

MÉTODOS DE ELECCIÓN DISCRETA EN LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE TRANSPORTE

Introducción

En la planeación del transporte, tanto en pasajeros como en carga, la estimación de la demanda del servicio es un componente indispensable para anticipar acciones y medidas de control que mejoren el desempeño de los sistemas de transporte y disminuyan sus impactos no deseados.

Por varios años, y aún en la década de los ochentas, los pronósticos de demanda se basaron en métodos estadísticos sobre datos agregados de los usuarios del servicio. De las observaciones de las decisiones de los viajeros o de sus respuestas a cambios en tarifas, tiempos de recorrido, etc., los analistas explicaron los atributos del servicio que determinaban las decisiones de los viajeros usando métodos estadísticos clásicos como la regresión lineal múltiple. Este enfoque, basado en observaciones de las acciones de los usuarios se conoce en la literatura como de preferencias reveladas, y si bien fue un primer paso en la estimación de la demanda tuvo desventajas, como la necesidad de coleccionar enormes cantidades de datos, la dificultad de conocer características de las opciones de transporte no elegidas por los viajeros o la dificultad de estimar las reacciones de los usuarios a la introducción de servicios nuevos que nunca se habían ofrecido.

A finales de los años setenta y durante la década siguiente surgió un enfoque diferente, basado en técnicas de investigación de mercados para averiguar las preferencias de los usuarios del transporte; este enfoque se conoce como de preferencias declaradas, pues se basa en encuestas hechas a los viajeros en el sistema de transporte.

Con esta perspectiva se resolvieron muchas de las limitaciones de las estimaciones agregadas que se tuvieron en el caso de las preferencias reveladas, y aunque al principio los pronósticos logrados no fueron muy buenos, ya en la década de los años noventa el refinamiento en las técnicas estadísticas y en el diseño de cuestionarios mejoraron significativamente las estimaciones de demanda que se obtuvieron. La característica esencial de este enfoque es que se utilizan directamente los datos individuales de cada viajero.

Este artículo muestra una síntesis de la publicación "Métodos de Elección Discreta en la Estimación de la Demanda de Transporte" que está por aparecer dentro de la serie de Publicaciones Técnicas del IMT.

La intención es revisar las ideas básicas para familiarizarse con el tema de la estimación de la demanda con el enfoque de la maximización de

CONTENIDO

MÉTODOS DE ELECCIÓN DISCRETA EN LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE TRANSPORTE	1
COMPORTAMIENTO DE UNA ARCILLA ESTABILIZADA CON CEMENTO	7
GLOSARIO	15
PROYECTOS EN MARCHA	16
PUBLICACIÓN	17
EVENTOS ACADÉMICOS	17

la utilidad del viajero y el contexto probabilista de los modelos Logit, a fin de tener un documento que permita a los interesados en la aplicación de estas técnicas iniciarse en los detalles prácticos de su uso.

El contexto metodológico

La base teórica que sustenta el enfoque de preferencias declaradas es la modelación de elecciones discretas de los usuarios del transporte. Este tipo de modelos trata de reproducir el comportamiento de los viajeros que eligen frente a un número finito de opciones de viaje por algún motivo concreto (ir al trabajo, a la escuela, de compras, etc.), de manera que la demanda del sistema viene a ser el resultado de la suma de las elecciones individuales que hacen los viajeros.

Cuando se logra construir un modelo de elecciones discretas que representa razonablemente el proceso de toma de decisiones de los viajeros, entonces los usuarios que el modelo pronostique para las distintas alternativas de viaje pueden sumarse para estimar el uso agregado de cada una de esas opciones.

Los tres elementos básicos de un modelo de elecciones discretas son:

1. Identificar opciones de viaje disponibles y conocidas por el viajero que decidirá.

2. Identificar variables que influyen en la decisión de viajar, p. ej. el tiempo de viaje, la tarifa, el número de transbordos, etc., relacionadas con el viaje, y además variables socioeconómicas (sexo, edad, ingreso, etc.) que caractericen a los usuarios.

3. Un modelo matemático que represente las elecciones del usuario en función de las variables que afectan su decisión de viajar.

Los dos primeros elementos se integran con relativa facilidad.

El tercer elemento requiere de hipótesis apropiadas para representar la toma de decisiones de los viajeros. Lo primero que considera un modelo de elecciones del usuario, es que cuando éste elige una opción, manifiesta preferencia por esa opción. Así, por ejemplo, si un usuario va a trabajar en autobús en vez de usar su automóvil, muestra una preferencia por el transporte público.

Las preferencias del usuario en sus elecciones ante un conjunto de alternativas dependen de los atributos de las opciones y de las características del propio usuario. Por ejemplo, atributos del viaje que influyen en la decisión del usuario pueden ser el tiempo del viaje, el costo o la confiabilidad de los itinerarios; mientras que las características del usuario que influyen en sus preferencias pueden ser: edad, sexo, ingreso o posesión de automóvil.

Entonces, siendo la elección del usuario una muestra de sus preferencias, el modelo matemático se dirige hacia las preferencias de los viajeros ante las alternativas para viajar. El marco teórico adecuado para este fin es la Teoría de Utilidad, en el campo de la Economía, cuyo supuesto básico del comportamiento humano es que el valor de una decisión depende del bienestar que da o de la molestia que evita, que en términos económicos es la cantidad de utilidad generada por la decisión. Consecuencia de lo anterior es la hipótesis de que los usuarios del transporte siempre buscarán maximizar la utilidad derivada de las distintas alternativas que enfrentan al tomar una decisión.

En el Capítulo 1 se resumen los antecedentes de los esfuerzos de modelación de la demanda de transporte a finales del siglo XX, y se presentan los enfoques de preferencias reveladas y preferencias declaradas que sustentan distintos métodos de estimación de demanda, así como las ideas fundamentales que se necesitan para desarrollar modelos de elección discreta, los cuales han mostrado su utilidad y su mayor alcance en términos de precisión de estimación en comparación con los métodos tradicionales utilizados en la década de los años 1980.

El uso del concepto de utilidad y los modelos Logit

En el Capítulo 2 se describen las ideas básicas para construir modelos de elección discreta. La sección 2.1 parte del principio de que los flujos de pasajeros en un sistema de transporte resultan de las elecciones de los viajeros, y que éstos siempre maximizan la utilidad que les da el viaje (o en su defecto siempre minimizan los inconvenientes).

El principio de maximización de utilidad se vuelve operativo con la función de utilidad, una función matemática que representa las preferencias de los viajeros del sistema.

El valor numérico de esta función depende de los atributos de la opción de viaje considerada y de las características del individuo que decide. La propiedad de la función de utilidad que representa las preferencias del usuario está en que si su valor numérico para una opción de viaje "a" es mayor que el correspondiente a la opción de viaje "b", entonces el individuo preferirá la opción "a" sobre la "b"; y viceversa, si el individuo prefiere la opción de viaje "x" sobre otra "y", entonces la función de utilidad tendrá un valor mayor evaluada en "x" que evaluada en "y". Ante la presencia de un número finito de opciones, el individuo elegirá la más preferida, que es la que tiene el mayor valor de la función de utilidad.

Los elementos de modelación de las preferencias con una función de utilidad son:

a) El conjunto de alternativas disponibles **A**, con las opciones de viaje conocidas y disponibles para el usuario (automóvil, taxi, tren, etc.). Cada opción "j" del conjunto **A** tiene un conjunto de atributos X_j que la determinan (tiempo de viaje, costo, etc.).

b) El conjunto de atributos **S** del individuo que elige y que son relevantes para la decisión como: edad, sexo, ingreso, núm. de automóviles poseídos, etc.

Con el principio de maximización de utilidad, se busca una función U que depende tanto de los atributos de las alternativas del conjunto **A** como de los atributos **S** del individuo que decide, y tal que para cualquier par de alternativas j, k del conjunto **A** la relación:

$$U(X_j, S) > U(X_k, S)$$

indica que el usuario prefiere la opción j a la k y por tanto elegirá j si debe escoger entre ambas. Cuando se elige entre varias opciones de **A**, se elegirá la opción j siempre que se cumpla que: $U(X_j, S) > U(X_k, S)$ para todas las opciones k en **A**.

