

Damage and structural restoration effect in the calculation of structural natural vibration frequencies of petroleum vapor plant

**Antonio Ramón Sarcos Portillo, Andrés Francisco Ugarte Caldera,
Hildrun García Legl y José Agustín Delgado Arguello**

*Departamento de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad del Zulia.
Maracaibo 4002-A, Venezuela. asarcosp@yahoo.com, afugartec@hotmail.com,
garcialelg@yahoo.es, sadelgado1@cantv.net.*

Abstract

A vapor plant belongs to the petroleum industry of the oriental coast of Maracaibo lake, Zulia State of Venezuela. The structure of the plant is conformed by a frame of two floors that supports in the second roof two tanks of water with weight of 50 tons each one. The floors have several links with diverse pipes that transport water and vapor. Although the structure was already built at the beginning of the decade of the 1980, at the commencement of the 2000 year, it was out of operation because its maintenance was very deficient and with inadequate procedures. This paper proposed a methodology for the repair of the structure, and were calculated experimentally and theoretically the natural vibration frequencies of the structure before and after the repair, with the purpose of obtaining a theoretical relationship of the initial damage of the structure and then to be able to quantify the increment of rigidity of the frame after having repaired.

Key words: Natural frequency, damage, stiffness.

Efecto del deterioro y restauración estructural en el cálculo de las frecuencias naturales de vibración de la estructura de planta de vapor petrolera

Resumen

La planta de vapor, pertenece a la industria petrolera de la costa oriental del lago de Maracaibo Estado Zulia de Venezuela. La estructura de la planta la conforma un marco espacial de dos pisos que soporta en el nivel de techo dos tanques de agua con un peso de 50 toneladas cada uno. En los entresijos se conectan a la estructura diversas tuberías que transportan agua y vapor. A pesar de que la estructura fue construida al comienzo de la década de los 1980 ya a principios de la década del 2000 estaba fuera de funcionamiento, dado que su mantenimiento fue muy deficiente y con procedimientos inadecuados. En el presente trabajo se propuso una metodología para la reparación de la estructura, y se calcularon experimentalmente y teóricamente las frecuencias naturales de vibración del marco antes y después de la reparación, con la finalidad de obtener una relación teórica del deterioro inicial de la estructura y luego poder cuantificar el incremento de rigidez del marco después de reparado.

Palabras clave: Frecuencia natural, deterioro, rigidez.

Introducción

La estructura portante de la planta de vapor petrolera esta conformada actualmente por dos pórticos principales de concreto armado distanciados 4.50 m, con cinco tramos de 6.00 m, mas una escalera de 2.00 m en planta. En la Figura 1, se muestra la configuración de dimensiones de secciones de las vigas y columnas que conforman los pórticos antes de intervenir la planta.

Esta estructura fue diseñada originalmente para soportar en el nivel de techo dos tanques con agua con un peso máximo de 50 toneladas cada uno, además de múltiples fijaciones en su entrepiso y techo de tuberías que transportan agua y vapor, las que transmiten fuerzas vibratorias a la estructura. Al momento de su construcción a principios del año 1980, para aminorar la transmisión de las fuerzas generadas por la permanente vibración, se colocaron 20 soportes elásticos en lugares importantes entre las tuberías y la estructura. Sin embargo a medida que

estos soportes se fueron dañando, se sustituyeron por uniones improvisadas, o simplemente se fueron apoyando directamente en vigas secundarias, que no estaban diseñadas para soportar este tipo de cargas dinámicas.

Para el año 2001, la presente planta de vapor, se encontraba en condiciones no operativas, cuya estructura portante presentaba deterioro, por lo que la gerencia de la industria petrolera gestionó trabajos para reparar el marco de la estructura y activar de nuevo la producción de la planta. En el inicio de los trabajos se realizó inspección visual detallada de las columnas, vigas y losas pertenecientes a la estructura, en donde se observo la existencia de agrietamiento severo del concreto y corrosión del acero del refuerzo. El estudio de estos daños conllevó al diagnóstico de grave deterioro del marco de la estructura, debido al agrietamiento del concreto producido principalmente por la vibración permanente de las tuberías, para que luego actuara la corrosión en los elementos estructurales (Figuras 2 y 3).

