

TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE SUPERVIVENCIA APLICADAS A LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO

V. Gibert
C. Serrat
V. Royano

Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona – UPC, España

Este trabajo de investigación tiene dos objetivos principales: el primero de ellos consiste en introducir el análisis de supervivencia para su uso en técnicas de conservación en el patrimonio construido y, en segundo lugar, aplicar la metodología estudiada en un gran parque edificado, con el fin de obtener información relevante para crear estrategias de conservación y posterior mantenimiento útiles para establecer futuras políticas de intervención.

Por razones de impacto urbanístico y de seguridad hacia los ciudadanos, esta investigación se centra en el subsistema de la fachada de los edificios. Asimismo, se ha prestado especial atención a la descripción del evento de interés considerado como la existencia de lesión en función de su magnitud y gravedad, representando de esta forma los parámetros de disfunción o de riesgo que presentan las fachadas. El seguimiento realizado sobre éstas se basa en inspecciones visuales. Para poder estimar la durabilidad de los elementos inspeccionados, se han empleado análisis de durabilidad bajo un enfoque no paramétrico. Para ello, se han implementado procedimientos en el programa S-PLUS®, de Insightful®, con formulación específica para la obtención de los estimadores de supervivencia numéricos y gráficos.

El potencial de esta propuesta se ilustra con su aplicación en un conjunto de datos reales obtenidos a partir de un estudio sistemático de inspecciones de fachadas en la ciudad de Santiago de Chile, mediante un sistema de fichas estandarizadas y que se han aplicado con éxito en distintos lugares del mundo. Este estudio particularizado se basa en más de 1.400 edificios que han sido inspeccionados y de los cuales se ha recopilado una exhaustiva información del estado real de cada uno de ellos. El análisis de los resultados permite a los técnicos detectar las diferentes zonas y niveles de degradación y riesgo de las fachadas de los edificios, con el fin de establecer intervenciones parciales o integrales de forma predictiva y con criterios de sostenibilidad social, lógicos para la perdurabilidad de la ciudad.

INTRODUCCIÓN Y ESTADO DE LA CUESTIÓN

El sector de la edificación últimamente ha mostrado la necesidad de utilizar sistemas de información cada vez más completos que permitan planificar, controlar y gestionar efectivamente el parque construido con la ayuda de una mayor información, más fiable y continua. Ello en gran parte debido a que los responsables del control y la gestión del

patrimonio son cada vez más sensibles a la necesidad de hacer frente a un entorno en constante mutación, con fuertes exigencias sociales y políticas.

El estudio que presentamos tiene el objetivo principal de establecer políticas basadas en criterios de mantenimiento mediante la creación de planes directores que permitan definir de qué manera tenemos que actuar sobre el patrimonio construido sin importar que sea a nivel macro o micro urbano. Para obtener resultados coherentes se ha creado una base de información fruto de inspecciones realizadas con el apoyo de una base científica.

En cuanto sabemos, existen pocos documentos que estudien las técnicas de análisis de supervivencia basadas en el enfoque estadístico de una gran muestra de edificios. Las primeras contribuciones aparecen en la década de los noventa y se centran básicamente en la predicción de la vida de servicio de los materiales constructivos (Frohnsdorff, (1996), entre otros).

Uno de los primeros enfoques estadísticos para la predicción de la vida de servicio de los materiales de construcción es el propuesto por Flourentzou, Brandt y Wetzel (2000). Ellos introducen MEDIC como método para predecir la vida de servicio residual y los presupuestos de inversiones de rehabilitación. Las predicciones se basan en la combinación de la probabilidad a priori, procedentes de la experiencia de un gran número de investigaciones y rehabilitaciones anteriores y del estado actual del sujeto (edificio) en estudio. El objetivo es obtener una probabilidad condicional de los cambios (a peor) entre los estados dado el estado actual. Sin embargo, un inconveniente de esta metodología es el hecho de que el proceso de deterioro se describe por estratificación en cuatro estados, lo que no es posible determinar si no conocemos a priori la distribución real del tiempo hasta el deterioro. En este sentido, la importancia de disponer de información acerca de la supervivencia de los edificios y sus elementos ya fue señalada por Buerger-Goodwin (2005).

