



Received: 24-05-2018
Accepted: 28-07-2018

Escala de gravedad de daños en edificios. De la asignación directa a la contrastación estadística. Scale of severity of damages in buildings. From the direct assignment to the statistical contrastation.

F. Ruiz, A. Aguado, C. Serrat, J.R. Casas

Universitat Politècnica de Catalunya (felix.ruiz@upc.edu; antonio.aguado@upc.edu; carles.serrat@upc.edu; joan.ramon.casas@upc.edu)

Resumen— Está firmemente demostrada la importancia de realizar mantenimiento preventivo en los edificios, para evitar que se degraden y aparezcan lesiones graves. También está demostrado que con el mantenimiento preventivo se ahorra dinero frente al mantenimiento correctivo. En el marco del mantenimiento cabe decir que, para realizar las inspecciones periódicas de los edificios, es de gran utilidad el poder cuantificar hasta qué punto las deficiencias existentes son graves o no, con objeto de facilitar la toma de decisiones y priorizar las intervenciones terapéuticas. De hecho, se han utilizado y utilizan numerosas escalas diferentes entre sí para valorar el grado de gravedad de los elementos constructivos. Pero no existe consenso común y estas escalas son diferentes entre sí según el estudio a que pertenezcan. Por ejemplo, en las diferentes normas ITE existentes en España se utilizan diferentes escalas y formas de valorar las deficiencias existentes y no hay consenso común en el método de valoración. El objetivo del presente artículo es proponer, en base a un largo y riguroso proceso metodológico, una escala que sirva para valorar el grado de gravedad de los daños en edificios, que pueda ser utilizada de manera generalizada.

Palabras clave— Mantenimiento preventivo, priorizar, escala, grado de gravedad, daños.

Abstract- The importance of performing preventive maintenance on buildings is clearly demonstrated, in order to prevent them from deterioration and severe damages. It is also demonstrated that preventive maintenance saves money versus corrective maintenance. In the framework of maintenance, to make periodic inspections of the buildings is useful to quantify the extent to which deteriorations are severe or not, in order to facilitate decision making and prioritize interventions. To this purpose many scales have been used and are used to assess the severity of damage and deterioration of the building components. But it appears evident that there is not common consensus and these scales are different between them, according to the study they belong to. Everything referred shows the need to propose and validate a scale that serves to assess the degree of severity of construction elements in buildings, which is widely used. Therefore, the objective of this article is to propose, based on a long and rigorous methodological process, a scale that serves to assess the degree of severity of damage in buildings, which can be widely used.

Index Terms— Preventive maintenance, prioritize, scale, degree of severity, damage.

I. INTRODUCCIÓN

“Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide, no se puede mejorar. Lo que no se mejora, se degrada siempre”. Esta frase es de Sir William Thomson, Baron Kelvin of Largs (que entre otras importantes aportaciones definió la escala de temperatura Kelvin).

Aunque la frase es del siglo XIX, es plenamente vigente, y somos muy conscientes de la importancia de realizar mantenimiento preventivo en los edificios, para evitar que se degraden y aparezcan lesiones graves. En el marco del mantenimiento cabe decir que para realizar las inspecciones periódicas de los edificios, es de gran utilidad el poder cuantificar hasta qué punto las deficiencias existentes son graves o no, con objeto de facilitar la toma de decisiones y priorizar las intervenciones terapéuticas. De hecho se han utilizado y utilizan numerosas escalas diferentes entre sí para valorar el grado de gravedad de los elementos constructivos. Pero no existe consenso común y estas escalas son diferentes entre sí según el estudio a que pertenezcan. Por ejemplo, en las diferentes normas ITE existentes en España se utilizan diferentes escalas y formas de valorar las deficiencias existentes y no hay consenso común en el método de valoración.

En cambio, en otros ámbitos de la ciencia sí existen numerosas escalas de uso generalizado. Algunos ejemplos son la escala Bouffort (intensidad del viento), escala Richter (intensidad de terremotos) (Gutenberg & Richter, 1954), escala Mohs (dureza de una sustancia) (Hofmann & Karpinski, 1980), escala Fujita-Pearson (intensidad de tornados) (Fujita, 1971), escala EVA (intensidad del dolor) (Von Korff et al., 1992), escala Douglas (estado del mar), etc.

