

EL MÉTODO DEL ANÁLISIS DE LA ENVOLVENTE DE DATOS EN LA ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD Y LA EFICIENCIA DE LOS PUERTOS DE CONTENEDORES

Introducción

En 1988, un estudio realizado por la UNCTAD¹ concluyó que la gran mayoría de los estudios que tenían como objetivo determinar la productividad y la eficiencia portuarias dejaban mucho que desear, por lo que hizo un llamado a realizar esfuerzos tendientes a mejorar las técnicas y metodologías empleadas para cumplir con ese objetivo. De esta manera, un buen número de trabajos buscó adaptar metodologías, que habían probado su eficacia en otros entornos productivos, a la compleja industria portuaria, véase González y Trujillo (2005).

Una metodología que se ha venido empleando con éxito en la medición de la productividad y la eficiencia en el transporte, es el método del Análisis de la Envolvente de Datos (DEA por sus siglas en inglés), el cual se basa en técnicas de programación lineal para obtener tanto la eficiencia técnica, como el cambio en la productividad total de los factores. En el presente artículo, tratamos de mostrar tanto las ventajas, como los distintos problemas a los que nos enfrentamos al emplear dicha técnica para medir la productividad y eficiencia de la actividad portuaria.

Conceptos de productividad y eficiencia

En muchas ocasiones los conceptos de productividad y eficiencia se les ha tratado

¹Siglas en inglés de Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo

indistintamente, sin embargo, se debe entender a la productividad como un cociente de lo producido (producto) entre lo empleado para producirlo (insumos), mientras que la eficiencia se refiere a la comparación entre la producción observada y los valores óptimos de la misma. Asimismo, mientras que la productividad mide el desempeño de un proceso de producción de forma integral, la eficiencia es un componente de la productividad.

Para comprender mejor la diferencia entre productividad y eficiencia, consideraremos un proceso de producción en él que sólo se emplea un insumo para elaborar un producto. La relación insumo producto de dicho proceso, puede ser representada gráficamente como se muestra en la Figura 1, donde el punto A, representa la cantidad de insumo X_A ,

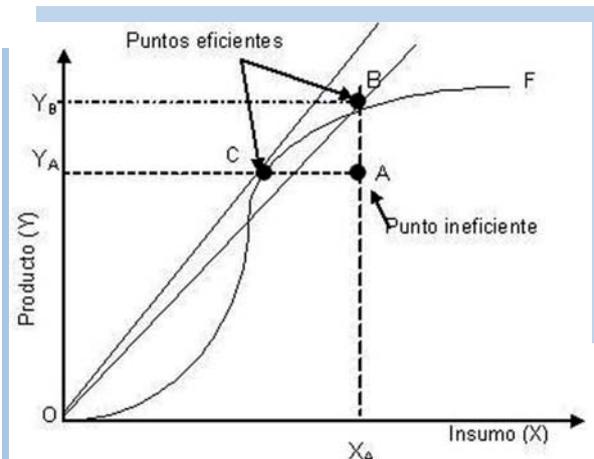
CONTENIDO

EL MÉTODO DEL ANÁLISIS DE LA ENVOLVENTE DE DATOS EN LA ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD Y LA EFICIENCIA DE LOS PUERTOS DE CONTENEDORES	1
PRESIONES INTERNAS PRODUCIDAS POR CORROSIÓN DEL ACERO EN CONCRETO	9
GLOSARIO	16
PROYECTOS EN MARCHA	17
PUBLICACIÓN	18
EVENTOS ACADÉMICOS	18

necesaria necesaria para obtener la cantidad de producto Y_A . De acuerdo con lo señalado en el párrafo anterior, la productividad en el punto A estaría definida por el cociente Y_A/X_A , es decir, por la pendiente de la recta \overline{OA} .

En la misma Figura 1, la curva OF representa la frontera de producción, es decir, es la máxima cantidad de producto que se puede obtener de una determinada cantidad de insumos, dada la tecnología disponible. El hecho de que esa curva represente los valores máximos de la producción indica que será el marco de referencia para cuantificar la eficiencia, es decir, los puntos sobre la curva son eficientes, mientras que los puntos por debajo de dicha curva son ineficientes. Como se puede apreciar, para nuestro ejemplo, el punto A se encuentra produciendo de manera ineficiente, ya que podría reducir el consumo de insumos obteniendo el mismo nivel de producción (punto C), o bien, elevar la producción hasta el punto B, empleando la misma cantidad de insumos. Por lo tanto, se cuenta con dos enfoques para cuantificar la eficiencia: enfoque orientado al producto, cuando se desea obtener la máxima producción dada una cantidad de insumos (punto B), y enfoque orientado al insumo, cuando se desea obtener la mínima cantidad de insumos necesarios para una producción establecida (punto C).

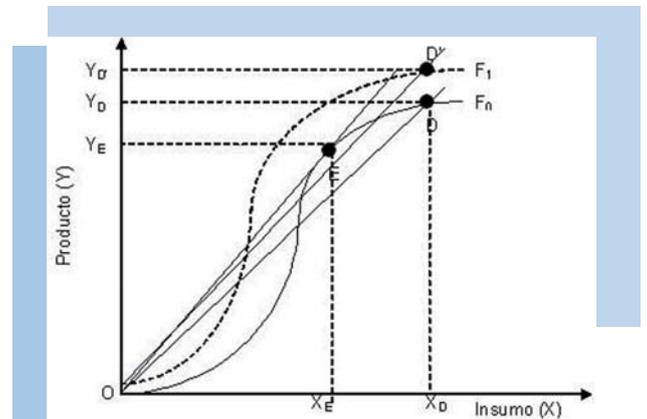
Debido a que la eficiencia, se define en función de la tecnología disponible, la eficiencia recibe



Fuente: Coelli et al 1998

Figura 1

el nombre de eficiencia técnica. Es necesario destacar que un incremento en la eficiencia, conlleva a un incremento en la productividad, pues como se observa en la figura 1, las pendientes en los puntos eficientes B y C, son mayores que la pendiente en el punto A.



Fuente: Coelli et al 1998

Figura 2

Asimismo, existen otros dos factores que aumentan la productividad, estos son; el producir bajo una escala adecuada (eficiencia de escala), así como la introducción de nuevas tecnologías (cambio tecnológico). Estos dos conceptos se comprenden al analizar la figura 2, en la que se muestra como a pesar de que los puntos D y E se encuentran dentro de la frontera de producción, la productividad en E es mayor. Esto es, reducir la escala de producción de XD a XE, permite obtener una mayor producción por unidad de insumo. Por otro lado, debido a que la tecnología no permanece constante, un cambio o innovación en la tecnología disponible originará un desplazamiento de la frontera de producción, representado por la curva 0-F1, en la figura 2, en donde se aprecia como el punto D aumento su productividad al pasar al punto D'.

El método del Análisis de la envolvente de datos en la estimación de la eficiencia técnica y el cambio en la productividad

Eficiencia Técnica

Como se mencionó, las medidas de eficiencia nos indican la diferencia entre lo que se

produce, y lo que se puede de producir, es decir, para saber si se está produciendo de manera eficiente, debe existir un marco de comparación. Para ello, Farell (1957), propuso que dicha comparación debe estar en función de la mejor marca o bench marking observada entre un conjunto de empresas a las que se desee equiparar.

Farell definió la eficiencia técnica como la distancia existente entre la mejor marca y la marca real de la empresa ó DMU², que se desea comparar. Por tanto, para conocer la eficiencia técnica es importante determinar la frontera de producción definida en el punto anterior. Así, en los últimos años se han desarrollado dos enfoques principales para determinar esta frontera y medir la eficiencia: paramétrico y no paramétrico. El enfoque paramétrico consiste en determinar a través de técnicas econométricas una función frontera utilizando una representación paramétrica de la tecnología junto con un término de error compuesto, mientras que el no paramétrico, se resuelve mediante técnicas de programación lineal, calculando la frontera directamente de los datos, sin imponer restricciones a priori a la función frontera.

