CALIBRACIÓN DEL TIEMPO EQUIVALENTE DE EXPOSICIÓN AL FUEGO SEGÚN EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN

(CALIBRATION OF THE EQUIVALENT TIME OF FIRE EXPOSURE ACCORDING TO THE SPANISH BUILDING CODE)

Mariana Llinares Cervera; María Eugenia Maciá Torregrosa; Ángel Arteaga Iriarte
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). Madrid

Fecha de recepción: 23-III-04

ESPAÑA

407-9

RESUMEN

La tendencia existente en la reglamentación actual es la de adoptar normativas de carácter prestacional en las que se establecen objetivos sin exigir que éstos deban alcanzarse de una forma determinada. En la aplicación de este tipo de reglamentaciones, el proyectista debe demostrar que, mediante la solución propuesta, se alcanzan o superan los niveles de protección prefijados. En el Código Técnico de la Edificación se ofrece el método del Tiempo equivalente de exposición al fuego como un método simplificado alternativo a las tablas de tiempos mínimos de resistencia exigidos a la estructura de un edificio. En este trabajo se aplica este método a distintos ejemplos de edificios tipo con el fin de extraer conclusiones sobre su aplicabilidad.

SUMMARY

Current tendency in regulation is that of adopting performance based codes where targets are established without demanding them to be reached in a certain way. In the application of this kind of codes, the designer must prove that, by means of his suggested solution, prearranged protection levels are reached or overcome. In the Spanish Technical Building Code the method of the Equivalent Time of Fire Exposure is given as a simplified alternative method to the prescriptive tables of minimal time of resistance demanded to the structure of a building. In this work this method is applied to different examples of buildings in order to extract conclusions on the suitability of its application.

1. INTRODUCCIÓN

La adopción de códigos de **carácter prestacional**, que establecen unos objetivos sin exigir que éstos deban alcanzarse de una forma determinada, son una tendencia actual en la mayoría de países. Son claras las ventajas que presentan estos códigos frente a los prescriptivos. Estos últimos se limitan a dar soluciones preestablecidas determinando unos límites y unas medidas para lograr la seguridad exigida, pero sin permitir la incorporación de soluciones innovadoras, aunque cumplan con las exigencias mínimas requeridas.

El paso no es sencillo. Por un lado existe la inercia de no modificar lo que, aparentemente, en la mayoría de los casos, funcionaba suficientemente bien y, por otro lado, no siempre el nivel de conocimiento establecido es suficiente para poder fijar unas prestaciones que puedan ser verificadas.

En el caso de la seguridad estructural en caso de incendio estos dos aspectos son fundamentales. Por ello, en el Código Técnico de la Edificación (CTE) [1], se ha optado por una solución doble. Por una parte, se mantienen **métodos tradicionales** como soluciones admitidas: por ejemplo, la utilización de la curva normalizada de fuego y tiempos mínimos de resistencia exigidos según esa curva, y, por otra parte, se abre el camino a **soluciones prestacionales** dadas por las técnicas de ingeniería de fuego o cálculos utilizando la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

Informes de la Construcción, Vol. 55, nº 490, marzo-abril 2004

Un método adecuado para conjugar los beneficios de ambas filosofías es la incorporación del **tiempo equivalente de exposición al fuego** incluido en el CTE.

Para la calibración de este método se ha llevado a cabo un estudio del método del tiempo equivalente, no sólo de los resultados sino también del campo de aplicación y de las limitaciones existentes. Se ha aplicado a distintos ejemplos de edificios tipo y para distintos valores de los parámetros derivados de las condiciones del sector. En este trabajo se presentan los resultados de esa calibración y se extraen las oportunas conclusiones.

2. CÓDIGOS PRESCRIPTIVOS Y PRESTACIONALES

En el Documento Básico de Seguridad en caso de incendio (DB SI) del CTE, manteniendo lo que se decía en la aún vigente Norma Básica de Incendio, NBE-CPI/96 [2], como en general en los códigos prescriptivos, el requisito de resistencia al fuego suficiente de los elementos estructurales se expresa como el tiempo que deben ser capaces de soportar esos elementos en un incendio definido por una temperatura en un sector dada por la **curva de fuego normalizada**, que tiene la expresión:

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8\,t + 1)$$

donde:

Θ_g: es la temperatura del aire en el sector (ºC),
t: es el tiempo desde la iniciación del incendio (min).

es decir, una curva que da la temperatura en el sector como función monótona creciente del tiempo exclusivamente. El tiempo que la estructura debe soportar ese incendio viene definido, únicamente, por el **uso y la altura de evacuación del edificio** (Tabla 1).

