

EVALUACION DE ESTRUCTURAS DE MUROS RESISTENTES

(ASSESSMENT OF MASONRY STRUCTURES)

Profesor Dr. Bohdan Lewicki, Dr. H. C.
Instituto de Investigaciones sobre la Construcción/Varsovia/Polonia

Fecha de recepción: 20-XII-88
871-4

RESUMEN

El autor del presente artículo, una de las máximas autoridades mundiales en el campo de la ingeniería estructural, señala la importancia de la intuición como componente de la capacidad creadora del ingeniero y su necesidad en el proceso de evaluación de las estructuras.

En el artículo se dan también unas indicaciones referentes a principios generales sobre fiabilidad de las estructuras de muros resistentes.

SUMMARY

The author of this article, who is one of the main international personalities in the field of the structural engineering, point out the importance of intuition as a component of the creative capacity of the engineer, as well as its necessity within de evaluation process of structures.

The article includes also some indications about the general principles on reliability of masonry structures.

1. Generalidades

El término "assessment" puede explicarse como la evaluación de las condiciones habituales de servicio y seguridad de estructuras existentes. El experto, para realizar esta tarea, necesita unos conocimientos adecuados de ingeniería así como experiencia e intuición.

La intuición es la componente de capacidad creadora de un ingeniero y tiene gran importancia en todas sus actividades. Habría que resaltar especialmente la necesidad de intuición en el proceso de evaluación, ya que la información de que dispone el experto es incompleta e implica la necesidad de formular algunas hipótesis para completar los elementos de juicio.

La intuición aumenta con la experiencia y la experiencia a su vez resulta más eficaz, a la hora de evaluar, si se apoya en una buena teoría y ciencia de las estructuras. Por consiguiente, los tres elementos que constituyen la capacidad del experto son inseparables.

Las razones que motivan una evaluación se pueden dividir en tres clases:

— *Daños estructurales* debidos a terremoto, incen-

dios, impacto, explosión, asientos, inundaciones, etcétera.

— Posible *reducción de vida útil* debida a corrosión de armaduras y/o mampostería, hielo, deshielo, fatiga, daños mecánicos, etc., debido a retracción o efectos térmicos, etcétera.

— *Cambio de uso.*

Al término de la evaluación pueden surgir las siguientes sugerencias:

— Demolición de la estructura en cuestión, o

— Posible utilización de la estructura existente sin ninguna modificación (utilización plena o limitada) después de alguna modificación de carácter no estructural o estructural en este último caso, previa reparación o refuerzo.

El término "reparación" puede entenderse como restauración de las propiedades mecánicas iniciales de la estructura y el término "refuerzo" como establecimiento de propiedades mecánicas superiores a las iniciales.

Toda intervención para restaurar la aptitud de uso de la estructura requiere un nuevo proyecto. El nuevo proyecto para la estructura existente se basa en los datos obtenidos durante el procedimiento de evaluación. Las nuevas partes de la estructura se proyectan de conformidad con las recomendaciones usuales de diseño que se recogen en las Especificaciones correspondientes. La necesidad de formular hipótesis y el gran papel que desempeña la intuición confieren un carácter especial a los procedimientos de evaluación y nuevo proyecto. Los principios generales del análisis estructural y de las conclusiones son los mismos que para el diseño normal de estructuras nuevas.

El establecimiento de los parámetros de diseño requeridos para el análisis estructural así como de los valores numéricos de los coeficientes de seguridad parcial puede sin embargo ser diferente.

Los comentarios sobre la evaluación de estructuras de muros resistentes que figuran en este artículo forman parte de las Recomendaciones Internacionales para el Proyecto y Ejecución de Estructuras de Obras de Fábrica armadas y no armadas [1].

En la norma ISO 2394 "Principios Generales sobre fiabilidad de estructuras" [2], se dan unas indicaciones generales sobre el análisis estructural ampliadas con unos comentarios del Comité Mixto para Seguridad Estructural (JCSS), publicado en el Boletín de información CEB n.º 191 [3].

Estas instrucciones generales tratan asimismo del procedimiento de evaluación.

2. Procedimiento de evaluación

En la figura 1 se muestra el organigrama del procedimiento de evaluación.