Todo lo referido muestra la necesidad de proponer y validar una escala que sirva para valorar el grado de gravedad de elementos constructivos en edificios, que sea de uso generalizado, que es el objetivo del presente artículo. El mismo se encuadra en una línea de investigación de la Universitat Politècnica de Catalunya, en la que se ha trabajado intensamente durante seis años. Uno de los resultados de dicha investigación es la tesis doctoral titulada “Escala de gravedad de daños en edificios. De la asignación directa a la contrastación estadística”, realizada por el Dr. Félix Ruiz Gorrindo y dirigida por el Dr. Antonio Aguado de Cea y el Dr. Carles Serrat i Piè, en la ETS de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (Departamento de Ingeniería de la Construcción), en colaboración con la EPS de Edificación de Barcelona (Ingeniería de Edificación- Institut d'Estadística i Matemàtica Alicada a l'Edificació (IEMA)).

II. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL GRADO DE GRAVEDAD

En el trabajo expuesto, se ha alcanzado dicho objetivo, habiéndose propuesto, inicialmente, una escala de gravedad de daños en edificios, de 11 grados de gravedad (de 0 a 10), de aplicación mediante el método de asignación directa (Observación). Las definiciones de cada grado son forzosamente genéricas, ya que la escala es de aplicación a cualquier tipo de elemento constructivo, ya sea fachada, viga de madera, pilar de hormigón armado, perfil metálico, pared de carga, etc.

Sobre esta escala, con posterioridad se introduce un método de cálculo, en distribución, mediante el método de cuantiles estadísticos, que permite visualizar de forma inmediata cuál es la gravedad mínima y máxima de cada sistema (entendiendo por sistemas las fachadas, estructura horizontal, estructura vertical, etc.), y también muy importante, poder visualizar la distribución de gravedades de cada sistema. En las siguientes expresiones se muestran la gravedad de distribución para el sistema s ($G_d^{(s)}$) y la gravedad de distribución para el conjunto del edificio (G_d^*), considerando S sistemas.

$$G_d^{(s)} = (q_0^{(s)} \cdot q_{0.25}^{(s)} \cdot q_{0.50}^{(s)} \cdot q_{0.75}^{(s)} \cdot q_{1.00}^{(s)}) \quad (1)$$

$$G_d^* = \begin{pmatrix} G_d^{(1)} \\ G_d^{(2)} \\ \dots \\ G_d^{(S)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_0^{(1)} & q_{0.25}^{(1)} & q_{0.50}^{(1)} & q_{0.75}^{(1)} & q_{1.00}^{(1)} \\ q_0^{(2)} & q_{0.25}^{(2)} & q_{0.50}^{(2)} & q_{0.75}^{(2)} & q_{1.00}^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_0^{(S)} & q_{0.25}^{(S)} & q_{0.50}^{(S)} & q_{0.75}^{(S)} & q_{1.00}^{(S)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Los resultados numéricos obtenidos a través de los cuantiles estadísticos, se pueden reducir, cuando se precise, a escalares, a través de la aplicación de expresiones matemáticas y pesos que se proponen y justifican, y permiten calcular las gravedades de sistemas y del conjunto del edificio. En las siguientes expresiones se muestran la gravedad resultante (en escalar) para el sistema s ($G_{rw}^{(s)}$) y la gravedad resultante (en escalar) para el conjunto del edificio (G_w^*), siendo $w^{(s)}_i$, $w^{(s)}$, $w^{(s)}$, diferentes pesos que se proponen y justifican, y siendo $m^{(s)}_i$ los puntos medios entre las componentes de $G_d^{(s)}$.

$$G_{rw}^{(s)} = \sum_{i=1}^4 w_i^{(s)} \cdot m_i^{(s)} \quad (3)$$

$$G_w^* = \frac{\sum_{s=1}^S w^{(s)} \cdot G_{rw}^{(s)} \cdot w_{(s)}}{\sum_{s=1}^S w^{(s)} \cdot w_{(s)}} \quad (4)$$

Los métodos propuestos son de fácil uso y flexibles. Los resultados obtenidos son coherentes al aplicarlo a casos reales de edificios.