INSPECCIONES Y METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS

A continuación introduciremos la metodología que se ha utilizado para el proceso de inspección así como las técnicas de análisis de la supervivencia que vamos a utilizar para el análisis de los datos.

Metodología de la inspección

La inspección sistemática de los elementos de las fachadas está orientada a la detección de factores de riesgo de las fachadas con el fin de evaluarlas después. Para desarrollar una metodología de inspección, se han establecido los criterios sobre la base de una estandarización de los indicadores más significativos objeto del proyecto. En este sentido, hemos caracterizado los edificios, los elementos constructivos que componen las fachadas y sus materiales, las lesiones más recurrentes que pueden afectar a las fachadas, la gravedad de dichas lesiones y, por último, su magnitud. La clasificación de la gravedad de las lesiones se ha establecido numéricamente tal y como señala la Tabla 1.

<i>Definición</i>	<i>Gravedad</i>	<i>Acción</i>
Fachada Correcta	0	Mantenimiento
Síntoma	1	Pre-diagnóstico
Daños leves	2	Mantenimiento
Lesiones graves	3	Acción a largo plazo
Lesión muy grave	4	Mediano plazo
Lesión urgente	5	Acción a corto plazo
Lesión inmediata	6	Acción a corto plazo

Tabla 1: Códigos de la gravedad de las lesiones

La extensión de las lesiones se ha establecido según la afectación en: puntual (cuando la lesión afecta a un elemento menos de un 25%), locales (que afecta a entre un 25% y un 50% del elemento) y general (cuando la zona afectada es superior a un 50% del elemento).

Metodologías de análisis

En esta sección vamos a introducir las definiciones básicas en la durabilidad, el tema del mecanismo de censura y el enfoque no-paramétrico que vamos a utilizar para el análisis estadístico. Algunas referencias básicas sobre la fiabilidad / análisis de supervivencia son en los libros de Meeker y Escobar (1998), Klein y Moeschberger (1997) y Gómez y Canela (1994), entre muchos otros.

Conceptos fundamentales en el análisis de supervivencia

Tres conceptos básicos en el análisis de la durabilidad son el fallo, la función durabilidad y la función de riesgo, que definimos a continuación.

Definición 1: Entenderemos por *fallo* el evento de interés en el cual estamos preocupados.

En la configuración de mantenimiento, el momento cero significará la fecha en que el edificio se construye y por fallo vamos a entender los sucesivos grados de gravedad o de magnitud de las lesiones. El tiempo desde el momento cero y el fallo lo denotaremos por T . Los grados de gravedad serán 0, 1 o 2 según si la gravedad sea baja, media o alta. Se entiende que para llegar a los grados 1 o 2 se debe pasar por las anteriores.

Definición 2: La función de la durabilidad de la variable aleatoria T es el complemento de la función distribución de T , $R(t) = 1 - F(t) = 1 - P(T \leq t) = P(T > t)$.

Por definición, $R(t)$ es la probabilidad de que el fallo pase más allá de t , o, en otros términos, la probabilidad de que el elemento sobreviva al momento t .

Definición 3: El tiempo medio de fallo (también conocido como MTTF o *vida media* del elemento) es la esperanza de la variable aleatoria T , $MTTF = E(T)$.

Definición 4: La *tasa media de riesgo* en el intervalo $[t_1, t_2]$ se define como

$h(t_1, t_2) = \frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1)R(t_1)}$, donde la durabilidad $R(t_1)$ es la proporción de supervivientes

en el momento t_1 y $[R(t_1) - R(t_2)] / R(t_1)$ representa la proporción de elementos que, no habiendo aún fallado en el momento t_1 , fallan en el intervalo $[t_1, t_2]$. Cuando t_2 tiende a t_1 obtenemos la *función de riesgo (instantánea)* en el tiempo t_1 , $h(t_1) = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} h(t_1, t_2)$.