En este artículo se analiza el enfoque no paramétrico a través del método de la envolvente de datos o DEA (Data Envelopment Analysis), desarrollado por Charnes, Cooper y Rhodes en 1978, el cual es un método de programación lineal, en el que la función de producción está definida por el máximo nivel de producción alcanzable, con una cierta combinación de insumos (Bonilla et al 1997).

La formulación matemática, parte del hecho de que para cada empresa analizada podemos obtener la relación de los productos (y_i) entre la cantidad de insumos (x_i) $\frac{u'y_i}{v'y_i}$, donde u' y

² En la literatura existente es común que a las entidades comparables se les denomine DMU, o Decision Making Units.

v' son vectores ponderadores de los productos e insumos respectivamente. La obtención del valor óptimo de esos ponderadores se obtiene al resolver el siguiente problema de programación lineal (Coelli et al 1998):

$$\max_{u,v} \left(\frac{u'y_i}{v'y_i} \right)$$

sujeto a:

$$\frac{u'y_j}{v'y_j} \leq 1, j= 1,2,K, N,$$

$$u,v \geq 0$$

Al resolver este problema, se encuentran los valores de u y v , tales que la eficiencia de la i -ésima DMU, sean maximizados, sujetos a las restricciones de que todas las medidas de eficiencia deben ser menores o iguales a uno. Un problema detectado en este planteamiento, es que tiene un infinito número de soluciones, para evitar eso se puede imponer la restricción $v'x_i=1$, quedando:

$$\max_{\mu,v} (\mu'y_i),$$

sujeto a:

$$v'X_i = 1,$$

$$\mu'y_j - v'X_j \leq 0, j= 1,2,K, N,$$

$$\mu,v \geq 0$$

Ahora disponemos de un problema de optimización lineal estándar, de $N + 1$ restricciones lineales y $n + m$ restricciones de no negatividad. Recurriendo al problema dual asociado se puede formular:

$$\min_{\theta, \lambda} \theta,$$

sujeto a:

$$\min_{\theta, \lambda} \theta,$$

$$-y_i + Y\lambda \geq 0,$$

$$\theta X_i - X\lambda \geq 0,$$

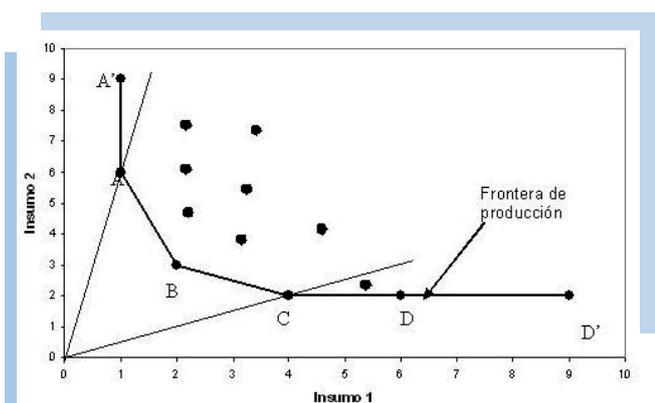
$$\lambda \geq 0$$

Donde θ es un escalar y $\lambda \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ un vector de constantes $X \in \mathbb{R}^{n \times N}$ es la matriz de insumos con tantas filas como insumos y tantas columnas como DMU e $Y \in \mathbb{R}^{m \times N}$, la matriz de productos con filas como productos y columnas como DMU haya. En este caso habrá $n + m$ restricciones lineales y N de no negatividad, es decir un número menor de restricciones que en la

representación primal. Este problema nos permite determinar las DMU a partir de las cuales se construirá la empresa “virtual” con la que se compara al resto de las DMU. Para conocer las unidades “eficientes” asociadas a las demás se debe resolver un problema similar; por esta razón el ejercicio debe repetirse N veces (una vez para cada DMU).

Cabe hacer mención que un resultado igual a 1, indica que esa DMU es técnicamente eficiente, mientras que los resultados menores a 1, nos indican el porcentaje respecto a la DMU eficiente al que se está operando.

La representación gráfica del método es presentada en la Figura 3, la cual nos muestra un conjunto de DMU, que emplean 2 insumos para producir la misma cantidad de producto. Como puede apreciarse, en los puntos A, B y C se encuentran las mínimas combinaciones de insumos necesarias para obtener la producción indicada. La frontera de producción se genera a partir de estos puntos uniéndolos y prolongando la frontera tanto vertical como horizontalmente, quedando la superficie A'ABCDD'. A partir de esa frontera se debe medir la distancia que existe entre ella y el resto de los puntos, obteniendo así la eficiencia técnica.



Fuente: Fried et al 2008

Figura 3
Método DEA

El cambio en la productividad total de los factores (FPT)

Además de obtener la Eficiencia Técnica, el método DEA permite, mediante la incorporación del Índice de Malmquist obtener el cambio en la productividad total de los factores (FPT). El concepto de productividad total se refiere, como su nombre lo indica, a una medida que relacione a todos los productos entre la totalidad de los insumos empleados en su elaboración.

Matemáticamente, lo anterior equivale a aplicar las sumatorias correspondientes en el cociente de productividad, con lo cual se obtiene la siguiente expresión:

$$FPT = \frac{\sum_{m=1}^M u'_m y_m}{\sum_{k=1}^K v'_k x_k}$$

donde FPT es la Productividad Total de los Factores para M productos que emplean K insumos, u' y v' son ponderadores, pues no todos los insumos o productos deben tener la misma importancia.

El FPT, puede ser representado en razón del cambio que éste ha sufrido durante un periodo analizado. Para aclarar lo anterior, se debe suponer nuevamente una empresa que produce un producto empleando para ello un insumo. La expresión que nos permite conocer el cambio que existió en la productividad del periodo inicial (t) a un periodo final (t+1) es:

$$\frac{y_{t+1} / x_{t+1}}{y_t / x_t} \tag{1}$$

La expresión (1), puede generalizarse a procesos productivos que empleen más de un insumo, para obtener más de un producto, si se recurre al Índice de Malmquist. Este Índice emplea las funciones de distancia introducidas

por Shephard (1953), para determinar la distancia que separa a las entidades comparadas, de las más eficientes.

El Índice de productividad de Malmquist es representado por la siguiente expresión:

$$M_{oc}^t(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \frac{D_{oc}^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_{oc}^t(x^t, y^t)} \quad (2)$$

En donde $M_{oc}^t(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1})$ compara (x^{t+1}, y^{t+1}) es decir, la combinación insumo producto en el periodo t+1, con (x^t, y^t) combinación de insumo producto en el periodo t, obteniendo las distancias que las separa de la mejor marca posible, respecto a la tecnología en el periodo t, es decir, T_c^t . De esta manera, un valor mayor a uno en la expresión (2) indicaría que se incrementó el valor del FPT, caso contrario ocurre en valores menores a la unidad.

De manera análoga, se puede obtener la relación correspondiente considerando ahora, como base la tecnología en el periodo t+1, es decir, T_c^{t+1} , obteniendo la expresión:

$$M_{oc}^{t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \frac{D_{oc}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_{oc}^{t+1}(x^t, y^t)} \quad (3)$$

Así, las expresiones (2) y (3), consideran que la tecnología permanece fija ya sea en el periodo t ó en el t+1. Caves et al (1982), propusieron que los cambios en la tecnología pueden determinarse sí se obtiene la media geométrica de las expresiones anteriores, de esta manera se obtiene el Índice de Malmquist como:

$$M_{oc}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) =$$

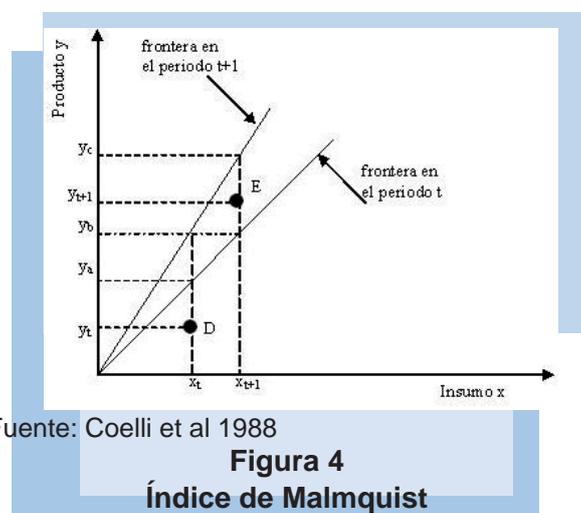
$$\left[\frac{D_{oc}^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_{oc}^t(x^t, y^t)} \times \frac{D_{oc}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_{oc}^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

La representación gráfica del Índice de Malmquist, es posible al emplear de nuevo el ejemplo de la producción de un producto, con el empleo de un insumo. En la figura 4

se muestran las “distancias” que deberán obtenerse para medir el cambio que existió entre la productividad del punto E (t+1) al D (t), considerando como fronteras las tecnologías de ambos periodos.