Para que la función de utilidad $U(X_j, S)$ sea consistente, debe ser la misma para todas las opciones en **A**, con valores numéricos distintos para los distintos atributos X_j de las opciones en **A**; aunque puede haber coincidencia de valores para dos atributos X_j y X_k en cuyo caso habrá indiferencia en la elección de ambas opciones; además, para una alternativa j dada, el valor numérico de $U(X_j, S)$ debe depender sólo de los atributos X_j y **S** de la propia alternativa y del individuo, y no depender de los atributos de otras alternativas en **A**.

Con la función de utilidad se visualiza la dependencia entre las preferencias y las elecciones de los viajeros y los atributos tanto del viaje como de las características socioeconómicas de los usuarios, además de que permite pronosticar las reacciones de los usuarios ante cambios de los atributos en las opciones de viaje (cambios en tiempos de viaje, tarifas, etc.).

Una función de utilidad para modelar las elecciones de los usuarios de un sistema de transporte no es única, Cualquier función matemática que represente numéricamente el orden de preferencias del viajero servirá como función de utilidad y dará las mismas predicciones de elección del usuario independientemente del valor numérico o del signo que resulten de su fórmula analítica. Con la información de las

funciones de utilidad aplicadas a los individuos se pueden obtener resultados agregados para pronosticar el comportamiento colectivo de los usuarios de un sistema de transporte; los ejemplos numéricos en la Sección 2.1 ilustran algunos casos.

Extendiendo el enfoque de modelación descrito con el principio de maximización de utilidad, en la Sección 2.1 se sigue con el enfoque probabilístico, el cual resuelve las contradicciones que se presentan con el uso de la función de utilidad cuando dos usuarios identificados con exactamente los mismos atributos de viaje, clasificados con las mismas características socioeconómicas y enfrentando una decisión ante un mismo conjunto de alternativas eligen de modo distinto. O también cuando un mismo individuo enfrentado en ocasiones distintas a las mismas opciones de viaje elige diferente en cada ocasión.

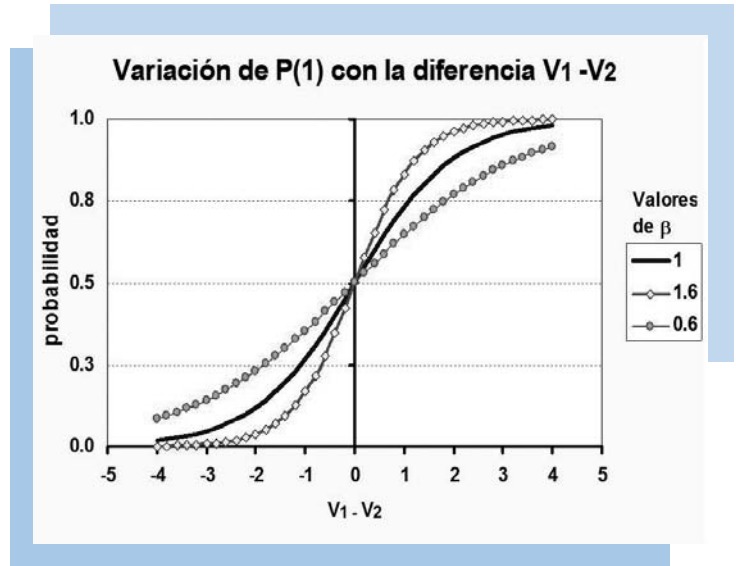
Luego de revisar algunas razones por las que los viajeros muestran variaciones que parecen contradictorias en sus elecciones, se discute la idea de utilidad aleatoria, que extiende el concepto de función de utilidad sumando un término de error para representar todos los factores no conocidos por el analista y que influyen en la decisión del viajero.

Ya con este concepto de utilidad aleatorio se prosigue en la Sección 2.2 con los modelos Logit, que son la versión probabilista de modelos de elección discreta más difundida en la literatura, y la que ha tenido más aplicaciones prácticas.

Comenzando con el modelo Logit binomial, para la elección entre dos alternativas "1" y "2", se revisa el modelo de elección que resulta ser una densidad logística donde la probabilidad de elegir la opción "1" es:

$$P(1) = \frac{e^{\beta V_1}}{e^{\beta V_1} + e^{\beta V_2}} = \frac{1}{1 + e^{-\beta(V_1 - V_2)}}$$

La curva de esta densidad tiene la forma de una "S" alargada y mapea el dominio de la variable $(V_1 - V_2)$ que es la diferencia de utilidades entre la opción "1" y la opción "2", sobre el intervalo $[0, 1]$ que representa la probabilidad medida. Dependiendo del valor del parámetro β se obtienen distintas curvas como se ve en la siguiente gráfica.



En estas gráficas se ve que cuando $V_1 - V_2 = 0$, indicando que la utilidad de ambas alternativas es la misma, la probabilidad de elegir la alternativa 1 es 0.5, que corresponde a la situación de indiferencia frente a la alternativa 2. A medida que $V_1 - V_2$ toma valores positivos cada vez mayores, indicando que la utilidad de la alternativa 1 es cada vez mayor comparada a la de la alternativa 2, la probabilidad de elegir la alternativa 1 aumenta tendiendo a uno; y viceversa, cuando la diferencia $V_1 - V_2$ toma valores negativos indicando que la alternativa 2 tiene mejor utilidad que la 1, la probabilidad de elegir la alternativa 1 disminuye, aproximándose a cero. Este es el comportamiento esperado de un modelo de elecciones discretas, y es consistente con el principio de maximización de utilidad.

Prosiguiendo con el modelo Logit, se revisa luego el caso multinomial, en el cual hay N alternativas, con utilidades sistemáticas V_1, V_2, \dots, V_N , y en el cual la probabilidad de elegir la alternativa "j" es:

$$P(j) = \frac{e^{V_j}}{\sum_{k=1}^N e^{V_k}} = \frac{1}{e^{V_1} + e^{V_2} + \dots + e^{V_N}} = \frac{1}{1 + e^{(V_j - V_1)} + e^{(V_j - V_2)} + \dots + e^{(V_j - V_N)}}$$

Con este modelo Logit multinomial la sección 2.2 continúa con varios ejemplos numéricos de cálculo de probabilidades, de estimaciones agregadas de reparto porcentual de usuarios entre las alternativas y de pronóstico de cambios en estos porcentajes ante cambios en los atributos del viaje como son el aumento en el costo de combustibles. Otro ejemplo mostrado es el caso de la introducción de una alternativa nueva, que es una de las ventajas que tienen estos modelos Logit, ya que permiten pronosticar comportamientos de usuarios en circunstancias donde no se tienen datos históricos debido a la novedad de dicha alternativa.

La sección 2.2 concluye revisando la introducción de constantes específicas para alternativas, que se usan para refinar el modelo de elección añadiendo constantes que determinen mejor la influencia de alguna alternativa particular, como es el caso en el que se compara la elección entre automóvil particular y transporte público considerando a los individuos que poseen automóvil y a los que no lo tienen. También se revisa una propiedad importante de los modelos Logit, que es la independencia de las alternativas irrelevantes, que fue descrita por Luce y Suppes (1965) como sigue:

“Siempre que dos alternativas tengan probabilidades positivas de ser elegidas, la razón de una probabilidad a la otra permanece inalterada por la presencia o ausencia de cualquier otra alternativa adicional en el conjunto de opciones disponibles”.

El capítulo 2 continúa con la Sección 2.3 que trata del desarrollo de las variables que se utilizan en los modelos Logit; la conveniencia de desagregar los tiempos de viaje en el tiempo que el usuario viaja más los tiempos de acceso a paradas o terminales más los tiempos de espera. Esta sección muestra algunos ejemplos numéricos ilustrativos. Finalmente, el capítulo concluye con la Sección 2.4 en la que se discuten los detalles prácticos para determinar el conjunto de alternativas que se puede utilizar en la modelación y muestra ejemplos numéricos de diversos cálculos con distintos conjuntos de opciones.

