

CRITERIO COSTO-RENDIMIENTO PARA RETROADAPTACION SISMICA

Alberto L. Guzmán¹ y Ali Saffar²

RESUMEN: Los componentes claves de cualquier modelo económico empleado para medir los niveles apropiados de rehabilitación en un edificio existente son las cantidades estimadas del acervo de capital (capital stock). En este artículo, las variables que enlazan esas cantidades con las pérdidas económicas ocasionadas por daño estructural son introducidas en el conocido modelo de insumo-producto (input-output) de Leontief. De esta forma el modelo de costos del ciclo de vida esperado, propuesto por Ang y de León (1995), es extendido para incluir los factores de pérdida económica producida en un edificio cuyo tipo de ocupación sea residencial, de oficinas o industrial. Finalmente, se ilustra la implementación del modelo para un evento sísmico seleccionado para la ciudad de Mayagüez, Puerto Rico.

INTRODUCCIÓN

Los problemas causados por la infraestructura envejeciente en Puerto Rico han sido motivo de preocupación y gran interés en la última década. El código de construcción de Puerto Rico se modificó en 1987 y actualmente se ha adoptado el código "Uniform Building Code" del año 1997 (UBC-97), el cual introduce normas más estrictas para el diseño sísmico y la construcción. Hay una gran cantidad de edificios viejos que debido al uso de cargas de diseño insuficientes ya no son aceptables de acuerdo a los criterios actuales de diseño de Puerto Rico. A menos que esos edificios sean retroadaptados, su comportamiento en un terremoto puede ser deficiente. Sin embargo, para medir adecuadamente la efectividad económica de cualquier sistema de retroadaptación, se debe conocer de antemano las reducciones a la demanda y oferta asociadas con la pérdida parcial o total del edificio. En este trabajo se presentan las conclusiones de la primera parte de la investigación de edificios de concreto reforzado en Puerto Rico que se consideraron sísmicamente deficientes. Para el estudio se seleccionó la ciudad de Mayagüez localizada en la región oeste de la isla de Puerto Rico. La selección fue influenciada por el más alto riesgo sísmico estimado para esta zona, como también por la intensa actividad manufacturera presente en esa región.

ACERVOS DE EDIFICIOS RELACIONADOS CON UN TERREMOTO

Se asume que el nivel de protección requerido cuando se desea rehabilitar un edificio contra terremotos es función del costo de reemplazo contra el costo de reparación. Sin embargo, este es un punto de vista muy simplificado que ignora el costo real asociado con la pérdida de un edificio. La Figura 1 muestra los acervos de un edificio relacionados con un terremoto. Allí se han tomados en consideración los efectos directos e indirectos de la pérdida de capital y capital humano. Este modelo económico es general y es consistente con el método sistemático propuesto por Ang y De León (1995). Los factores en consideración son el costo de reparación-reemplazo, C_r , la pérdida de contenido, C_c , las lesiones humanas o muertes, C_h , y las pérdidas económicas, C_e . Estos factores representan las funciones de costos de daño utilizadas en el presente estudio. Estas funciones son convenientemente expresadas en término del índice de daño global, D_m , el cual es una medida cualitativa del comportamiento de un edificio después de un terremoto. En este estudio se utilizó el modelo de daño de Park-Ang para calcular índices de daño para elementos de concreto.

El modelo de Ang-De León calcula el costo de daños en un edificio debido a un sismo como la suma del flujo directo del acervo de capital y el capital humano. De estos factores, solamente el factor de pérdida económica, C_e , no está claramente definido por el modelo. A continuación se describe brevemente cada componente y se proveen expresiones para determinar los valores asociados a Puerto Rico.

COSTO DE REEMPLAZO O REPARACIÓN, C_r :

Existe muy poca información sobre los costos de reparación de edificios que han resultado dañados durante un terremoto. Park y Weng (1987) usaron información de solamente nueve edificios de concreto para calibrar el índice de daño global del tipo utilizado en este estudio. Esta calibración puso el límite de daño reparable en $D_m = 0.4$. Correlacionando el índice de daño calculado con la información de costo reportada del terremoto de la Ciudad de México de 1985, Ang y De León definieron la función de costos de reparo-reemplazo, así como la pérdida de contenido, como función lineal del índice de daño (Ang y De León, 1995a). En este sentido, el costo de reparación para un edificio en Puerto Rico puede ser definido como (Guzmán, 1998):

$$C_r = \text{costo de reparación ó reemplazo} = p_r C_0 D_m = 2.35 C_0 D_m \quad ; 0 \leq D_m \leq 0.4 \quad (1)$$

¹ Ph.D., Ingeniero Estructural, UNIPRO-AEP, P.O. Box 10914, San Juan, PR 00968.

