

DISEÑO DE NUDOS EN ESTRUCTURAS DE FÁBRICA: ANÁLISIS COMPARATIVO

(DESIGN NODES IN MASONRY STRUCTURES: COMPARATIVE ANALYSIS)

Manuel J. Freire Tellado, Dr. arquitecto, Juan B. Pérez Valcárcel, Catedrático de Universidad
Departamento de Tecnología de la Construcción.
Universidad de A Coruña

Fecha de recepción: 6-X-03

ESPAÑA

631-19

RESUMEN

La verificación resistente de una sección de un muro de fábrica depende básicamente de la determinación de la excentricidad en la aplicación del axil, excentricidad que es además el punto de arranque de la comprobación de pandeo. Dada la situación de revisión normativa en la que nos encontramos inmersos, ha parecido relevante la revisión de los métodos de evaluación de la excentricidad que proponen diversas referencias de nuestro entorno y la evaluación comparativa de los resultados obtenidos.

Se parte del análisis de los diversos métodos desarrollados, cuya implementación informática se traduce en una serie de gráficas que muestran el comportamiento de cada uno de ellos. Para ello es preciso definir previamente elementos que puedan ser evaluados por cualquiera de los métodos, lo que añade una justificación al análisis previo.

Se trata de activar los mecanismos de control que los métodos gráficos incluyen, al tiempo que se alerta sobre la divergencia de los resultados de las diferentes formulaciones.

SUMMARY

The resistant verification of a section of a masonry wall basically depends on determining the eccentricity in the application of the axial load; this eccentricity is also the starting point to confirm buckling. Given the current regulation situation, we consider relevant to revise the eccentricity evaluation methods proposed by different references in our environment, and the comparative evaluation of the results obtained.

We start with the analysis of the different methods developed, which computing tools can be translated into a series of graphics reflecting the behaviour of each of them. Previously, we must define the elements that can be evaluated by means of any of those methods; this adds justification to the initial analysis of those methods.

The graphics generated alert on the divergence of the different formulations results, at the same time as they activate the control mechanisms inherent in the graphic representation.

1. INTRODUCCIÓN

Punto crítico de la normativa de fábrica es el análisis del nudo. Y no sólo por la dificultad del encuentro de dos materiales -y dos filosofías- distintas, sino debido tanto a razones constructivas (el cambio de dimensión del propio muro portante, por ejemplo) como analíticas (la difícil determinación del grado de empotramiento que se produ-

ce en el apoyo del forjado en la fábrica). Es además un estudio determinante, porque de las excentricidades en la aplicación del axil que se obtengan dependerán la aceptación o no de la sección de fábrica y también todo el proceso de cálculo a pandeo subsiguiente. Con esta consideración ha parecido muy relevante investigar los resultados a los que conducen los diversos métodos de validación de estructuras de fábrica de nuestro entorno.

Estas líneas se organizan por tanto en base al estudio de la antigua norma española de muros resistentes de fábrica de ladrillo, MV-201 [01], y de la actual, NBE-FL-90 [02]. Asimismo se ha incluido el método propuesto por la norma inglesa de estructuras de fábrica sin reforzar, BS-5628 Part 1: 1992 [03], y la norma europea de referencia, EC-6 [04], actualmente en fase de adaptación como Código Técnico de la Edificación. Ha parecido relevante considerar la formulación propuesta por HISPALYT [05].

Se han revisado también las normas estadounidenses Building Code Requirements for Masonry Structures, ACI 530-02, y Specification for Masonry Structures, ACI 530.1-02 [06], pero no se han encontrado referencias específicas para este análisis. De todas formas vale la pena señalar que esta norma permite planteamientos de verificación muy variados, que van desde la verificación de la estructura por métodos de tensiones admisibles (Capítulo 2), por estados límites (Capítulo 3) e incluso -recogiendo la tradición de la tratadística- mediante reglas geométricas (Capítulo 5, Diseño empírico de la fábrica). Permite además el empleo simultáneo de dos sistemas de unidades (libra, pulgada... e internacional), proporcionando la formulación en ambos sistemas. Parece un ejemplo que podrían considerar los redactores de las normativas españolas, y no sólo en el mundo de la fábrica sino también en el hormigón estructural.