Por lo tanto, el cambio en la eficiencia técnica y el cambio tecnológico estaría determinado por las siguientes expresiones:

Cambio en la eficiencia técnica: $\frac{y_{t+1}/y_c}{y_t/y_a}$
 Cambio tecnológico: $\left[\frac{y_{t+1}/y_b}{y_{t+1}/y_c} \times \frac{y_t/y_a}{y_t/y_b} \right]^{1/2}$



De esta manera, de acuerdo con Coelli et al (1998), una manera equivalente de escribir la ecuación (4) es:

$$M_{oc}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \frac{D_{oc}^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_{oc}^t(x^t, y^t)} \left[\frac{D_{oc}^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_{oc}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \times \frac{D_{oc}^t(x^t, y^t)}{D_{oc}^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2} \quad (5)$$

En la ecuación (5), el cociente fuera de los corchetes mide el cambio en la eficiencia técnica, mientras que lo que se encuentra dentro de los corchetes mide el cambio tecnológico. Además, como lo señalan Coelli et al (1988), es posible descomponer el cambio en la eficiencia técnica en cambio en la eficiencia de la escala de producción y cambio “puro” en la eficiencia técnica.

Cabe hacer notar que los valores de productividad obtenidos, están calculados en referencia a dos periodos, es por ello que se le denomina “cambio” en la productividad. De esta manera, los índices obtenidos no reflejan cuáles entidades comparadas resultaron más productivas, sino cuáles de ellas obtuvieron más avances en sus índices de productividad.

Estimación de la productividad y eficiencia portuaria empleando el método DEA

La productividad portuaria, más que ningún otro tipo de productividad en el transporte, es obtenida con el empleo de indicadores parciales. Es decir, las Autoridades Portuarias, generalmente miden su rendimiento relacionando al tonelaje manejado con el número de grúas, o bien a los buques atendidos por unidad de tiempo, etc. Este tipo de indicadores son de gran ayuda cuando se trata de determinar la productividad en un área específica del puerto, sin embargo carecen de utilidad si lo que se pretende es valorar todo el proceso productivo ya sea para todo el puerto o para una terminal en particular.

Así, con el propósito de representar en un indicador la productividad y la eficiencia portuarias, surgieron, al iniciarse la década de 1990, diversos estudios que emplearon el método DEA. La mayoría de estos estudios han estado enfocados a las terminales de contenedores. Algunos de los más significativos son el de Roll et al (1993), Poitras, Tongzon y Li (1996), Cullinane (2004) y Herrera y Pang (2004).

El estudio del cambio en la productividad total de los factores aplicado a puertos es más reciente. Uno de los estudios involucra a puertos mexicanos, véase Estache et al (2004), el cual analiza el efecto de la introducción de capital privado en la productividad de las Administraciones Portuarias Integrales (APIs).

El método DEA, está planteado para representar los elementos que integran el proceso productivo, es decir, es necesario contar con al menos un producto, así como insumos que representen tierra, trabajo y capital. Para el caso analizado, la mayoría de los trabajos coincide en que la producción portuaria, queda representada por la cantidad de contenedores movilizada por el puerto como producto, y la infraestructura y equipo portuario como los insumos requeridos.

En los siguientes apartados se realizará un análisis de los insumos y productos frecuentemente empleados, obteniendo las consideraciones bajo las cuales deben obtenerse las conclusiones sobre la productividad y eficiencia obtenidas con la metodología.

Datos empleados en el modelo DEA

Para seleccionar el producto, lo primero que hay que tener en cuenta es el punto de vista bajo el cual se quiere realizar el análisis. Un puerto presta servicios tanto a las embarcaciones como a la carga. En este sentido, si se desea obtener la productividad del puerto referente a las navieras, el producto que debe considerarse es el número de buques atendidos, mientras que si se antepone el punto de vista de los operadores o administraciones portuarias, el producto debe ser la mercancía movilizada.

Ahora bien, como se mencionó anteriormente, para seleccionar los insumos es necesario tener en cuenta que estos deben representar a los tres insumos básicos que se emplean en el proceso de producción, es decir, tierra, trabajo y capital. La dificultad de disponer información acerca de la cantidad de trabajadores dentro del puerto origina que este insumo sea representado por el equipo portuario, pues como lo mencionan Herrera y Pang (2005), existe una estrecha relación entre la cantidad de equipo y el número de trabajadores. En cuanto a los insumos tierra y capital, estos son comúnmente representados

por la infraestructura de que dispone el puerto, como longitudes de atraque, superficies de almacenamiento, etc.

Una de las ventajas que ofrece el método DEA es que no requiere que se le defina la función de producción, sino que ésta es generada a partir de los datos recabados. Por consiguiente, es muy importante que se consideren “todos” los insumos que se emplean en la producción. Para el caso portuario, esto representa un inconveniente, ya que no todos los puertos operan empleando el mismo equipo, y para efectos del modelo, no es posible incluir datos que contengan cero unidades. Por lo que es necesario restringir el equipo al que es común en todos los puertos.

Referente al equipo, existen un par de inconvenientes más, el primero de ellos tiene que ver con la disposición de la información, pues debido a que ésta no se encuentra suficientemente desagregada, no es posible distinguir si el equipo es empleado o no en la Terminal en cuestión. El segundo inconveniente es que la metodología no permite diferenciar las capacidades de los equipos, por lo que éstas se tienen que homologar originando desviaciones de la realidad observada.

El principal inconveniente del empleo de la infraestructura como insumo se encuentra asociado con la calidad de la información, pues no se cuenta con datos estadísticos disponibles en todos los puertos que proporcionen las cantidades de infraestructura por terminal.

Características de los datos de salida (resultados)

El hecho de que el DEA este basado en técnicas de programación lineal facilita la solución de las ecuaciones mediante algoritmos matemáticos. En la actualidad existe una buena cantidad de programas computacionales que dan solución a la metodología, muchos de ellos son gratuitos. Además los resultados obtenidos se pueden representar mediante distintos

gráficos, lo que facilita su comprensión.

El método permite identificar los insumos que más inciden en las ineficiencias, a partir de ello se pueden crear distintos escenarios que nos indiquen las cantidades de consumo de insumos o aumento de producción que deben tener los puertos para alcanzar estándares de eficiencia o para mejorar sus marcas respecto a las de los puertos competidores.

Algunas consideraciones que deben tenerse en cuenta al interpretar los resultados de la metodología descrita son:

a) **Respecto al marco comparativo.** Debido a que el método DEA está basado en el concepto de mejor marca, la eficiencia y productividad obtenidas, corresponden sólo a la muestra analizada. Es decir que los resultados dependen de los puertos que estemos comparando.

b) **Respecto al nivel de servicio.** Un puerto podría estar aumentando su eficiencia y productividad, y simultáneamente, estar ofreciendo realmente un mal servicio. Por ejemplo, si se disminuye la cantidad de grúas para atender el mismo volumen de contenedores, esto aumentará la productividad del puerto, pero puede ocurrir que el tiempo de atención a las embarcaciones se incremente al tener que esperar que haya equipo disponible. El modelo no permite distinguir entre una buena y una mala operación.

c) **Respecto al uso de la infraestructura como insumo.** Las inversiones requeridas para la construcción o ampliación de la infraestructura portuaria son elevadas, y por lo tanto estas obras deben planearse con periodos de vida útil realistas y visión de mediano y largo plazo. Por lo anterior, existen dos factores que hay que considerar. El primero de ellos es que cuando se realizan obras de ampliación, generalmente, los puertos presentan incrementos importantes en su infraestructura, lo anterior es interpretado por

la técnica como una disminución importante de la eficiencia, sin que esto sea necesariamente cierto. El otro problema ocurre, si disminuye la cantidad de carga manejada por el puerto, ya que este factor puede ocurrir por situaciones ajenas al puerto como tendencias del mercado o crisis económicas. Sin embargo dado que el puerto no puede disminuir su “consumo” de infraestructura, esto es interpretado como una baja en la productividad.

d) **Respecto a los datos estadísticos.** Los resultados del análisis pueden verse afectados en caso de que los datos estadísticos contengan errores. Contar con una base estadística confiable resulta crucial en la obtención de resultados más confiables.