En caso de daños estructurales se necesita la inspección in situ con el fin de evaluar la posibilidad de seguir utilizando la estructura dañada o determinar si su estado es tan grave que puede constituir una amenaza para la vida humana y por consiguiente tiene que derribarse. También puede tratarse de reducción de vida útil, aunque asimismo puede haber casos de este tipo en los que la evaluación comienza con la recopilación de documentos e información y seguidamente se realiza la visita al lugar para evaluar las propiedades mecánicas de la estructura y para efectuar el análisis del modelo estructural. La segunda forma es la habitual en caso de que se trate de evaluaciones por cambio de uso de la estructura.

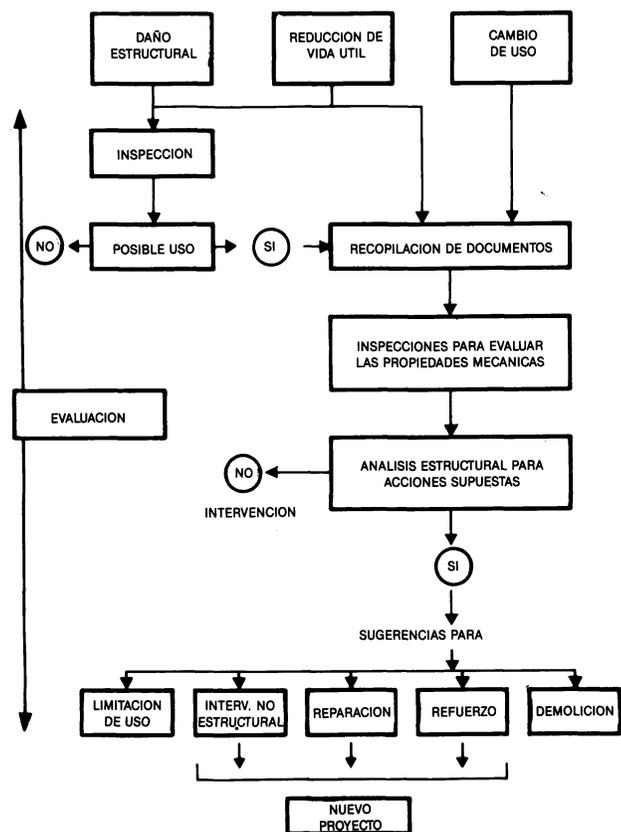


Fig. 1

El examen crítico de los documentos e información recogidos, relativos, entre otros a la aplicación prevista así como a las posibles acciones a las que estará probablemente expuesta la estructura y la evaluación in situ de las propiedades mecánicas con el análisis del modelo estructural, constituyen la parte fundamental de la evaluación, para lo cual el experto deberá reunir la cualificación necesaria.

El examen de las causas que han originado el daño observado así como su supuesto mecanismo y la influencia sobre la vida útil de la estructura (durabilidad) también forma parte del procedimiento de evaluación.

Es necesario realizar un estudio adecuado de la estructura prestando especial atención a las zonas y secciones transversales críticas desde el punto de vista de la seguridad.

Después debe realizarse el análisis estructural, a partir de las propiedades mecánicas evaluadas así como del modelo de estructura y de toda la información que se ha recogido. Pueden utilizarse los cálculos del proyecto existente así como los planos pero sin prescindir de un examen crítico y de una comparación con las observaciones realizadas in situ.

El análisis estructural y las observaciones in situ permiten decidir si hace falta realizar alguna acción en re-

lación con la aplicación prevista para la estructura y en caso afirmativo, cuál sería la acción necesaria:

- intervención no estructural,
- reparación, o
- refuerzo.

En casos extremos, cuando la reparación o el refuerzo resultan demasiado caros o pueden entorpecer la utilización de la estructura, puede sugerirse la demolición de la misma.

El nuevo proyecto incluye tres clases de intervención: intervención no estructural (por ejemplo en caso de daños mínimos por agresión química), reparación y refuerzo.