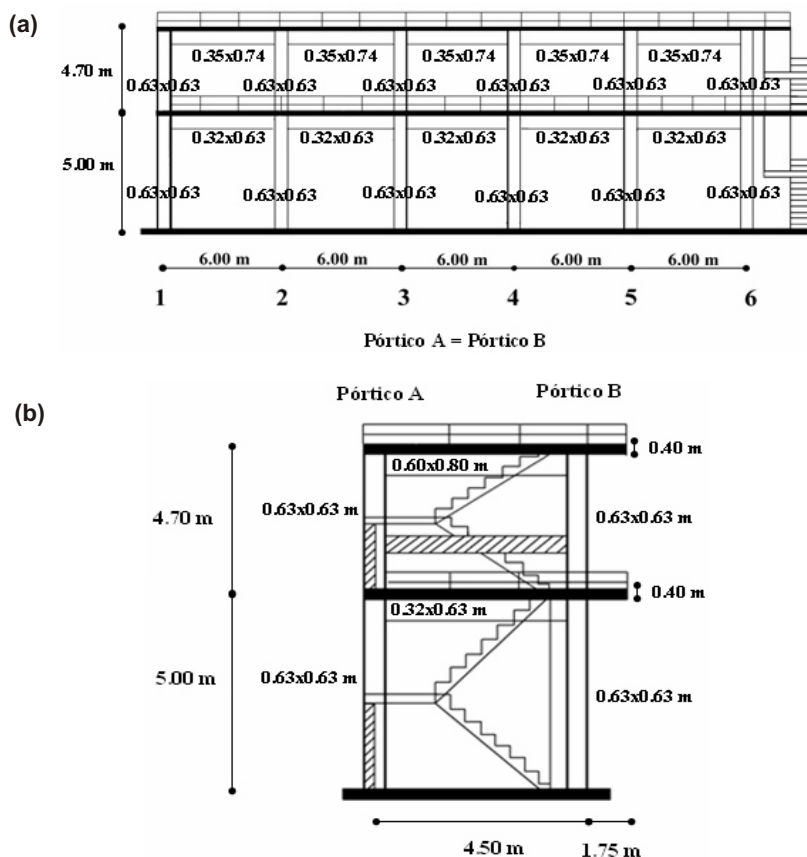


Figura 1. Esquema de la planta de vapor. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal.

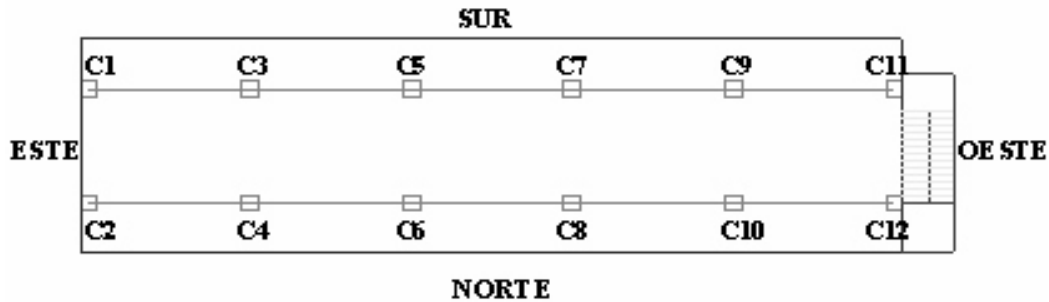


Figura 2. Identificación en planta de columnas de la estructura de la planta de vapor.



Figura 3. Deterioro Columnas. (a) Columna C6 cara oeste. (b) Columna C7 cara norte.

Entonces, el presente trabajo propone una metodología para la restauración del marco estructural de la planta de vapor, sin tener que demolerla completamente y/o cambiarla de sitio.

En la Figura 2, se muestra la nomenclatura de las columnas de la edificación y en las Figuras 3(a y b) se muestran fotos en donde es posible observar la situación de deterioro de dos columnas en el momento de efectuar la primera prueba experimental de vibración del edificio.