El planteamiento general realizado permite evaluar cualquier sistema (estructura vertical, estructura horizontal, fachadas,

instalaciones, etc.) que integre un edificio y, por agregación se puede evaluar todo el edificio. En la misma línea permite dos alternativas, comprensibles y de fácil uso, que en función de las circunstancias (urgencia, valoraciones, etc.), puedan ser utilizables con éxito para valorar la gravedad de daños en el conjunto del edificio o elementos del mismo.

III. VALIDACIÓN DE LA ESCALA PROPUESTA

Para la contrastación de la escala y evaluar cómo funciona se ha realizado un ensayo de campo en el que han participado 374 técnicos asignando el grado de gravedad, según la escala propuesta de 0 a 10, a 33 imágenes de elementos constructivos. De los datos recogidos (12.342 valores de G asignados) se realiza un análisis estadístico, donde se analizan y relacionan diversos aspectos y se utilizan variadas técnicas matemáticas, tales como estadística descriptiva (medias aritméticas, desviaciones tipo, densidades, frecuencias, histogramas, etc.), regresión logística binaria y clustering, utilizándose para ello el programa de análisis estadístico Minitab. El estudio estadístico de los datos obtenidos ha permitido:

- comprobar la robustez de la escala propuesta

- determinar la capacidad discriminante de la misma
- proponer una escala reducida de menor variabilidad entre técnicos, de 5 grados de gravedad (de 0 a 4).

En la figura 1 se presenta, a manera de ejemplo, los histogramas de frecuencia para tres fotografías representativas del grado gravedad 6 (GR = 6). Asimismo, en la figura 2 se muestra el boxplot del estudio estadístico realizado, para todas las fotos de los distintos niveles, tras una depuración (poco significativa) de valores anómalos y, en la figura 3, se presenta el histograma de frecuencias de las desviaciones (Dev) para cada uno de los valores de G.

En base a los datos recogidos y los análisis realizados, se hace estudio para determinar cuál es la métrica óptima de la escala, es decir, cuál es el número óptimo de grados para esta escala. Para ello utilizamos técnicas de clustering (agrupamiento), que constan de las siguientes fases:

- Evaluación de la fiabilidad de la escala inicial.
- Evaluación de la especificidad y potencia de la escala inicial.
- Gráfica de especificidad y potencia.
- Evaluación de vecindades.
- Resumen de todo el proceso para aumentar la fiabilidad de la escala.