La estimación de los parámetros

En el Capítulo 3, la Sección 3.1 aborda la cuestión de la estimación de los parámetros, comenzando con una discusión sobre el contexto estadístico del modelo y la necesidad de cambiar a un enfoque distinto al usado en la típica regresión lineal por mínimos cuadrados.

Luego de esta discusión en la Sección 3.2 se analiza el proceso de estimación usado en los modelos Logit, que es el método de máxima verosimilitud, en el cual se maximiza la función de densidad conjunta dependiente de los parámetros $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$ de un modelo Logit multinomial, en la cual se introducen los datos de la muestra obtenida de la población de usuarios para hacer el ajuste.

Se define la función de verosimilitud L de los atributos x_k de la muestra en función de los parámetros β^* :

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n, \beta^*) = \prod_{j=1}^N \frac{1}{1 + e^{\beta^*(V_j - V_1)} + e^{\beta^*(V_j - V_2)} + \dots + e^{\beta^*(V_j - V_N)}}$$

Y se plantea el proceso de estimación como un problema de maximización no lineal que da como resultado los parámetros β^* que ajustan el modelo Logit:

$$\text{Max}_{\beta^*} \log L(x_1, x_2, \dots, x_n, \beta^*) = \log \left[\prod_{j=1}^N \frac{1}{1 + e^{\beta^*(V_j - V_1)} + e^{\beta^*(V_j - V_2)} + \dots + e^{\beta^*(V_j - V_N)}} \right]$$

Se muestran algunos ejemplos numéricos de ajuste de parámetros en los cuales se utiliza el módulo Solver de Excel para resolver el problema de optimización no lineal planteado en un modelo Logit binomial y en uno que incluye una constante específica de un reparto modal entre automóvil y autobús.

Continuando en la Sección 3.3 los resultados se comparan con los que da el módulo de regresión logística del paquete estadístico JMP v.9.0, en el cual se obtienen además criterios de bondad de ajuste estadística, como es la estadística de Wald y el porcentaje de aciertos entre elecciones pronosticadas contra elecciones observadas en la muestra.

Se discute también la significancia de los parámetros β^* estimados en el modelo y se dan criterios básicos para decidir la inclusión o exclusión de las variables en el modelo en atención al nivel de significación de sus parámetros estimados.

La sección 3.3 concluye con una serie de recomendaciones prácticas en la estimación de los parámetros del modelo a fin de evitar errores comunes en la construcción del mismo, como es el caso de tener demasiadas constantes específicas de alternativas; la especificación inadecuada de las variables socioeconómicas que describen a los usuarios o el problema de la colinealidad perfecta entre variables incluidas en el modelo.

Aplicaciones y conclusión

En el capítulo 4 se muestran algunas aplicaciones de los modelos de elección discreta. La sección 4.1 trata la cuestión de aplicar estos modelos al problema de elegir ruta en un sistema de

transporte y al problema de elegir la hora de partida para un viaje.

En cada caso se mencionan los aspectos esenciales que se deben considerar para modelar adecuadamente estos problemas de elección discreta y se sugieren factores convenientes para incluir en el proceso de modelado.

La sección 4.2 continúa con la revisión de los métodos para producir pronósticos agregados a partir de la información de elecciones discretas que proporcionan los modelos Logit. Estos pronósticos agregados son de gran interés para los analistas y modeladores del transporte, pues proporcionan las estimaciones básicas para propósitos de planeación de los sistemas de transporte. En esta sección se muestran algunos ejemplos numéricos de estimaciones agregadas con base en información de las elecciones individuales de los viajeros.

Es con estas estimaciones de las decisiones agregadas que se pueden prever el uso de los sistemas; sus dimensiones; su mejora; y en casos de servicios nuevos, la utilización potencial de los servicios y la magnitud esperada de recursos necesarios para operar eficientemente los servicios de transporte ofrecidos.

La sección 4.2 concluye con un resumen breve de métodos de pronóstico agregado con base en información de los modelos de elección discreta, recomendaciones de su uso según el caso que se tenga de disponibilidad de datos y algunos ejemplos numéricos ilustrativos.

Finalmente, en el Capítulo 5 se resumen los puntos principales de la revisión que se hace en esta investigación y se dan sugerencias para trabajos futuros que continúen el tema con aspectos más avanzados.

Bibliografía

Amos WEB GLOSS*arama, Utilitarianism; Utility maximization. En: <http://www.AmosWEB.com>. AmosWEB LLC, 2000-2010. 2010

Ben-Akiva, M. & Lerman, S.R. *Discrete choice analysis: Theory and application to travel demand*. The MIT Press. The Massachusetts Institute of Technology. USA. 1985

Ben-Akiva, M. and Bierlaire, M. *Discrete Choice Models with Applications to Departure Time and Route Choice*. In: Handbook of Transportation Science. Edited by Randolph W. Hall. Kluwer Academic Press. USA. 2003

Greene, W.H. *Econometric analysis. 4th edition*. Prentice-Hall International, Inc. USA. 2000

Hensher, D.A., Rose, J.M., and Greene, W.H. *Applied choice analysis. A primer*. 3rd printing. Cambridge University Press. New York. 2007

Horowitz, J.L., Koppelman, F.S. and Lerman, S.R. *A Self-Instructing Course in Disaggregate Mode Choice Modeling*. Federal Transit Administration, U.S. Department of Transportation. Washington. 1986

Kanafani, A. *Transportation Demand Analysis*. McGraw-Hill. USA. 1983

Kreyszig, E. *Introductory Mathematical Statistics*. Principles and Methods. John Wiley & Sons. New York. 1970

Luce, R.D. and Suppes, P. *Preference, utility and subjective probability*. EN: R.D. Luce, R.R. Bush and E. Galanter, editors, Handbook of Mathematical Psychology. John Wiley & Sons, New York. 1965

Montgomery C. Douglas & Myers H. Raymond. *Generalized Linear Models*. Wiley-Interscience Publication. 2002

Nelson, D. *The Penguin Dictionary of Statistics*. Penguin Books. London. 2004

Ortúzar, J.D, and Willumsen, L.G. *Modelling transport*. Second edition. John Wiley & Sons. Chichester, UK. 1994

Ortúzar, J.D. *Modelos de demanda de transporte*. 2ª. Edición. Ediciones Universidad Católica de Chile. Alfaomega Grupo Editor S.A. México. 2000

Train, K.E. *Discrete Choice Methods with Simulation*. 2nd edition. Cambridge University Press. New York. 2009

MORENO Eric
emoreno@imt.mx

COMPORTAMIENTO DE UNA ARCILLA ESTABILIZADA CON CEMENTO

Introducción

A medida que la población se incrementa y existe una mayor necesidad por construir nuevos caminos y carreteras, es necesario explotar más bancos para extraer los materiales que se utilizarán en la construcción de dichas obras, sin embargo, cada vez será más difícil tener acceso a este tipo de bancos si se desea

crear menos daño al medio ambiente. Por esto y como una forma de utilizar la mayor parte de los materiales que se tienen a lo largo de los proyectos de caminos y carreteras (aunque no cumplan con especificaciones), existen en el mercado varios productos que prometen mejorar las propiedades de los materiales que se utilizan en la sección estructural. Sin embargo, antes de que sean utilizados en la

construcción, es necesario estudiarlos para responder las siguientes preguntas: ¿Cuáles son las propiedades que mejora el producto?, ¿En qué medida se presentan los incrementos o reducciones de las propiedades?, ¿Cuál es el diseño de la mezcla?, etc.

En este artículo se presentan los resultados que se obtuvieron al estabilizar un material marginal con cemento (que es uno de los productos que generalmente se usa), es decir, un material que en su estado natural no cumple con los requisitos para ser utilizado en la construcción de caminos o carreteras.

Estabilización con cemento

El cemento es uno de los productos que generalmente se elige cuando se desea estabilizar materiales en la construcción de carreteras. Éste puede agregarse tanto a los materiales de subrasante, subbase y base. En varios países se han llevado a cabo diversas investigaciones sobre comportamiento de materiales estabilizados y se ha llegado a la conclusión de que este producto mejora en gran medida las propiedades de resistencia y deformabilidad.