Procedimiento de Reparación

Después de identificar los elementos estructurales dañados, se generó un protocolo de reparación que consistió en sustituir y reforzar las barras de acero de refuerzo en elementos es-

tructurales (vigas y columnas) y luego se procedió a vaciar (caso columnas) o proyectar (caso vigas) concreto preparado para tal fin [1-5].

En el caso de las columnas, se procedió a eliminar 6 cm del perímetro de la sección, con fines de reforzar y extraer la totalidad del acero de refuerzo corroído [5, 6]. Luego, se colocó la misma configuración de aceros de refuerzos en todo el perímetro, y todo el contorno de los elementos intervenidos fue vaciado con mezcla de concreto preparada para una resistencia cilíndrica de $f_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$. En la Figura 4 [5, 7], se observan las configuraciones de las secciones transversales de todas las columnas y se visualiza el incremento de la sección después de haber llevado a cabo la reparación (Figura 4-c).

Al efectuar la reparación de las columnas fue garantizada la estabilidad y seguridad del sistema de piso a través de sistemas de apuntalamiento localizados en las zonas dañadas con la finalidad de no afectar elementos estructurales adyacentes.

El tratamiento en la reparación de las vigas dañadas, fue similar al procedimiento de reparación de las columnas, con la diferencia que las vigas con pérdida de estribos por corrosión fue necesario intervenirlas desde la losa maciza de 40 cm de espesor y el detalle de las secciones reparadas de las vigas es igual al de las vigas originales de la edificación, pero con los recubrimientos incrementados tal y como se colocaron en las columnas [5]. En la Figura 5, se muestran las tres secciones típicas de vigas estructurales de la edificación. En el caso de vigas y juntas vigas-columnas con daño en el acero de refuerzo principal (Figura 6), fueron apuntaladas de forma tal para generar una deformada inversa a las causadas por las cargas verticales de trabajo, con la finalidad de que el nuevo refuerzo instalado traba-

je y quede esforzado en conjunto con el material del concreto viejo para el momento de desmontar el apuntalamiento.

En la Figura 7(a), se observa encofrada parte de la viga de entrepiso longitudinal, en su proceso de reparación. Adicionalmente, en la Figura 7(b), se muestra una vista del marco de la estructura de la planta reparada con su resistencia restablecida e incrementada.

Restitución de Resistencia en Elementos Estructurales

Con fines de garantizar la restauración de la resistencia dada la reparación de las vigas y las columnas, se calcularon las capacidades nominales teóricas a efectos combinados de fuerza axial y momento flector de los elementos tipo del marco resistente a cargas del edificio a través de los Diagramas de Interacción Carga Axial y Momento (Flexo-Compresión). Los diagramas de interacción nominales (sin aplicar factores de minoración de resistencia) fueron obtenidos apli-

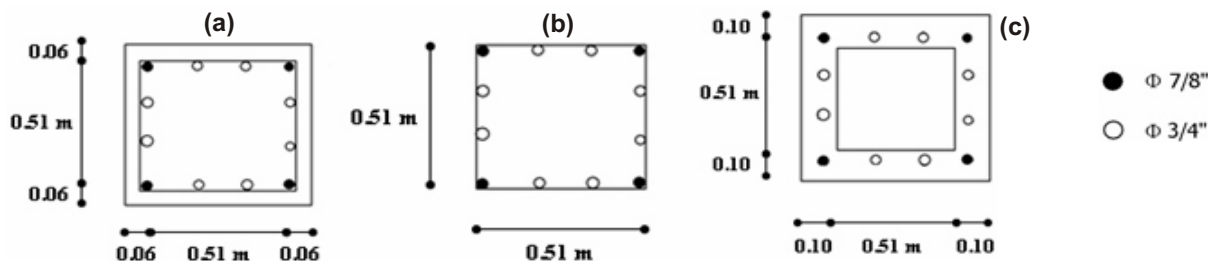


Figura 4. Configuración de las secciones transversales de todas las columnas. (a) Original. (b) Deterioradas sin recubrimiento. (c) Reparadas.