Se puede demostrar que $h(t) = f(t)/R(t)$ y, en este sentido, la función de riesgo mide la propensión al fallo de los sujetos a través del tiempo. Si definimos la función de riesgo acumulado, $H(t)$, como $H(t) = \int_0^t h(s) ds$ la relación entre la función de durabilidad y la función de riesgo acumulada es $R(t) = e^{-H(t)}$.

Sobre el mecanismo de la censura

Si T es el tiempo real de interés hasta el fallo y C_1 denota un tiempo de inspección, puede ocurrir que C_1 sea mayor o menor que T . En el caso que $T < C_1$ diremos que la variable T está censurada por la izquierda y denotaremos la observación por C_1^- . En caso contrario podemos decir que T está censurada por la derecha y denotaremos la observación por C_1^+ . Esta situación es habitual en estudios de durabilidad y en nuestro caso todos los datos están censurados por la derecha o por la izquierda. En el caso de existir dos tiempos de inspección, los datos observados podrían estar censurados por la derecha, izquierda o en el intervalo como muestra la Figura 1.

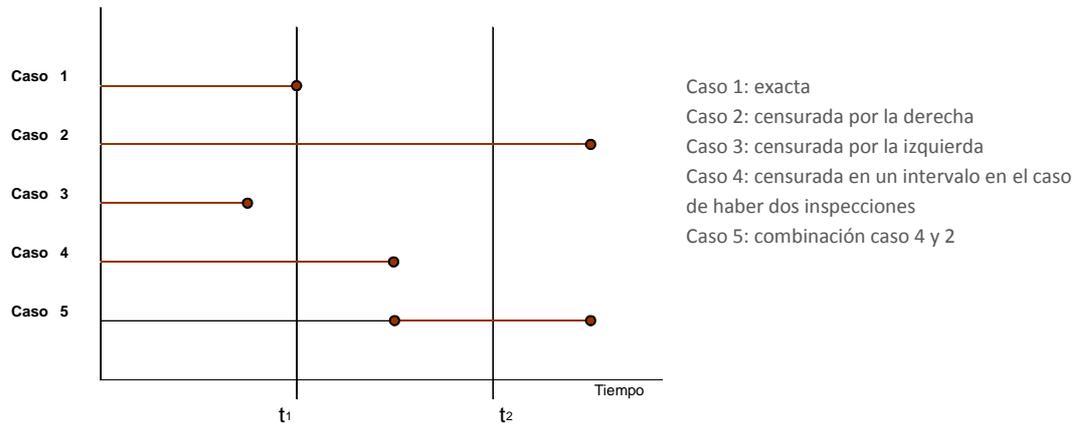


Figura 1: Ilustración de los diferentes tipos de censura en las observaciones

Un enfoque no paramétrico

Dado que no existen referencias sobre las distribuciones que siguen los tiempos de fallo de las diferentes lesiones y elementos, vamos a calcular la función de durabilidad y de riesgo en función de forma no paramétrica. Es decir, nuestras estimaciones se basarán únicamente en los datos y no supondremos ninguna familia de distribución hipotética (y no validable) para la densidad desconocida f de T .

Kaplan y Meier (1958), propusieron un estimador no paramétrico para la función de durabilidad para el caso de datos censurados por la derecha. Turnbull (1976), extendió el estimador de Kaplan-Meier para el caso de datos censurados en un intervalo. El estimador de Turnbull es un algoritmo iterativo que maximiza la función de verosimilitud no paramétrica.

$$L = \prod_{i \in O} (F(o_i) - F(o_i^-)) \prod_{i \in R} (1 - F(r_i)) \prod_{i \in L} F(l_i) \prod_{i \in I} (F(r_i) - F(l_i)),$$

donde O , R , L y I son, respectivamente, los subgrupos de observaciones exactas, censuradas por la derecha, censuradas por la izquierda y censuradas en el intervalo. El algoritmo de Turnbull identifica los intervalos donde la masa probabilística puede ser estimada y de ella se obtienen la función de durabilidad y la función de riesgo.

