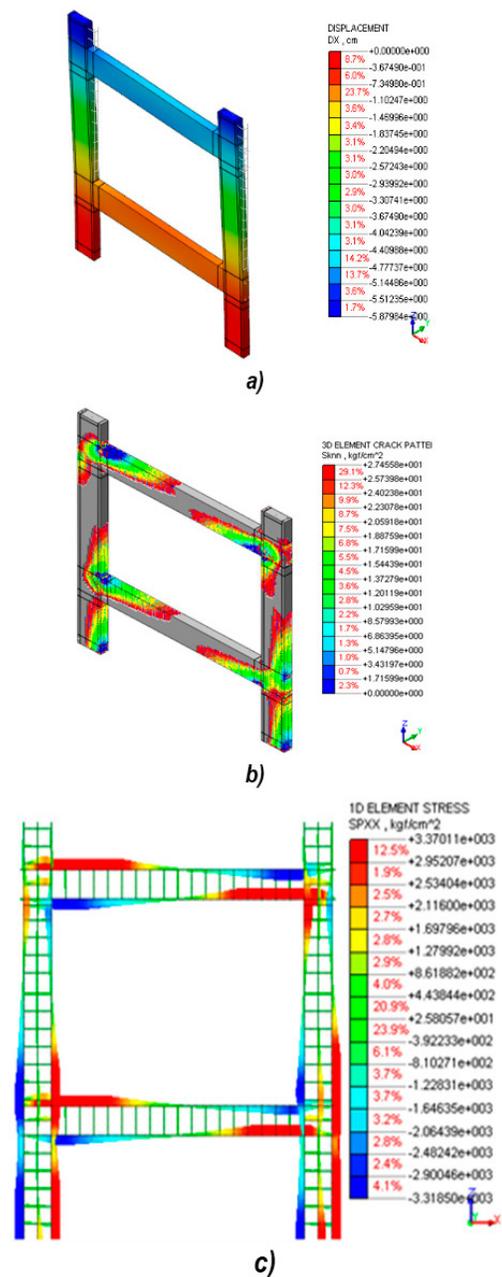


Figura 7. a) desplazamientos horizontales, b) trayectorias de agrietamiento y c) esfuerzos desarrollados en el acero de refuerzo.

CONCLUSIONES

En este artículo, el concreto se modeló con elementos finitos tridimensionales de ocho nodos y el acero de refuerzo con elementos unidimensionales con dos nodos, considerando acoplamiento perfecto entre el acero de refuerzo y el concreto.

En el marco estudiado, las curvas carga-desplazamiento obtenidas numéricamente son congruentes con los resultados experimentales reportados por Chan et al. (2000), lo cual valida el uso de estos elementos finitos y modelos constitutivos para el estudio de elementos y estructuras de concreto reforzado. Se observó, además, que el considerar los ejes de simetría para modelar sólo una parte de la estructura reduce el tiempo de cómputo, el cual puede ser significativo en modelos que tiene un mayor número de ecuaciones por resolver.

Con el modelado numérico en el programa MidaSoft (2019) se obtuvieron las zonas más esforzadas de los elementos, donde inicia y se propagan los agrietamientos en el concreto y la plastificación en el acero de refuerzo. Esta información es útil para el diseño y reforzamiento de elementos estructurales. El modelado numérico en el intervalo no-lineal es una herramienta valiosa para predecir y complementar los resultados experimentales.

AGRADECIMIENTOS

El tercer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca para realizar los estudios de Maestría. El segundo autor agradece al CONACYT por el financiamiento para el desarrollo del proyecto de Ciencia Básica 258271. Se agradece a la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco y a la Universidad Autónoma de Chiapas por las facilidades para realizar este estudio. Además, se agradece a MidasSoft por la licencia académica del programa MidasFEA en la que se realizaron los análisis.