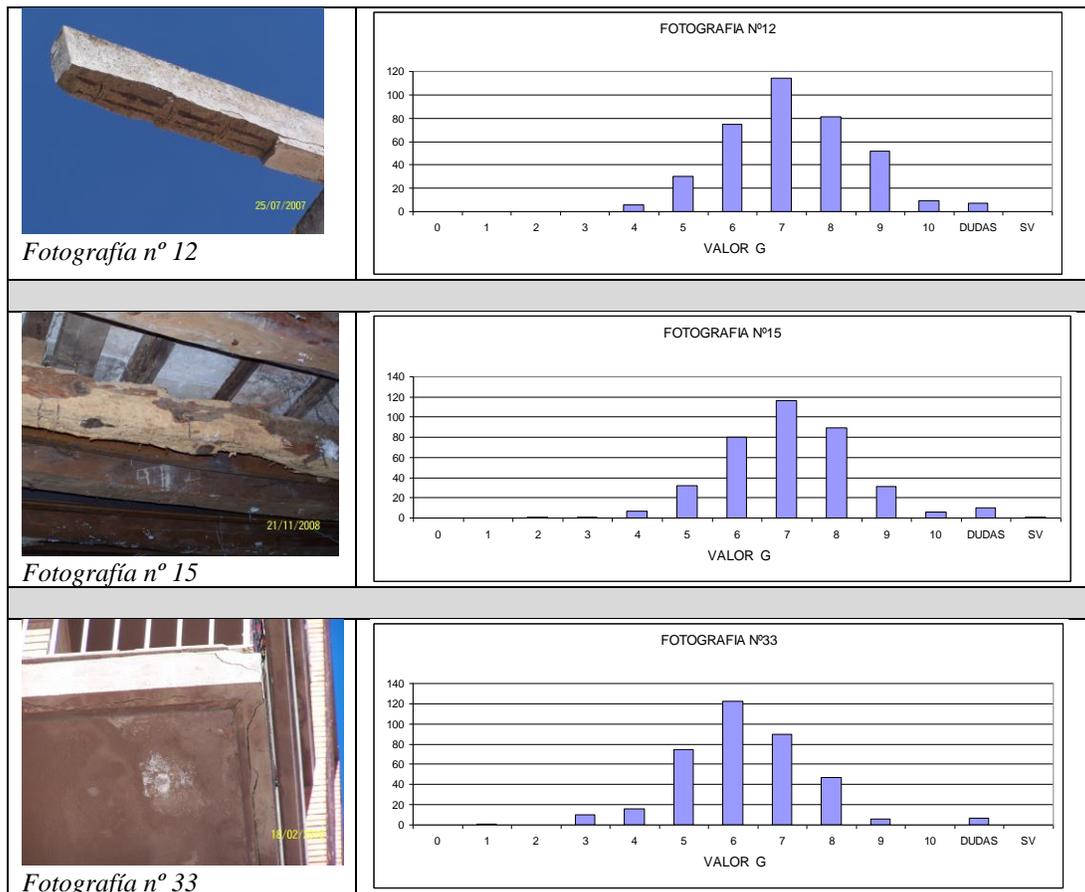


Fig. 1. Histograma de frecuencias relativas para las respuestas en las fotografías nº2, 15 y 33 (GR=6)

TABLA I
 Correspondencia entre valores de G y de GS

G	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
GS	0	1			2			3			4

- Propuesta de nueva escala.

En la figura 4 se muestra gráficamente lo explicado, donde los puntos de color azul indican cómo va aumentando la probabilidad de clasificación correcta a medida que se reduce el número de grados de la escala (tendencia que se visualiza con la flecha azul), y los puntos de color rojo indican cómo varía la desviación tipo del error global, $\sigma(\epsilon_k)$, a medida que se reduce

el número de grados de la escala (tendencia que se visualiza con la flecha roja), dándose el mínimo de $\sigma(\epsilon_k)$ para 5 grados (que se visualiza con las delimitaciones en verde). En cambio, al pasar a 4 grados (se visualiza con un círculo naranja) se produce un notable incremento de $\sigma(\epsilon_k)$.

Igualmente cabe resaltar que valores de G (según la Escala General de 11 grados) se pueden traducir automáticamente a valores de GS (según la Escala Simplificada de 5 grados), tal y como se muestra en la tabla 1.

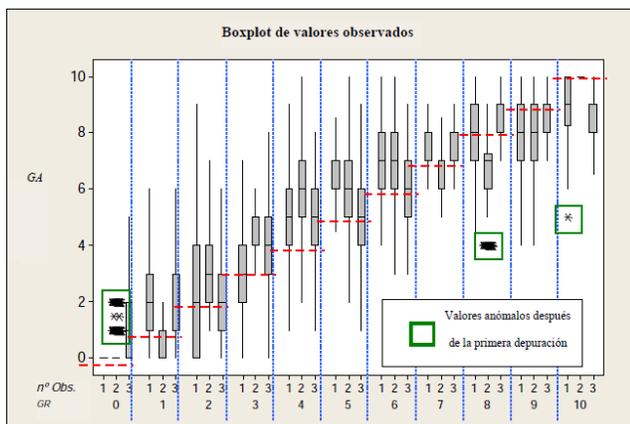


Fig. 2. Boxplot después de la 1ª depuración de valores anómalos.

IV. SISTEMA DE EVALUACIÓN DE FACHADAS

Como alternativa metodológica al método de asignación directa, se ha propuesto otro método basado en indicadores y modelos matemáticos de regresión. El mismo se ha aplicado para el caso de las fachadas y se denomina SEF (Sistema de Evaluación de Fachadas), y se compone de dos partes: gráfica y numérica. En la parte gráfica se representa la fachada y las zonas que se delimitan de la misma, en base a las disfunciones existentes y a las características de los materiales y de los