Cuando se lleva a cabo investigación sobre el cemento como material estabilizante, la propiedad que se estudia generalmente es la resistencia a la compresión no confinada, ya que en muchos casos se especifica que una vez que el material es compactado en campo y después de un cierto número de días, éste debe alcanzar un valor de resistencia especificado, sin embargo, es necesario que las propiedades que se estudien en laboratorio estén relacionadas con los fenómenos a los que va a estar expuesta la estructura una vez que esté en funcionamiento. En este estudio se llevaron a cabo pruebas de compresión simple, módulo de ruptura y fatiga; estas dos últimas pruebas parecen simular mejor las condiciones de campo.

Propiedades índice del material estudiado

Arcilla en estado natural

El suelo utilizado en el estudio corresponde a una arcilla de alta compresibilidad clasificada como CH según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. La Tabla 1 resume las propiedades índice así como las propiedades de compactación del material en estado natural y la Figura 1 muestra la curva de compactación Proctor modificada.

Tabla 1
Resumen de las propiedades índice y propiedades de compactación

Clasificación	Límites de Atterberg			Pasa malla No. 200 (%)	G _s	Características de compactación (ASTM D 1557)	
	LL (%)	LP (%)	IP (%)			w _{opt} (%)	γ _{dmax} (kN/m ³)
CH	55	30	25	81.4	2.59	30.5	13.69

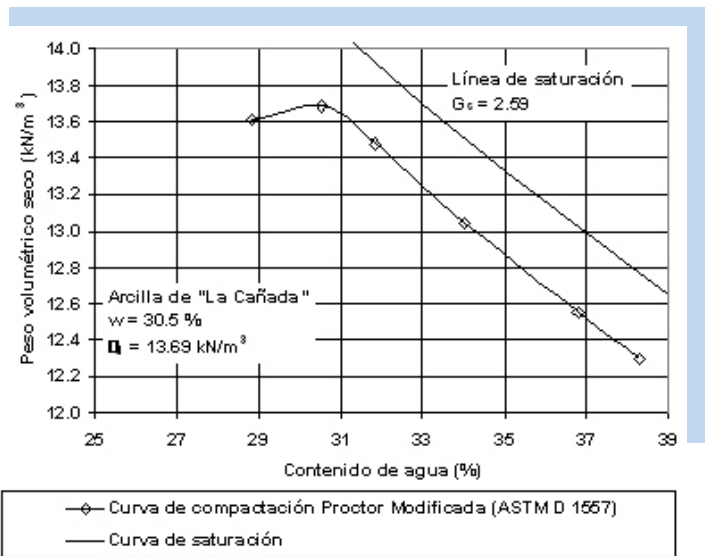


Figura 1
Curva de compactación Proctor Modificada de la arcilla CH

Arcilla estabilizada

Para llevar a cabo la preparación de los especímenes se requirió la determinación de la curva de compactación del material estabilizado con cemento. Utilizando el método de prueba ASTM D 1557 se determinó que la humedad óptima y el peso volumétrico seco máximo para la mezcla fueron de 27.0 y 13.92 kN/m³, respectivamente. Por tanto, esta condición de contenido de agua y peso volumétrico seco máximo fueron los utilizados para la preparación de los especímenes.

Preparación de los especímenes de estudio

Los procedimientos de preparación de especímenes fueron los siguientes:

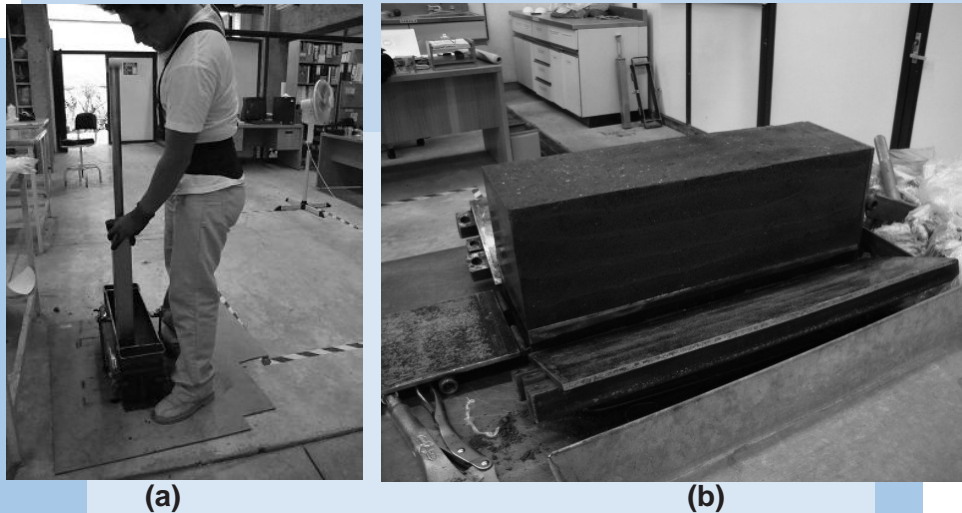
Para los especímenes de suelo en estado natural:

1. Después de cribar el suelo por la malla No. 4 se dejó secar al ambiente.
2. Posteriormente se pesó la cantidad de suelo necesario para la preparación del espécimen.
3. Se agregó al suelo la cantidad de agua necesaria para alcanzar el contenido de agua óptimo; se permitió una variación de ± 1 %.
4. Se colocó el material en una bolsa de plástico y se dejó reposar por 24 horas para uniformizar el agua en toda la muestra.
5. Al siguiente día se preparó el espécimen en un molde cilíndrico de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura para pruebas de compresión no confinada. El espécimen se compactó en 8 capas; en cada capa se aplicaron 62 golpes con un pisón de 4.5 kg; con estas características se alcanzó el peso volumétrico seco máximo.
6. Finalmente, los especímenes se ensayaron en compresión a una velocidad

de 1.2 %/min hasta alcanzar la falla del espécimen.

Para los especímenes de suelo estabilizados con cemento:

1. Después de cribar el suelo por la malla No. 4 se dejó secar al ambiente.
2. Posteriormente se pesó la cantidad de suelo necesario para la preparación de una muestra.
3. Se agregó al suelo 8 % de cemento con respecto a peso seco, se mezcló completamente y posteriormente se agregó la cantidad de agua para alcanzar el contenido de agua óptimo; se permitió una variación de ± 1 %.
4. Se compactó el espécimen de tal forma que se alcanzará el peso volumétrico seco máximo; en este caso también se permitió una variación de 1 % en este parámetro.
5. Para el caso de muestras a ensayarse en compresión simple, los especímenes se compactaron en un molde de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. Se compactaron en ocho capas con un pisón de 4.5 kg; el número de golpes fue el requerido para alcanzar el peso volumétrico seco máximo.
6. Para muestras prismáticas (vigas), los especímenes se compactaron en 5 capas con un pisón de 4.5 kg (Figura 2a y 2b). Cada capa se compactó con 140 golpes.
7. Después de compactar los especímenes, algunos se ensayaron inmediatamente y otros se colocaron en un cuarto húmedo por el tiempo de curado especificado.
8. Algunos de los especímenes se ensayaron en compresión simple, otros en prueba de módulo de ruptura y otros en prueba de fatiga.



(a) (b)

Figura 2

(a) Compactación de las muestras prismáticas;
(b) Muestra al final de la compactación

Procedimiento de prueba

Prueba de compresión no confinada

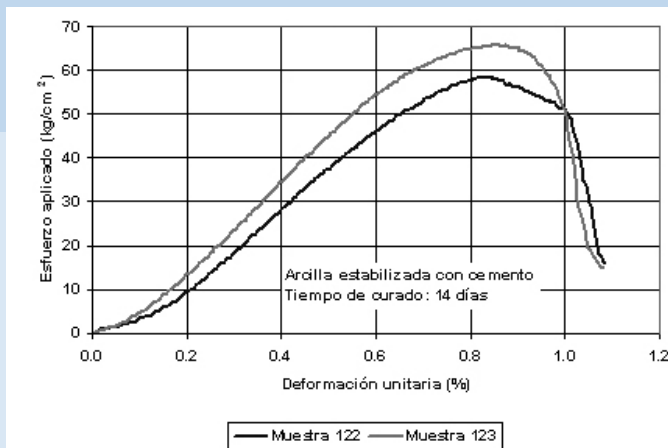
Para determinar la resistencia en compresión no confinada se utilizó un marco de carga INSTRON. Después de colocar el espécimen en los platos de compresión, se aplicó carga a una velocidad de 1.2 %/min hasta alcanzar la falla del espécimen (Figura 3). Finalmente, en el caso de especímenes de suelo natural, al final se disgregaron para determinar el contenido de agua final.