REFERENCIAS

- Chan, C.M.; Ning, F.; Mickleborough, N.C. (2000), "Lateral stiffness characteristics of tall reinforced concrete buildings under service loads", *The Structural Design of Tall Building*, Vol. 9, pp. 365-383.
- Godínez-Domínguez, E.A.; Tena-Colunga, A.; Juárez-Luna, G. (2015), "Nonlinear finite element modeling of reinforced concrete haunched beams designed to develop a shear failure", *Engineering Structures*, Vol. 105, pp. 99-122.
- Rashid, Y.R. (1968), "Analysis of prestressed concrete pressure vessels", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 7(4), pp. 334-344.
- MidaSoft (2019). Midas FEA Advanced Nonlinear and Detail Analysis System. MidaSoft Inc, New York, N.Y.
- MidaSoft (2021). Analysis Reference. Advanced nonlinear and detail analysis system. M. MidaSoft Inc, New York, N.Y.

ANÁLISIS DE FLUJO EN TRANSPORTE PÚBLICO, REGIÓN ORIENTE DE LA ZONA METROPOLITANA DE TUXTLA GUTIÉRREZ

ANALYSIS OF FLOW IN PUBLIC TRANSPORT, EAST REGION OF THE METROPOLITAN AREA OF TUXTLA GUTIÉRREZ

Gabriel Alejandro Ballinas Salazar

Profesor medio tiempo, Facultad de Ingeniería- Universidad Autónoma de Chiapas.

gabriel.ballinas@unach.mx

Ricardo Suárez Gomez

Profesor de tiempo completo, Facultad de Ingeniería- Universidad Autónoma de Chiapas.

rsuarez@unach.mx

Juan José Cruz Solís

Profesor de tiempo completo, Facultad de Ingeniería- Universidad Autónoma de Chiapas.

juan.cruz@unach.mx

RESUMEN

La zonas metropolitanas presentan un alto desarrollo por la sinergia de los municipios que las integran, un factor que ha generado ese crecimiento es el uso de transporte público, en esta investigación, mediante caracterización de variables y recopilación de información se presenta un análisis de flujo vehicular de sistemas de transporte de la zona oriente de la zona metropolitana de Tuxtla Gutiérrez.

Palabras clave: Zona Metropolitana, Flujo Vehicular, Transporte.

ABSTRACT

The metropolitan areas present a high development due to the synergy of the municipalities that comprise them, a factor that has generated this growth that the use of public transport, in this research, by characterizing variables and collecting information, an analysis of vehicular flow is presented of transportation systems in the eastern part of the metropolitan area of Tuxtla Gutiérrez.

Keywords: Zone Metropolitan, Flow Vehicle, Transport.

INTRODUCCIÓN

La movilidad impacta considerablemente en la productividad de una sociedad, y constituye un pilar para el desarrollo de la zona en donde confluyen diferentes poblaciones que tienen sinergia entre si, sobre todo si se trata de una zona metropolitana.

Las zonas metropolitanas se definen como el conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan el límite del municipio que originalmente la contenía, incorporando como parte de sí misma o de su área de influencia directa a municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica; en esta definición se incluye además a aquellos municipios que por sus características particulares son relevantes para la planeación y política urbanas. (Sedesol 2004)

Actualmente en México existen 50 zonas metropolitanas constituidas oficialmente, de ellas se estima que el 71% del producto interno bruto del país se genera en dichas zonas, sin duda cada zona tiene características especiales, y diferentes variables de estudio, pero un común denominador es el flujo vehicular de los sistemas de transporte que cuentan, y de que manera aumentan o disminuyen el desarrollo integral de la región. De ahí surge la necesidad del estudio de cada zona en particular.

La revisión del volumen del flujo vehicular del transporte público permite conocer la eficiencia con la que funciona en zonas determinadas el sistema de transporte de estudio, lo que define valores de movilidad a

mediano y largo plazo que son fundamentales para una planeación adecuada y que realmente incidan en el desarrollo de la zona metropolitana, cuando hablamos del concepto de eficiencia entendemos como la capacidad para realizar o cumplir adecuadamente una función.