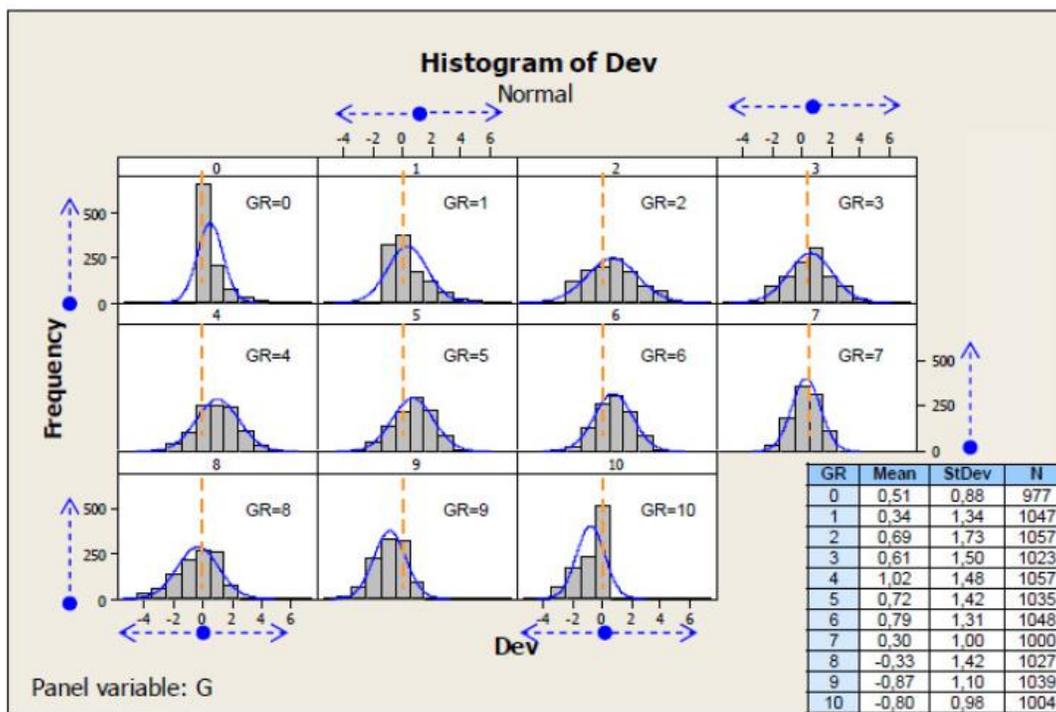


Fig. 3. Histograma de frecuencias de las desviaciones (Dev) para cada uno de los valores de G.

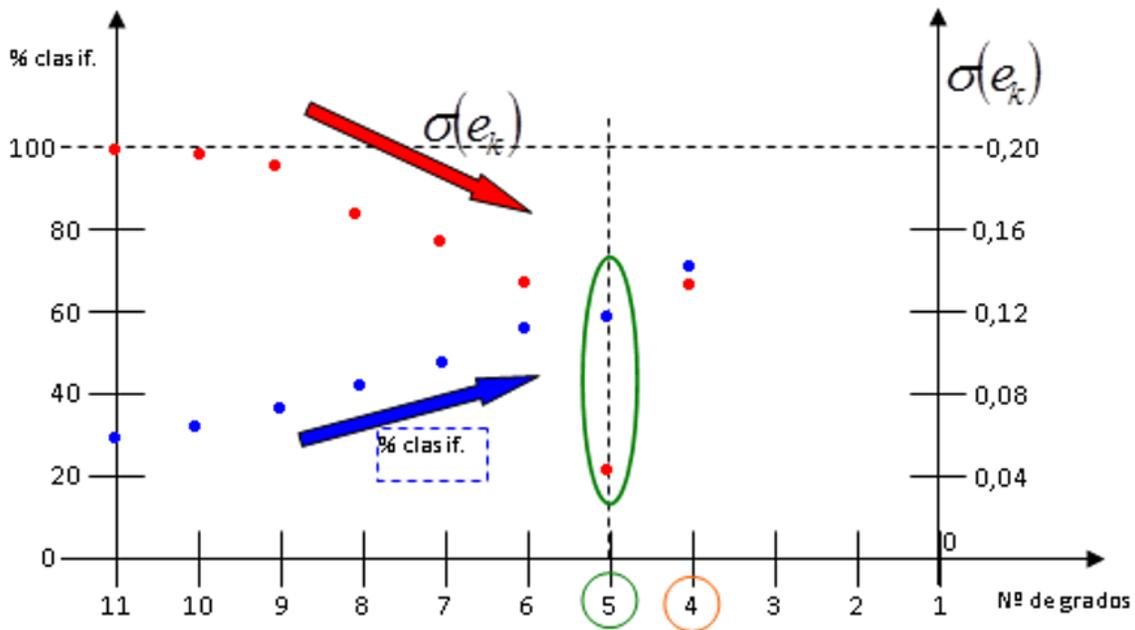


Fig. 4. Proceso de simplificación de la escala.

elementos constructivos que constituyen la fachada, tal como se muestra en la figura 5.