Conclusiones

El método DEA ofrece la ventaja de integrar dentro de un sólo indicador todos los insumos y productos para obtener tanto la eficiencia técnica, como el cambio en la productividad total de los factores. Sin embargo, para su correcta aplicación al sector portuario, requiere de una fuente completa y desagregada de información estadística.

Aun cuando el método requiere de adecuaciones y complementos para tener una correcta interpretación de resultados, el índice obtenido es útil para comparar la productividad y eficiencia entre puertos.

Referencias

Bonilla, M., Medal, A., Casasús, T. y Sala, R. (1997): “Un análisis de la eficiencia de los puertos españoles”, Trabajo realizado dentro del Convenio de Colaboración con la Autoridad Portuaria de Valencia

Coelli, T., Prasada Rao, D.S. y Battese, G.E. (1998): “An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis”, Kluwer Academic Publisher, USA

Cullinane, K., Song, D.W., Ji, P. and Wang, T.F. (2004): “An Application of DEA Windows

Analysis to Container Port Production Efficiency, *Review of Network Economics*, 3, 2, 184-206.

Estache, A., González, M. y Trujillo, L. (2002): “Efficiency Gains from Port Reform and the Potential for Yardstick Competition: lessons from México”, *World Development*, 30 (4), 545-560.

Estache, A., Tovar de la Fé, B., Trujillo, L. (2004): “Sources of efficiency gains in port reform: a DEA decomposition of a Malmquist TFP index for Mexico”, *Utilities Policy*, 12(2004), 221-230

Farell, M.J. (1957): “The Measurement of Productive Efficiency” *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)* Vol. 120, No 3 (1957).

Fried, H.O., Lovell, C.A., Schmidt, S.S., (2008), “The Measurement of Productive Efficiency and Productivity Growth”, Oxford University Press.

González, M.M., Trujillo, L. (2005): “La medición de la eficiencia en el sistema portuario: Revisión de la evidencia empírica”, Documento técnico 2005/06 Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España.

Herrera, S., Pang, G. (2004): “Efficiency of Infrastructure: The case of container ports” World Bank H54, D24.

Liu, B.L., Liu, W.L., Cheng, C.P. (2006): “Efficiency Analysis of Containers Terminals in China: An Application of DEA Approach” Nankai University.

UNCTAD (1988): “Medición y evaluación del rendimiento y de la productividad de los puertos” Serie de monografías preparadas por la UNCTAD en colaboración con la Asociación Internacional de Puertos (API).

GUERRERO Alejandro
aguerrero@imt.mx
RIVERA César
crivera@imt.mx

PRESIONES INTERNAS PRODUCIDAS POR CORROSIÓN DEL ACERO EN CONCRETO

Introducción

Las estructuras de concreto son consideradas como estructuras permanentes y con un bajo coste de mantenimiento. Esto es cierto en algunos ambientes, con la selección apropiada de materiales y métodos de construcción cuidadosamente ejecutados. Sin embargo, desde hace algunas décadas, la agrietamiento y el descascamiento del recubrimiento asociado a la corrosión del acero de refuerzo a generado muchos problemas a nivel mundial.

El acero de refuerzo está protegido de la corrosión por una capa pasiva de productos de hidratación del cemento con un ambiente altamente alcalino. Sin embargo, en ambiente marino los iones cloruro del agua de mar se acumulan en la superficie de concreto y migran lentamente a través del recubrimiento de concreto hasta llegar a la superficie del refuerzo. Cuando la concentración de iones cloruro en la superficie del acero de refuerzo alcanza el valor crítico, la capa pasiva protectora del acero se rompe y comienza el proceso de corrosión activo.

La generación de la grieta se suele producir en tres etapas: 1) Periodo de iniciación de la agrietamiento, durante el que las grietas se desarrollan hasta alcanzar la superficie del concreto, 2) Periodo de propagación de la agrietamiento, durante el que crece el ancho de grieta, pudiendo producirse el desprendimiento del recubrimiento del concreto y 3) esta propagación puede progresar coalesciendo con otras grietas para dar lugar al desprendimiento de trozos enteros del recubrimiento.

La transformación del acero de refuerzo del concreto en productos de corrosión está

parcialmente comprendida. Las técnicas analíticas no se pueden emplear in situ para determinar el tipo de productos de corrosión generados en la superficie del refuerzo embebido dado que el acero no está expuesto al exterior. Pero, los productos de corrosión pueden oxidar la barra hasta exponerla al ambiente. Aunque hay discrepancias sobre el tipo de productos de corrosión formados en la interfaz concreto/acero [1-5], se establece que la densidad de dichos productos es inferior a la del acero [6], resultando un volumen de expansión que grieta el recubrimiento de concreto.

El proceso mecánico de la expansión del refuerzo por corrosión se muestra en la Figura 1. El acero de refuerzo se considera como un cilindro con un radio inicial r_0 , embebido en un medio de concreto semi-infinito con un recubrimiento C , y una longitud de corrosión L (llamada región anódica). Cuando la corrosión progresa, el radio del acero disminuye en una cantidad x (penetración de la corrosión). Sin embargo, los productos de corrosión (que tienden a permanecer en la superficie del acero) ocupan un volumen mayor al del acero original. Esto da lugar a un aumento del volumen Δr_{eff} , sobre el radio de acero inicial, con un valor total de $r_0 + \Delta r_{\text{eff}}$. El concreto que rodea el acero es presionado por una expansión radial efectiva, resultando un rompimiento del recubrimiento y su agrietamiento.

En la literatura [7-15] se encuentran investigaciones teóricas, experimentales y observaciones in situ del agrietamiento del recubrimiento de concreto debida a la expansión de los productos de corrosión. Sin embargo, los aspectos fundamentales del mecanismo de agrietamiento del recubrimiento

de concreto, esenciales para el pronóstico de la durabilidad, son inciertos.

asumiendo una interfaz concreto/acero con una adherencia perfecta. También, se han realizado trabajos con modelos numéricos empleando el método de elementos finitos y analizando el agrietamiento con el modelo de grieta difusa, asumiendo un reblandecimiento lineal del concreto [20], una fractura elástico lineal y una malla móvil colocada alrededor de la zona de agrietamiento para obtener la concentración del esfuerzo local [22,23] y con elementos de contacto [24]. Otros autores desarrollan modelos basados en la penetración de ataque por corrosión crítica para iniciar el agrietamiento y su relación con el radio del acero de refuerzo [25], en la reducción de la sección de acero por corrosión y su relación con el cociente recubrimiento/diámetro y las características del concreto [26-28]. Las investigaciones previas, cálculos y simulaciones del inicio del agrietamiento se comparan con diferentes técnicas experimentales y se concluye que el inicio del agrietamiento depende principalmente de la calidad del concreto, sus características, y relación recubrimiento/diámetro.