De acuerdo al Programa de Ordenamiento de la Zona Metropolitana de Tuxtla Gutiérrez (ZMTG), en 2005 se consideró inicialmente a Tuxtla Gutiérrez y Chiapa de Corzo como Zona Metropolitana. En 2009 en un estudio del Consejo para el Desarrollo Metropolitano de Tuxtla Gutiérrez se propone la ampliación de la ZMTG incorporando a Berriozábal y considerando la integración de Suchiapa, San Fernando y Ocozocoautla de Espinoza, debido a la interacción socioeconómica y territorial que existe entre estas ciudades para ordenar el crecimiento de las mismas a través de los lineamientos del Ordenamiento Ecológico y Territorial y los Planes de Desarrollo Urbano. (Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez, 2011)

En Chiapas viven un total de 5,543,828 habitantes, respecto a la ZMTG se estima que: la ciudad de Tuxtla Gutiérrez cuenta con 604,147 habitantes, Chiapa de corzo con 112,075 habitantes y Suchiapa con 25,627 habitantes, San Fernando 41,793, Berriozábal con 64,632 habitantes. (INEGI 2020)

La extensión territorial de la ZMTG es de 2,454 km², cuenta con 9 accesos carreteros pavimentados en entrada y salida entre la capital del Estado Tuxtla Gutiérrez y los municipios de la ZMTG, como se observa en la figura 1.

Respecto a datos de (INEGI, 2020), en el Estado, en cinco años el parque vehicular aumento de 561,920 a 736,909 vehículos, lo que representa un aumento del 31%.

Por la magnitud de la ZMTG es necesario acotar y definir los puntos a estudiar, debido que cada vía de acceso tiene morfología diferente, para este trabajo se establecen 4 vías principales que conectan con las cabeceras municipales de los municipios que colindan con la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, y deberían formar parte oficial de la ZMTG, los cuales son: Chiapa de Corzo, Suchiapa, Berriozábal y San Fernando, debido a la morfología de la ZMTG, es aceptable acotar el estudio de caso en dos partes, una donde se estudie el lado poniente de la ciudad que incluye las salidas a Berriozábal y San Fernando. Y por otra parte la zona oriente que incluye las salidas a Chiapa de Corzo y Suchiapa. (Ballinas Et Al, 2020).

Las condiciones que experimentan los usuarios en el sistema de transporte del caso de estudio (Tuxtla Gutiérrez, Chiapas), está determinado por la heterogeneidad