Implementación de la metodología de análisis

Hemos desarrollado toda la metodología del análisis de la durabilidad en S-PLUS®, de Insightful®, con las rutinas y procedimientos para la obtención de las estimaciones de las probabilidades del fallo, la durabilidad y las funciones de riesgo.

ILUSTRACIÓN

Ámbito del proyecto

El proyecto y la metodología presentada en la sección anterior se han aplicado en varias ciudades y localizaciones, no sólo a nivel nacional sino también internacional. La Tabla 2 muestra la ubicación de las inspecciones y el número aproximado de fachadas inspeccionadas.

País	Ciudad	Localización	Numero aprox. de Fachadas inspeccionadas
España	Barcelona	Ciutat Vella	3000
		L'Eixample	4000*
	L'Hospitalet de Llobregat	Toda la ciudad	10000
Francia	Toulouse	Casco Antiguo	80
México	México DF	Casco Antiguo	600
Chile	Valparaíso	Zona de los Cerros	150
	Santiago de Chile	Casco Antiguo	1500

(*) conjuntamente con 9 patios interiores
Tabla 2: Ámbito del proyecto hasta la fecha

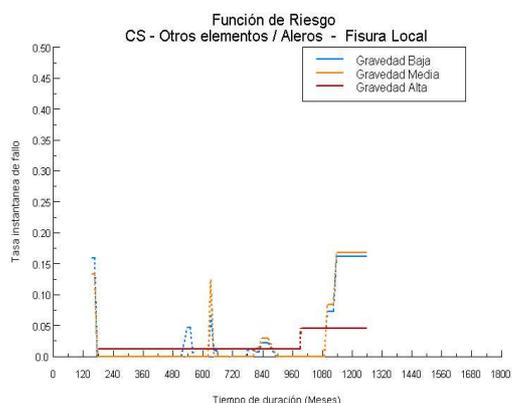
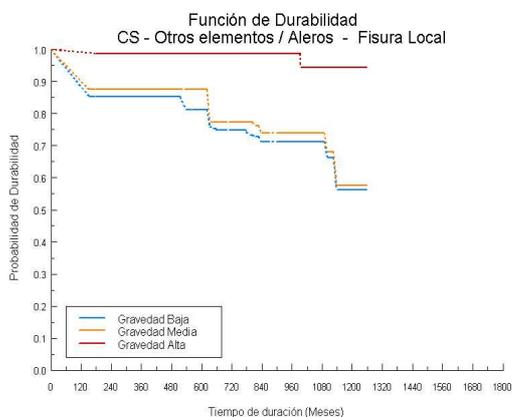


Fig.2: Funciones de durabilidad y riesgo para la fisura local en aleros (por nivel de gravedad)

Como ejemplo de estas técnicas se presentan algunos resultados de la aplicación en Santiago de Chile.

Análisis univariado por gravedad y por magnitud

El tipo de análisis seguido nos permite obtener la media del comportamiento de la evolución de cada una de las lesiones a través del tiempo. Si el tamaño de la muestra es lo suficientemente grande, es siempre interesante tratar de incorporar la información procedente de las características o covariables de los sujetos y, a continuación, comprobar si existen diferencias significativas para obtener distribuciones condicionales. En este trabajo nos referiremos únicamente a los análisis univariados por gravedad y por magnitud

Con el fin de ilustrar las capacidades de nuestra propuesta, en esta sección se presenta una pequeña muestra de los resultados gráficos y numéricos del análisis por gravedad (Figura 2 y Tabla 3). En este caso, se muestra como la fisura local en aleros se presenta desde un inicio en gravedad baja y media mientras que la lesión en forma de gravedad alta no se manifiesta hasta un tiempo pasado de 85 años aproximadamente.