3. Evaluación de datos para el análisis estructural

La desigualdad básica para evaluar la seguridad de las estructuras existentes puede expresarse —según ISO 2394 [2]— de la forma siguiente:

$$\gamma_n \cdot \gamma_{sd} S (S_k \cdot \gamma_f) \leq \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R \left(\frac{f_k}{\gamma_m}, a_d \right) \quad (1)$$

donde:

- γ_n - coeficiente de seguridad por posibilidad de fallo y sensibilidad del sistema estructural a la rotura frágil,
- γ_{sd}, γ_{Rd} - coeficiente de seguridad por incertidumbres del modelo utilizado para el cálculo de R (resistencia) o S (respuesta estructural) respectivamente,
- f_k - resistencia característica de la obra de fábrica o armadura,
- γ_f, γ_m - coeficientes de seguridad parcial para las acciones (γ_f) y para resistencia del material (γ_m), según se define en las recomendaciones CIB [1], pero en la medida en que γ_m está involucrada y no es necesariamente del mismo valor,
- a_d - excentricidad geométrica debida a la posibilidad de desviaciones desfavorables de parámetros geométricos respecto de los valores característicos.

La inclusión de otros coeficientes de seguridad individual en la desigualdad (1), aparte de γ_f y γ_m , es de im-

portancia secundaria y depende de lo que el experto considere conveniente.

γ_n puede incorporarse a γ_f ó γ_m ; γ_{sd} puede combinarse con γ_f , que será entonces γ_f y γ_{Rd} con γ_m , que se convierte en γ_m . Las desviaciones geométricas, expresadas por a_d , pueden quedar cubiertas también con γ_m , aunque esta última no parece ser adecuado [2].

Si el coeficiente de seguridad global se sustituye en nuestras Especificaciones por coeficientes de seguridad parcial, esto se realiza principalmente para facilitar la diferenciación de las exigencias de seguridad según las condiciones y situación particulares. Esto también constituye un elemento de juicio para el experto.

El producto $\gamma_f \times \gamma_m$ puede entenderse como un coeficiente de seguridad global tradicional relativo a valores de carga representativos (prácticamente idénticos a los valores que figuran en las antiguas especificaciones) y a una resistencia característica del material (inferior a la resistencia media del material —en caso de obras de fábrica—, en un 25-30 por ciento).

Los expertos con mucha práctica y experiencia pueden seguir trabajando con el coeficiente global de seguridad, corregido de modo subjetivo de acuerdo con la situación examinada in situ. Sin embargo, en este caso sería aconsejable comprobar la diferencia entre el coeficiente global de seguridad adoptado y el producto $\gamma_f \times \gamma_m$.

De acuerdo con la explicación dada anteriormente para γ_n , este coeficiente se debe entender descompuesto en dos factores: γ_m debido a la posibilidad de fallo, y γ_{n2} debido a la sensibilidad de la estructura a rotura frágil.

JCSS no es partidaria de tener en cuenta las posibilidades de fallo de resistencia con la introducción del coeficiente γ_m y prefiere ejercer un mejor control de calidad en todas las fases de la ejecución, si se requiere un mayor nivel de fiabilidad para estructuras más importantes, así como tener en cuenta acciones excepcionales (accidentales) que pueden surgir durante la vida útil esperada de la estructura.

La opinión de JCSS es ciertamente correcta mientras se trate de construcciones nuevas. En caso de evaluación de estructuras existentes en las que no hay oportunidad de realizar un control de calidad durante el proceso de ejecución y por consiguiente de hacer uso de γ_n para considerar la importancia de la estructura, la introducción del factor γ_m parece si embargo justificada.

Normalmente, para tener en cuenta el grado de importancia de la estructura se recomienda $\gamma_m \leq 1,2$.

La sensibilidad del sistema estructural a un incremento de cargas y el modo de rotura frágil o no —con un aviso previo por desarrollo de grietas o sin dicho aviso— podrá ser representada por γ_{n2} (según se adopta en las recomendaciones CIB [1] con $\gamma_{n2} = \gamma_n$, que sirve para modificar γ_m o también por γ_{sd} .