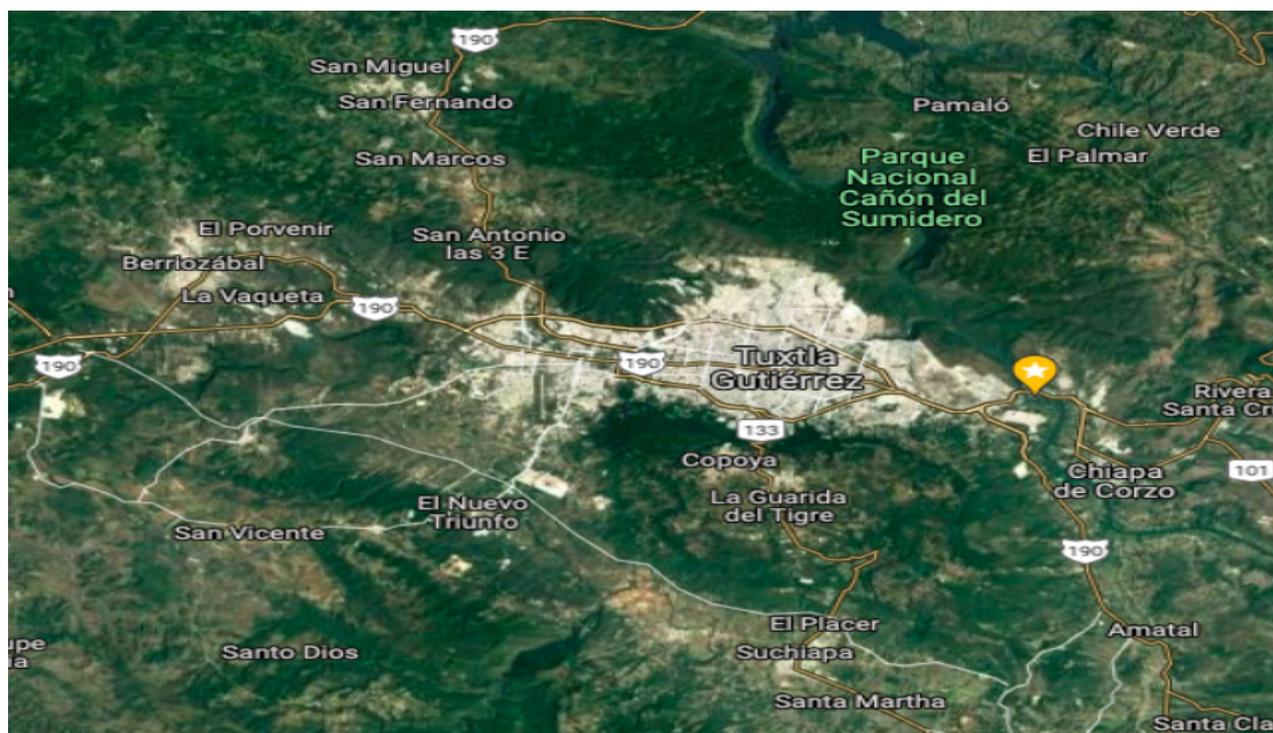


Figura 1. Zona Metropolitana Tuxtla Gutierrez.
(Google Maps, 2021)

del sistema, que es tan alta que, en general, no es posible concluir que estadísticamente los valores promedio de los niveles de servicio son aceptables. Sin embargo, se puede hablar de tendencias, en este caso la tendencia es que el sistema tiene una sobre oferta, que va de la mano con una baja velocidad de servicio. (Ballinas et al, 2019).

Otro elemento de (o importancia para acrecentar la problemática es la existencia de 85 rutas suburbanas, que en su mayoría realizan la operación similar a rutas urbanas, dichas rutas conforman la zona metropolitana de Tuxtla que conectan con municipios colindantes que mantienen una cercanía con Tuxtla Gutiérrez, como son: Chiapa de Corzo, Suchiapa, Berriozabal, San Fernando, Ocozocoautla y Osumacinta. (Ballinas et al, 2019).

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez cuenta con tres vialidades principales en el sentido de Oriente a Poniente, la población hace uso de ellas para llegar a la mayoría de los destinos. (Sansebastián et al., 2018)

Por todo lo anterior, se establece la importancia de un estudio acotado de la ZMTG, es decir, realizar investigaciones en paralelo, que tengan el objetivo de estudiar en conjunto el sistema integral de transporte público, para ello en esta investigación se define realizar el análisis en la zona oriente de la ZMTG.

Cuando se habla de transporte público nos referimos al término aplicado al transporte colectivo de pasajeros en donde los usuarios tienen que adaptarse a los horarios y a las rutas que ofrezca el operador y dependen en mayor o menor medida de la intervención regulatoria del Gobierno, por lo que es importante que el sistema de transporte sea eficiente.

No obstante esta estructura se presenta también para las rutas suburbanas mismas que circulan al interior de la ciudad de Tuxtla e inclusive al mismo tiempo ubican sus bases en el mismo lugar que las urbanas, esto coadyuva al congestionamiento de la vialidad, aumento de los contaminantes en el aire producidos por fuente móviles debido a los kilómetros recorridos, además de generar una competencia entre rutas urbanas y suburbanas. Este tipo de estructura física en las rutas urbanas y suburbanas del área metropolitana de Tuxtla Gutiérrez es motivo para que se estudien sus condiciones operacionales principalmente porque afirman algunos autores, que en ciudades mayores a 300,000 hab. No es un modelo funcional, debido a que se incrementan las necesidades para viajar a otros sitios de la ciudad, que no necesariamente son el centro de actividad principal.