² Profesor Asociado del Depto. de Ing. Civil, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, Mayagüez, PR 00681-9041

$$= 1.07 C_0 \quad ; D_m > 0.4$$

donde:

ρ_t = razón de reparación total a costo inicial

C_0 = costo de construcción inicial.

COSTO DE PERDIDA DE CONTENIDO, C_c :

La pérdida del contenido de un edificio es una función de peso del índice de daño, multiplicada por el valor del contenido (C_o). Varía linealmente para daños intermedios (o sea reparables):

$$C_c = \omega_c C_o D_m \quad (2)$$

Al factor del tipo de contenido, ω_c , se le asigna un valor comprendido entre 0.5 (Kircher et al., 1997) y 1.0 (Ang y De León, 1995a). El modelo asume que nunca ocurrirá una pérdida total del contenido. Para la mayoría de los edificios, y en lugar de un análisis más exacto, se considera razonable un valor de C_c igual a $0.5C_o$ (Kircher et al., 1997, Ang y De León, 1995b). Por lo tanto, el valor mínimo de C_c y el usado en este estudio será:

$$C_c = \frac{1}{4} C_o D_m \quad (3)$$

COSTO DE PERDIDA DE VIDAS HUMANAS, C_h :

Cualquier procedimiento que tome en cuenta el capital asociado con pérdidas o lesiones humanas debe considerar tres partes. Primero, debe estimar el número de personas presentes en el edificio al momento de ocurrir el terremoto. Segundo, debe considerar el porcentaje de los afectados y por último debe tener en cuenta el costo asociado con cada muerte o lesión.

Para estimar el número de personas presentes durante un terremoto se adoptó la metodología de celda utilizada para especificar la carga viva. Esta metodología divide el área de piso, A , en celdas, λ . Ellingwood y Culver (1977) definieron a λ de la siguiente manera:

$$\lambda = \sqrt{\frac{A-155}{6.3}} \quad (4)$$

El número de personas, N_D , que se le asigna a cada celda varía con el tipo de ocupación del edificio. Por tanto, el número de personas en un edificio se obtendrá mediante el producto λN_D .

La literatura de acceso público contiene menos información de muertes y lesiones que de daños estructurales a edificios. El documento conocido como ATC-13 del Consejo de Tecnología Aplicada (ATC, 1985), es uno de los pocos documentos que presentan información donde se correlaciona el índice de daño con las lesiones a personas. De esa correlación se puede definir la razón de fatalidad de la siguiente manera (Guzmán, 1998):

$$R_f = e^{11.2(D_m - 1.12)} \quad (5)$$

De aquí que se pueda determinar la cantidad de personas que resultan con lesión multiplicando la razón de fatalidad por un factor de gravedad de lesión, μ_i . Para μ_i , se han considerado en este estudio cuatro tipos de lesiones. El primer tipo corresponde a lesiones menores, de aquí que $\mu_1 = 30$ (Guzmán, 1998).

El segundo y tercer tipo corresponden a lesiones mayores, sin ó con desmembramientos, respectivamente. Suponiendo que un cuarto de todas las lesiones son con desmembramientos, $\mu_2 = 3$ y $\mu_3 = 1$. La muerte de la persona es representada por el cuarto tipo que por definición es $\mu_4 = 1$. Los valores antes definidos aplican a aquellos casos en el cual $D_m \leq 0.8$. Para $D_m = 1$, $\mu_1 = 2$, $\mu_2 = 1.5$, $\mu_3 = 0.5$ y $\mu_4 = 1$. Para D_m comprendido entre 0.8 y 1.0, los valores de los coeficientes de gravedad de lesión se interpolan linealmente. Finalmente, una vez que se ha estimado el número de personas afectadas, el factor de pérdidas humanas, C_H , se puede calcular como:

$$C_H = R_f (\lambda N_D) \sum_{i=1}^4 \mu_i C_{hi} \quad (6)$$

donde C_{hi} es el costo de fatalidad o lesión por persona. Usando información recopilada por la Corporación del Fondo del Seguro del Estado y la Junta de Planificación de Puerto Rico (Corporación del Fondo del Seguro del Estado, 1977) y basado en el promedio del costo de tratamiento de emergencia y de hospitalización para lesiones sin desmembramiento, respectivamente, se obtuvo lo siguiente:

$$C_{h1} = \$200$$

$$C_{h2} = \$3,742$$

En Puerto Rico, los datos del Fondo del Seguro del Estado indican que el 40% de las lesiones con desmembramiento son consideradas lesiones totales, por lo que se decidió tomar $C_{h3} = 0.4 C_{h4}$, donde C_{h4} es el costo de muerte humana. C_{h4} está basado en el promedio de ingreso de la persona que tiene más probabilidad de estar en el edificio al momento de un terremoto y en su edad. Es decir que:

$$C_{h4} = (\text{salario promedio de la población del edificio})(\text{promedio de años de trabajo faltante}) \quad (7)$$

En el caso de edificios de residencia, el ingreso promedio debe tomarse como el ingreso bruto per cápita, porque la familia es una muestra de la población (empleados y desempleados). La Administración del Seguro Social reconoce la edad de 65 años como edad de retiro. La última información del Negociado del censo (Census Bureau) establece una edad laboral promedio de 35 años para Puerto Rico (Census of Population, 1990). Por lo tanto, tomando el ingreso bruto per cápita de \$8,119 dólares (Junta de Planificación de Puerto Rico, 1987) para edificios de residencia se tiene que:

$$C_{h4} = \$8,119(65 - 35) = \$243,570$$

Para otro tipo de ocupación que no sea residencial, la población puede ser mucho menos variada. Por ejemplo, en edificios usados para actividades de manufactura hay generalmente pocos visitantes. El salario promedio de los empleados y su edad laboral promedio menos la edad de retiro produciría un factor de costo de muerte humana, C_{h4} , mucho más alto que aquel para residencias. Para edificios dedicados a servicios, por otro lado, los empleados serán tratados como aquellos de manufactura mientras que la población general puede representar a los clientes. Por ejemplo, si se tiene una razón de 4 a 1 de cliente a empleado, el ingreso promedio de la población del edificio (Average Income of Building Population, AIBP) se puede calcular como:

$$AIBP = 0.8(\text{ingreso per cápita bruto}) + 0.2(\text{salario promedio del empleado en el negocio}) \quad (8)$$

Para situaciones particulares se pueden considerar otras variaciones en el modelo.

FACTOR DE PERDIDA ECONOMICA, C_e :

El modelo de insumo-producto originalmente diseñado para economía por Leontief (1941) será utilizado para calcular C_e . El modelo usa una matriz de requerimiento directa e indirecta, usualmente llamada *matriz inversa de Leontief*, para relacionar el producto bruto de un sector económico con el producto disponible por el sector para el producto final. La matriz inversa de Leontief para Puerto Rico está disponible en la Junta de Planificación de Puerto Rico (1990). Esta matriz está constituida por todos los sectores económicos, los cuales para Puerto Rico se agrupan en 94 sectores y son reducidos a cinco para facilitar su entendimiento. Los cinco sectores económicos considerados son: agricultura, minería más construcción, manufactura, servicios y gobierno. Estos cinco sectores son normalizados con respecto a la suma total de sus componentes. El modelo de Leontief ha sido usado anteriormente con éxito para calcular el impacto económico de un terremoto en el área metropolitana de San Juan (Zalacain, 1985). Sin embargo, ésta será la primera vez que un modelo de insumo-producto es usado para calcular las pérdidas económicas asociadas con un edificio.