El análisis ha establecido sobre los métodos siguientes:

- Método de MV-201 1972
- Método de NBE-FL-90
- Método de BS-5628 Part 1: 1992
- Método del Eurocódigo EC-6 (Análisis de nudo)
- Método del Eurocódigo EC-6 (Análisis de pórtico)
- Método de HISPALYT

El método de MV-201 1972 se va a estudiar conjuntamente con el método de NBE-FL-90 dado que la estructura es la misma, pero tratando de forma separada el punto en el que se produce la divergencia entre ambos: ha parecido conveniente exponer primeramente el método original y considerar después los efectos de la revisión que dio lugar a FL-90, dado que el factor introducido debe ser considerado cuidadosamente. Se ha introducido el análisis de la norma inglesa BS-5628 Part 1: 1992 debido al empleo de la construcción de fábrica en este país y a su valor como referencia para muchos técnicos. La consideración del Eurocódigo EC-6 es obligada en cuanto que norma europea de referencia y base de las propuestas del Código Técnico de la Edificación. Por ello se analizan las dos vías que propone para la determinación de las excentricidades en la verificación de la estructura. Por último, HISPALYT, propone un método muy sencillo en cuya formulación hay aspectos que pueden ser de interés.

2. TRABAJO DESARROLLADO

El objeto del estudio fue el análisis comparativo de los resultados numéricos obtenidos por la aplicación de los diversos métodos de estudio de nudos planteados por las distintas referencias. Se parte de la convicción de que la evaluación numérica aplicada a los modelos teóricos del cálculo de estructuras permite la evaluación y clarificación de las propuestas desarrolladas por las distintas referencias, dentro de lo que sería una fase previa del estudio experimental anterior al ensayo de modelos, proporcionando un control exhaustivo de resultados.

Como método de chequeo se recurre a la representación gráfica de los valores obtenidos. La exposición gráfica de los resultados permite la detección rápida de errores y el control visual del proceso, e incluye procesos de automáticos de comprobación.

Se trata por tanto de poner en evidencia el grado de acuerdo o desacuerdo de las diferentes propuestas de verificación desarrolladas, al tiempo que permite extraer interesantes consecuencias sobre el tema de estudio.

Para llevar a cabo este objetivo, se partió de la revisión pormenorizada de los métodos propuestos por las diferentes referencias consideradas, detectándose problemas diversos en las distintas formulaciones.

Seguidamente, se procedió al análisis comparativo, a la homogeneización y sistematización de la nomenclatura, para facilitar su comprensión y, en última instancia, la comparación. Se estableció un ámbito de aplicación que fuese válido para todos los métodos, identificándose los parámetros básicos de cada método. Así, se partió de un muro de fábrica de ladrillo perforado, deduciéndose a partir de una resistencia común los valores precisos de acuerdo con la formulación de cada método. Como criterio organizativo se tomaron los derivados de la norma española vigente, NBE-FL-90.

Se continuó con el desarrollo de una rutina informática en Visual Basic que permitiese realizar un barrido de las situaciones posibles del análisis de nudo. Además se ha dotado la rutina desarrollada de una salida de resultados de tipo *Script*, directamente legible por el programa *AutoCAD* r.2000.

El análisis tipo pórtico propuesto por EC-6 se llevó a cabo mediante el programa de cálculo matricial X7 [07] desarrollado dentro del Departamento de Tecnología de la Construcción. Es éste un programa matricial plano que permite el control del proceso dado que estudia las fuerzas desequilibradas que se producen en cada nudo tras el cálculo y con una opción de salida a fichero de texto, lo que permite la importación y tratamiento posterior de los resultados con una hoja de cálculo. El trabajo se completa

con la generación de ficheros tipo *Script*, para trasladar los resultados obtenidos al programa de dibujo.

Dentro del programa de dibujo, la información se estructura en capas, de tal forma que la revisión y comparación de los resultados se realiza seleccionando y activando las capas oportunas. Para facilitar esta labor, se dió a cada capa un nombre descriptivo, obtenido con un criterio de nomenclatura de capas que recoge las diferentes características del cálculo cuyos resultados contiene. Un nombre válido es *NIE-FL-24-Np3-AC1-e2*, donde los campos de información se separan con guiones.