(Gobierno del Estado de Chiapas, 2018).

Respecto a las condiciones físicas de las vialidades existentes, se encontraron en un estado de condición óptimo, y el nivel de servicio en ambos accesos de la zona oriente de la ZMTG presentan un grado E, flujo inestable, velocidad de operación 80 km/h, con variaciones. (Gobierno del Estado de Chiapas, 2018)

Debido a la problemática presentada, el sistema de transporte presenta fallos que repercuten directamente al flujo vehicular de la ZMTG, que a su vez afecta a los tiempos de traslado de los usuarios.

La operación de los transportes es el elemento clave para determinar si un sistema es eficiente o lo contrario a ello. Tanto las rutas urbanas como suburbanas se encuentran operando con baja velocidad, lo que impacta los costos de operación. (Gobierno del Estado de Chiapas, 2018)

En base a lo anterior expuesto se define la necesidad de estudiar puntualmente las condiciones operacionales del sistema de transporte de la ZMTG, para ello, lo principal es conocer los flujos vehiculares que ingresan al sistema, para que se establezca un parámetro que permita definir la cantidad de vehículos de transporte público que inciden directamente en el tránsito de la ZMTG.

MÉTODOLÓGIA

En esta investigación se aborda la zona oriente de la ZMTG, la metodología se estructura en dos fases, en primera, la caracterización de variables de estudio y en la segunda, la recopilación de información y obtención de resultados.

1.- Caracterización de variables de estudio

La caracterización del transporte público de la zona oriente tomando en cuenta que el lado oriente de la ZMTG se divide en zona Norte-Oriente y Sur-Oriente, se hace énfasis que para cada zona son diferentes rutas a diferentes destinos. Los vehículos utilizados para el transporte público en la zona oriente de la ZMTG son: autobús, suvs (tipo urvan), sprinter y taxis (tipo sedán).

La región oriente de la ZMTG cuenta con 15 municipios que cuentan con ruta directa con destino la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, de donde 12 rutas transitan por la zona norte-oriente como se observa en la figura 2 y 5 rutas (2 son de colonias conurbadas de Tuxtla Gutiérrez) por la zona sur-oriente como se observa en la figura 3. De lo anterior destaca que un 70.5% de las rutas origen-

Tuxtla transita por la zona Norte- Oriente y el 29.5% por la zona sur-oriente.

Tabla 1. Caracterización de rutas en ZMTG con base a la región oriente

Origen de rutas de transporte publico de región oriente de ZMTG	
Norte-Oriente	Sur-Oriente
Acalá, Bóchil, Chiapa de Corzo, Comitán de Domínguez, Emiliano Zapata, Ixtapa, La concordia, San Cristóbal de las Casas, Sarabia, Simojovel, Soyaló, Yajalón	Copoya, El Jobo, Suchiapa, Villaflores, Villacorzo

Con el análisis del flujo vehicular se pueden medir las características y comportamientos del tránsito, requisitos fundamentales para definir el funcionamiento del sistema de transporte, el flujo vehicular(q) es la cantidad de vehículos transitan en un punto en específico por unidad de tiempo.

Puede determinarse mediante:

$$q = \frac{n \times 3600}{T} \text{ vehiculos/hora}$$

Donde: n= el número de vehículos que transitan por un punto en el camino en T segundos, q= el flujo horario equivalente.

2.- Recopilación de información y obtención de resultados.