Prueba de módulo de ruptura y fatiga

Para estudiar el efecto de fatiga de los materiales estabilizados se requiere realizar dos tipos de prueba: la de módulo de ruptura y la de carga cíclica. La primera se lleva a cabo con aplicación de carga en los tercios medios de una viga de dimensiones 15 x 15 x 50 cm (ancho, profundidad y largo, respectivamente) (Figura 4b); la velocidad de aplicación de carga en este caso fue de 5.2 kN/min.



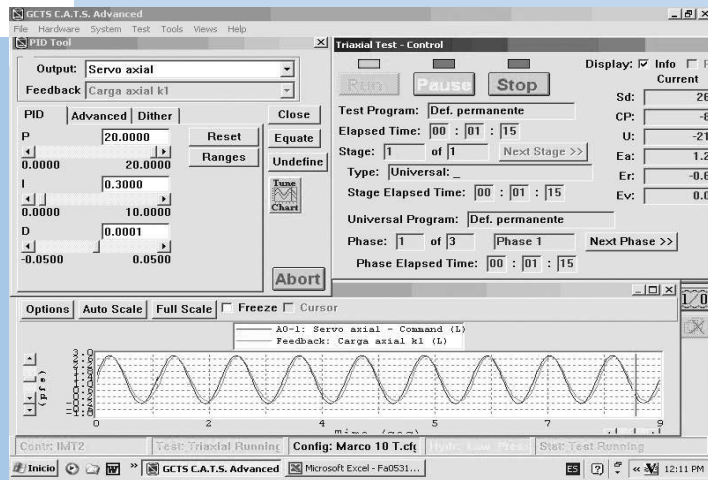
(a)



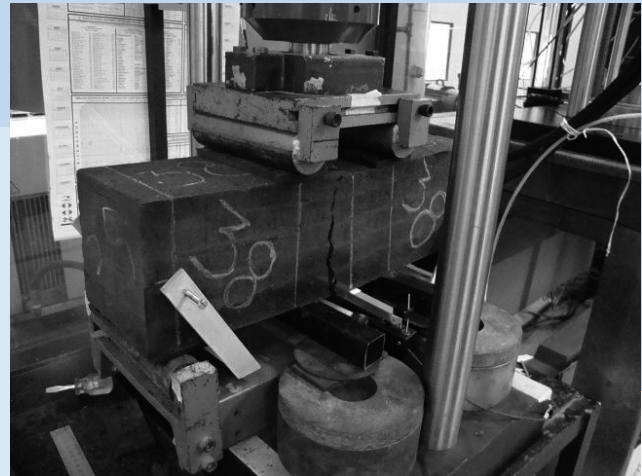
(b)

Figura 3

(a) Muestra ensayada en compresión simple; (b) Resultados esfuerzo-deformación de dos muestras ensayadas en compresión



(a)



(b)

Figura 4

(a) Aplicación de la carga a una frecuencia de 1 Hz ; (b) Viga fallada al final de la prueba de módulo de ruptura o prueba de fatiga simple

Para la prueba de fatiga y después de que los especímenes alcanzaron el tiempo de curado, las vigas se sometieron a ciclos de carga y descarga (carga aplicada en los tercios medios) con una onda tipo haversine a una frecuencia de 1 Hz (Figura 4a). La amplitud de la onda aplicada corresponde a la relación de esfuerzo requerida (carga aplicada/módulo de ruptura). Esta amplitud fue de 90, 70 y 50 % (Figura 4a); para cada uno de los porcentajes aplicados se ensayaron dos especímenes o tres en algunos casos. En la gráfica de fatiga mostrada en los resultados se indican todos los puntos.

ReResultados

Compresión no confinada

Como se mencionó anteriormente, la resistencia en compresión es uno de los parámetros utilizados para controlar la calidad de los materiales estabilizados. Como se observa en la Figura 5a, los tiempos de curado a los que se llevaron a cabo los ensayos fueron de 0, 7, 14, 28, 60, 90 y 180. Se nota que para la arcilla estabilizada con 8 % de cemento la resistencia hasta 28 días de curado se incrementa rápidamente mientras que la velocidad de este incremento es menor entre 28 y 60 días de curado. Por otro lado,

para tiempos de curado de 90 y 180 días, la resistencia en compresión se reduce. Además de lo anterior, la gráfica indica la diferencia entre las resistencias del material con y sin estabilizante. De hecho, la resistencia de la arcilla compactada en estado natural se mantiene relativamente constante a un valor de 8 kg/cm² mientras que la resistencia máxima que se puede alcanzar en el material estabilizado es de 80 kg/cm².

Otro de las características importantes que se obtienen en las pruebas de resistencia en compresión sin confinar es la deformación axial en la falla. En la Figura 5b se muestra el comportamiento de este parámetro. La figura indica que la deformación a la falla para la arcilla sin estabilizar inicia en un 5 % para material que se ensaya inmediatamente después de ser compactado y se va reduciendo a medida que el tiempo de curado se incrementa. Para 180 días de curado la deformación axial en la falla se reduce a un valor menor de 2 %, es decir, a medida que el tiempo de curado se incrementa la rigidez del material también lo hace. Por otro lado, para el material estabilizado con cemento se tiene que el cemento actúa inmediatamente después de ser aplicado junto con el agua, es decir, las muestras que se ensayan inmediatamente de ser compactados presentan un valor de

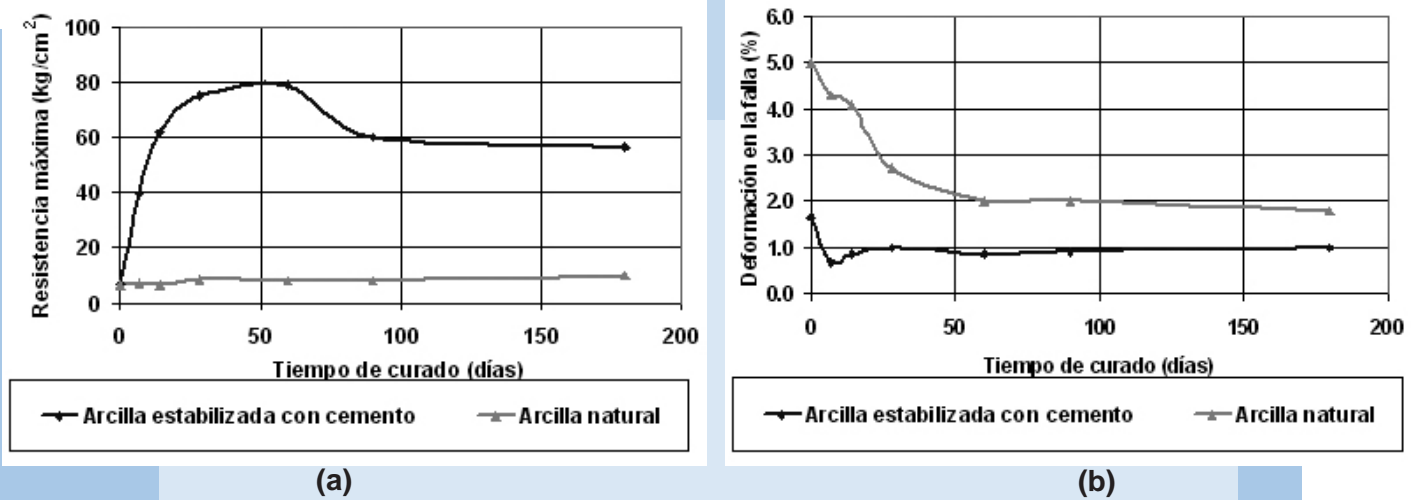


Figura 5
Comportamiento de la resistencia en compresión simple y de la deformación axial en la falla de la arcilla natural y la estabilizada con 8 % de cemento

deformación en la falla aproximado de 1.7 % y posteriormente se mantiene aproximadamente constante a un valor de 1 %.