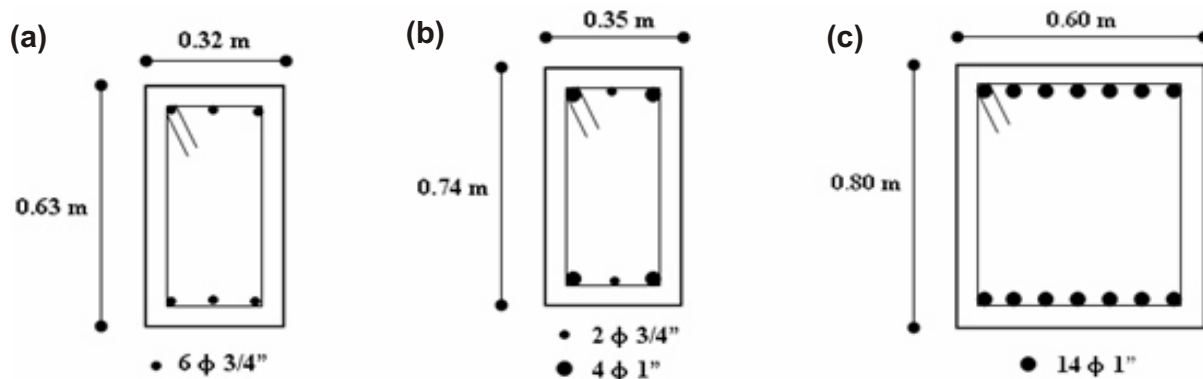


Figura 5. Configuración de secciones transversales de vigas estructurales sin deterioro. (a) Sección Tipo 1. (b) Sección Tipo 2. (c) Sección Tipo 3.

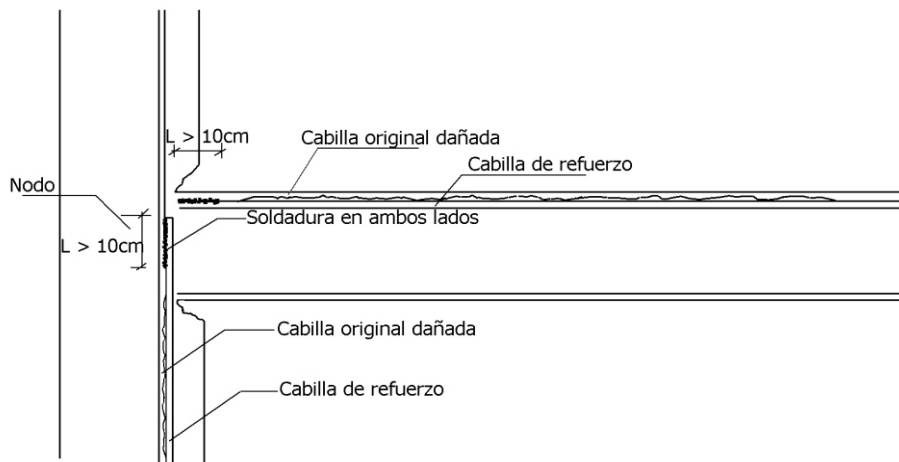


Figura 6. Detalle de colocación del nuevo acero de refuerzo en la reparación de juntas vigas-columnas.



Figura 7. (a) Marco en reparación. (b) Marco reparado.

cando equilibrio de fuerzas y momento respecto al eje central del área de la sección considerada, suponiendo una deformación límite pivote de rotura a compresión del concreto " $\epsilon_c = 0.003$ " con sucesivos patrones lineales de deformaciones en base a deformaciones en la fibra inferior de la última capa de acero, generando esfuerzos de rotura de compresión en el concreto (Bloque Equivalente de esfuerzos del ACI-318 [8]) y esfuerzos variables en las fibras de acero desde compresiones hasta tracciones que llegasen a la fluencia del acero y a la capacidad a tracción del elemento cuando la deformación del acero superara el valor de " $\epsilon_s > 0.05$ ".