El primero de ellos, *NIE* en el ejemplo, indica el tipo de nudo analizado: *Nudo Intermedio Extremo*. Seguidamente se indica el método de cálculo al que corresponden los resultados, *FL*; continúa indicando el espesor del muro inferior, *24* cm y el Número de Plantas sobre la calculada que existen, *Np3*. Finalmente indica si el forjado es Aislado (0) o Continuo (1), *AC1* -continuo- para rematar indicando la excentricidad sobre la que facilita los datos: excentricidad inferior, *e2*. De esta forma quedan recogidos los datos básicos del cálculo efectuado y se habilita la comparación por ese rango de valores.

En cuanto al análisis desarrollado es del tipo conocido como *análisis en variables separadas*: se parte de la modificación de una variable mientras se mantienen constantes todas las demás. Posteriormente se recurre a la variación en una segunda variable y se repite el proceso de variación de la variable base. Este sistema trata de prevenir de interacciones recíprocas y se ha resuelto mediante la creación de bucles anidados para la modificación de cada variable.

Se han analizado muros de una sola hoja y sección rectangular con ejes coincidentes, dada la limitación de la formulación de EC-6 -que luego se detalla-

No obstante todo lo anterior, la normativa de fábrica contiene normalmente dos puntos oscuros en es aspecto. Uno de ellos viene dado por una falta de deslinde en el cálculo de comprobación entre estado límite último -resistencia del nudo- y estado límite de servicio -fisuración exterior de la fábrica- que se pretenden resolver con una comprobación única. De ahí que métodos de resistencia como FL-90 planteen problemas en el aspecto exterior de la fábrica mientras que otros exijan secciones desproporcionadas condicionadas por la resolución del problema de fisuración con cargas de agotamiento.

No se puede olvidar tampoco la confusión que existe en los métodos de comprobación de la sección. Éstos están basados en el método que FL-90 llamó Sección eficaz [08], que corresponde a la situación de plastificación total de una sección de material sin resistencia a tracción con una rama plástica horizontal sometido a M y N, Figura 1. No se confunda esta situación con la derivada del empleo del diagrama rectangular: éste es un recurso para facilitar el cálculo cuyos resultados se aproximan a los obtenidos mediante la aplicación del diagrama parábola rectángulo. Nótese que el bloque de compresiones se limita, en el diagrama rectangular, al 80% de la zona comprimida de la sección -0,80. y, donde y es la profundidad de la fibra neutra-, mientras que en los métodos de comprobación de fábricas no aparece ninguna limitación, dado que el bloque de compresiones se extiende en toda la profundidad de la sección hasta alcanzar de la fibra neutra.

3. ACCIONES DE LOS FORJADOS: LA EXCENTRICIDAD

Los forjados transmiten las cargas a los muros con cierta excentricidad, debido tanto a la deformación por flexión de éstos como a la forma de realización del apoyo, excentricidad con un origen múltiple:

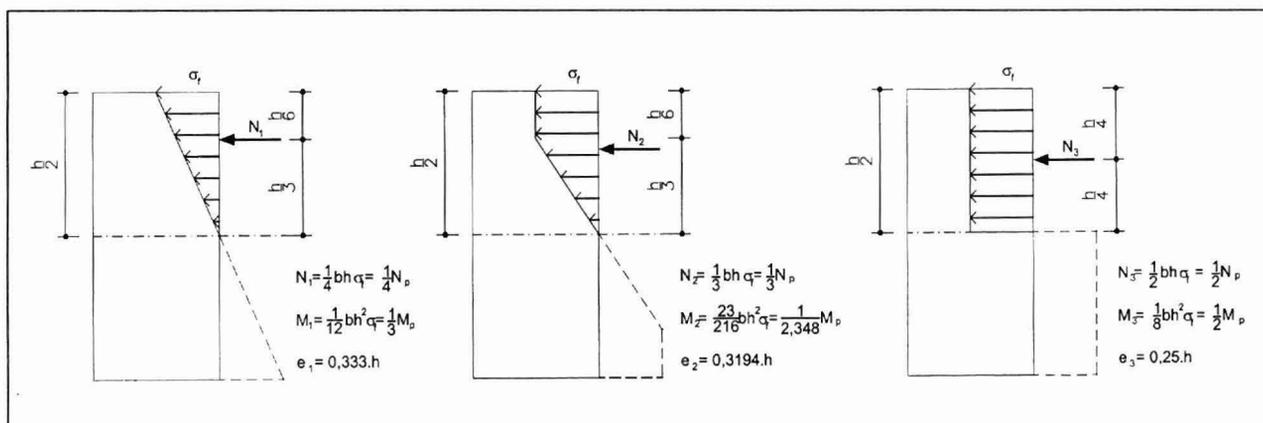


Figura 1

- la propia deformación por flexión de los forjados, que modifica el punto de aplicación de la resultante;
- el diseño del apoyo, ya que un apoyo que no ocupe todo el espesor del muro introduce necesariamente una excentricidad en la aplicación de las cargas;
- el propio diseño general de la estructura puede provocar excentricidades: forjados continuos con cargas y/o luces muy desequilibradas introducirán excentricidades sobre el muro en el que descansan;
- las condiciones de ejecución: las imperfecciones en la construcción pueden dar lugar a la aparición de excentricidades.

La situación resistente del nudo, como mecanismo de garantizar la estabilidad de éste.

Los semiempotramientos originados en los forjados como consecuencia de los tramos de muro que gravitan sobre ellos, y que coacciona su libre deformación.

Estas condiciones son recogidas parcialmente dentro de los métodos estudiados. La excentricidad así originada sirve de base para la comprobación de la sección y también el estudio del pandeo del muro, posterior a la comprobación anterior [09].

En lo tocante a la evaluación de las excentricidades con las que las cargas son transmitidas, para el desarrollo del trabajo se ha seguido la clasificación de casos establecida por la norma NBE-FL-90.

* *Forjados sin Tramo Superior de Muro (art. 5.5.2.).*

- *Tramo Extremo.*
- *Tramo Interior.*

* *Forjados con Tramo Superior de Muro (art. 5.5.3.).*

- *Tramo Extremo.*
- *Tramo Interior.*

Cada uno de estos casos tiene una forma específica de evaluar la excentricidad. Seguidamente se exponen los métodos de MV-201/FL-90 y de BS-5628.

1. ESTUDIO SEGÚN MV-20 / NBE-FL-90

MUROS SIN TRAMO SUPERIOR

La norma NBE-FL-90 define una excentricidad de aplicación muy sencilla, Figura 2, pero que no tiene en cuenta la interrelación con el forjado de cubierta: la excentricidad propuesta es independiente de la rigidez del forjado. Y es precisamente el grado de rigidez -mejor dicho de deformabilidad- del forjado el factor determinante en la excentricidad con la que se transmitirán las cargas al muro. Es cierto que existe una excentricidad accidental añadida -cuyo valor puede quedar englobada en el valor de excentricidad propuesto- y que la norma plantea cierto grado de

control sobre la deformabilidad del forjado al obligarle a cumplir los criterios de la norma de forjados de hormigón [10], pero este sistema no permite contemplar ni otros tipos de forjado -por ejemplo de madera, ni placas de hormigón- ni considerar el efecto beneficioso para el muro de fábrica que introduce el proyectar un forjado más rígido de lo que sería necesario por otras cuestiones.

Los valores de excentricidad definidos -siendo a la entrega y d el espesor del muro- son:

$$e = \frac{d}{2} - \frac{a}{4} \qquad e = \frac{F_{2d} - F_{1d}}{F_{1d} + F_{2d}} \cdot \frac{d}{4}$$

En el primer caso, si la entrega es total $e = d/4$. En el segundo de los casos, la excentricidad resultante se obtiene al considerar la carga total transmitida formada por dos fracciones, cortante derecho y cortante izquierdo, tales que $F_d = F_{1d} + F_{2d}$, fracciones aplicadas ambas a una excentricidad $d/4$ cada una hacia su lado. La fórmula anterior expresa el punto de paso de la resultante de fuerzas de este caso.

