
ANEXO C

Estados de daño

ESTADOS DE DAÑO

Propuesta de la escala de daño por la EERI

La EERI (Earthquake Engineering Research Institute, con sede en Oakland, California), propone una guía para evaluar el daño que pueden sufrir diferentes clases de edificios después de un terremoto. Para la EERI el daño se debe documentar de una manera detallada para todos los edificios, incluyendo edificios de un mismo tipo y tamaño ya que estos no necesariamente se comportan de la misma forma ante un terremoto. Propone además, realizar un levantamiento en donde se incluyan los edificios dañados así como los no dañados (EERI, 1996). Los niveles de daño propuestos en esta guía se pueden ver en la Tabla C-1, junto con el porcentaje de daño y la definición de cada nivel.

| Nivel | Estado de daño (%) | Definición |
|----------|--------------------|---|
| Ninguno | 0 | Sin daño. |
| Ligero | 0 – 5 | Daño no estructural aislado; costo de reparación menor al 5% del valor del mercado del edificio. |
| Moderado | 5 – 25 | Daño considerable no estructural y daño estructural ligero; costo de reparación menor al 25% del valor del mercado. |
| Severo | 25 – 50 | Daño estructural considerable y daño no estructural excesivo; costo de reparación menor al 50% del valor del mercado. |
| Total | 50 – 100 | Más económico demoler que reparar. |
| Colapso | >100 | Colapso de la estructura. |

Tabla C-1. Definición de daño de acuerdo al EERI.

Escalas de daño estudiadas por la NHRC

La NHRC (Natural Hazards Research Centre, con sede en la Universidad de Macquarie, Australia) ha realizado una recopilación de algunas de las escalas de daño más completas para la evaluación del daño en edificios, provocados por riesgos naturales como son los tornados, ciclones, deslizamientos de tierra, incendios, terremotos, etc. Dentro de este trabajo, se tienen las escalas propuestas Whitman *et al*, Hirschberg *et al* y Rojahn, y la propuesta por la NHCR dividida en 5 niveles, en donde trata de unificar las escalas de estos investigadores. Uno de los levantamiento del estado de daño de las estructuras más completo es el propuesto por Whitman et al 1973, el cual esta basado en el estudio de edificios de 5 o más niveles dañados por el sismo de San Fernando de 1971. Cada estado de daño se identifico por una descripción subjetiva del daño físico y una relación objetiva del costo de reparación al costo de reposición (Tabla C-2).

| Estado de daño | Daño estructural | Daño no estructural | Relación de daño (%) | Descripción del estado de daño |
|----------------|--------------------|---------------------|----------------------|--|
| 0 | Ninguno | Ninguno | 0.00 – 0.05 | Sin daño |
| 1 | Ninguno | Menor | 0.05 – 0.30 | Daño no estructural menor –grietas en algunos muros y tabique agrietados; daños irrelevantes en componentes mecánicos y eléctricos– |
| 2 | Ninguno | Localizado | 0.30 – 1.25 | Daño no estructural localizado –agrietamiento más importante (pero todavía no generalizado); posible daño en elevadores y/o otros componentes mecánicos y eléctricos– |
| 3 | No apreciable | Generalizado | 1.25 – 3.50 | Daño no estructural generalizado –posible agrietamiento en algunas vigas y columnas, aunque no apreciables– |
| 4 | Menor | Sustancial | 3.50 – 7.50 | Daño estructural menor –agrietamiento obvio o cedencia de algunos elementos estructurales; daño sustancial no estructural con grietas generalizadas– |
| 5 | Substancial | Extensivo | 7.50 – 20.0 | Daño estructural sustancial en donde se requiere reparar o remplazar algunos elementos estructurales; asociado a un daño importante en elementos no estructurales– |
| 6 | Mayor | Cercano al total | 20.0 – 65.0 | Daño estructural mayor, en donde se requiere reparar o remplazar muchos elementos estructurales; el daño no estructural asociado requiere reparar la mayor parte del interior; el edificio se desaloja durante la reparación |
| 7 | Declarado en ruina | | 100 | Edificio declarado en ruina |
| 8 | Colapso | | 100 | Colapso total |

Tabla C-2. Definición de daño de acuerdo a Whitman, 1973 (NHRC).