En el caso de las columnas, se calculo el diagrama de interacción de la columna original (sin deterioro), y se comparo con los diagramas de interacción nominales de las secciones consi-

derando las columnas originales con deterioro y finalmente reparadas como sección hueca o cajón y cuadrada. En la Figura 8, se aprecia la pérdida de resistencia de la columna deteriorada, pero la resistencia nominal de la columna considerada como sección cajón (concreto del núcleo despreciado y concreto vaciado en el perímetro $f_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$) se aproxima al de la columna original cuando la carga axial es menor a la carga nominal balanceada, que según los resultados del análisis estructural del modelo de la estructura es el rango donde trabajan las columnas del marco estructural de la planta de vapor. Nótese, que considerar la sección reparada de las columnas como cajón representa un caso muy desfavorable de resistencia a flexo-compresión, situación que se demuestra al comparar su resistencia con el diagrama de interacción de las columnas reparadas como sección cuadrada.

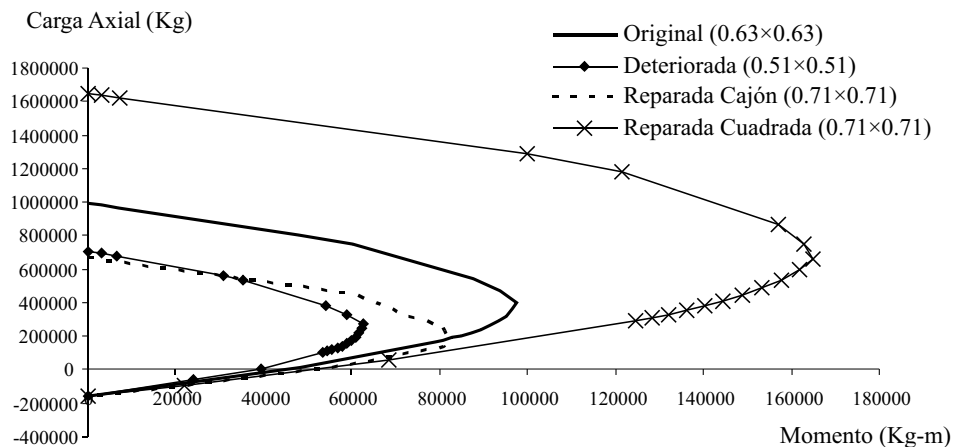


Figura 8. Diagramas de Interacción Nominales de Columnas: Original, Deterioradas y Reparadas.

Tabla 1
Momentos nominales resistentes de vigas tipo de la planta de vapor

Sección	Momentos Nominales (Kg-m)		
	Sección Original	Sección Deteriorada	Sección Reparada
Tipo 1 (0.32 × 0.63 m)	20000	17000	20000
Tipo 2 (0.35 × 0.74 m)	35800	30570	35800
Tipo 3 (0.60 × 0.80 m)	106000	90300	106000

En la Tabla 1, se muestran las capacidades nominales a flexión de las vigas según condición original, deteriorada y reparadas. En el cálculo de las capacidades nominales a flexión de las vigas deterioradas por corrosión en las barras inferiores, se consideró una pérdida del 15% de área de acero debido a la corrosión de las barras.

**Análisis Experimental.
Frecuencias Naturales de Vibración**

Con fines de calibrar y estimar los daños en el modelo teórico, se realizaron mediciones experimentales de las frecuencias naturales de vibración [9] del marco estructural de la planta antes de efectuar alguna reparación, con una máquina generadora de vibración diseñada y fabricada específicamente para el presente trabajo. La máquina fabricada posee una masa excéntrica de 22 Kg, la cual es posible hacer oscilar dentro de un rango de frecuencias entre 0.20 Hz hasta 1.00 Hz. La masa excéntrica es excitada por medio de un motor mecánico que se alimenta de una bombona con nitrógeno a una presión máxima de 2000 libras (Figura 9). Todos los dispositivos de



Figura 9. Foto de máquina generadora de vibración armónica en estructuras.

la máquina están constituidos con partes mecánicas y no eléctricas con fines de evitar posibilidades de incendios o explosiones.