Cabría entonces preguntar el porqué de los valores establecidos para los puntos de aplicación de la carga. Una segunda crítica es la desvinculación del método con las condiciones de servicio que permitan garantizar -especialmente en el primer caso- la no formación de una fisura horizontal, la clásica fisura de frentes de forjado.

MUROS CON TRAMO SUPERIOR

Cuando existe tramo superior de muro, el mecanismo que plantean MV-201 y FL-90 para fijar la excentricidad parte de considerar un cierto grado de empotramiento del forjado en el muro, como consecuencia de la gravitación del muro superior. La excentricidad es una condición para lograr el equilibrio del nudo, ya que permite generar un cierto momento flector que equilibra el efecto de semiempotramiento del forjado.

El razonamiento parece totalmente correcto, pero surge la duda cuando éste se instrumentaliza: la norma establece un valor del momento de empotramiento que se ha de garantizar, función de las rigideces relativas entre muros y forjado, y a partir de esta condición se realiza la determinación de las excentricidades. La crítica del método es inmediata, por cuanto en el grado de empotramiento que se produce en un nudo influye también la magnitud del axil que gravita sobre por éste, factor que la norma no considera.

Dado que MV-201 1972 y NBE-FL-90 son normas planteadas desde el estado último de agotamiento, el momento que se considera se plantea como una fracción del mo-

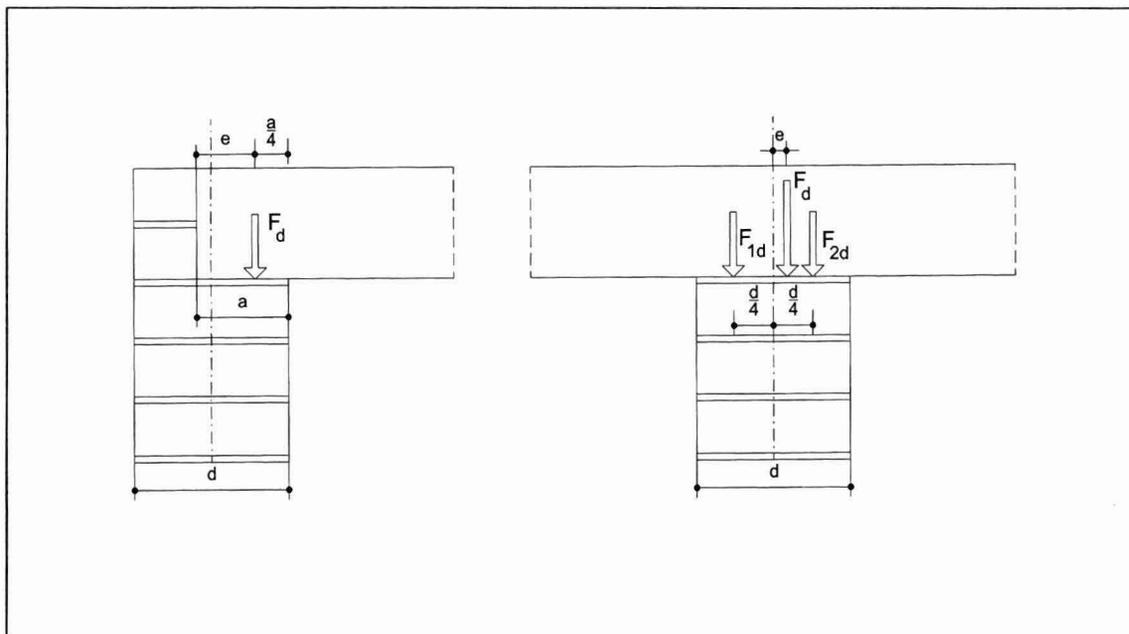


Figura 2

mento de empotramiento perfecto una vez plastificada la viga -momento de semiempotramiento perfecto-.