Módulo de ruptura

El módulo de ruptura es una prueba que se utiliza para determinar la resistencia a la flexión de un material, pero además este parámetro se usa para determinar características de fatiga como se verá en el siguiente inciso.

En este estudio se ensayaron vigas estabilizadas con cemento en prueba de módulo de ruptura y tiempos de curado de 0, 14 y 90 días. La Tabla 2 resume los valores de módulo de ruptura obtenidos para las vigas y las características de cada uno de los especímenes. Los valores de tabla indican que el módulo varió entre 180 y 873 kPa para los tiempos de curado utilizados.

La Figura 6 es una gráfica típica de los resultados de módulo de ruptura. En este

Tabla 2
Características de las vigas ensayadas en módulo de ruptura (arcilla estabilizada con 8 % de cemento)

Viga No.	Tiempo de curado (días)	w (%)	γ_d (kNm ³)	Deflexión (mm)	Carga máxima (kN)	Módulo de ruptura (kPa)	Módulo de ruptura promedio (kPa)
38	0	27.1	13.59	0.126	1.5	200	180
40	0	27.0	13.49	0.135	1.2	160	
25	14	27.5	13.45	0.083	4.0	533	533
26	14	27.5	13.44	0.095	4.0	533	
2	90	26.7	13.73	0.131	6.7	893	873
3	90	26.9	13.57	0.130	6.4	853	

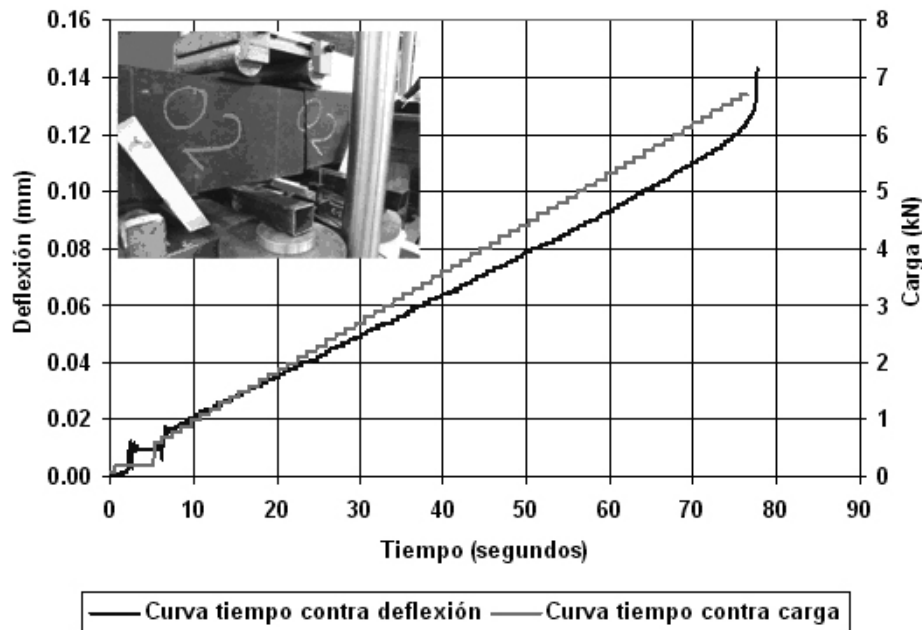


Figura 6

Prueba de Módulo de ruptura para la viga 2

ejemplo se grafican las curvas de tiempo contra carga y tiempo contra deflexión para la viga 2. La carga máxima que soportó fue de 6.7 kN y una deflexión a la falla de 0.131 mm. Los resultados de la tabla indican que las deflexiones soportadas por las vigas no exceden valores de 0.2 mm, es decir, la deflexión que puede soportar un material estabilizado con cemento es muy pequeña. Entonces, se observa que al agregar cemento a una arcilla ésta incrementa su resistencia pero también reduce su flexibilidad para soportar deformaciones.

Resistencia a fatiga

Una vez obtenidos los módulos de ruptura, se decidió que las relaciones de esfuerzo a ser aplicadas en la prueba de fatiga serían de 90, 70 y 50 %, es decir, las cargas cíclicas a aplicar fueron 90, 70 y 50 % de las cargas máximas obtenidas en la prueba de módulo de ruptura. Los tiempos de curado que se analizaron en esta prueba fueron 0, 14 y 90 días. Los datos que se registran en la prueba de fatiga son las deflexiones de la viga y el número

de ciclos soportados en la falla. De la gráfica de número de ciclos a la falla contra relación de esfuerzo se observa que los especímenes que se ensayaron inmediatamente después de ser compactados resisten pocas repeticiones de carga y a medida que el tiempo de curado se va incrementando el número de repeticiones a la falla se incrementa como lo muestran las líneas de tendencia que se dibujaron (Figura 7). Es importante hacer notar que las líneas de tendencia son aproximadas ya que se requiere de un mayor número de ensayos para establecer un modelo de fatiga más concluyente.

Para diseñar espesores de pavimento en lo que estarán involucrados materiales estabilizados es importante la utilización de las leyes de fatiga ya que éstas son las que determinan el número de repeticiones que soportará el material antes de llegar a la falla. Además, es claro que en este tipo de materiales, el criterio que regirá el diseño no será el de deformación permanente (ya que el material tiene una rigidez muy alta) sino el agrietamiento del material por fatiga.

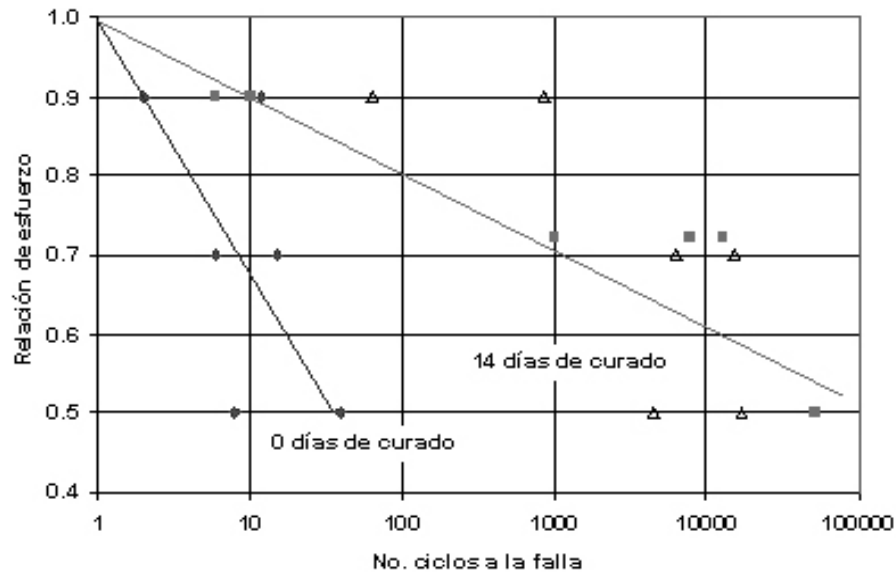


Figura 7

Tendencias aproximadas de la ley de fatiga de la arcilla estabilizada con cemento

Conclusiones

En el método de diseño empírico-mecanicista, una de las características importantes a determinar de los materiales estabilizados es la ley de fatiga, la cual se utiliza para determinar cuál será el número de repeticiones que soportará el material antes de que se produzca la falla. Debido a lo anterior, en el Instituto Mexicano del Transporte se están llevando a cabo investigaciones sobre el comportamiento de materiales estabilizados, entre los que se pueden mencionar las arcillas y los materiales de base. En este artículo se presentaron sólo resultados de resistencia a la compresión simple, módulo de ruptura y las leyes de fatiga de una arcilla estabilizada con cemento.