La ventaja en la utilización de estas curvas viene dada por su **universalidad** y larga experiencia en su aplicación. Estas características han dado lugar a una amplia base de datos utilizable: valores tabulados tanto de las temperaturas en el interior de las secciones de los elementos, como de la capacidad portante final de dichos elementos, para distintos materiales, secciones y tiempos de exposición.

Sin embargo, como en cualquier método prescriptivo, **no se deja flexibilidad** alguna al proyectista para modificar esa exigencia, variando alguno de los requisitos (por ejemplo, con el uso de medidas activas o condiciones de los sectores de incendio).

Por otro lado, es conocido que la evolución de la temperatura en un incendio real no es igual en todos los casos, sino que depende de las **características del sector** donde se produce el incendio: la carga de fuego existente, la utilización de medidas activas, la ventilación y el calor disipado por las paredes del recinto. Además, evidentemente, la temperatura no es siempre creciente en el tiempo, sino que crece hasta alcanzar un valor máximo y posteriormente, al consumirse el combustible, desciende más o menos lentamente.

Para modelar de una forma más ajustada los incendios reales teniendo en cuenta estas características se han establecido las llamadas "**curvas paramétricas**" que figuran en el Eurocódigo EN 1991-1-2 [3] y al que se hace referencia en el CTE.

Estas curvas han establecido de forma empírica la temperatura como función del tiempo, pero con parámetros que dependen de la carga de fuego, las aberturas existentes y de las propiedades térmicas de la envolvente. Se formula una rama ascendente hasta una temperatura máxima y una rama descendente.

En la Figura 1 está representada lo que podría ser una curva de fuego real en sus distintas fases, si existe la ventilación suficiente:

- fase inicial, con un crecimiento lento de la temperatura en el recinto debido a un fuego localizado;
- si la temperatura alcanza una temperatura suficientemente elevada, todo el material combustible del recinto comienza a arder, fase de *flashover,* con lo que la temperatura crece rápidamente hasta alcanzar una temperatura máxima;
- fase de decaimiento por consunción del combustible.

En la misma figura se ha representado una curva paramétrica, que supuestamente podría modelarla, y la curva de fuego normalizada general. Conviene destacar que las dos curvas modelo **están desplazadas** del inicio del incendio hasta que se inicia el *flashover*.

Es un lugar común que la utilización de la curva normalizada siempre está **del lado de la seguridad** respecto al fuego real. Esto no es siempre cierto, aunque sí lo es en las fases avanzadas del incendio (ningún incendio real aumenta indefinidamente la temperatura del recinto) Hay que tener en cuenta que la curva normalizada puede ser insegura en las fases primeras del fuego en las que las temperaturas reales crezcan de forma más rápida que en la curvas normalizada. Este aspecto, en cambio, se puede modelar adecuadamente con una curva paramétrica, como la representada en la figura.

Los parámetros que deben introducirse en el modelo son fáciles de obtener de las características del proyecto y, por tanto, estas curvas paramétricas pueden modelar, de forma sencilla y con suficiente aproximación, un **fuego real** en los casos más generales, con las limitaciones derivadas del campo de validez de las fórmulas.

Tabla 1
Resistencia al fuego suficiente de los elementos estructurales según el CTE

Uso del recinto inferior al forjado considerado	Plantas de sótano	Plantas sobre rasante		
		altura de evacuación del edificio		
		<15 m	<28 m	≥28 m
Vivienda unifamiliar	R-30	R-30	-	-
Vivienda, Residencial, Docente, Administrativo	R-120	R-60	R-90	R-120
Comercial, Pública Concurrencia, Hospitalario	R-120	R-90	R-120	R-180
Garaje (edificio de uso exclusivo)	R-90			
Garaje (situado bajo un uso distinto)	R-120 o la dada para el edificio si es superior			

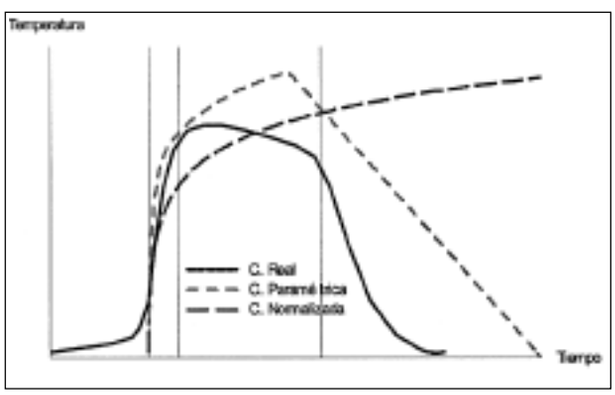


Figura 1.- Curvas tiempo-temperatura.