En la parte numérica, una vez obtenidos los diferentes datos de la fachada a partir de la parte gráfica, se calculan los indicadores que permiten determinar el grado de gravedad de cada zona j de la fachada, G_j , con el menor grado de variabilidad posible. Se proponen los dos indicadores siguientes:

- $I_j = I(x_j) \in [0, 1]$, como indicador de la medida de energía de impacto de desprendimiento, en función de

las características físicas x_j , de la zona j de la fachada y

- $P_j = P(y_j) \in [0, 1]$, como indicador de la medida de la probabilidad y_j de desprendimiento de la zona j de la fachada, en función de los síntomas observados.

La energía de impacto de desprendimiento se obtiene a partir de los conceptos físicos de cantidad de movimiento, fuerza y trabajo. La medida x_j obtenida de la energía de impacto del desprendimiento se muestra en la expresión (5).

$$x_j = \frac{m_j \cdot h_j \cdot g}{S_j} \quad (\text{en } J/m^2) \quad (5)$$

donde

- m_j = masa de la zona j considerada.
- h_j = altura del centro geométrico de la zona j considerada.
- g = aceleración de la gravedad ($g = \text{cte} = 9,8 \text{ m/s}^2$).

Con el fin de estandarizar el valor x_j en el intervalo $[0, 1]$ se propone la función de valor $I_j = I(x_j) \in [0, 1]$ de la figura 6, que describe una cierta tendencia lineal con dos curvas de suavizado en la parte inicial y final.

Para la estimación de los valores y_j a partir de síntomas identificables en la fachada se lleva a cabo un análisis multivariante con datos procedentes de una muestra de 197 imágenes de zonas de fachadas, con distintos niveles de degradación y representativa de la población de estudio. Para cada imagen se dispone de su correspondiente sintomatología y se asigna la medida de probabilidad de desprendimiento a partir del valor medio de asignación directa por parte de un equipo de cinco expertos.