Para evaluar el factor de pérdida económica, se identifican cuatro componentes distintos. Estos son la renta, gastos de operación (sin renta ni salarios), salario, y el ingreso bruto. El primer componente, C_{er} , es el equivalente al factor de pérdida económica para edificios de residencias como fue definido por el modelo de Ang-de León. El componente de gastos de operación, C_{ee} , se calcula formando un vector fila **E** basado en la multiplicación de los gastos asociados con los negocios por un vector de peso; luego se multiplica por la columna apropiada en la matriz inversa de Leontief **B**. El vector de peso o vector de escala se establece con la alimentación de los diferentes sectores económicos, sumando de la matriz de insumo-producto la contribución de cada sector y distribuyéndola entre el sector económico correspondiente. El componente de salarios, C_{ep} , se calcula en la misma forma. De hecho, el vector fila para el componente de salarios, **P**, se forma usando la misma forma del vector de escala usado en **E**. De igual manera, el componente de ingreso bruto, C_{eg} , se calcula primero buscando un vector de ingreso, **G**, distribuyéndolo en el vector normalizado correspondiente y luego multiplicándolo por la fila apropiada en la la matriz **B**.

Si suponemos un tipo de ocupación de negocios proveniente del sector k , se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$C_{ee} = \sum_{i=1}^n e_i \quad b_{ik} \quad C_{ep} = \sum_{i=1}^n p_i \quad b_{ik} \quad C_{eg} = \sum_{j=1}^n b_{kj} \quad g_j \quad (9)$$

donde n es el número de sectores económicos. El factor de pérdida económica para esta ocupación en un período T de construcción o reubicación será:

$$C_e = (C_{er} + C_{ee} + C_{ep} + C_{eg}) \quad T \quad D_m^2 \quad (10)$$

Para calcular el factor de pérdida económica total para el edificio, se suman los C_e para todos los ocupantes del edificio.

EJEMPLO ILUSTRATIVO

Para ilustrar los efectos del factor de pérdida económica en el costo de daño total de un edificio, se decidió considerar cuatro tipos diferentes de ocupantes para el mismo edificio en el centro del pueblo de Mayagüez. El edificio seleccionado es de dos pisos y tiene un área total en planta de 20,000 pies cuadrados. Los tipos de ocupación considerados fueron los siguientes: ambos pisos residencias; primer piso comercio (tiendas), segundo piso residencia; ambos pisos comerciales; y ambos pisos manufactura. El vector de entrada y salida **G** y los vectores filas **E** y **P** se muestran en la Tabla 1. Se asumió que la matriz inversa de Leontief para Puerto Rico también representa la economía regional de Mayagüez. Se asumió además un año de recuperación. Los

resultados se muestran en la Figura 2 como por ciento del sistema básico definido como residencia a un 20% del índice de daño.