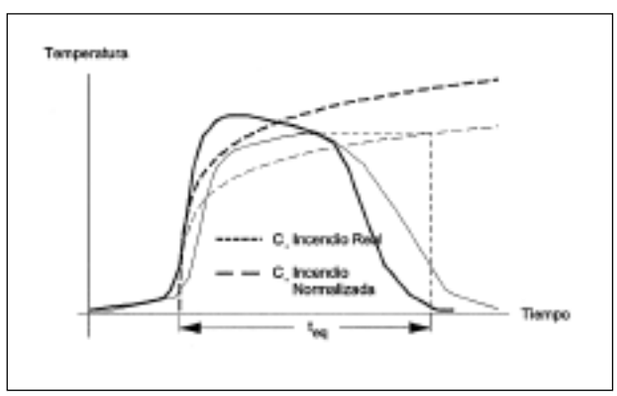


Figura 2.- Definición de tiempo equivalente.

El inconveniente que presenta la utilización de estas curvas viene dado por la dificultad de utilizarlas para establecer la capacidad resistente de un elemento: es necesario un cálculo complejo, salvo casos elementales, utilizando métodos de elementos finitos, o similares, que evalúe el incremento de temperatura en la sección con el tiempo y su efecto en la resistencia; o realizar ensayos particularizados para el elemento y la curva de fuego. Ambos métodos quedan fuera de las posibilidades en el caso de un proyecto mediano.

3. TIEMPO EQUIVALENTE DE EXPOSICIÓN AL FUEGO

La conveniencia de aunar las ventajas de los modelos de curvas normalizadas y de curvas paramétricas es clara, y desde hace tiempo se han llevado a cabo esfuerzos para ello con la idea de definir una duración de incendio en la curva normalizada que fuese equivalente al efecto del incendio real.

El Boletín 208 del CEB [4] define el *tiempo equivalente de exposición al fuego* de un elemento estructural como la **duración del período de calentamiento según la *curva tiempo-temperatura* de fuego normalizado que produce el mismo efecto decisivo en la estructura con respecto al fallo que la exposición a un incendio real en el sector de incendio considerado.**

En una estructura metálica se considera como efecto decisivo la temperatura en el elemento, supuesta uniforme. En elementos horizontales de hormigón armado se suele cosiderar la temperatura en la armadura inferior. En la Figura 2 se representa gráficamente esta definición del tiempo equivalente en una estructura metálica sin proteger. En ella aparecen, en trazo más grueso, las curvas de incendio real y normalizada de la temperatura en el ambiente del sector, y en trazo más fino las correspondientes curvas tiempo-temperatura en la estructura. El tiempo equivalente sería el tiempo en la curva de temperatura en el fuego normalizado que corresponde a la temperatura máxima alcanzada en el fuego real, ambas sobre las curvas de temperatura del elemento.

La traslación de la definición a términos operativos es compleja y se restringe a elementos estructurales de **ace-**

ro y de **hormigón aislados** sin tener en cuenta los efectos derivados del hiperestatismo de la estructura, de gran relevancia como pusieron de manifiesto los ensayos a escala real de Cardington [5].

En general, en el caso del acero, se considera como efecto decisivo para definir la equivalencia el que la temperatura del acero alcance una temperatura crítica de 500 ºC.

En el caso del hormigón armado se utiliza el mismo criterio considerando, en este caso, la temperatura alcanzada en la armadura inferior. Este criterio es válido, por tanto, para secciones de elementos dúctiles sometidas a flexión positiva; pero no tiene sentido en otro tipo de solicitaciones, pilares en particular.

Con los criterios indicados se han buscado fórmulas empíricas que den, de forma sencilla y aproximada, el valor del tiempo equivalente, en principio para elementos de acero, protegido o no, y posteriormente han sido comprobadas para el hormigón y validadas por experimentos o por estudios numéricos.

Pettersson [6], en 1975, fue el primero en dar una expresión que, con pequeñas variantes, se mantiene en la actualidad. El tiempo equivalente se calcula como el producto de tres factores, funciones de la **carga de fuego**, la **ventilación del recinto** y las **propiedades térmicas de las paredes** del contorno del mismo. La definición de estos factores varía en las distintas formulaciones. La consideración estadística de los valores obtenidos es de fundamental importancia. En definitiva, es un fenómeno con **alto grado de aleatoriedad** que se define determinísticamente.