En un trabajo posterior Whitman *et al* (1975), redujo la escala anterior a 6 estados de daño e incorporó una relación de daño central, junto con una abreviación para cada estado de daño (Tabla C-3).

| Estado de daño | Abreviación | Relación de daño Central (%) |
|----------------|-------------|------------------------------|
| Ninguno | 0 | 0 |
| Ligero | L | 0.3 |
| Moderado | M | 5 |
| Fuerte | H | 30 |
| Total | T | 100 |
| Colapso | C | 100 |

Tabla C-3. Definición de daño de acuerdo a Whitman, 1975 (NHRC).

Mientras que Hirschberg *et al*, en 1978 publica una versión ligeramente diferente a la anterior (Tabla C-4).

| Estado de daño | Daño (%) | Factor de daño promedio (%) | Condición estructural |
|----------------|------------|-----------------------------|--|
| Ninguno | 0 – 0.5 | 0.25 | Sin daño |
| Ligero | 0.5 – 1.25 | 0.90 | Grietas en las baldosas del techo o tabiques. |
| Moderado | 1.25 – 7.5 | 4.5 | Muchos tabiques agrietados o baldosas desprendidas; algunos elementos pueden llegar a ceder. |
| Fuerte | 7.5 – 65 | 32 | Daño significativo en elementos estructurales; Daño importante en la azotea. |
| Muy severo | 65 – 100 | 82.5 | Daño mayor; la estructura permanece en pie pero se caerá |
| Colapso | 100 | 100 | Estructuras que no permanecen en pie. |

Tabla C-4. Definición de daño de acuerdo a Hirschberg (NHRC).

En cuanto a la propuesta de Rojahn, es una escala ligeramente similar a las anteriores, dividida en 7 niveles basada en la opinión de expertos (Tabla C-5).

| Estado de daño | Factor de Daño (%) | Factor de Daño promedio |
|----------------|--------------------|-------------------------|
| Ninguno | 0 | 0 |
| Insignificante | 0 – 1 | 0.5 |
| Ligero | 1 – 10 | 5 |
| Moderado | 10 – 30 | 20 |
| Fuerte | 30 – 60 | 45 |
| Mayor | 60 – 100 | 80 |
| Destructivo | 100 | 100 |

Tabla C-5. Definición de daño de acuerdo a Rojahn (NHRC).

Finalmente, la NHRC propone una escala de daño construida de tal manera que el daño de los edificios de varias localidades, ocasionados por diferentes riesgos naturales puedan ser comparados y sumados. El índice de daño se baso en edificios dañados o destruidos, sin incluir los elementos no estructurales, así como el daño a autos, maquinaria, aeronaves o cultivos (Tabla C-6):

| Descripción | Rango (%) | Valor de daño central (%) |
|-------------|-----------|---------------------------|
| Ligero | 1 – 5 | 2 |
| Moderado | 5 – 20 | 10 |
| Fuerte | 20 – 60 | 40 |
| Severo | 60 – 90 | 75 |
| Colapso | 90 - 100 | 100 |

Tabla C-6. Definición de daño de acuerdo a la NHRC.