En caso de muros resistentes de cierta longitud existe la posibilidad de una redistribución local de las tensiones internas y por consiguiente puede adoptarse $\gamma_{n2} < 1,0$ por ejemplo $\gamma_{n2} = 0,9$. Para columnas individuales no armadas se recomienda mejor γ_{n2} aproximadamente igual 1,2.

Los modelos para análisis de estructuras existentes se suelen elegir en el lado de la seguridad y por consiguiente puede suponerse $\gamma_{sd} = 1$. En situaciones de duda sin embargo se puede adoptar $\gamma_{sd} > 1$ si la transmisión de cargas no es lo suficientemente clara debido a una reconstrucción anterior. Esto se aplica a modelos hiperestáticos para interacción entre muros de carga y forjados sensible a las características de rigidez de las juntas.

Para los valores R calculados de acuerdo con las fórmulas que se dan en la Especificación, debe adoptarse $\gamma_{rd} = 1$.

Los valores de f_m y γ_m que aparecen en dichas fórmulas se discuten más adelante. En el caso de valores R establecidos sobre la base de pruebas realizadas ad hoc hay que suponer $\gamma_{rd} > 1$, igual a la relación habitual entre R_m (valor medio de los resultados del test) y R_d (el valor especificado del proyecto).

Normalmente se suele adoptar $R_m : R_d \approx 1,2$ para obras de fábrica sometidas a compresión.

Los valores de la resistencia característica f_k se determinan de modo que, en opinión del experto, la probabilidad de obtener un valor más desfavorable en la estructura no sea superior aproximadamente a un 5%. Esta definición de f_k , tomada del Eurocode 7 sobre cimentaciones [4], difiere de la clásica, que se da en las recomendaciones CIB [1], dice que "el valor característico es aquél por debajo del cual no se producen más del 5% de los resultados de la prueba".

El experto no está en condiciones —por lo general— de realizar un número suficiente de pruebas para determinar f_k de forma normal. Particularmente en caso de muros resistentes resulta difícilmente posible recoger el número adecuado de muestras. A pesar de todos los esfuerzos para desarrollar métodos objetivos para probar las obras de fábrica in situ, mediante ensayos destructivos o no destructivos, algunos de ellos muy interesantes, como por ejemplo los basados en pruebas de carga la forma habitual de evaluar la resis-

tencia de la mampostería in situ, sigue siendo la que consiste en descubrir superficialmente los ladrillos y el mortero, y algunas veces golpearlos con el martillo, para evaluar seguidamente la resistencia de la obra de fábrica a partir de la resistencia estimada del ladrillo y el mortero y el examen visual de los ladrillos puestos en obra. Se tiene también en cuenta el número de ladrillos defectuosos y las de posibles grietas en la obra de fábrica.

Se tiene en cuenta también la posible diferencia entre los ladrillos superficiales del muro y los del interior.

En este sentido es necesario que el experto realice una investigación adecuada.

La información obtenida sobre la supuesta calidad del ladrillo y del mortero, sobre el proceso de ejecución y sobre las posibles modificaciones y reconstrucción de la estructura de obra de fábrica examinada, resultan siempre de gran utilidad para el experto.

Algunas veces puede ser útil realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos. En muy contadas ocasiones se conseguirá sin embargo determinar con ello directamente el valor de f_{mk} ya que resulta decisiva la evaluación del experto para poder saber si los datos obtenidos eran suficientemente representativos.

En general, debido a la considerable indeterminación en la evaluación del valor f_{mk} a partir de la inspección visual principalmente, y de la información recogida, este valor suele ser una estimación moderada y presenta el carácter de "estimación máximo verosímil".

El factor γ_m según se define en [1] puede considerarse como el producto de 4 factores γ_{mi}^* , que tiene en cuenta:

- γ_{m1} - la posibilidad de desviaciones desfavorables de la resistencia de la obra de fábrica respecto del valor característico.
- γ_{m2} - la posibilidad de diferencias entre la resistencia real de la obra de fábrica en la estructura respecto de la obtenida en las probetas.
- γ_{m3} - la posible debilidad local de la obra de fábrica derivada del proceso de ejecución (relleno de juntas, unidades defectuosas).
- γ_{m4} - la posible diferencia de resistencia de la mampostería derivada de la falta de precisión dimensional y geométrica.