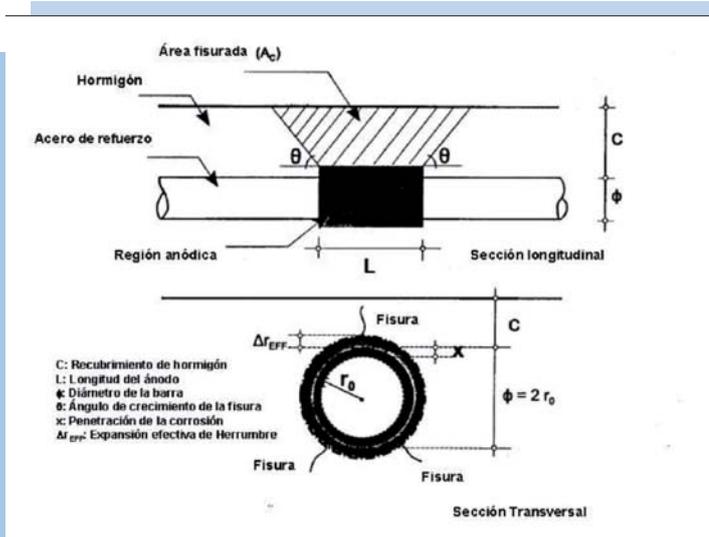


Figura 1
Parámetros implicados en el proceso de corrosión

Como se ha explicado [15-17], la corrosión del refuerzo induce esfuerzos internos que grietan el concreto. Sin embargo, la magnitud de los esfuerzos y la descripción cuantitativa de su desarrollo son poco conocidas, por lo que la información adicional sobre la relación entre la expansión de los productos de corrosión y la presión interna es deseable para hacer modelos de predicción.

Existen varios trabajos previos que han analizado la relación entre la abertura de grietas y la cantidad de óxidos generados por la corrosión, expresada como penetración de la corrosión o pérdida de diámetro de las barras mediante ensayos acelerados y no acelerados. Algunos modelos analizan el tiempo necesario para generar el agrietamiento en función del recubrimiento de concreto, de las características del concreto y los productos de corrosión y la acumulación del producto de corrosión [18,19]. Otros modelos asumen una acumulación constante de productos de corrosión [20,21], mientras que otros modelos encontrados en la bibliografía [10,20] obtienen un límite superior y otro inferior

Este trabajo se centra en obtener información que contribuya a confirmar un modelo predictivo de la presión ejercida por los productos de corrosión necesaria para grietar el concreto tomando en cuenta las dimensiones estructurales y las propiedades de fractura del concreto [15,17]. Para ello, el efecto de la penetración de la corrosión fue investigado de forma experimental con dos secciones de especímenes (cilíndrica y prismática) de concreto reforzado con la misma relación recubrimiento-diámetro y velocidad de corrosión, y varias longitudes de corrosión. El proceso de corrosión se aceleró mediante la aplicación de una corriente impresa (anódica) a través del acero de refuerzo para reducir el tiempo del ensayo. En la superficie de la barra de acero se colocaron galgas extensométricas para medir la deformación causada por la corrosión de acero en la interfaz concreto/acero y con estos datos estimar la presión

en la interfaz concreto/acero. Estas medidas, junto con la estimación de la expansión radial efectiva de los productos de corrosión permitieron evaluar el trabajo de la expansión durante el ensayo. Posteriormente, la cantidad de corrosión generada se comparó con la necesaria para iniciar el agrietamiento según las propiedades mecánicas del concreto.

Método experimental

Para las mezclas de concreto se empleó cemento portland tipo II con las proporciones de mezcla por metro cúbico de concreto mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1
Dosificaciones de mezclas de concreto

	Cilindro	Prisma 1	Prismas GM
Cemento	320	300	327
Grava	650	1143.8	958
Arena	1240	820.4	1000
Agua	200	195	165

El acero empleado fue BS-500 de 16 mm de diámetro. En las barras de la probeta cilíndrica y prismas GM se colocaron cuatro galgas extensométricas para medir la presión en la interfaz concreto/acero. Las dimensiones de las probetas se muestran en las Figuras 2 y 3.

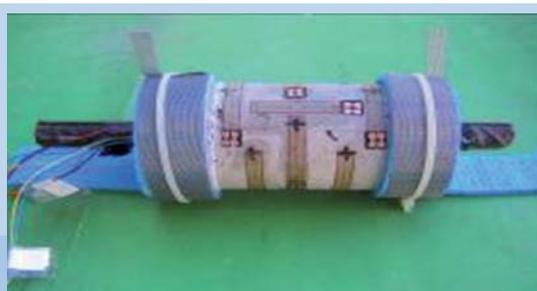


Figura 2
Probeta cilíndrica

Las probetas se curaron durante 24 horas en los moldes y 28 días en cámara de curado con un 95% de humedad relativa y una temperatura de 20° C. Después de los 28 días de curado, las probetas se secaron por algunos días para



Figura 3
Probetas prisma 1 y prismas GM

poder colocar las galgas extensométricas en el concreto, para determinar el momento del inicio del agrietamiento en la superficie del concreto de las probetas. Dichas galgas se colocaron como se muestra en las Figuras 2 y 3.

Aceleración de la corrosión y ensayo de agrietamiento

La longitud de corrosión para la probeta cilíndrica fue de 90 mm y para las probetas prisma 1 y prismas GM fueron de 230 mm. Para activar el proceso de corrosión se agregó un 3% en peso de NaCl en la mezcla de concreto, y se aplicó una corriente eléctrica (galvanostática) a través de las barras de acero para acelerar el proceso de corrosión.

El procedimiento de aceleración de la corrosión empleado para las probetas consistió en un galvanostato con el que se aplicó una densidad de corriente nominal constante a través de los contraelectrodos colocados en los extremos de las probetas (Figuras 2 y 3). El contacto eléctrico se obtuvo colocando esponjas húmedas entre el contraelectrodo y la superficie del concreto.

Se aplicaron dos densidades de corrientes. Hasta la aparición de la primera grieta, se empleó una densidad de corriente de 1, 5 y 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y después de la aparición de la primera grieta, la densidad de corriente aplicada fue de 10, 50 y 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para seguir la evolución del agrietamiento.

El ensayo se consideró finalizado cuando se alcanzó un ancho de grieta considerable. Después, se desconectaron las probetas del sistema de aceleración de la corrosión y se rompieron para limpiar las barras del producto de corrosión. Se estudió el tipo de óxidos, su color y las zonas de concreto alcanzadas por los productos. Después, se limpiaron las barras, se secaron y pesaron para obtener la diferencia de peso entre las barras antes y después de corroerlas.

La conversión de velocidad de corrosión en pérdida de radio se realizó mediante la siguiente ecuación, basada en la ley de Faraday [20]:

$$x = 0.0116 I_{corr} t \quad \text{Ec. 1}$$

donde x es la penetración de ataque en micras, I_{corr} es la intensidad de corriente en μA/cm², t es el tiempo transcurrido en días desde el inicio de la aplicación de la corriente, y 0.0116 es un factor de conversión de μA/cm² a μm/año para el caso de corrosión sea homogénea.

En principio, la pérdida de radio se calcula para cada corriente aplicada según la ley de Faraday. Así, se asume que toda la corriente aplicada se emplea en el proceso de corrosión y que se ha registrado una eficiencia del 100%. La pérdida de radio calculada en este trabajo se llamó pérdida “teórica”. Sin embargo, la eficiencia del 100% no se produjo y la pérdida de radio “real” en todos los casos fue mayor a la pérdida “teórica”. Hecho que se verificó comparando la pérdida teórica y la pérdida gravimétrica al final de experimento.