Existen varias formulaciones aplicadas en la actualidad con ligeras variaciones, CEB[6], CIB [7], EN 1991[3]. La dada por el CIB es la más avanzada, hace patente la incertidumbre del modelo y da una caracterización estadística de los parámetros.

En el CTE se ha adoptado la indicada por el Eurocódigo que está dada por la expresión:

$$t_{e,d} = (q_{f,d} \cdot k_b \cdot w_f) \cdot k_c$$

donde:

$t_{e,d}$: tiempo equivalente de exposición al fuego (min),

$q_{f,d}$: valor de cálculo de la densidad de carga de fuego (MJ/m^2),

k_b: coeficiente de conversión en función de las propiedades térmicas de la envolvente del sector ($min \cdot m^2/MJ$),

w_f: coeficiente de ventilación en función de la superficie del sector [-],

k_c: coeficiente de corrección según el material estructural [-].

4. VALOR DE CÁLCULO DE LA CARGA DE FUEGO

El valor de cálculo de la carga de fuego se obtiene multiplicando el valor característico por distintos factores que tienen en cuenta la probabilidad de inicio de incendio, según tamaños y actividades del sector, y la probabilidad de fuegos totalmente desarrollados por la presencia de medidas activas, tomados del Eurocódigo. Además, se ha incluido explícitamente un nuevo factor que tiene en cuenta las consecuencias a que puede dar lugar el incendio, según la altura de evacuación y uso del edificio.

Este nuevo factor sería equivalente al coeficiente Y_{n1} definido en el CIB [7], pero aplicado al valor de la carga de fuego, en lugar de directamente al tiempo equivalente. La ventaja de aplicarlo a la carga de fuego es que este nuevo valor corregido permite que se considere en cualquier estudio que utilice directamente las curvas paramétricas sin consideración explícita de las consecuencias. Este coeficiente se supone implícito en la formulación prescriptiva de la duración de incendio exigida.

Las Tablas 2, 3, 4 y 5 dan los valores de estos coeficientes dados en el CTE.

Tabla 2
Coeficiente según el riesgo de iniciación por el tamaño del sector

Superficie del sector A_f (m^2)	Coeficiente
<20	1,00
25	1,10
250	1,50
2 500	1,90
5 000	2,00
>10 000	2,13

Tabla 3
Coeficiente según el riesgo de iniciación por el uso del sector

Actividad	Coeficiente
USOS: Vivienda, Administrativo, Residencial, Docente,	1,00
USOS: Comercial, Garaje, Hospital. Sectores de riesgo especial bajo	1,25
Sectores de riesgo especial medio	1,40
Sectores de riesgo especial alto	1,60

Tabla 4
Coeficiente según las medidas activas existentes

Detección automática	Alarma automática a bomberos	Extinción automática
$\delta_{n,1}$	$\delta_{n,2}$	$\delta_{n,3}$
0,87	0,87	0,61

Tabla 5
Coeficiente según las consecuencias previsibles

Altura de evacuación	δ_c
Edificios con altura de evacuación descendente de más de 28 m o ascendente de más de una planta	2,0
Edificios con altura de evacuación descendente entre 15 y 28 m o ascendente hasta 2,8 m. Garajes bajo otros usos.	1,5
Edificios con altura de evacuación descendente de menos 15 m	1,0

Tabla 6
Cargas de fuego características según uso

Usos	Valor característico, $q_{f,k}$ (MJ/m^2)
Comercial[1]	730
Vivienda	650
Hospitalario / Residencial	280
Administrativo / Oficinas	520
Docente	350
Pública concurrencia (teatros, cines)	365
Garaje	280

En el caso de edificios de especial trascendencia que no sea admisible que quede fuera de servicio o se puedan originar un número elevado de víctimas, como en el caso de hospitales, los valores indicados deben ser multiplicados por 1,5.

El valor característico de la carga de fuego puede obtenerse por valoración particularizada en cada proyecto o el dado en el CTE por usos del sector, según la Tabla 6.

(1)Para locales comerciales el valor indicado es el mínimo que se debe considerar, si no es previsible un uso con carga de fuego especialmente elevada.

5. ANÁLISIS DE LA CALIBRACIÓN

Con carácter previo es necesario aclarar que la calibración no se refiere a la fórmula de tiempo equivalente propuesta, que se supone adecuadamente calibrada, véase [8], sino a la calibración de los valores dados por la expresión utilizada en el CTE, con las modificaciones consideradas. Es decir, se tiene en cuenta el coeficiente multiplicador de la carga de fuego por las consecuencias previsibles del incendio; comparado con los valores dados de resistencias exigidas.