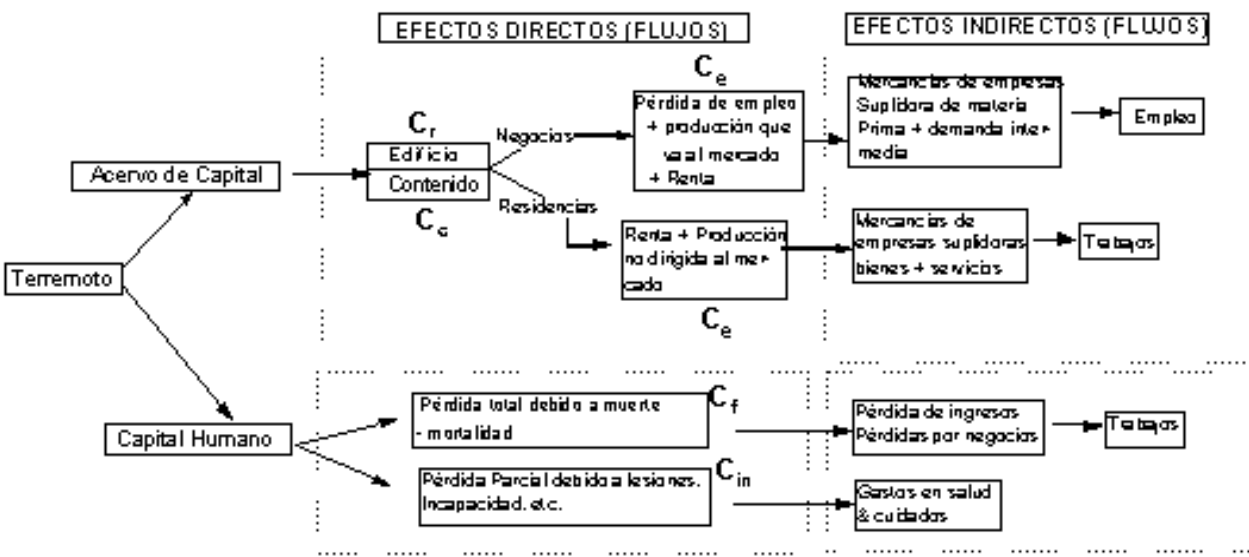


Figura 1: Acervos relacionados con un terremoto

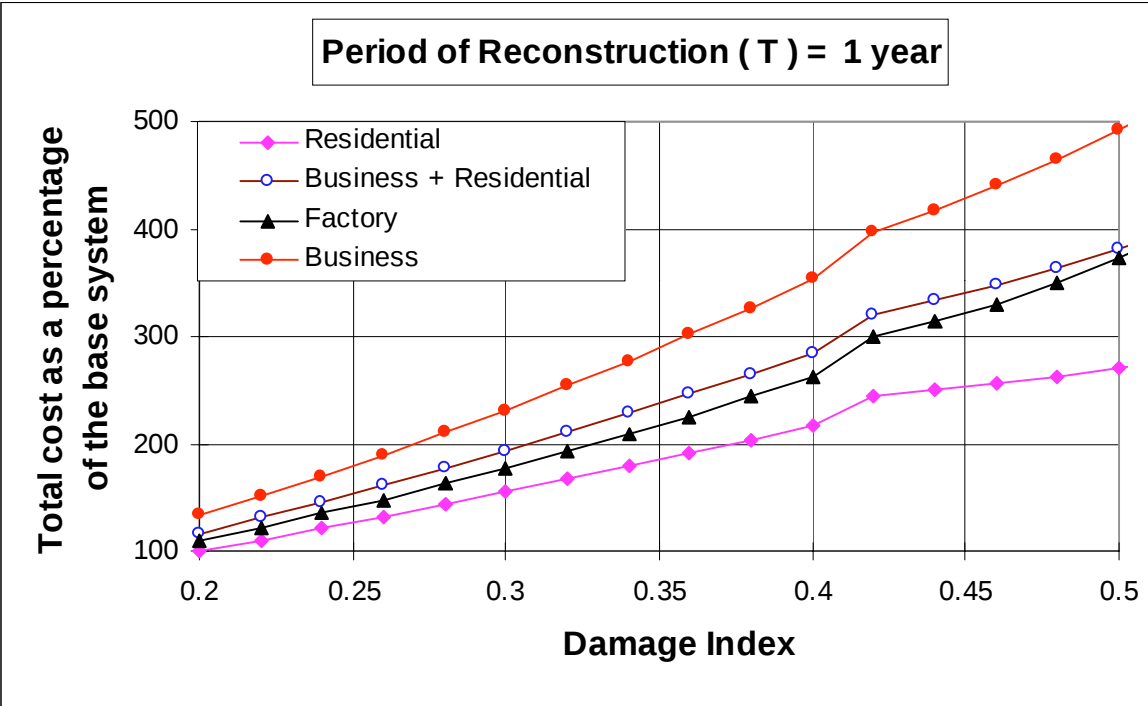


Figura 2: Costo total para diferentes tipos de ocupación con un período de reconstrucción constante de 1 año.

TABLA 1: Vectores ilustrativos Columna y Fila de insumo-producto (\$/ft²)

Ocupación		Negocio			Fábrica		
		G	E ^t	P ^t	G	E ^t	P ^t
Sector	Agricultura	0.6261	0.1557	0.0941	1.250	0.0233	0.0086
	Minería y	9.185	1.207	0.7294	0.7281	2.102	0.7780
	Construcción						
	Manufactura	83.16	8.803	5.321	19.08	7.838	2.901
	Servicios	63.74	59.18	35.77	5.235	47.16	17.46
	Gobierno	16.36	4.313	2.607	0.9389	20.35	7.534
Total		173	73.66	44.52	27.23	77.48	28.68

COSTO DEL CAPITAL HUMANO:

Para este edificio en particular, usando la ecuación (4), el número de celdas se escoge como sigue:

$$\lambda = \sqrt{\frac{20000 - 155}{6.3}} = 56.125$$

Los siguientes valores de C_{h4} son usados:

C_{h4} = \$243,570 Para residencias, basado en un AIBP = \$8,119
C_{h4} = \$360,390 Para negocios, basado en un AIBP = \$12,013
C_{h4} = \$474,240 Para manufacturas, basado en un AIBP = \$15,808

Se asumió un promedio de 30 años restante de trabajo para la población de los edificios en todos los casos.