Nuevamente surgen dudas sobre la instrumentación de este razonamiento, especialmente al definir la forma de calcular las excentricidades a considerar, que parecen excesivas. Se llegan a plantear paradojas muy curiosas que se analizarán posteriormente.

a. Tramo Extremo:

En cuanto a las cargas a considerar en el equilibrio del nudo, la acción del forjado se plasma en la transmisión de

una reacción y a la vez que estará sometido a un cierto grado de empotramiento por razón de la gravitación del tramo superior de muro, Figura 3. La norma señala un valor para este momento de semiempotramiento del forjado:

$$M_d = \mu \cdot q_d \cdot b \cdot l^2$$

donde q_d es la carga a la que se encuentra sometido el forjado, l su luz, b el ancho del tramo considerado y μ el factor de empotramiento dado por la fórmula

$$M_d = \frac{1}{16} q_d \cdot b \cdot l^2 \frac{K_{n1} + K_{n2}}{K_f + K_{n1} + K_{n2}}$$

donde los valores de K_i corresponden a los valores de las distintas rigideces de los elementos que intervienen:

$$\text{Tramo Superior : } K_1 = \frac{E \cdot I_1}{h_1} \quad I_1 = \frac{t_1^3 \cdot b}{12}$$

$$\text{Tramo Inferior : } K_2 = \frac{E \cdot I_2}{h_2} \quad I_2 = \frac{t_2^3 \cdot b}{12}$$

$$\text{Forjado : } K_f = n \frac{K \cdot b}{l}$$

donde:

E : módulo de deformación de la fábrica

$K = I_f E_f$: módulo de flecha por metro del forjado

n : factor dependiente de las condiciones de apoyo del forjado,

$n = 0,5$ en forjado de tramo aislado

$n = 1$ en forjado continuo.

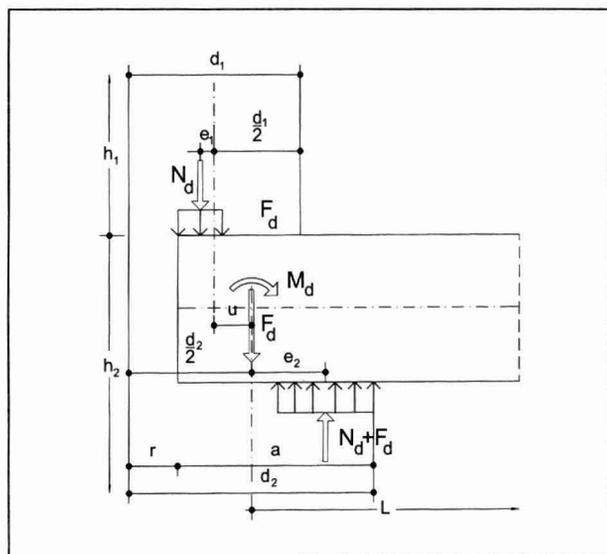


Figura 3

Si se introduce el módulo de flecha en la ecuación anterior, la rigidez del forjado se expresa de la forma sobradamente conocida

$$K_f = n \cdot b \frac{I_f \cdot E_f}{l}$$

donde b introduce el ancho real de forjado - el módulo de flecha se indica para 1 m de ancho-.

La forma en que se obtiene el momento transmitido al muro -porcentaje de acuerdo con las rigideces relativas- permite deducir que son interesantes forjados rígidos que minimicen el factor de empotramiento y mejoren el comportamiento del muro: el incremento de la rigidez del forjado disminuye el cociente. Se señala también que como caso límite para rigidez nula del forjado, el momento a absorber por el muro sería:

$$M_d = \frac{q_d \cdot l^2}{16}$$

Señalar también que así como la carga transmitida al muro por el forjado se ve incrementada por el ancho de la faja de carga -que incluye también la mitad del espesor de los huecos adyacentes-, sin embargo al evaluar la rigidez del forjado se toma un ancho igual al del machón y no al ancho real del tramo del forjado, lo que parece no casar muy bien, si bien es cuestión fácilmente soslayable. Igualmente parece conveniente ajustar las expresiones de rigidez a las derivadas de la teoría, con la relación 4:3.

En estas condiciones, planteando el equilibrio del nudo tal y como se desprende del gráfico anterior, se obtiene:

$$M_d = (N_d + F_d) \cdot e_2 + N_d \cdot (e_1 + u)$$

Para un determinado valor del momento, la excentricidad máxima se producirá cuando el muro esté reaccionando a la máxima tensión de que es capaz, esto es, con el valor de cálculo de ésta, f_d .