Resultados y discusión

Una vez observado el comportamiento de las galgas colocadas en el interior y en la superficie de las probetas se determinó tomar dos periodos de medición: el primero, cuando la primera de las galgas GM de cada probeta mostrara un aumento considerable en la

medida de la deformación, indicando el inicio de la agrietamiento en la interfaz concreto/acero y, el segundo, cuando la primera de las galgas G colocadas en la superficie del concreto de la probeta tuviera el mismo comportamiento que la galga GM de la misma probeta, como se muestra en la Figura 4. Para obtener los valores de presión en la interfaz concreto/acero se tomaron en cuenta los datos obtenidos de las galgas mencionadas anteriormente. Así mismo, tomando las ecuaciones 2 y 3 propuestas por [25] y [36], donde: f_t es la resistencia a la tensión del concreto (C1=3.04 MPa, P1=3.80 MPa y P2, P3 y P4= 3.85 MPa), C/Φ es la relación recubrimiento/ diámetro, C/L es la relación recubrimiento longitud de corrosión, R1 y R2 son el radio interior (de la barra) y exterior (de la probeta de concreto), Φ la deformación unitaria medida por las galgas adheridas al concreto, E el módulo de elasticidad del concreto y x es la penetración del ataque, se pudo estimar el factor P_{max}/f_t para cada probeta, como se muestra en la Tabla 2.

$$\frac{P_{max}}{f_t} = 1.54 \frac{C}{\Phi} \left(\frac{C}{L} + 1 \right)^{0.72} \quad \text{Ec. 2}$$

$$P = \frac{E (R_2^2 - R_1^2) \epsilon}{R_2^2 2} \quad \text{Ec. 3}$$

Tabla 2
Valores de P_{max} y factor P_{max}/f_t para las galgas GM del periodo 1 y G del periodo 2

Probeta	Periodo	Galga	P _f (MPa)	P _{max} /f _t
C1	1	GM1	11.12	3.7
	2	G3	11.54	3.8
P1	2	G18	8.02	2.1
	1	GM4	8.17	2.1
P2	2	G9	13.66	3.5
	1	GM2	8.19	2.1
P3	2	G1	29.86	7.8
	1	GM1	8.12	2.1
P4	2	G14	79.95	20.8

Podemos observar que los datos obtenidos en este trabajo se mantienen en la tendencia

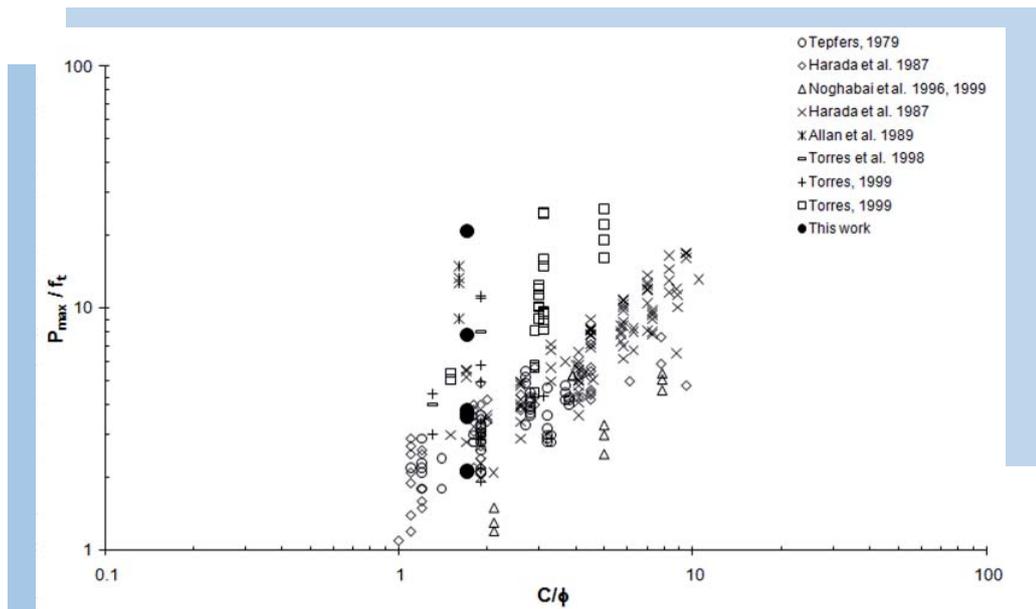


Figura 4
Comparación de resultados de P_{max}/f_t versus C/ϕ obtenidos en este trabajo y por otros autores

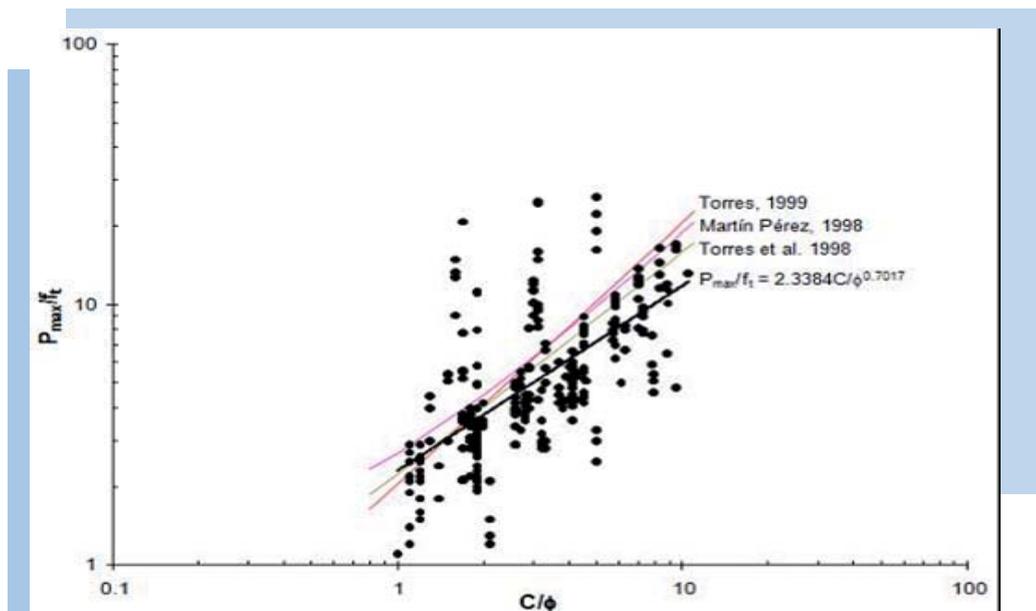


Figura 5
Comparación de los modelos encontrados en la bibliografía y el propuesto en este trabajo con los datos de P_{max}/f_t versus C/ϕ obtenidos en este trabajo y por otros autores

de los datos obtenidos por otros autores. El resultado de la galga G1 de la probeta P3 está ligeramente por encima de la tendencia, mientras que el resultado de la galga G14 de la probeta P4 se sale por encima de la tendencia general de los datos de otros autores.

En la revisión bibliográfica realizada, se encontraron diferentes modelos propuestos para estimar la presión de los productos de corrosión necesaria para iniciar el agrietamiento, encontrando los modelos de

[17], [21] y [25] como los más representativos. En la Figura 5 se muestra una comparación de los modelos encontrados en la bibliografía y los datos de la Figura 4, así como la regresión lineal obtenida de los datos mostrados y la comparación de la regresión lineal obtenido con respecto a los modelos encontrados en la bibliografía.

Podemos observar que cualquier modelo empleado para estimar el parámetro P_{\max}/ft empleando la relación C/Φ nos da una aproximación aceptable y no es posible decantarse por algún modelo en particular. Sin embargo, la ecuación 4 es una alternativa más para estimar dicho parámetro. De la regresión lineal exponencial realizada a los datos de la Figura 53 se obtuvo un modelo alternativo para estimar el parámetro P_{\max}/ft empleando la relación C/Φ y que resulta en la ecuación 4.

$$\frac{P_{\max}}{ft} = 2.3384 \left(\frac{C}{\Phi} \right)^{0.7017} \quad \text{Ec. 4}$$

Conclusiones

Se ha aportado un modelo sencillo en el que sólo es necesario conocer la relación C/Φ y la resistencia a tracción del concreto para estimar la presión ejercida por los productos de corrosión necesaria para iniciar el agrietamiento.