Propuesta del estado de daño del ATC

El ATC 13 (Applied Technology Council) permite estimar el porcentaje del daño físico causado por un sismo para la mayoría de las construcciones consideradas en este trabajo, expresados en términos de factor de daño vs la escala de intensidad de Mercalli Modificada. Esta propuesta fue desarrollada a través de un proceso de cuestionarios múltiples involucrando agencias privadas y 58 expertos en ingeniería sísmica. El objetivo de este proceso fue desarrollar matrices de probabilidad de daño, con las cuales es posible estimar la pérdida en dólares esperados por un sismo en cada construcción, multiplicando los factores de daño para las estructuras y su contenido por el valor de remplazo estimado para cada una de ellas. La Tabla C-7, muestra el estado de daño y su correspondiente factor de daño definido en este proyecto.

| Estado de Daño | Factor de Daño (%) | Factor Central (%) |
|----------------|--------------------|--------------------|
| Ninguno | 0 | 0 |
| Suave | 0 – 1 | 0.5 |
| Ligero | 1 – 10 | 5 |
| Moderado | 10 – 30 | 20 |
| Fuert | 30 – 60 | 45 |
| Mayor | 60 – 100 | 80 |
| Destrucción | 100 | 100 |

Tabla C-7. Definición de daño del ATC-13.

Escala de daño utilizada en el trabajo de Yépez (1996)

El procedimiento para evaluar el índice de daño global de las estructuras se adaptó del trabajo propuesto por Braga *et al.* El nivel de daño de los elementos del sistema resistente vertical se tomó como el índice de daño global de la estructura. De esta manera se califican el grado de daño que sufre la estructura debido a un terremoto de determinadas características en la escala A – F y se le asigna un valor numérico como se muestra en la Tabla C-8.

| Grado de Daño | Índice de Daño Global Adoptado |
|---------------|--------------------------------|
| A | 0 % |
| B | 10 % |
| C | 25 % |
| D | 50 % |
| E | 75 % |
| F | 100 % |

Tabla C-8. Definición de daño de la Yépez (1996), para edificios de mampostería no reforzada.

Escala de evaluación del grado de daño propuesta por Benedetti *et al*

En este trabajo se considera que los estados de daño generalmente se realizan por medio de una medida monetaria (por ejemplo, el costo de refuerzo) o atribuyendo un valor numérico (de acuerdo a una escala disponible) a cada elemento esencial del edificio (como son losas, muros, azotea, cimentación o detalles de la construcción). La suma del daño de cada elemento, permitirá evaluar un grado de daño que puede sufrir una estructura. Benedetti *et al*, dividen la escala en cinco niveles como se muestra en la Tabla C-9.

| Daño | Valor | Grado de daño (%) | Daño promedio (%) |
|-----------------|-------|-------------------|-------------------|
| Ninguno | 0 | 0 – 20 | 10 |
| Ligero | 1 | 20 – 40 | 30 |
| Moderado | 2 | 40 – 60 | 50 |
| Fuerte | 3 | 60 – 80 | 70 |
| Colapso parcial | 4 | 80 – 100 | 90 |

Tabla C-9. Escala para la evaluación del grado de daño propuesta por Benedetti *et al*, 1988.

DAÑO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Escalas basadas en el índice de daño de Park, Ang y Wen

Uno de los índices de daño más ampliamente usado en todo el mundo es el propuesto por Park, Ang and Wen (1985). En base a este índice los autores propusieron una escala de daño relacionando un valor de daño calculado, con el daño físico que puede sufrir una estructura ante un sismo de determinadas características. Este escala fue calibrada con el daño observado de nueve edificios de hormigón armado, debido al terremoto de San Fernando en 1971, (Tabla C-10).

| Nivel de daño | Grado de daño | Estado | | Daño esperado | Apariencia física |
|---------------|---------------|---------------|--------------------------|--|---|
| 1 | Ligero | Reparable | | 0 – 10 | Ocurrencia esporádica de grietas |
| 2 | Menor | | | 10 – 20 | Grietas menores en el Edificio. Grietas del hormigón en columnas |
| 3 | Moderado | | | 20 – 40 | Grietas grandes importantes. Desprendimiento de hormigón en miembros más débiles. |
| 4 | Severo | 40 – 100 | | Grietas importantes del hormigón. Visibilidad del refuerzo pandeado. | |
| 5 | Colapso | Perdida total | Amenaza a la vida humana | 100 | Colapso parcial o total del edificio. |

Tabla C-10. Índice de daño vs Daño observado, propuesto por Park, et al 1985. En este trabajo se considera el índice de daño como el daño global de la estructura en donde $ID < 40\%$, representa daño reparable; daño entre el $40 - 100 \%$, representa un daño más allá de lo reparable y $ID > 100\%$, representa colapso total de la estructura.