La expresión anterior se puede expresar, en función de las excentricidades e_1 y e_2 , como

$$M_d - N_d \cdot u = (N_d + F_d) \cdot e_2 + N_d \cdot e_1$$

Así, de acuerdo con el gráfico, la tensión sobre los tramos de muro será, siendo r el recubrimiento,

$$\sigma_1 = \frac{N_d}{2 \left(\frac{d_1}{2} - r - e_1 \right) b} \leq f_d \quad \sigma_2 = \frac{N_d + F_d}{2 \left(\frac{d_2}{2} - e_2 \right) b} \leq f_d$$

Como las cargas F_d y N_d son constantes, la tensión dependerá exclusivamente del valor del área sobre la que esté aplicada la carga. Este área dependerá exclusivamente de los distintos valores de las excentricidades. Llegados a este punto se plantean las diferencias entre MV-201 1972 y NBE-FL-90.

Ambas normas plantean las condiciones límites de

$$e_1 \geq -\frac{r}{2} \text{ y } e_2 \geq 0, \text{ valor que debe corregirse a } e_2 \geq \frac{r}{2}.$$

Además, ambas normas consideran que el recubrimiento r no trabaja, lo cual no tiene por qué descartarse en ciertas situaciones, como la que recoge la Figura 4 y ampliar de esta forma los casos que la norma permite considerar como aceptables.

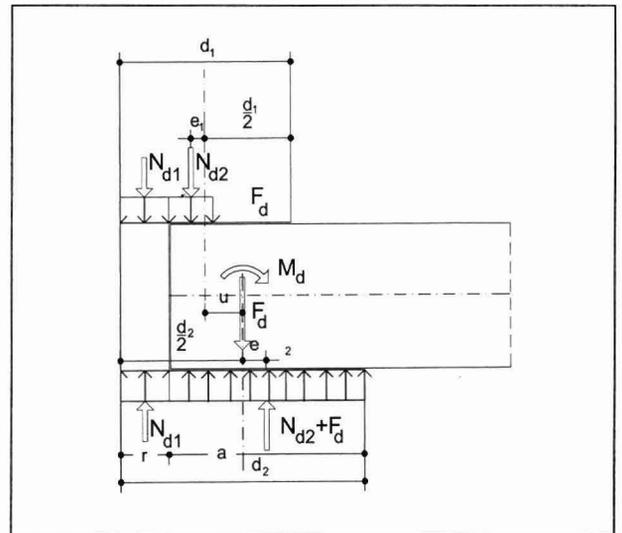


Figura 4

a. MÉTODO DE LA NORMA MV-201

Establece que *generalmente* se admite que $\sigma_1 = f_d$ (condición límite último) y en esta situación se obtiene:

$$e_1 = \frac{d_1}{2} - r - \frac{N_d}{2 \cdot b \cdot f_d}$$

y

$$e_2 = \frac{M_d - N_d(u + e_1)}{N_d + F_d}$$

Valor para el que se comprueba que $\sigma_2 \leq f_d$. Entre las críticas a este método se plantea, como fundamental, la que se refiere a la tensión con la que reacciona el muro superior. La norma, dentro del esquema de cálculo en tensiones últimas, plantea la reacción de una sección completamente plastificada, lo cual evidentemente, puede distar mucho de la realidad, ya que el muro no tiene por qué -salvo en el caso de momento último del nudo- estar res-

pondiendo a su tensión máxima, y, por tanto, con excentricidades tan elevadas.