Utilizando la ecuación (6), obtenemos el costo asociado con las pérdidas humanas para los diferentes tipo de ocupación del edificio como sigue a continuación:

$$\begin{aligned} C_H &= R_f (56.125)(6)[(30)(200) + (3)(3,742) + (1)(97,428) + (1)(243,570)] \\ &= (120,631,932)e^{11.2(Dm-1.12)} \rightarrow \text{Para residencias (N}_D = 6) \\ C_H &= R_f (56.125)(7)[(30)(200) + (3)(3,742) + (1)(144,156) + (1)(360,390)] \\ &= (204,991,175)e^{11.2(Dm-1.12)} \rightarrow \text{Para negocios (N}_D = 7) \\ C_H &= R_f (56.125)(7)[(30)(200) + (3)(3,742) + (1)(189,696) + (1)(474,240)] \\ &= (267,611,521)e^{11.2(Dm-1.12)} \rightarrow \text{Para manufacturas (N}_D = 7) \end{aligned}$$

COSTO ECONOMICO, C_E :

En el caso de residencias (edificios de apartamentos) las pérdidas económicas se estiman de las pérdidas de la renta durante el período de reconstrucción. De llamadas informales a agencias de bienes raíces se obtuvo una renta promedio de \$19.20 por ft² por año. Por lo tanto, para un período máximo de reconstrucción de T_R años, el factor de pérdidas económicas es:

$$C_E = C_{er} A T_R D_m^2 = 19.2 A T_R D_m^2$$

Para calcular el costo económico para negocios y manufacturas se tienen que generar los vectores de insumo-producto descrito anteriormente, para cada tipo de ocupante. Estos vectores se generaron con información obtenida en el área de Mayagüez mediante encuestas. De los vectores, solamente el ingreso bruto, los gastos y la nómina salarial fueron requeridos. Cada cantidad se multiplicó por el vector unitario correspondiente, según se describió anteriormente. Los resultados se muestran en la Tabla 1. Por lo tanto, el costo económico total es:

$$C_E = 253.38 T_R A D_m^2 \rightarrow \text{Para negocios}$$

$$C_E = 68.71 T_R A D_m^2 \rightarrow \text{Para manufactura}$$

COSTO TOTAL DE DAÑO, C_d :

Las figuras 2 y 3 muestran los efectos de cambiar el tipo de ocupación en un edificio. El cálculo se basa en la suma de las pérdidas del edificio y del contenido, las pérdidas económicas y las pérdidas humanas, resultando en la siguiente ecuación:

$$C_d = C_R + C_C + C_E + C_H$$

El costo total de daño se evaluó en una forma determinística, variando el índice de daño de 0.2 a 0.5. Aunque un edificio se asume como pérdida para un índice de daño de 0.4, la mayoría de las funciones de costo variarían hasta un índice de daño iguala 1.0. Esto se ilustra en las gráficas a través del cambio en costo de daño total cuando el índice varía de 0.4 a 0.5. Es notable también como se altera el costo asociado a las diferentes ocupaciones cuando se produce un cambio en el período de reconstrucción.