Los mismos autores propusieron una clasificación más detallada de esta escala en 1987 (Tabla C-11), implementándola posteriormente en la versión original del programa IDARC (Park, *et al*, 1987; Kunnath, *et al*, 1990; Williams and Sexsmith, 1995).

| Nivel de daño | Grado de daño | Daño esperado (%) | Estado de daño |
|---------------|---------------|-------------------|--|
| 1 | Sin daño | < 10 | Grietas menores localizadas |
| 2 | Menor | $10 - 25$ | Grietas ligeras en toda la estructura |
| 3 | Moderado | $25 - 40$ | Grietas severas y desprendimientos localizados |
| 4 | Severo | $40 - 100$ | Aplastamiento del hormigón, refuerzo visible |
| 5 | Colapso | > 100 | Colapso |

Tabla C-11. Clasificación más detallada propuesta por Park *et al* 1987. En este trabajo siguen considerando que a partir de un daño mayor a 40% , va más allá de lo reparable.

Utilizando el índice de daño de Park, Ang and Wen, Bracci *et al* (1989) y lo adaptó para obtener un daño potencial. Después realizó una comparación con pruebas en columnas y marcos de tres y seis niveles y sugirió los siguientes estados de daño (Tabla C-12).

| Nivel de daño | Estado de Daño | Rango del daño |
|---------------|----------------|----------------|
| 1 | Ninguno | < 33 |
| 2 | Reparable | 33 – 66 |
| 3 | Irreparable | 66 – 100 |
| 4 | Colapso | > 100 |

Tabla C-12. Estados de daño propuestos por Bracci *et al* (1989), basados en el índice de daño de Park, Ang and Wen. En este trabajo observaron que existe una mayor dispersión de los valores, en los estados de daño, que en los anteriores trabajos.

Una versión modificada de las escalas mostradas anteriormente, utilizando como base el índice de daño de Park, Ang y Wen, fue propuesta por Singhal and Kiremidjian, 1996. En este trabajo utilizan cinco estados discretos de daño (Tabla C-13), esto les permite estimar las pérdidas económicas y víctimas. Los estados de daño discretos permiten que el daño sufrido por una estructura pueda ser expresada en términos de un estado físico de daño.

| Nivel de daño | Estado de Daño | Rango del daño |
|---------------|----------------|----------------|
| 1 | Ninguno | < 10 |
| 2 | Menor | 10 – 20 |
| 3 | Moderado | 20 – 50 |
| 4 | Severo | 50 – 100 |
| 5 | Colapso | > 100 |

Tabla C-13. Singhal and Kiremidjian, 1996, utiliza 5 estados de daños discretos, basados en el índice de daño de Park, Ang and Wen, para evaluar las pérdidas económicas y víctimas debidas al daño en las estructuras.

Otra clasificación de los estados de daño en estructuras de hormigón reforzado, basándose en el índice de daño de Park, Ang and Wen, fue propuesta por Hwang y Huo, 1994. En esta escala utilizan los mismos niveles que el trabajo anterior, modificando ligeramente la relación entre el daño físico y el daño calculado (Tabla C-14).

| Nivel de daño | Estado de daño | Índice de daño del edificio | |
|---------------|----------------|-----------------------------|------------------|
| | | Rango | Estimación media |
| 1 | No estructural | 0.01 – 0.10 | 0.05 |
| 2 | Ligero | 0.10 – 0.20 | 0.15 |
| 3 | Moderado | 0.20 – 0.50 | 0.35 |
| 4 | Severo | 0.50 – 0.85 | 0.67 |
| 5 | Colapso | 0.85 – 1.15 | 1.00 |

Tabla C-14. Estados de daño propuestos por Hwang *et al*, 1994 para edificios de hormigón armado. El índice utilizado en este trabajo es el propuesto por Park, Ang y Wen.