Como se observa de los resultados, la resistencia en compresión simple de la arcilla estabilizada con 8 % de cemento se incrementa alrededor de 10 veces comparada con la resistencia que se obtiene en condiciones naturales. Por otro lado, el material estabilizado se rigidiza de forma importante lo cual trae como consecuencia que el nivel de deformaciones que soporte antes de fallar es muy pequeño. También es claro que la velocidad de incremento de la

resistencia de la arcilla estabilizada es muy importante en los primeros días de curado y para tiempos de curado largos, la resistencia tiende a disminuir.

Con respecto a las leyes de fatiga, se observó que la ley de fatiga para un tiempo de curado de cero días (especímenes ensayados inmediatamente después de ser compactados) está por debajo de la que se obtiene para 14 días de curado, sin embargo, los modelos son aproximados ya que se requiere de un mayor número de ensayos para obtener una ley de fatiga más confiable. Además, es deseable que se lleven a cabo el mismo tipo de investigaciones para una mayor cantidad de materiales.

Referencias

PowerCem Technologies. Reporte de investigación del proyecto IE-11/09. 6 de Septiembre del 2010

PÉREZ Natalia
nperez@imt.mx
GARNICA Paul
pgarnica@imt.mx
RANGEL Daniel
jrangel@imt.mx
AGUADO Edgar

GLOSARIO

Artículo 1:

Elección discreta: El modelo de la elección discreta surgió en la Economía al estudiar a consumidores que deben elegir entre alternativas de consumo distintas. El término discreta indica que el consumidor elige sólo una de las opciones posibles, y no una cantidad continua de un bien, p. ej. como alimentos o gasolina. Este enfoque usa el concepto de utilidad, suponiendo que el consumidor elegirá la opción que le maximiza la utilidad o equivalentemente le minimiza la incomodidad de la elección. En estudios del transporte el enfoque se ha usado con éxito para modelar las elecciones de las alternativas de viaje de los usuarios (automóvil propio, autobús, taxi, etc.) y se ha refinado con el concepto de utilidad aleatoria, que permite captar diferencias de opiniones, gustos o circunstancias de usuarios que a veces eligen diferente ante las mismas opciones. El modelo matemático más común en estudios de elecciones discretas es el modelo Logit con sus distintas variantes.

Máxima verosimilitud: Es un método para estimar un parámetro desconocido de una población con distribución de probabilidad supuesta, p. ej., el coeficiente de una variable de la función de utilidad de un usuario que elige entre automóvil propio o autobús para ir al trabajo. Como en otros métodos de estimación, se usa una muestra de la población para estimar los parámetros de interés. Suponiendo un modelo de utilidad lineal: $U = b_0 + b_1y_1 + b_2y_2 + \dots + b_ny_n$, la idea básica es hallar los valores numéricos de los parámetros b_k que hacen que con el modelo propuesto, la probabilidad de observar los valores y_k obtenidos en la muestra sea máxima. El proceso de estimación usa la función de verosimilitud $L(b_0, \dots, b_k)$ que es la probabilidad conjunta de haber obtenido la muestra y_1, y_2, \dots, y_n , mediante el producto de las densidades de probabilidad de cada una

de las observaciones y_k . Los parámetros que maximizan $L(b_0, \dots, b_k)$ se obtienen con técnicas de optimización de cálculo diferencial.

Modelo Logit: Es uno de los modelos más usados para elecciones discretas en demanda de transporte. De modo muy resumido, si un viajero debe elegir entre N opciones de viaje, cuyas utilidades sistemáticas son V_1, V_2, \dots, V_N , la probabilidad de que el usuario elija la alternativa "j" es:

$$P(j) = \frac{1}{1 + e^{(V_j - V_2)} + e^{(V_j - V_2)} + e^{(V_j - V_2)} + \dots + e^{(V_j - V_N)}}$$

El modelo Logit tiene algunas variantes. Si sólo hay dos elecciones posibles, se tiene el modelo Logit Binario; si hay más de dos opciones, se tiene el modelo Logit Multinomial; y si hay semejanzas en algunas opciones que puedan "anidarse" en una clasificación común (p. ej. autobús urbano y taxi colectivo como opciones de "transporte público") se tiene un modelo Logit Anidado.

Artículo 2:

Estabilización de suelos: Proceso mediante el cual los suelos naturales se someten a cierta manipulación o tratamiento de modo que se obtenga un material con mejores propiedades.

Base cementada: Una base cementada se llama generalmente al suelo-cemento y consiste de una mezcla de suelo o roca triturada, cemento Pórtland, agua que posteriormente es densificada mediante compactación (Young, 2007).

Fatiga de materiales: es la falla progresiva de un material producida por esfuerzos repetidos que son menores a su resistencia máxima.

PROYECTO EN MARCHA

Investigación de la variabilidad en el corto término de la escala de tiempo, de los cuspates en la playa El Palmar de Ixtapa, Guerrero

En la playa denominada El Palmar, ubicada en Ixtapa, Gro. (ver figura) se ha observado la formación de cuspates, los cuales desde un punto de vista descriptivo dan lugar a la formación de sistemas de corrientes de retorno importantes que originan en ocasiones peligro para los bañistas, así como la pérdida de arena de la parte alta de la playa.

Con objeto de conocer los mecanismos de formación de los cuspates en la citada playa, los cuales forman parte de los procesos costeros que dan origen a los cambios en planta de la misma, el Instituto Mexicano del Transporte está realizando estudios de campo de los diversos factores que de acuerdo con la literatura participan en la formación de los cuspates.

Los estudios realizados a la fecha, contemplan la revisión bibliográfica del estado del arte de la formación de los cuspates, la instalación de dos ológrafos direccionales instalados en la zona exterior de la playa en estudio, un levantamiento topobatómico realizado a lo largo de 2.650 Km. de costa y hasta la profundidad de - 20 m respecto al Nivel de Bajamar Media Inferior (N. B. M. I.), un levantamiento topográfico para medir el espaciamiento de los cuspates, así como la instalación de un sensor de presión para medir las variaciones del nivel del agua en la zona de la citada playa. Estos estudios de campo se pretende realizarlos durante un año (en forma estacional).

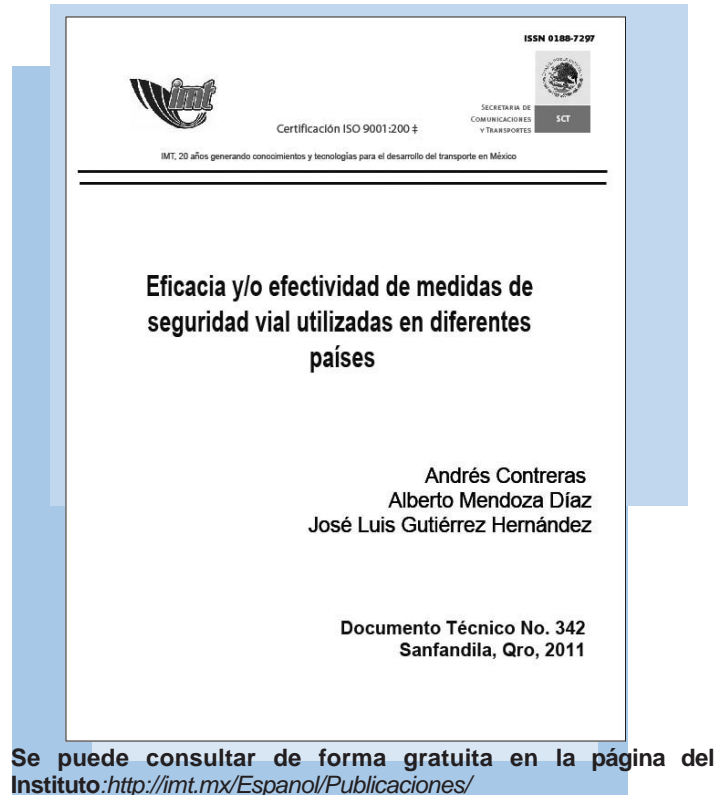
MONTOYA Miguel
mmontoya @imt.mx



PUBLICACIÓN

Eficacia y/o efectividad de medidas de seguridad vial utilizadas en diferentes países

En la **PUBLICACIÓN TÉCNICA 342** se realiza una comparación de las medidas tomadas en otros países para mejorar la seguridad vial y las metodologías utilizadas en su evaluación económica. Se sustenta en un cuestionario distribuido con el apoyo de Asociación Mundial de la Carretera (AIPCR/PIARC). Se comparan las medidas más efectivas para todos los elementos de seguridad vial que actualmente realizan diferentes países. Para hacer más eficiente la asignación de recursos, se propone que las medidas de mejoramiento de la seguridad vial en México se realicen con base en la recopilación y estudio de las acciones que han resultado más eficaces y eficientes en países más avanzados, así como sus metodologías de evaluación. El objetivo de este trabajo es investigar como se utilizan las técnicas de Análisis Costo-Efectividad (ACE) y el Análisis Costo-Beneficio (ACB) en otros países.