Como resultado evidente de la utilización del concepto de tiempo equivalente, cuando el valor sea menor que el exigido en las tablas prescriptivas, el proyectista debe proveer a la estructura con una resistencia al incendio dada por ese tiempo equivalente. Se entiende que el fuego real probable que puede ocurrir no va a producir efectos en la estructura mayores que el fuego normalizado mantenido durante ese tiempo.

Cuando el valor del tiempo equivalente es superior al exigido en las tablas la respuesta no es tan obvia. Ese resultado indicaría que el fuego real probable puede ocasionar unos efectos mayores en la estructura que los dados por la resistencia exigida. Por tanto, si la estructura tuviese estrictamente la resistencia exigida, en el caso de un incendio real de cálculo, la estructura podría colapsar.

El problema fundamental en este caso es que no se sabe realmente qué significa ese tiempo exigido. Se sabe, si acaso, lo que no es [3]:

Dicho tiempo no coincide, en general, con el de desarrollo de un incendio, ni con el instante en el que se alcanza la temperatura máxima o la peor condición para el elemento en cuestión. Tampoco se relaciona directamente con el tiempo necesario para la evacuación del edificio.

En el caso de incendio, no es un requisito que la estructura no llegue a colapsar, el requisito es que no se produzca el colapso mientras no estén asegurados los otros requisitos: los usuarios estén a salvo, no se produzca la propagación a otros edificios y los bomberos puedan actuar con seguridad. Puede admitirse que la estructura colapse posteriormente.

Se entiende que el tiempo exigido de resistencia es suficiente para asegurar que los requisitos se han cumplido antes de que la estructura colapse y que estos tiempos están calibrados empíricamente con la larga tradición en su uso.

Por tanto, entendemos que no es necesario dotar a la estructura de la resistencia dada por el tiempo equivalente cuando éste sea mayor que el de la exigencia, aunque pueda llegar a colapsar la estructura en el incendio.

6. CASOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN

Con el fin de hacer un estudio comparativo entre el método de tiempo equivalente que se propone en el CTE y los valores exigenciales de resistencia al fuego de los elementos estructurales dados en sus tablas, se han escogido cuatro casos representativos del panorama edificatorio actual.

Cada edificio corresponde a una actividad diferente. Además se ha considerado que están dotados de las medidas activas exigidas por el CTE.

Las características geométricas de cada tipología edificatoria se detallan en la página siguiente.

7. PRINCIPIOS BÁSICOS

Como ya se ha expuesto anteriormente, el modelo de tiempo equivalente de exposición al fuego definido en el CTE viene dado por la expresión:

$$\mathbf{t_{e,d}} = (\mathbf{q_{f,d}} \cdot \mathbf{k_b} \cdot \mathbf{w_f}) \cdot \mathbf{k_c} \qquad \text{(min)}$$

El valor del coeficiente de conversión $\mathbf{k_b}$ hace referencia a las propiedades térmicas de la envolvente del sector. En los casos estudiados se ha tomado, del lado de la seguridad, igual a 0,07.

El coeficiente de corrección según el material estructural $\mathbf{k_c}$, para estructuras de hormigón armado o acero protegido, toma el valor 1,0. Se ha considerado en los casos estudiados que la estructura se ha resuelto mediante alguno de estos dos sistemas.

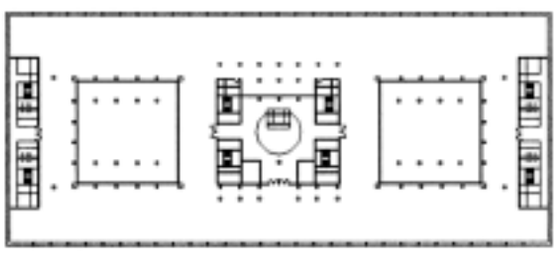
Para el cálculo del coeficiente de ventilación $\mathbf{w_f}$ es necesario conocer la relación entre la superficie de aberturas (tanto en la fachada como en el techo) y la superficie construida del sector (α_v y α_h respectivamente). La expresión para la obtención de este coeficiente es la siguiente:

$$w_f = (6/H)^{0,3}[0,62+90(0,4-\alpha_v)^4/1+b_v\alpha_h)] \geq 0,5$$

Según el Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio del CTE, el valor de la relación entre la superficie de las aberturas en el techo y la superficie construida del suelo del sector α_v ($\alpha_v=A_v/A_f$) debe estar comprendido entre los valores 0,025 y 0,25. Por otro lado, en los casos escogidos para este estudio, se considera que no hay aberturas en el techo, por lo que el valor de la relación entre la superficie de las aberturas en el techo y la superficie construida del sector del suelo α_h ($\alpha_h=A_h/A_f$) es 0.