NUM. A RIESGO	% DE CENSURADOS		ESTIMACION INICIAL			% LESIONES FINAL			TIEMPO EN AÑOS HASTA UN % ACUMULADO DE LESIONES				% ACUMULADO DE LESIONES EN UN TIEMPO EN AÑOS				UMBRAL DE RIESGO	AÑOS CORTE CON UMBRAL	
	I2Q	DCHA	AÑOS	% RIESGO	AÑOS	% RIESGO	AÑOS	% RIESGO	10%	25%	50%	75%	10	25	50	100		tA	tB
102	24.5	75.5	12.8	14.8	0.160	104.8	43.7	0.161	8.6	54.8	--	--	11.6	14.8	18.7	43.7	0.01	14.7	90.9
102	21.6	78.4	12.8	12.5	0.134	104.8	42.4	0.168	10.2	69.3	--	--	9.8	12.5	12.5	42.4	0.01	14.7	90.9
102	2.0	98.0	14.8	1.2	0.013	104.8	5.6	0.045	--	--	--	--	0.8	1.2	1.2	5.6	0.01	--	--

Tabla 3: Resultados numéricos del análisis gráfico de la Fig. 2

NUM. A RIESGO	% DE CENSURADOS		ESTIMACION INICIAL			% LESIONES FINAL			TIEMPO EN AÑOS HASTA UN % ACUMULADO DE LESIONES				% ACUMULADO DE LESIONES EN UN TIEMPO EN AÑOS				UMBRAL DE RIESGO	AÑOS CORTE CON UMBRAL	
	I2Q	DCHA	AÑOS	% RIESGO	AÑOS	% RIESGO	AÑOS	% RIESGO	10%	25%	50%	75%	10	25	50	100		tA	tB
80	41.3	58.8	7.8	31.0	0.371	104.8*	100	100	2.5	6.3	93.7	104.8	31.5	33.5	33.5	66.7	0.01	47.2	84.8
80	25.0	75.0	49.8	18.0	0.198	104.8	54.1	0.184	27.7	79.8	98.5	--	3.6	9.0	18.0	54.1	0.01	62.3	90.1
80	7.5	92.5	49.8	7.4	0.077	104.8	27.9	0.249	97.2	99.4	--	--	1.5	3.7	7.4	27.9	0.01	54.5	97.0

Tabla 4: Resultados numéricos del análisis gráfico de la Fig. 3

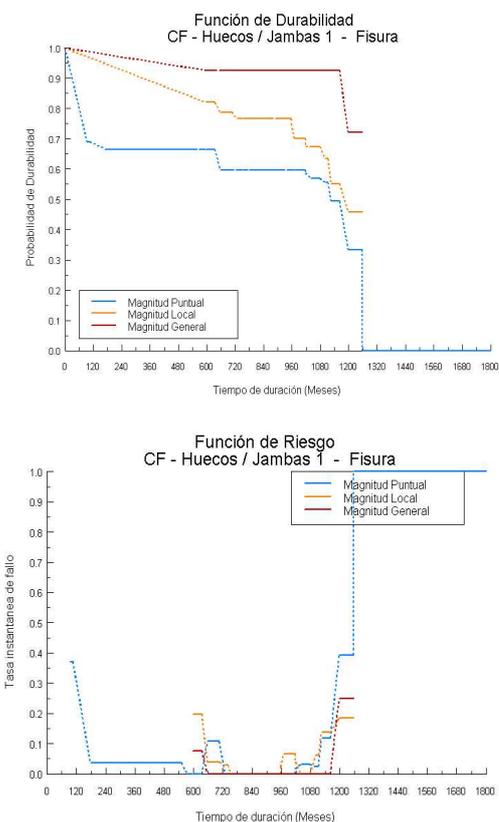


Fig.3: Funciones de durabilidad y riesgo para la fisura en jambas (por nivel de magnitud)

Otro ejemplo es el de la Figura 3 y la Tabla 4 en el que se muestra el resultado del análisis por magnitud. La Figura muestra las curvas de durabilidad en función si la lesión es puntual, local o general en el caso de las fisuras en jambas. Como se puede apreciar, la lesión con magnitud puntual colapsa poco después de los 100 años mientras la local y la general fallan progresivamente.

DISCUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

Hemos presentado nuestra propuesta para utilizar técnicas de supervivencia en el mantenimiento del edificio. Como técnica probabilística nos permite estimar las distribuciones del fallo para todas las lesiones en las que podemos estar interesados. Además, podemos probar para estas características cuales juegan (o no) un papel importante en el proceso de deterioro. Todo este conocimiento permite comprender cómo funcionan los elementos de la envolvente del edificio, así de cómo debemos anticipar fallos o un mal funcionamiento como consecuencia del envejecimiento y puesta en servicio. En particular, la forma en que debemos anticipar estos fallos con acciones preventivas en la fase de servicio, o acciones de mejora en la fase de diseño, desde el punto de vista de la durabilidad.

La plataforma de análisis que hemos desarrollado e implementado se convierte en la base de un análisis continuo en el futuro, lo que permitirá no sólo el diseño de estrategias de mantenimiento y/o políticas de prevención –basados en criterios económicos y de seguridad- sino también poder tomar decisiones en línea.

Nos gustaría destacar dos aspectos en los que estamos trabajando ahora. En primer lugar, la relevancia de programar un calendario más continuo de inspecciones. Esto nos permitirá mejorar la calidad de los datos mediante la reducción de la proporción de censura o cambiando la

censura por la izquierda o la derecha por censura en un intervalo. En segundo lugar, el interés de ajustar las distribuciones resultantes a las covariables cuando nos referimos al análisis multivariado. En muchos casos, la distribución de fallo será sensible a las condiciones del edificio. Es evidente que ambos enfoques harán que la estrategia de mantenimiento de los edificios sea más eficiente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte recibido por la Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona (EPSEB-UPC) y por el Ministerio de Ciencia e Innovación mediante el proyecto MTM2008-06747-C02-01. También agradecen a la ciudad de Santiago de Chile por su colaboración en la toma de datos, a los autores de Proyectos Final de Carrera vinculados con esta área de investigación por su contribución y a los miembros del Laboratori d'Edificació y del Institut d'Estadística i Matemàtica Aplicada a l'Edificació (IEMAE) por sus importantes comentarios y sugerencias en las fases preliminares del trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- BUERGEL-GOODWIN E., FERRARA C. AND BRADLEY PE. (2005), Survival functions of buildings and building elements. In *Proceedings of the 10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Elements*. Lyon, France.
- FLOURENTZOU F., BRANDT C. and WETZEL C. (2000), MEDIC, A method to predicting residual service life and refurbishment investment budgets. *Energy and Building* 31, 167-170.
- FROHNSDORFF GJC. (1996), Predicting the Service Lives of Materials of Construction. In *Proceedings of the Fourth Materials Engineering Conference*. Chong KP. (ed), 38-53, American Society of Civil Engineers (ASCE), Washington, DC, USA.
- GÓMEZ G. and CANELA MA. (1994), *Fiabilitat industrial*. Edicions UPC, Barcelona, Spain.
- KAPLAN EL. and MEIER P. (1958), Nonparametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American Statistical Association*, 53, 457-481.
- KLEIN JP. and MOESCHBERGER ML. (1997), *Survival Analysis. Techniques for Censored and Truncated Data*. Springer, New York, USA.
- MEEKER W. and ESCOBAR L. (1998), *Statistical Methods for Reliability Data*. John Wiley & Sons, New York, USA
- TURNBULL BW. (1976), The empirical distribution function with arbitrarily grouped, censored and truncated data. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 38 (3), 290-295.