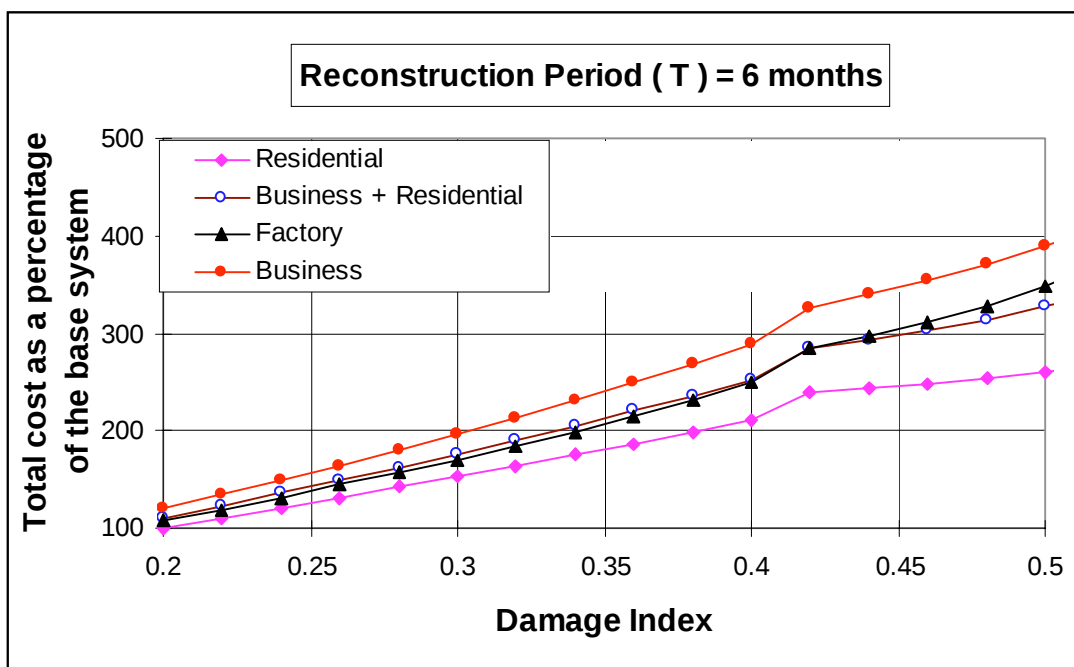


Figura 3: Costo total para diferentes tipos de ocupación con un período de reconstrucción constante de 6 meses.

CONCLUSIONES

Este artículo presenta una metodología para facilitar el proceso de toma de decisión para la rehabilitación de un edificio. El ejemplo en las Figuras 2 y 3 muestra dos importantes hallazgos. Primero se puede observar que un cambio en el ocupante del edificio puede sustancialmente alterar el costo del daño asociado con el edificio; además, el cambiar el tipo de ocupación del edificio, de un negocio de menos densidad (en término de las funciones económicas) a una más alta puede representar la necesidad de rehabilitación que de otra forma no lo haría. Por otra parte, se puede apreciar cómo el tiempo de reconstrucción afecta notablemente los costos, lo cual lo hace un parámetro muy importante en el cálculo de costos de daño.

RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la National Science Foundation (NSF) a través del subsidio OSR-9452893, otorgado al Centro de Investigación de Infraestructura Civil (CIRC) del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico de Mayagüez. Los autores agradecen mucho esta ayuda. Los autores agradecen a la Dra. Loyda Rivera y al Dr. José Alameda, quienes han dado un gran apoyo para la realización de esta investigación, así como al municipio de Mayagüez, especialmente al Sr. Fernando Espinosa, quien ha puesto todo su empeño para el buen término de dicha investigación.

REFERENCIAS

- Ang, A. H-S. y de Leon, D. (1995). "Basis for Cost-Effective Decisions on Upgrading Existing Structures for Earthquake Protection", *Proc. US-China Symposium on Earthquake Reconstruction and Rehabilitation*, Kunming, China.
- Ang, A. H-S. y de Leon, D. (1995a). "Development of Risk-Based Cost-Effective Criteria for Design and Upgrading of Structures", *International Symposium on Public Infrastructures System Research*, Techno Press, Seoul, Korea, pp. 379-390.
- Applied Technology Council (1985). "Earthquake Damage Evaluation Data for California", ATC-13, Redwood City, California.
- Ellingwood, B. R. y Culver, C. G. (1997). "Analysis of Live Loads in Office Buildings", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 103(ST8), 1551-1560.
- Guzmán, A. L. (1998). *Cost-Performance Criteria for Seismic Retrofitting*, Tesis Doctoral, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico.
- Kircher, C. A., Nassar, A. A., Kutsu, O., y Holmes, W. T. (1997). "Estimation of Earthquake Losses to Buildings", *Earthquake Spectra*, 13(4), 703-720.
- Park, Y.J., Ang, A. H-S. y Wen Y. K., (1987). "Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 111(ST4), 740-757.
- Leontief, W.W. (1941). *The Structure of the American Economy*, Oxford University Press, New York.
- Zalacain, F. (1985). "The Economic Impact of Natural Disasters in Puerto Rico", Natural Hazards Mitigation Office, Dept. of Natural Resources, San Juan, Puerto Rico.