$$\frac{P_{\max}}{ft} = 2.3384 \left(\frac{C}{\Phi} \right)^{0.7017}$$

Referencias

- [1] Bedu, P.: "Volumetric changes of cement paste under exposure to the simulated corrosion products of steel and their influence on cracking susceptibility". M. Sc. Eng. Thesis, Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida, 1993.
- [2] Fontana, M. G., New York, New York, USA: McGraw-Hill, "Corrosion engineering," 3rd ed., pp. 556, 1986.
- [3] Sagoe-Crentsil, K. K. y Glasser, F. O.: "Steel in concrete: Part I. A review of the electrochemical and thermodynamic aspects". Magazine of Concrete Research, 41, 149, pp. 205-212, 1989.
- [4] Sagoe-Crentsil, K. K. y Glasser, F. O.: "Steel in concrete: Part II. Electron microscopy Analysis". Magazine of Concrete Research, 41, 149, pp. 213-220, 1989.
- [5] Sagoe-Crentsil, K. K. y Glasser, F. O.: "Constitution of green rust and its significance to the corrosion of steel in Portland cement". Corrosion, 49, 6, pp. 457-463, 1993.
- [6] Tuutti, K.: "Corrosion of steel in concrete" Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, 1982.
- [7] Atimatay, E. y Ferguson, M.: "Early corrosion of reinforced concrete – A test report" ACI Structural Journal, 70, 9, pp. 606-611, 1973.
- [8] Bazant, Z. P.: "Physical model for steel corrosion in concrete sea structures – theory". Journal Structural Division, ASCE, 105, ST6, pp., 1137-1153, 1979.
- [9] Bazant, Z. P.: "Physical model for steel corrosion in concrete sea structures – application". Journal Structural Division, ASCE, 105, ST6, pp., 1155-1166, 1979.
- [10] Beeby, A. W.: "Cracking, cover and corrosion of reinforcement". Concrete International, 5, 2, Pg. 35-40, February 1983.
- [11] Andrade, C., Alonso, C. y Molina, F. J.: "Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part I – Experimental test". Materials and Structures, 26, pp. 453-464, 1993.
- [12] Andrade, C., Alonso, C. y Molina, F. J.: "Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part II – Numerical model". Materials and Structures, 26, pp. 532-548, 1993.
- [13] Andrade, C., Alonso, C., Rodriguez, J. y Garcia, M.: "Cover cracking and amount of rebar corrosion: importance of the current applied accelerated tests". In concrete repair, Rehabilitation and protection, R. K. Dhir and M. R. Jones eds., E&FN Spon, London, UK, pp. 263-273, 1996.
- [14] Alonso, C., Andrade, C., Rodriguez, J., Casal, J. and Garcia, M.: "Rebar corrosion and time to cover cracking". In concrete across borders international conference, Odense, Denmark, pp. 301-319, 1994.
- [15] Alonso, C., Andrade, C., Rodriguez, J. and Diez, J. M.: "Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion". Materials and Structures, 31, August-September, pp. 435-441, 1998.
- [16] H. W. Reinhardt: "Fracture mechanics of an elastic softening material like concrete", Heron Vol. 29 No. 2, 1984.

- [17] Torres Acosta, A. A. y Sagüés, A. A.: "Concrete cover cracking and corrosion expansion of embedded reinforcing steel". Proceedings of the third NACE Latin American region corrosion congress on rehabilitation of corrosion damaged infrastructures, Castro, P., Troconis, O. y Andrade, C. eds., pp. 215-229, 1998.
- [18] S. J. Pantazopoulou and K. D. Papoulia: "Modeling cover cracking due to reinforcement corrosion in RC structures", Journal of Engineering Mechanics, April 2001.
- [19] Y. Liu and R. E. Weyers: "Modeling the time to corrosion cracking in chloride contaminated reinforcement concrete structures", ACI Materials Journal, 95 (6), pp. 675-681.
- [20] C. Andrade, C. Alonso y F. J. Molina, "Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part II – Numerical model". Materials and Structures, 26 (1993), pp. 532-548.
- [21] B. Martín-Perez: "Service life modeling of RC highway structures exposed to chlorides". Ph.D. dissertation, Dept. of Civil Engineering, University of Toronto, 1998.
- [22] K. Y. Leung: "Modeling of concrete cracking induced by steel expansion", Journal of Materials in Civil Engineering, May-June, 2001.
- [23] J. Padovan and J. Jae: "FE modeling of expansive oxide induced fracture of rebar reinforced concrete", Engineering Fracture Mechanics, 56 (6), pp. 797-812, 1997.
- [24] M. Ohtsu and S. Yoshimura: "Analysis of crack propagation and crack initiation due to corrosion reinforcement", Const. And Build. Mat., 11 (7-8), pp. 437-442, 1997.
- [25] A. A. Torres Acosta, "Cracking induced by localized corrosion of reinforcement in chloride contaminated concrete". Ph. D. Thesis, University of South Florida, Florida, USA, 1999.
- [26] T. Vidal, A. Castel and R. Francois: "Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete", Cement and Concrete Research 34, 2004, pp. 165-174.
- [27] C. Andrade, C. Alonso, J. Rodríguez, J. Casal y J. M., Relation between corrosion and concrete cracking. Reporte interno del proyecto Brite/Euram BE-4062. DG XII, C.E.C., Agosto 1995.
- [28] Rasheeduzzafar, S. S. Al-Saadoun and A. S. Al-Gahtani: "Corrosion cracking in relation to bar diameter, cover and concrete quality", Journal of Material in Civil Engineering, Vol. 4 (4), Nov. 1992.
- [29] J. Rodríguez, L.M. Ortega, J. Casal and J.M. Diez: "Corrosion reinforcement and service life of concrete structures", Durab. Build. Mater. Compon. 7 (1), pp. 117-126, 1996.
- [30] Allan, M. L. and Cherry, B. W.: "Mechanical simulation of corrosion induced cracking in reinforced concrete", Corrosion/89, Conference paper No. 377, NACE, Houston, Texas, 1989.
- [31] Harada, T., Soeda, K., Idemitsu, T. and Watanabe, A.: "Characteristics of expansive pressure and expansive demolition agent and the development of new pressure transducers", Conc. Lib. JSCE, 21 (478), pp. 95-109, 1993.
- [32] Harada, T., Idemitsu, T. and Watanabe, A.: "Demolition of concrete with expansive demolition agents", Concrete library of Japanese Soc. Civil Eng., 3 (360), pp 63-81, 1986.
- [33] Tepfers, R.: "Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars", Mag. Conc. Res., 31 (106), pp. 3-12, 1979.
- [34] Nogahabai, K.: "Discrete versus smeared versus element-embedded crack models on ring problem", J. Eng. Mech., ASCE, 125 (3), pp. 307-315, 1999.
- [35] A. Muñoz, C. Andrade, A. Torres-Acosta, J. Rodríguez: "Relation Between Crack Width and Diameter of Rebar Loss due to Corrosion of Reinforced Concrete Members" Electrochemical Society Symposium, Cancun, Mexico, Oct 29th – Nov 3rd, 2006.
- [36] A. Muñoz, C. Andrade, A. Torres-Acosta: "Reinforced-Concrete Cover Cracking due to the Pressure of Corrosion Products" FraMCoS 6, Catania, Italy, June 17th – 22nd, 2007.

MUÑOZ Alejandro
amn211177@hotmail.com
ANDRADE Carmen
andrade@ietcc.csic.es
TORRES Andres
atorres@imt.mx

GLOSARIO

Artículo 1:

Análisis de la Envolvente de Datos: Técnica desarrollada por Charnes Cooper y Rhodes, la cual emplea métodos de programación lineal, para generar una frontera de producción, y en base a ello comparar distintas entidades. En este trabajo se analiza su aplicación al sector portuario.

DMU (Decision Making Units): En la literatura sobre medición de la productividad y eficiencia, se refiere a las entidades que habrán de ser comparadas empleando algún método para determinar la eficiencia técnica.

Índice de Malmquist: Técnica que emplea los conceptos de función de distancia para medir el cambio en el Factor de Productividad Total.

Artículo 2:

Corrosión: Proceso de oxidación destructiva de los materiales metálicos en un medio específico.

Durabilidad: Término referido a la capacidad del concreto para resistir cambios en su microestructura y en sus propiedades. Indica la vida en servicio o vida útil de una estructura dada.

Potencial de Media Celda: Método para

determinar cualitativamente la actividad por corrosión de un metal en un electrolito cualquiera utilizando electrodos de referencia conocidos. El procedimiento estándar para realizar mediciones de potencial de media celda de acero desnudo en concreto se explica en ASTM C-876 "Método estándar para determinar el potencial de media celda de barras de refuerzo sin recubrimiento en concreto."

Velocidad de Corrosión: Pérdida de masa de metal por unidad de área y por unidad de tiempo que se genera cuando un metal se encuentra en proceso de corrosión activa. Sus unidades pueden ser $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ o $\text{mm}/\text{año}$ ($1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 0.012 \text{ mm}/\text{año}$).