La máquina de vibración fue fijada a la estructura en el nivel de techo en ocho puntos, mediante el uso de 8 pernos, y se colocó en los sitios indicados según Figura 10. Los movimientos en la estructura generados por la vibración, se registraron a través de un analizador de señales HP3560A, el cual procesa la vibración proveniente de sensores de velocidad y de aceleración, permitiendo calcular la transformada rápida de Fourier (FFT) y determinando sus respectivos espectros [9-11]. Este proceso se realizó a la estructura deteriorada (al inicio de los trabajos), y a la estructura reparada. Los valores de las frecuencias obtenidas se muestran en la Tabla 2.

Al calibrar las frecuencias calculadas a partir del modelo teórico del marco de la estructura, se logró obtener un porcentaje general de deterioro

de la estructura al inicio de los trabajos cercano al 13%.

Al medir las frecuencias naturales de vibración reales después de efectuar las reparaciones propuestas, se pudo garantizar y comprobar la restauración total de la rigidez y resistencia inicial del marco de la estructura dadas las reparaciones efectuadas.

Modelo Estructural Teórico

Se elaboró un modelo estructural matemático de la planta de vapor mediante elementos finitos, utilizando modelos de marcos espaciales en elementos estructurales (Elementos FRAME-MARCO: modelos para vigas y columnas) y modelos de elementos de placas (Elementos SHELL-PLACAS: modelos de placas de entrepiso y techo) con el programa de Elementos Finitos SAP-2000, con el propósito de ajustarlo a las frecuencias na-

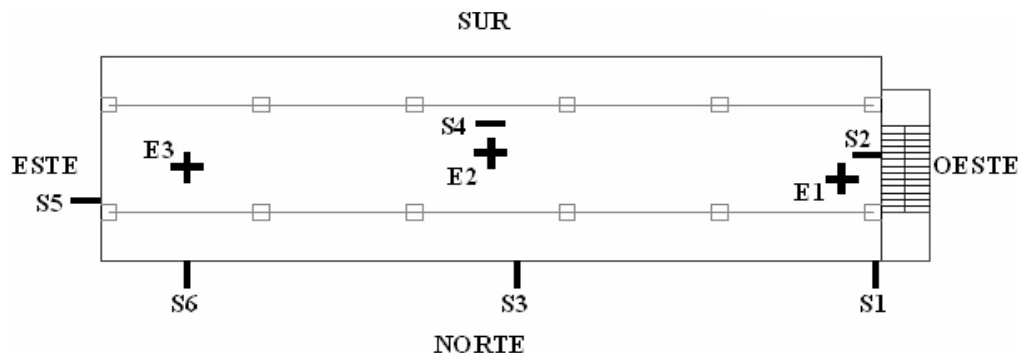


Figura 10. Vista de techo del marco de la estructura de la planta de vapor, sitios de colocación de la máquina de vibración (E1, E2 y E3), y ubicación de sensores (S1, S2, S3, S4, S5 y S6).

Tabla 2

Comparación entre las frecuencias de vibración, experimental y teórica, de la planta de vapor

Modo	Frecuencias (Hz)					Descripción del Modo
	Teórica Inicial (Edificio sin Daño)	Teórica Inicial (Edificio Dañado)	Experimental Inicial (Edificio Dañado)	Teórica Final (Edificio Reparado)	Experimental Final (Edificio Reparado)	
1	2.76	2.27	2.30	2.76	2.70	Longitudinal
2	2.93	2.47	2.50	2.92	3.00	Transversal
3	3.96	3.13	3.60	3.96	4.01	Torsional
4	11.12	9.80	9.20	11.12	10.10	Longitudinal
5	11.95	10.35	9.90	11.95	-	Transversal
6	12.63	10.60	10.8	12.63	-	Torsional

Tabla 3
Frecuencias calculadas a través del modelo matemático SAP-2000, para distintos porcentajes de daño estructural de la planta

Modo	Porcentaje de Daño (Hz)					
	0%	2%	5%	10%	20%	30%
1	2.76	2.74	2.67	2.35	2.09	1.74
2	2.93	2.91	2.77	2.61	2.14	1.77
3	3.96	3.70	3.46	3.22	2.86	2.50
4	11.12	11.03	10.91	10.21	9.17	7.51
5	11.95	11.94	11.80	10.68	9.58	7.87
6	12.63	12.30	11.95	10.87	9.77	8.23

turales de vibración medidas en la estructura luego de su reparación [9, 12], para luego a partir de la medición de las frecuencias pertenecientes a la estructura dañada, reproducir teóricamente el daño inicial existente en la planta de vapor.