ESCALA DE DAÑO BASADOS EN OTROS ÍNDICE DE DAÑO

Escalas propuestas por Roufaiel y Meyer

Existen otras formas de evaluar el índice de daño, como es el trabajo propuesto por Roufaiel y Meyer, 1985, estos autores utilizan el desplazamiento máximo de la azotea para evaluar el daño global de la estructura y establecen cuatro estados de daño (Tabla C-15). En el caso de no conocer el desplazamiento máximo de la estructura, utilizan la frecuencia fundamental de la estructura, transformándola a un desplazamiento de la azotea..

| Nivel de daño | Daño esperado | Daño promedio |
|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 0 – 25 | 12.5 |
| 2 | 26 – 50 | 37.5 |
| 3 | 51 – 75 | 62.5 |
| 4 | 75 – 100 | 87.5 |

Tabla C-15. Estados de daño considerados por Roufaiel y Meyer 1987, para la evaluación de matrices de probabilidad de daño, de estructuras de hormigón armado.

Escalas propuestas por Mosalam *et al*

Mosalam *et al* (1997), evalúa la deformación máxima de la azotea, transformándola posteriormente en una deformación de entrepiso. El valor obtenido lo considera como una medida del índice de daño de la estructura y lo correlaciona con los estados límites siguientes: agrietamiento, fluencia, deformación de entrepiso, ruptura, aplastamiento y pandeo, (Tabla C-16). Los límites que se consideraron para realizar la correlación se basaron en el juicio de expertos y en observaciones experimentales.

| Estado de daño | Descripción del daño | Nivel de respuesta | Deformación de entrepiso |
|---------------------|--|---------------------|--------------------------|
| Sin daño | Sin daño visible, tanto para los elementos estructurales como en los no estructurales. | Elástico | < 0.2 |
| Daño insignificante | Es posible reparación en los elementos no estructurales. Pero sin ninguna reparación en los estructurales. | Agrietamiento | 0.2 – 0.5 |
| Daño moderado | Es necesario reparación en los elementos estructurales. Las reparaciones pueden realizarse en el lugar, sin tener que demoler elementos o remplazarlos. | Fluencia | 0.5 – 1.0 |
| Daño fuerte | El daño es considerable, por lo que la reparación de los elementos no es viable requiriendo la demolición de grandes áreas o inclusive el remplazo de la estructura. | Fluencia en general | > 1.0 |

Tabla C-16. Estado de daño propuestos por Mosalam *et al*, 1997. En este caso los estados límites dependen del tipo de estructura.

Escalas de daño basadas en sistemas integrados (Tatsumi *et al*, 1992)

Tatsumi *et al*, desarrollaron un sistema experto para calcular cuantitativa o cualitativamente el daño sísmico esperado en la edificios y establecieron cuatro estados de daño (Tabla C-17). El factor de daño esperado lo evaluaron dividiendo el costo de pérdida del edificio entre el costo de reparación.

| Nivel de daño | Estado de daño | Factor de daño | Daño promedio |
|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 1 | Ninguno | 0 | 0 |
| 2 | Pequeño | 0 – 10 | 5 |
| 3 | Medio | 10 – 60 | 35 |
| 4 | Grande | 60 – 100 | 80 |

Tabla C-17. Estados de daño propuestos por Tatsumi *et al* (1992), para la función de daño DF-MRA, en donde el daño está medido en forma cuantitativa con respecto a la relación pérdida en dólares / el valor de reposición.