Vida Útil: Es el tiempo de una estructura en servicio antes de que a ésta se le tenga que realizar una reparación mayor. Inicia cuando ésta se fabrica y se pone en servicio y finaliza cuando ésta requiere de una intervención para restablecer su estética, resistencia o estabilidad original.

Vida Remanente: Es el tiempo de la estructura que inicia en el momento que manifiesta daños de consideración producto del ambiente (grietas, delaminaciones) hasta que ésta colapsa por falta de mantenimiento que reestablezca su estado inicial.

PROYECTO EN MARCHA

Simulación del efecto de irregularidades de la superficie del camino en el control direccional de un vehículo Pesado

El comportamiento dinámico de un vehículo es el resultado principalmente de la interacción de

cuatro factores que son: el conductor, el vehículo, el medio ambiente y el camino. Alteraciones en

estos factores producen cambios en la forma en que el vehículo responderá ante ciertas circunstancias, pudiendo con ello provocar accidentes viales con las consecuencias que estos conllevan, como pérdidas materiales y lesiones o incluso la muerte de los ocupantes.

Algunos estudios asocian que del total de accidentes viales, la infraestructura participa como causa en alrededor de una quinta parte de los mismos. Aunque existen algunas incertidumbres sobre las verdaderas causas de muchos de ellos, es evidente que el estado superficial del camino puede afectar el control y desempeño de un vehículo durante su tránsito. Así, las irregularidades o heterogeneidad de la carpeta asfáltica se constituyen en un patrocinador de riesgo para la ocurrencia de un accidente.

Con el fin de incrementar la seguridad en las carreteras es necesario tener un mejor entendimiento de cómo cada factor altera el comportamiento dinámico de los vehículos, con mayor énfasis a los vehículos de carga pesada ya que, debido a las magnitudes de carga que transportan, el potencial de daño en caso de presentarse algún incidente es mayor. En ese sentido, el presente trabajo busca aportar información acerca de cómo el estado superficial del camino altera el comportamiento dinámico de un camión unitario de tres ejes, denominado como C3. Para tal efecto, se utiliza un modelo de simulación numérica, que corre bajo la plataforma de un programa comercial.

El estudio considera las irregularidades superficiales más comunes en las carreteras del país, como baches y hundimientos. También incluye diferencias de nivel entre carriles adyacentes debidos a procesos de reparación, como fresado y reencarpetamiento parciales con diferentes espesores, así como diferencias en las propiedades físicas de la carpeta asfáltica por el uso de materiales distintos durante reparaciones de irregularidades. Los resultados se comparan contra los obtenidos del tránsito por un camino en buen estado.

Las maniobras de prueba ejecutadas virtualmente son cambio de doble carril, cambio simple de carril y frenado en línea recta a velocidades de avance de 60, 70 y 80 km/h. Para realizar la comparación se emplean algunas medidas del desempeño dinámico de vehículos, entre las que se encuentran la aceleración lateral máxima generada durante la maniobra, la diferencia entre la trayectoria original y la trayectoria real seguida por el vehículo, la transferencia lateral de carga y la distancia de frenado.

El análisis de los resultados parciales obtenidos a la fecha muestran que las irregularidades en la carretera afectan de manera negativa el comportamiento dinámico de los vehículos, comparado cuando se circula por una carretera en buen estado. En algunos casos, las diferencias en los parámetros empleados alcanzan incrementos mayores al 100%. Incluso en la maniobra de doble cambio de carril los vehículos han presentado volcadura al momento de realizarla a la máxima velocidad establecida de 80 km/h, con excepción del caso de carretera en buen estado. De igual forma se han observado diferencias significativas en cuanto a la distancia de frenado para las condiciones del camino analizadas. En general, se evidencia que las irregularidades en la superficie del pavimento pueden ser precursores de riesgo en la ocurrencia de accidentes.

FLORES Oscar
oflores@imt.mx

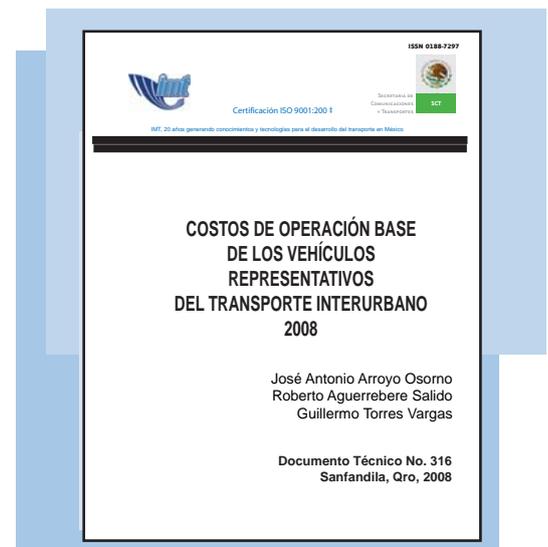
PUBLICACIÓN

CosCostos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2008

El objetivo de la **PUBLICACIÓN TÉCNICA 316** es aportar al sector transporte, información y un procedimiento sencillo para la estimación de costos de operación básicos de vehículos representativos del tránsito interurbano, en función del alineamiento geométrico y del estado superficial de las carreteras.

La publicación ha tomado como referencia los modelos matemáticos desarrollados por el Banco Mundial en 1987, con los cuales posteriormente se estructuró un programa de cómputo denominado Vehicle Operating Costs (VOC, por sus siglas en inglés).

Se puede consultar de forma gratuita en la página del Instituto: <http://imt.mx/Espanol/Publicaciones/pubtec/pt316.pdf>



EVENTOS ACADÉMICOS

Ingeniería de puertos y costas

Este curso internacional fue llevado a cabo del 17 al 21 de agosto de 2009, en las instalaciones del IMT en Sanfandila, Querétaro. La coordinación académica del curso estuvo a cargo del M en C José Miguel Montoya Rodríguez.

Los objetivos fueron presentar la planeación portuaria en México y las políticas de acción para el desarrollo de infraestructura portuaria nacional. Contribuir en la formación y actualización de profesionales e investigadores relacionados con el diseño de rompeolas, estructuras de protección costera, diseño de muelles y tablestacas.

El curso se diseñó para ingenieros y profesionales en el área de planeación, diseño, construcción, mantenimiento y supervisión de estructuras portuarias y costeras, así como servidores públicos y privados, cuyas funciones estén relacionados con las áreas mencionadas.

Tuvo una asistencia de 19 participantes, de los cuales varios provinieron de la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante de la SCT, pero también de la API Lázaro Cárdenas, API Ensenada; Universidad Marista de Querétaro, Universidad de Colima, Instituto Politécnico Nacional, Infraestructura y Proyectos de México, S.A. de C.V., y PROMOCAR, S.A. de

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

M. en I. Ramón Cervantes Beltrán
Coordinador de Ingeniería Estructural Formación Profesional y Telemática
 (55) 55 98 56 10 ext. 4324
 ramon.cervantes@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
Encargado de la Coordinación 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:

LCC 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

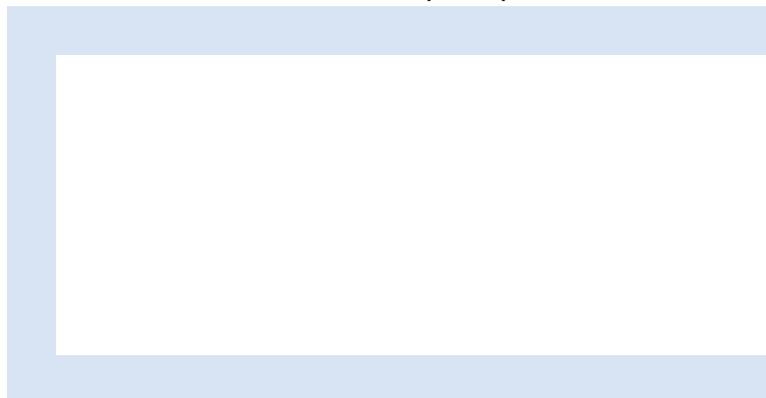
El contenido de los artículos aquí publicados es responsabilidad exclusiva de sus autores; por tanto, no refleja necesariamente el punto de vista del Instituto Mexicano del Transporte.

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