(*) ISO [2], permite esta primera aproximación.

Queda aún abierta la cuestión de saber en qué medida la situación en una estructura existente difiere de los supuestos adoptados para el proyecto. En mi opinión, la magnitud de las incertidumbres en el proyecto de una estructura es considerable también y por esta razón en la mayoría de los casos habría que adoptar valores γ_{mi} similares para las estructuras proyectadas y para las evaluadas con la excepción de γ_{m2} que cubre, en caso de evaluación, la incertidumbre entre f_{mk} establecida en virtud del examen realizado, y la resistencia de la mampostería en otros lugares que no se pudieron examinar. En edificios antiguos, reconstruidos en el pasado, sin ninguna prueba fehaciente, la incertidumbre acerca de la resistencia real de la mampostería en partes no examinadas de la estructura puede ser considerable. El valor γ_m que incluye la rotura frágil para γ_n se define en [1] y varía entre 2,0 y 3,5.

No existe ninguna información en [1] acerca de cómo desglosar dichos valores en sus factores individuales. Grosso modo podría suponerse —en mi opinión— pa-

ra condiciones medias (*) con $\gamma_m = 2,5$

$$\begin{array}{lll} \gamma_n = 1,2; & \gamma_{m1} = 1,5; & \gamma_{m2} = 1,2 \\ & \gamma_{m3} = 1,1; & \gamma_{m4} = 1,05 \end{array}$$

En caso de situaciones poco claras como por ejemplo en edificios antiguos, se sugiere adoptar γ_{m2} bastante mayor que para edificios recientemente construidos, por ejemplo $\gamma_{m2} = 1,3$ a $1,5$ en lugar de $\gamma_{m2} = 1,2$, lo cual nos daría $\gamma_n \times \gamma_m = 2,7 + 3,1$.

El último elemento de incertidumbre en la desigualdad [1] a_d es la suma

$$a_k + \Delta a = a_d$$

donde a_k - excentricidad geométrica nominal.

Δa - excentricidad adicional positiva o negativa, que expresa la incertidumbre de la geometría real.

En caso de muros de obra de fábrica Δa se refiere a la excentricidad accidental e_a y a una posible reducción de la sección transversal efectiva del elemento de obra de fábrica en su zona crítica.

La excentricidad accidental puede ser debida a [1]:

- Dispersión en el muro debido a unidades con propiedades diferentes.
- Dispersión debida a falta de horizontalidad o planitud en la construcción del muro.
- Falta de verticalidad entre pisos.

Debe prestarse la atención suficiente a estas posibles razones de e_a durante la inspección in situ. Si la calidad de ejecución de los edificios examinados corresponde al nivel normalmente aceptado, se puede suponer e_a para comprobación de seguridad, tal como se da en los reglamentos nacionales. Si no ocurre así, habría que adoptar un valor de e_a superior.

La posible reducción de la sección transversal efectiva del muro se tiene en cuenta por [1], a través de una componente adecuada del valor γ_m , según se ha mencionado anteriormente.

Para las columnas y muros de superficie plana $A \leq 0,2$ m² se recomienda dividir γ_m por $(0,70 + 1,5 A)$, A en m². Este factor multiplicador puede no ser siempre correcto para la evaluación de una estructura existente.

Para los casos en los que las desviaciones geométricas son de importancia fundamental para la seguridad estructural, puede resultar más adecuada una evaluación de Δa conforme con la situación examinada.

REFERENCIAS

- [1] Recomendaciones internacionales CIB para proyecto y ejecución de estructuras de obra de fábrica armadas y sin armar - publicación CIB 58.
- [2] Norma ISO 2394/1986 - Principios generales sobre fiabilidad de estructuras.
- [3] JCSS - principios generales sobre fiabilidad de estructuras — un comentario a ISO 2394 — Boletín de información CEB, n.º 191, julio de 1988.
- [4] Eurocode 7: Cimientos - borrador del modelo de marzo de 1986.

(*) Categoría B de control de producción (calidad de materiales garantizada por el fabricante solamente, sin supervisión adicional por parte de una autoridad independiente) y del control de ejecución (control eventual por el proyectista o su representante).

* * *