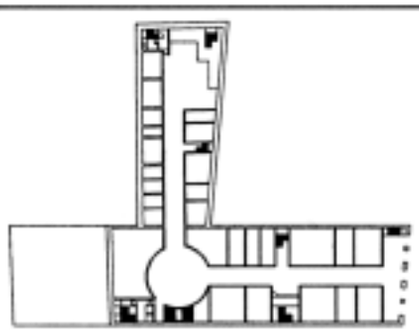
EDIFICIO OFICINAS

Área sector comercial (A_f):	1.593 m²
Altura sector (H):	3 m
Altura evacuación edificio:	9 m
Huecos en fachadas:	
Número de huecos:	74
Área de hueco:	6 m²
Área total de huecos (A_v):	444 m²
Huecos en techo:	
A_h	0 m²



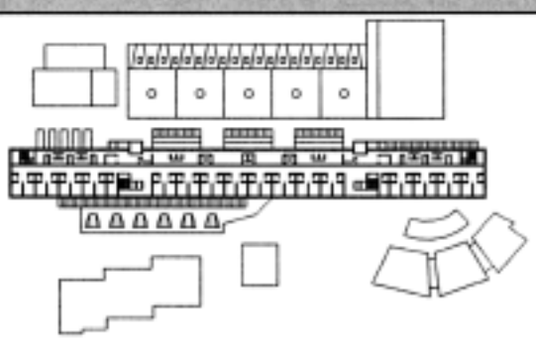
EDIFICIO COMERCIAL

Área sector comercial (A_f):	1.191 m²
Altura sector (H):	4 m
Altura evacuación edificio:	8 m
Huecos en fachadas:	
Número de huecos:	28
Área de hueco:	4 m²
Área total de huecos (A_v):	112 m²
Huecos en techo:	
A_h	0 m²



EDIFICIO HOSPITAL

Área del sector comercial (A_f):	702 m²
Altura sector (H):	3 m
Altura evacuación edificio:	17 m
Huecos en fachadas:	
Número de huecos:	39
Área de hueco:	3 m²
Área total de huecos (A_v):	117 m²
Huecos en techo:	
A_h	0 m²



EDIFICIO VIVIENDAS

Área del sector comercial (A_f):	660 m²
Altura sector (H):	3 m
Altura evacuación edificio:	12 m
Huecos en fachadas:	
Número de huecos:	50
Área de hueco:	1,5 m²
Área total de huecos (A_v):	75 m²
Huecos en techo:	
A_h	0 m²

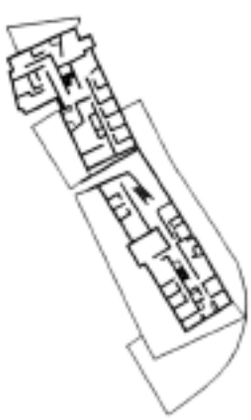


Tabla 7
Parámetros ventilación

	OFICINAS	COMERCIAL	HOSPITAL	VIVIENDAS
w_f	0,82	2,67	1,09	1,55
$\alpha_v = A_v/A_f$	0,25	0,027	0,17	0,11

8. PARÁMETROS DE VENTILACIÓN

Los parámetros de ventilación w_f y α_v calculados en los cuatro ejemplos de edificios se comparan a continuación en la tabla 7.

La relación de la superficie de aberturas en fachada con respecto a la superficie construida del sector puede variar mucho en función del uso del edificio. En los distintos ejemplos, este valor varía desde 0,027 en el edificio comercial hasta 0,25 en el edificio de oficinas. Con el aumento de este valor, el coeficiente de ventilación disminuye, ya que una mayor superficie de aberturas facilita la entrada de oxígeno y se acelera la combustión.

9. CARGA DE FUEGO Y COEFICIENTES

El valor de cálculo de la densidad de carga de fuego $\mathbf{q}_{f,d}$ se determina en función del valor característico de la carga de fuego del sector y de las consecuencias y la probabilidad de activación del incendio:

$$q_{f,d} = q_{f,k}\, m\, \delta_{q1}\, \delta_{q2}\, \delta_n\, \delta_c \qquad (MJ/m^2)$$

siendo:

m: coeficiente de combustión, que refleja la fracción del combustible que arde en el incendio. Se ha considerado que el material incendiado es mayoritariamente de tipo celulósico (m = 0,8);
δ_{q1}: coeficiente que tiene en cuenta el riesgo de iniciación debido al tamaño del sector. El caso del edificio comercial es el que tiene un tamaño de sector más grande, y su efecto negativo se compensará con la instalación de un sistema de rociadores automático;
δ_{q2}: coeficiente que tiene en cuenta el riesgo de iniciación de un incendio debido al tipo de uso o actividad. Según las tablas del DB SI del CTE, los cuatro ejemplos estudiados tienen el mismo nivel de riesgo: 1;
δ_n: coeficiente que tiene en cuenta las medidas activas existentes. En el edificio comercial se considera que hay una instalación de rociadores automáticos, lo que reduce considerablemente el valor de cálculo de la densidad de carga de fuego;
δ_c: coeficiente de corrección según las consecuencias del incendio. Se considera que las consecuencias de que se produzca un incendio en un hospital son mucho más graves que en otros edificios, ya que este uso edificatorio representa un riesgo considerable para la sociedad en caso de colapso. En este caso, donde además la altura de evacuación supera los 15 m, el coeficiente δ_c multiplica el valor característico de la densidad de carga de fuego por 2,25;
$q_{f,k}$: valor característico de la densidad de carga de fuego por unidad de superficie del sector, tomado de la tabla proporcionada por el CTE.

En la tabla 8 se relacionan los valores de los coeficientes empleados en el cálculo de la densidad de carga de fuego en los cuatro edificios estudiados y, en la tabla 9, los de la densidad de carga de fuego, tanto el valor característico como el de cálculo.

Finalmente, el tiempo equivalente se calcula con todos los datos obtenidos. En la tabla 10 se comparan los resultados con los valores exigenciales dados por el CTE.

En general, hay una gran variación en los resultados obtenidos con los métodos del tiempo equivalente con respecto a los valores dados en las tablas del CTE.

En el caso del edificio de oficinas y del hospital los valores de resistencia al fuego exigidos en el CTE son más exigentes que los obtenidos por el método del tiempo equivalente. Esto ocurre sobre todo en el caso del hospital, en el que el tiempo que pide el CTE es más del doble, a pesar de la aplicación del coeficiente δ_c tan elevado, que multiplica el valor de la densidad de carga por 2,25.

10. OBSERVACIONES

Si introducimos variaciones en los datos de partida de los ejemplos anteriores, puede verse cómo influyen los distintos parámetros en el valor del tiempo equivalente obtenido.

En el edificio de oficinas, por ejemplo, se ha obtenido un tiempo equivalente de resistencia al fuego de **43 min**. Si se reduce el coeficiente de ventilación w_f disminuyendo la superficie de aberturas en fachadas (el mínimo $\alpha_v = A_v/A_f = 0{,}025$, entonces $w_f = 2{,}95$), el tiempo equivalente sería de **155 min.**, más del triple que en el ejemplo original. Si, en cambio, se instala un sistema de rociadores automáticos sobre la primera versión, el tiempo equivalente se reduciría a **26 min**.

Tabla 8
Coeficientes empleados en el cálculo de la densidad de carga de fuego

	OFICINAS	COMERCIAL	HOSPITAL	VIVIENDAS
m	0.8	0.8	0.8	0.8
δ_{q1}	1.80	1.95	1.70	1.60
δ_{q2}	1	1	1	1
δ_{qn}	1	0.53	0.76	1
δ_s	1	1	2.25	1

Tabla 9
Valor característico y de cálculo en la densidad de carga de fuego

	OFICINAS	COMERCIAL	HOSPITAL	VIVIENDAS
q_{fk}	520	730	280	650
q_{fd}	749	604	649	832

Tabla 10
Comparación con las exigencias del CTE

	OFICINAS	COMERCIAL	HOSPITAL	VIVIENDAS
Tiempo equivalente	43	113	50	90
Exigencia CTE	60	90	120	60

El edificio comercial, con un tiempo equivalente de **113 min**, tiene un coeficiente de ventilación muy bajo. Si se sustituye por el mayor coeficiente posible ($_v = A_v/A_f = 0{,}25$, entonces $w_f = 0{,}75$), se obtiene un valor del tiempo equivalente de **32 min**.

En el caso del hospital escogido como ejemplo, el tiempo equivalente obtenido inicialmente es de **50 min**. Si reducimos el coeficiente de ventilación w_f disminuyendo la superficie de aberturas en fachadas (el mínimo $_v = A_v/A_f = 0{,}025$, entonces $w_f = 2{,}95$), el tiempo equivalente sería de **134 min**. En cambio, la instalación de un sistema de rociadores automáticos con el nivel de ventilación inicial, reduciría el t_{eq} a **30 min**.