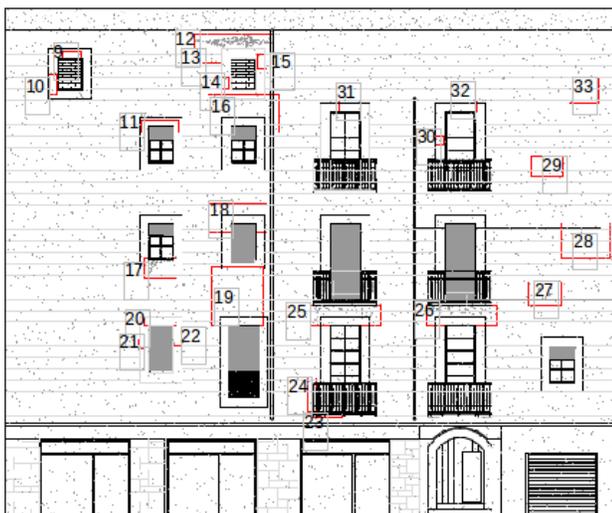
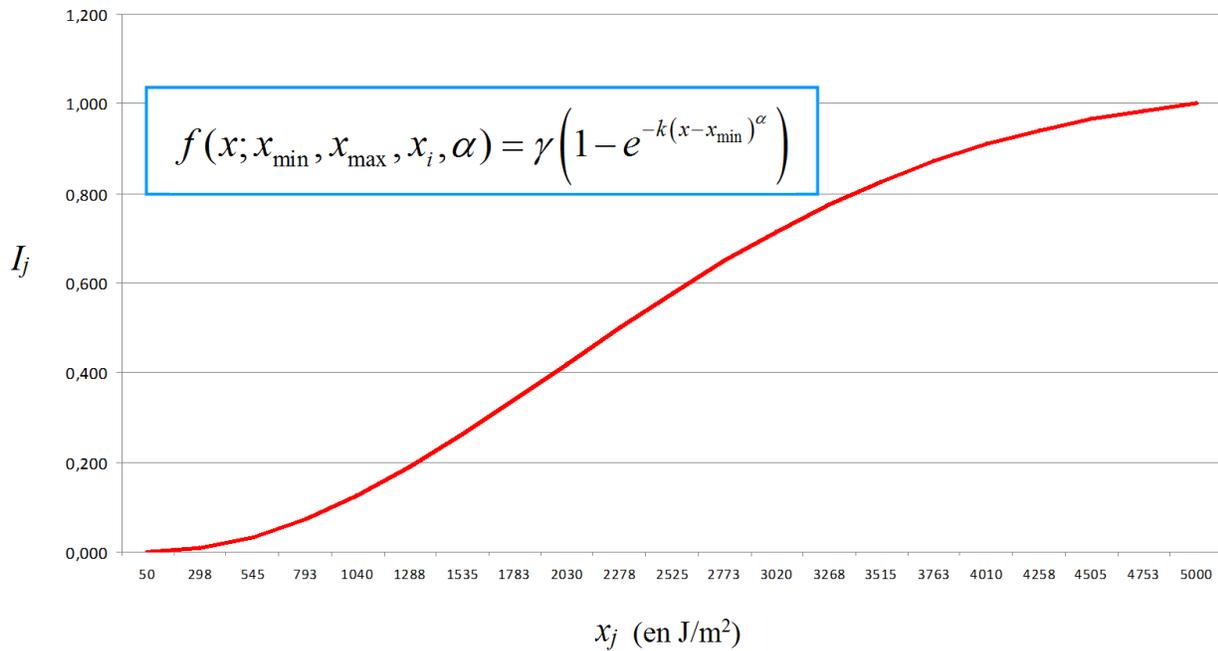
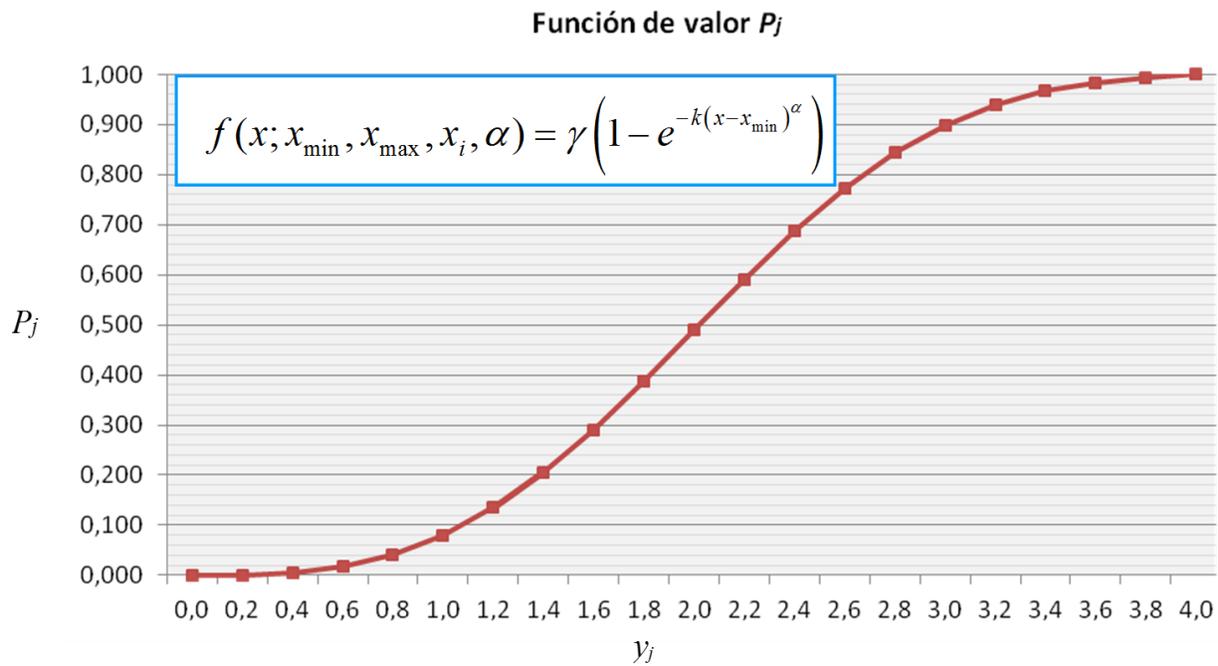


Fig. 5. Ejemplo de delimitación de zonas en una fachada.

Fig. 6. Función de valor I_j para la energía de impacto.Fig. 7. Función de valor P_j para la probabilidad de desprendimiento.