Inicialmente, se calibró el modelo de la estructura reparada a partir de sus resultados de vibración dinámica experimental y de su modelo teórico con la geometría inicial sin daño, haciendo coincidir sus frecuencias naturales. Luego, a partir de los resultados anteriores, se calibró el modelo teórico con deterioro disminuyendo las propiedades geométricas de los elementos dañados de la estructura en forma iterativa hasta hacer coincidir las frecuencias naturales teóricas y las frecuencias medidas experimentalmente con daño inicial de la estructura (Tablas 2 y 3).

Para calcular el daño se asumieron varios porcentajes de deterioro en las secciones transversales de los elementos estructurales [13], 2%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, de tal modo que si el porcentaje de daño es del 10%, por ejemplo, el factor multiplicador " f " de las dimensiones de la sección deteriorada que se muestra en la Figura 11, se calcula como:

$$f = \left(1 - \frac{\text{daño}(\%)}{100\%}\right) = \left(1 - \frac{10\%}{100\%}\right) = 0.90$$

$$\text{Área} = h \cdot b$$

$$\text{Área Dañada} = h \cdot 0.90 \cdot b \cdot 0.90 = h \cdot b \cdot 0.90^2$$

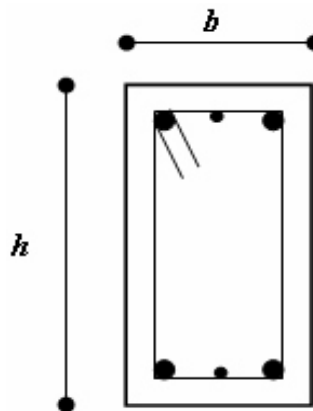


Figura 11. Sección ejemplo para el cálculo del deterioro.

$$\text{Área Dañada} = \text{Área} \cdot f^2$$

Por analogía se obtiene la Inercia Dañada como:

$$\text{Inercia Dañada} = \text{Inercia} \cdot f^4$$

Al realizar varios análisis del modelo estructural con el programa SAP-2000 para cada caso de daño considerado, se pudo determinar las frecuencias naturales de vibración correspondientes a cada uno de los casos y se pudo obtener aproximadamente el nivel de daño del marco estructural antes de realizar la rehabilitación y se encontraba entre el 10% y el 20%. Las propiedades de los elementos del modelo se calcularon en base a un daño promedio del 13% (Tabla 3).

Análisis de Resultados

Los resultados de la medición de las frecuencias naturales indican, que el procedimiento propuesto para la reparación del marco estructural de la planta de vapor, logra restituir la rigidez original de la estructura (Tabla 2). Sin embargo se puede notar que las frecuencias naturales de la estructura calculadas antes y después de la reparación, no se modifican significativamente, a pesar del gran deterioro inicial existente en la misma. La reparación propuesta para las columnas logra recuperar su resistencia original, en su rango de trabajo habitual de carga que corresponde a una carga axial inferior a la carga balanceada (Figura 8), y la propuesta para la reparación de las vigas logra recuperar su resistencia nominal a flexión (Tabla 1) y a cortante.

La maquina diseñada en este trabajo, para transmitir vibración armónica a la estructura, logra hacer vibrar la estructura en sus frecuencias naturales de vibración. Sin embargo, las frecuencias de trabajo de esta maquina no permitieron obtener experimentalmente en forma directa las frecuencias superiores al tercer modo para el marco estructural de la planta de vapor.