En el caso del edificio de viviendas, se ha tomado un número y dimensión de huecos bastante habitual en la construcción actual. Los resultados obtenidos del tiempo equivalente son más desfavorables que la duración del incendio dada en las tablas del DB SI del CTE y, únicamente en el caso de que duplicásemos el número de aberturas, nos acercaríamos al valor de las tablas.

En general, la presencia o no de medidas activas en el sector en estudio influye sustancialmente en los resultados obtenidos. Como se ha visto, en todos los casos una instalación de rociadores automáticos reduce significativamente el tiempo equivalente.

En cuanto al coeficiente de ventilación, también influye de manera significativa en el valor del t_{eq}. En los casos en que el sector está bastante ventilado, los valores de las tablas del DB SI del CTE son bastante más exigentes que los obtenidos con el método del t_{eq}.

11. RESULTADOS

Los ejemplos realizados no pretenden ser la base de una calibración completa y rigurosa de los valores obtenidos de tiempo equivalente, sólo se ha pretendido obtener una panorámica que dé una idea del rango de valores obtenidos comparados con los exigidos y, si acaso, ensayar una metodología para un estudio completo que debe realizarse.

En general, hay una gran variación en los resultados obtenidos con los métodos del tiempo equivalente con respecto a los valores dados en las tablas de exigencias del CTE, dependiendo principalmente del **coeficiente de ventilación**. En los casos en que el sector está muy ventilado, los valores de las tablas son bastante más exigentes que los obtenidos por el tiempo equivalente.

Hay que señalar, por tanto, que si se obtiene un valor pequeño del tiempo equivalente debido a un coeficiente de ventilación elevado se está aumentando la seguridad de la estructura en caso de incendio, pero puede representar otro tipo de riesgos durante el incendio. En un recinto con muchas aberturas el fuego se desarrolla más rápidamente, por lo que se puede perjudicar la evacuación de los ocupantes.

El coeficiente introducido en la carga de fuego por las consecuencias del incendio parece tener un efecto de homogenización de ambos métodos y que incluso en el caso de hospitales, en que este valor se ha tomado máximo los valores de tiempo equivalente son inferiores a los exigidos, salvo que la ventilación sea mínima, que no parece tener sentido.

La influencia de las medidas activas instaladas en el sector influyen sustancialmente en los resultados obtenidos. La instalación de rociadores automáticos considerada reduce significativamente el tiempo equivalente, permitiendo tener en cuenta su influencia que con las exigencias prescriptivas no era posible.

12. CONCLUSIONES

- El estudio muestra la viabilidad del empleo del tiempo equivalente como alternativo a las exigencias prescriptivas tradicionales.
- Los valores de tiempo equivalente obtenido parecen razonables, sin significar, ni en un sentido ni otro, diferencias importantes con las exigencias anteriores, salvo en casos extremos de ventilación.
- El coeficiente de corrección por carga de fuego introducido produce efectos razonables
- Puede actuarse sobre la resistencia que deba ser exigida mediante la modificación del proyecto: aumentando la ventilación o incluyendo medidas activas.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido desarrollado dentro de la división del Código Técnico de la Edificación del IETcc. Colaboraron en los trabajos previos Silvia Herrero, arquitecto y Amélie Deleurence, alumna de la École National de Ponts et Chaussées. Paris.

REFERENCIAS

[1] Código Técnico de la Edificación. M. Fomento, 2004, www.codigotecnico.org
[2] Norma Básica de la Edificación: Condiciones de Protección contra Incendios en los edificios, M. Fomento, Madrid 1996.
[3] EN 1991-1-2: *Eurocódigo 1: Acciones en estructuras: Parte 1-2: Acciones de incendio. Bruselas, 2002.*
[4] Bulletin d´Information 208. *Fire Design of Concrete structures in accordance with CEB/FIP model code 90* (final draft) July 1991. CEB. Comité Euro-International du Beton.
[5] Tom Lennon, David Moore, "*The natural fire safety concept. Full scale tests at Cardington.*", Fire Safety Journal 38 (2003), pp. 623-643.
[6] Bulletin 39. *The connection between a real fire exposure and heating conditions according to standard fire resistance tests, with special application tosteel structures*. Ove Pettersson. Division of structural mechanics and concrete construction. Lund Institute of Technology. Lund Sweden 1975.
[7] CIB Report, Actions on structures. Fire. Publication 166, September 1993.
[8] J.B. Schleich, *Background document for the preparation of prEN1991-2-2*, CEN/TC250/SC!/N161, 1996

* * *