La obtención de resultados se realizo de acuerdo al manual vigente de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

Para conocer el del flujo de tránsito en los trabajos de monitoreo existe el método manual, el cual se utiliza para obtener atributos del flujo de tránsito a través de personal que realiza el conteo vehicular de forma visual. (Ballinas Et al, 2020)

El método manual de conteo de flujo de tránsito permite clasificar a los vehículos por: tamaño, tipo, número de ocupantes, carril de circulación, dirección de circulación, entre otras propiedades muy diversas. (SCT, 2016). Para la realización del método manual, se definen intervalos de horas picos durante el día dentro de la ZMTG, en la zona oriente se identificaron dos intervalos: Matutino 7:00 AM – 9:00 am y Vespertino 1:00 PM- 3:00 pm.

De acuerdo a la caracterización vehicular antes mencionada se identificaron dos puntos de acceso en la zona oriente de la ZMTG, el primero ubicado en Carretera internacional San Cristóbal de Las Casas - Tuxtla Gutiérrez 112, Satélite Loma Larga, 29045 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, y el segundo en: Entronque Carretera Villaflores – Libramiento Sur, Tuxtla Gutiérrez Chiapas como se observa en la figura 4.

Se realizaron los aforos en las horas pico elegidas en los cinco días laborales de la semana con una duración global de dos meses, con un inicio el día 5 de abril y culminación el día 4 de junio como se observa en la Figura 5.



Figura 2. Ruta de entrada zona Norte-Oriente. Obtenido de: <https://smyt.chiapas.gob.mx/MapaRutas>

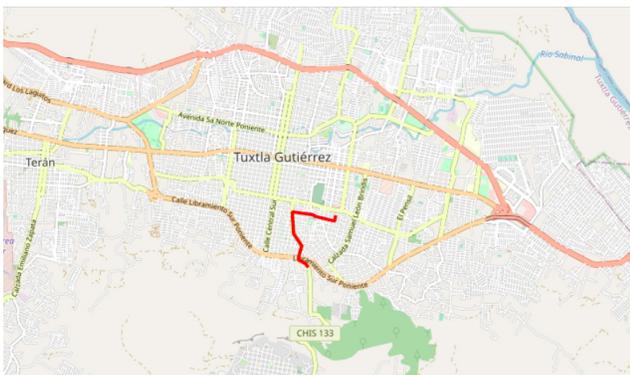


Figura 3. Ruta de entrada zona Sur-Oriente. Obtenido de: <https://smyt.chiapas.gob.mx/MapaRutas>



Figura 4. Puntos de conteo manual del flujo vehicular. (Elaboración propia con datos de Google maps).



Figura 5. Punto de aforo en horario pico matutino. Elaboración propia

RESULTADOS

En los datos oficiales disponibles de Secretaria de Comunicaciones y Transportes, los datos de flujo vehicular son globales, es decir no hay una medición puntual de transporte público.

Por lo anterior el presente estudio se enfoca en la medición puntual de transporte público que transita por los puntos de aforo.

De acuerdo a los parámetros establecidos de estudio, y la caracterización de rutas que se presenta en tabla 1, los resultados obtenidos referentes al flujo vehicular promedio en cada punto se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Flujo vehicular en ZMTG región oriente.

Flujo vehicular en unidades por hora			
Carretera internacional San Cristóbal de Las Casas - Tuxtla Gutiérrez 112, Satélite Loma Larga, 29045 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas			
Autobus	Urvan	Sprinter	Taxi
3	145	18	98
Entronque Carretera Villaflores – Libramiento Sur, Tuxtla Gutiérrez Chiapas,			
URVAN		TAXI	
135		65	

De acuerdo a la metodología presentada para el cálculo, los datos presentan un alto flujo vehicular, con mas de 3,712 vehiculos por día en promedio, que son las unidades de transporte público que ingresan por la zona oriente de la ZMTG.

CONCLUSIONES

Los resultados de la presente investigación presentan un alto flujo vehicular de transporte público en la zona oriente de la ZMTG, se observa un alto congestamiento en horas pico por los dos puntos de estudio, cabe resaltar que dicho flujo vehicular repercute directamente en el transito de la zona.