Conclusiones

1. Las frecuencias naturales de vibración calculadas experimentalmente, antes y después de efectuar la reparación del marco estructural de la planta de vapor, presentaron una variación máxima aproximada de 16% y este porcentaje corresponde a un daño promedio general del marco estructural aproximado al 13%.

2. El procedimiento de reparación propuesto en este trabajo para las vigas y columnas del marco estructural de la planta de vapor, logra recuperar su resistencia original a flexión y flexo compresión.

3. El procedimiento experimental dinámico realizado en este trabajo, representa un método confiable para determinar el deterioro o daño del marco de una estructura, siempre y cuando el daño sea apreciable visualmente, y es una alternativa para determinar si el trabajo realizado para restaurar una estructura logra sus objetivos.

Referencias Bibliográficas

1. O. Rincón, R. Fernández, M. Romero, D. Contreras, C. Vezga, O. Morón, M. Sánchez, "PGRU Bridge: Based on an electrochemical diagnosis". Repair and rehabilitation of reinforced concrete structures: the state of the art, ASCE, Maracaibo - Venezuela, 2001, 60 - 81.
2. T. J. Wipf, F. W. Klaiber, E. J. Raker. "Evaluation of Repair Materials for Use in Patching Damaged Concrete - Effective Structural Concrete Repair". Final Report, Iowa Department of Transportation. USA, 2004. <http://publications.iowa.gov/archive/00002490/>
3. Myles A. (Tony) Muray. "Reclamation of a Mailing Parking Garage". Restruction Corporation. <http://www.restruction.com/>
4. Timothy V. Gumina and Michael R. Wyman. "Repair Solutions to Structural Problems". Repair Series: TDS-4. Restruction Corporation. <http://www.restruction.com/>
5. Tarek Alkhrdaji, Jay Thomas. "Structural Repair and Strengthening Techniques for Concrete Facilities", 2004. http://www.structural.net/News/Media_coverage/media_SE_strengthening.html
6. O. Rincón, D. Contreras, M. Sánchez, J. Padilla, C. Lasarte, A. Sarcos, H. Garcia, A. Navarro. "Inspection and Repair of Lake Maracaibo Bridge suspension cables", Materials Performance, NACE, USA, 2001.
7. Carlos Prato, Carlos Gerbando, Marcelo Ceballos. "Case Studies of failure, Damage Assessment, and Repair of Multispan Bridges in Argentina". Rehabilitating and Repairing the Building and Bridges of the Americas. Hemispheric Workshop on Future Direction. ASCE, Córdoba - Argentina, 2001, 155-170.
8. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318r-05) Reported by ACI Committee 318 (Pág. 119-123).
9. D. Muria Vila, R. Gomez, C. King. "Dynamic structural properties of cable-stalled Tampico Bridge". ASCE paper N° 26360. USA, 1991, 3396-3416.

10. Antonio Sarcos, Hildrun Garcia, "Structural Study of Piers 30 and 33 bearing saddles, Maracaibo bridges Venezuela". Structural Engineering International IBASE, Zurich - Switerland, 2002, 48-51.
11. Antonio Sarcos, Lizbelangel Gordillo, Igor Rodríguez, Alexis Segovia, Roberto Angulo, Fernando Urdaneta. "Evaluating the Dynamic Behavior of Pump Stations in Lake Maracaibo", Revista Técnica de Ingeniería Universidad del Zulia, Maracaibo-Venezuela, 2000.
12. Antonio Sarcos, Hildrun García. "Theoretical And Experimental Analysis Of The Central Piles of the General Rafael Urdaneta", Revista Técnica de Ingeniería Universidad del Zulia, Maracaibo-Venezuela, 1996.
13. Sebastián Delgado, Antonio Sarcos, Julio Flórez, Ricardo Picón, María Marante. "Daño Estructural en Pórticos de Concreto Armado diseñados según la Norma Sísmica". Revista Internacional de Desastres Naturales Accidentes e Infraestructura Civil, Puerto Rico, 2002, 3-11.

Recibido el 12 de Junio de 2006

En forma revisada el 26 de Febrero de 2007