Para la respuesta y_j se estima el modelo multivariante más adecuado, usando como predictor la sintomatología de la fachada. La ecuación de regresión resultante permite estimar la medida de probabilidad y_j a partir de los síntomas observados, y reducir la variabilidad entre técnicos.

Con el fin de estandarizar el valor y_j en el intervalo $[0, 1]$ se propone la función de valor $P_j = P(y_j) \in [0, 1]$ de la figura 7, que describe una cierta tendencia lineal con dos curvas de suavizado

en la parte inicial y final. Esta gráfica describe más una tendencia en forma de “S”, que la correspondiente a I_j , dado que al tratarse de probabilidad, el incremento de los valores P_j es más acentuado para valores medios de y_j , lo que se consigue con el valor $\alpha = 3$.

La contrastación del método propuesto se ha hecho con diversos casos reales de edificios obteniéndose resultados coherentes, tanto desde el punto de vista técnico como con

respecto el método anterior de asignación directa, aplicado en fachadas.

V. CONCLUSIONES

El estudio de la literatura técnica sobre escalas de daños, pone en evidencia, la gran necesidad de las mismas y su diversidad en diferentes ámbitos temáticos. Con respecto a la edificación, existen numerosas propuestas sin que su uso sea generalizado, con escalas de valores muy amplias. Por ellos se constata la necesidad de disponer de una escala de gravedad de daños en edificios, de uso generalizado.

Con el fin de contribuir en esta dirección, en primer lugar, se ha propuesto la denominada Escala General con 11 grados (de $G = 0$ a $G = 10$) en base a una asignación directa de puntuación. Con los resultados, el método de cálculo propuesto, en distribución y en escalar, permite calcular las gravedades de sistemas y del conjunto del edificio, de forma fácil y flexible. Los resultados obtenidos son coherentes al aplicarlo a casos reales de edificios

Esta escala general es sencilla de utilizar, tal como han manifestado los 374 técnicos participantes en la experiencia de campo. Pero no resulta del todo satisfactoria tras el análisis estadístico de los datos recogidos, ya que existe una probabilidad de clasificación correcta de los técnicos respecto al valor GR objetivo del 32,07%; lo que representa un valor bajo.

Tras este resultado se ha propuesto la denominada Escala Simplificada (GS) con 5 grados (de $GS = 0$ a $GS = 4$) que mejora la probabilidad de clasificación correcta de los técnicos respecto al valor GS objetivo del 62,88%. Por este motivo, se considera adecuado que en los casos en que el grado de gravedad de elementos constructivos se vaya a valorar en base a asignación directa, se utilice la Escala Simplificada, al haber menor variabilidad entre los técnicos y aceptable probabilidad

de clasificación correcta. En cualquier caso, cabe resaltar que valores de gravedad (G) según la Escala General (de 11 grados) se pueden traducir a valores de la Escala Simplificada (GS) (de 5 grados).

Cara a la implementación práctica y generalizada de las escalas propuestas, convendría que los técnicos, aparte de las definiciones genéricas de la escala, dispusieran además de un catálogo de imágenes de elementos constructivos con sus valores de G de referencia, que les sirviera de orientación e información adicional, que contribuiría a aumentar la probabilidad de acierto para asignar valores de G.

Por último, hay que resaltar que las escalas propuestas tienen un amplio alcance (cualquier tipo edificio o cualquier localización geográfica). Aparte de ser fácilmente desglosable para sistemas del edificio y no sólo para el conjunto.

Para el caso específico de fachadas se ha propuesto un método alternativo para determinar valores de G, Sistema de Evaluación de Fachadas (SEF), basado en indicadores y modelos de regresión. Con él se obtiene una reducción de la variabilidad entre técnicos, obteniéndose resultados coherentes en su contrastación con casos reales. Su aplicación por parte de los técnicos también es fácil.

REFERENCIAS

- Fujita, T.T., (1971) Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. University of Chicago.
- Gutenberg, B. and Richter, C.F. (1954) Seismicity of the Earth. 2nd edition. Princenton University Press. Princenton.
- Hofmann, F. and Karpinski, J. (1980) Schöne und seltene Minerale. Leipzig.
- Von Korff, M. et al., 1992. Grading the severity of chronic pain. Elsevier B.V.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.