A partir de los enfoques de medición de flujo vehicular se verifica la importancia de que la cantidad de vehículos que ingresan a la ZMTG está ligada a una alta demanda por parte de los usuarios.

Cabe mencionar que se identifico que alrededor el 60% del transporte público finaliza su recorrido en la terminal conocida como “Los Ancianos” sobre la 9ª avenida sur oriente, que colinda con el primer cuadro de la ciudad, y el 80% de vehículos transitan por avenidas principales de la ciudad, lo que genera un mayor congestamiento ya que se suman con el flujo vehicular del transporte publico local. Lo que define una deficiencia en el sistema de transporte en la zona oriente de la ZMTG.

De acuerdo a los resultados obtenidos es conveniente definir puntos de terminales de corto recorrido que se ubiquen en las entradas de la ciudad de Tuxtla Gutierrez,

a fin de contener y distribuir el alto flujo vehicular que ingresa a la ciudad y congestiona las principales avenidas, sumado a que de manera paralela se debe gestionar un sistema de transporte publico local que garatice a los usuarios mejorar el nivel de servicio del sistema.

REFERENCIAS

- Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez (2011). Periódico Oficial No.339. Publicaciones Municipales. Publicación No. 0079-C-2011.
- Ballinas, G. Suárez, R. Y Nazar, M. (2019). Medición de Índices de Calidad en el Funcionamiento de Transporte Público en Ciudades Intermedias.
- Ballinas G. Suárez R. Y Argüello T. (2020). Revisión de flujo en transporte público, región poniente de la Zona Metropolitana de Tuxtla Gutiérrez
- Gobierno del Estado de Chiapas. (2018). Diagnóstico de Movilidad Urbana. Plan Integral de Movilidad Urbana Sustentable en la Zona Metropolitana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda
- Nicolas, G. y Lester, A. (2005). Ingeniería de Tránsito y Carreteras.
- Sansebastián H. y Silva R. (2018). Analisis de la capacidad vial acceso al centro comercial ámbar fashion mall, tuxtla Gutiérrez.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2016) Manual para Obtener los Volúmenes de Transito en Carreteras.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2009). Movilidad regional en Chiapas, información básica para la planeación del transporte.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2007). Análisis de los sistemas de transporte
- SEDESOL, CONAPO, INEGI. (2004). Delimitación de las Zonas metropolitanas en México. Ciudad de México.
- Silva, M. García, A. Y Hernando A. (2015). Crecimiento de la mancha urbana en la Zona Metropolitana de Tuxtla Gutiérrez (Chiapas, México).

ofrece sus servicios en:

Pruebas del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Resistencia de Materiales y Tecnología del Concreto



- Densidad y absorción del material que pasa la malla núm. 4.75 mm.
- Límites de consistencia de los suelos .
- Determinación del contenido de agua, por muestra de suelo.
- Análisis granulométrico utilizando mallas.
- Equivalente de arena.
- Desgaste de los ángeles.
- Forma de las partículas.
- Ensaye a compresión de cilindros estándar de concreto.
- Ensaye de tabique y bloque de concretos huecos.
- Ensayes a flexión de vigas de concreto.
- Ensaye de tensión, doblado y verificación geométrica de varillas de acero de refuerzo, examen metalúrgico macroscópico en varillas.
- Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante, mediante la prueba triaxial rápida no consolidada no drenada (uu) para 4 probetas, incluyendo labrado de los especímenes.
- Consolidación unidimensional, por muestra.
- Ensayos SPT.

INFORMES

Boulevard Belisario Domínguez Km. 1081,
Terán. C.P.29050 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
Tels. (961) 6178000 ext. 1560,
(961) 61 50322 ext. 101

Visita nuestra página:

www.ingenieria.unach.mx





EDIFICIO E

A person walking in the courtyard.