EVENTOS ACADÉMICOS

Evaluación de impacto ambiental "medidas de mitigación y monitoreo ambiental en carreteras"

El creciente desarrollo de la infraestructura para el transporte y particularmente de las carreteras en México, ha generado la necesidad de preparar a los profesionales del sector en el conocimiento de la evaluación del impacto ambiental. Por tal motivo, el Instituto Mexicano

del Transporte en coordinación con la Dirección General de Carreteras, ha organizado el Curso Internacional sobre Evaluación de Impacto Ambiental, enfocado a Medidas de Mitigación y Monitoreo Ambiental en Carreteras.

Del 25 al 29 de octubre de 2010, se llevó a cabo dicho Curso Internacional en las instalaciones del Instituto Mexicano del Transporte en Sanfandila, Querétaro. La coordinación de éste estuvo a cargo del M. en C. Juan Fernando Méndez.

El objetivo fue capacitar y concientizar sobre la importancia de la implementación de las medidas de mitigación del impacto ambiental en la construcción de infraestructura carretera, así como el monitoreo ambiental de los diferentes componentes ambientales que son afectados por la operación del transporte carretero y el transporte de materiales peligrosos.

El curso estuvo diseñado para ingenieros y profesionales que planifican y proyectan infraestructura para el transporte carretero, así como para servidores públicos y privados, cuyas funciones estén relacionadas con el control y mitigación del Impacto Ambiental.

Tuvo una duración de 36 horas y una asistencia de 24 participantes, los cuales provinieron de la Dirección General de Carreteras-SCT, de la Dirección General de Conservación de Carreteras-SCT, de los Centros SCT de Nayarit, Michoacán; Chihuahua, Sinaloa y San Luis Potosí.

Alguna de la temática fue:

- Proceso de evaluación del impacto ambiental
- Resolutivo de la autorización ambiental para la construcción del proyecto
- Resolutivo de la autorización ambiental para la construcción del proyecto
- Medidas preventivas, correctivas o compensatorias para cada uno de los componentes ambientales como: paisaje, agua, suelo, residuos, biodiversidad, aire
- Estrategias de mitigación, rehabilitación,

vigilancia y control para cada etapa del proyecto

- Especificaciones y métodos constructivos adecuados de las medidas de mitigación
- Programas específicos para mitigar y rehabilitar impactos por actividades del proyecto
- Identificación de las mejores prácticas de mitigación para cada uno de los aspectos ambientales impactados por la construcción de carreteras
- Panorama internacional
- Identificación de las técnicas ideales para evaluar la efectividad de las medidas de mitigación, costo-beneficio, entre otras.
- Estudio de los métodos y técnicas para el monitoreo de los impactos ambientales en las carreteras en operación, de aspectos tales como: ruido, aire, suelo, agua, etc.
- Legislación sobre el transporte de residuos peligrosos
- Impacto ambiental del transporte de residuos peligrosos
- Estrategias para mitigar el impacto ambiental
- Indicadores ambientales



DIRECTORIO*Ing. Roberto Aguerrebere Salido***Director General**

(55) 55 98 56 10 ext. 2001

roberto.aguerrebere@imt.mx

*Ing. Jorge Armendariz Jiménez***Coordinador de Administración y Finanzas**

(55) 55 98 56 10 ext. 4316

jorge.armendariz@imt.mx

*Ing. Alfonso Mauricio Elizondo Ramírez***Coordinador de Normativa para la Infraestructura del Transporte**

(55) 55 98 56 10 ext. 4314

alfonso.elizondo@imt.mx

*M. en E. Victor Manuel Islas Rivera***Coordinador de Economía de los Transportes y Desarrollo Regional**

(442) 216 97 77 ext. 2018

victor.islas@imt.mx

*Dr. Carlos Daniel Martner Peyrelongue***Coordinador de Integración del Transporte**

(442) 216 97 77 ext. 2059 martner@imt.mx

*Dr. Miguel Martínez Madrid***Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural**

(442) 216 97 77 ext. 2010

miguel.martinez@imt.mx

*Dr. Alberto Mendoza Díaz***Coordinador de Seguridad y Operación del Transporte**

(442) 216 97 77 ext. 2014

alberto.mendoza@imt.mx

*M. en C. Tristán Ruíz Lang***Coordinador de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales**

(442) 216 97 77 ext. 2005

tristan.ruiz@imt.mx

*M. en C. Rodolfo Téllez Gutiérrez***Coordinador de Infraestructura**

(442) 216 97 77 ext. 2016

rodolfo.tellez@imt.mx

*El diseño y elaboración de la presente publicación es realizada y está a cargo de:***M. en D.G. Alejandra Gutiérrez Soria**

(442) 216 97 77 ext. 2056 agutierrez@imt.mx

INFORMACIÓN Y CONTACTOS**CURSOS INTERNACIONALES IMT**

El Instituto Mexicano del Transporte (IMT), a través de su Unidad de Servicios Académicos, hace una cordial invitación a los profesionales interesados en participar en los cursos que ofrece dentro del programa de capacitación IMT; el cual se publica en la página web:

<http://imt.mx/Espanol/Capacitacion/>

PUBLICACIONES, BOLETINES Y NORMAS

En dicha página web pueden consultarse sus publicaciones completas, los boletines externos "NOTAS" anteriores y las nuevas normas técnicas, ingresando a los enlaces siguientes:

<http://imt.mx/Espanol/Publicaciones/>

<http://boletin.imt.mx/>

<http://normas.imt.mx/>

INFORMES:

Tels: (442) 216 97 77, 216 97 44

216 96 57 ext. 2034

Fax: 216 97 77 ext. 3037

Correo: publicaciones@imt.mx

Electrónico: capacitación@imt.mx

Para cualquier comentario o sugerencia con respecto, a esta publicación o ejemplares pasados, nos podrá contactar en: notas@imt.mx

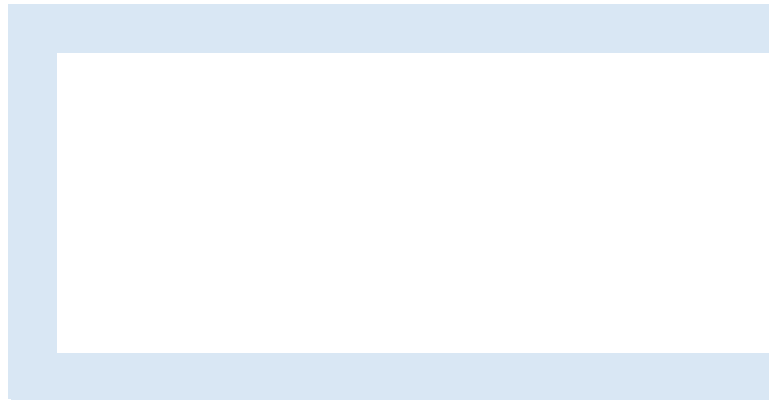
El contenido de los artículos aquí publicados es responsabilidad exclusiva de sus autores; por tanto, no refleja necesariamente el punto de vista del Instituto Mexicano del Transporte.

Se autoriza la reproducción parcial o total de los artículos contenidos en este ejemplar, siempre y cuando sean citados como fuente los nombres de autor (es), título del artículo, número y fecha de este boletín.



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE
APARTADO POSTAL 1098
76000 QUERÉTARO, QRO
MÉXICO

Registro Postal
Cartas
CA22-0005
Autorizado por Sepomex



POR AVIÓN
AIR MAIL