La norma señala textualmente que '*generalmente* se admite [...]', lo que no implica una obligación sino una posibilidad de empleo común. Esta condición es derivada del análisis plástico, que es un análisis en agotamiento lo cual permite establecer un límite superior y no determinar la excentricidad en cada caso: el proyectista puede establecer que el admite por ejemplo $\sigma_1 = 0,50 \cdot f_d$, comprobar el equilibrio en ese supuesto, y aceptar el nudo si se verificase, si bien aceptar una situación de secciones plastificadas con tensiones diferentes a la de plastificación rechina -si bien es lo que hace FL-90-. Ahora bien, con el método de estudio del pandeo que propone la norma interesa obtener en los nudos las mayores excentricidades posibles para que el estudio del pandeo no conduzca a incrementos de éstas. Nótese que el método permite suponer que cualquiera de ambas excentricidades es nula e intentar equilibrar el nudo con este criterio.

b. MÉTODO DE LA NORMA FL-90

Expuesto lo anterior, NBE-FL-90 introdujo la siguiente corrección. Si llamamos e_1' y e_2' a las excentricidades máximas, esto es, aquellas que se producen cuando el muro está reaccionando con una tensión de valor f_d del gráfico se deduce que éstas se pueden expresar como:

$$e_1' = \frac{d_1}{2} - r - \frac{N_d}{2 \cdot b \cdot f_d} \quad e_2' = \frac{d_2}{2} - \frac{N_d + F_d}{2 \cdot b \cdot f_d}$$

Empero admitiendo que la respuesta del muro provoque unas excentricidades menores que las máximas -que se pueden expresar como un porcentaje de las excentricidades máximas-, y suponiendo constante el porcentaje de ambas excentricidades con respecto a sus respectivas excentricidades máximas, esto es, $e_1 = \phi \cdot e_1'$ y $e_2 = \phi \cdot e_2'$, donde e_1' y e_2' son las excentricidades máximas, la fórmula anterior se escribe como

$$M_d = (N_d + F_d) \cdot \Phi \cdot e_2' + N_d \cdot (\Phi \cdot e_1' + u)$$

Y operando en la expresión anterior se obtiene la condición

$$\Phi = \frac{M_d - N_d \cdot u}{(N_d + F_d) e_2' + N_d \cdot e_1'} \leq 1$$

Evidentemente, si partiendo de una pareja de valores hipotéticos para e_1' y e_2' , se obtiene un valor de ϕ mayor que la unidad, el dimensionado supuesto no es posible puesto que se precisarían tensiones de valor más elevado que f_d . Si el valor de $\phi \leq 1$, el dimensionado sería válido ya que los muros estarían respondiendo con tensiones menores que el valor de cálculo, respondiendo con $\sigma = f_d$ para el valor de $\phi = 1$

Es precisamente ésta la expresión que propone la norma para comprobar la validez del dimensionado efectuado, con la evaluación de los casos señalada. Si $\phi > 1$, el dimensionado no sería válido, debiéndose aumentar d_2 .

En estas condiciones, las excentricidades actuantes serían

$$e_1 = \Phi \cdot e_1' \quad e_2 = \Phi \cdot e_2'$$

Estas consideraciones equivalen a admitir que la fábrica no tiene por qué estar resistiendo a su tensión de agotamiento, si bien se admite la servidumbre de que la respuesta del muro provoca una excentricidad que es un porcentaje de la máxima posible, porcentaje igual para ambas excentricidades. Además la formulación precisa de la definición de límites que la complementen -como ocurre, por ejemplo, cuando el numerador se vuelve negativo-. Ya se ha señalado anteriormente la duda previa de la aceptación de un reparto tensional basado en un criterio de agotamiento con una tensión que no lo es, que fue una corrección introducida ante la ausencia de definición de un diagrama tensión/deformación para la fábrica.

b. Tramo Interior:

Dentro de los muros que reciben tramos interiores de forjado hay que considerar que siempre habrá una excentricidad aun con la misma luz de forjado a ambos lados, puesto que la carga no será, en todo caso, la misma al considerar la alternancia de sobrecargas.

Las normas indicadas aplican nuevamente los mismos criterios de compensación de la excentricidad anteriormente expuestos.

Para MV-201 y FL-90 éste era función de las luces de los tramos que acometen al muro interior. Hemos visto que para un muro aislado, $M_d = \mu \cdot q_d \cdot b \cdot l^2$ con los significados ya conocidos. En un muro interior acometen dos tramos de forjado, de luces l_a y l_b -donde $l_a > l_b$, de forma tal que en la figura anterior l_a correspondería al forjado de la derecha-, de acuerdo con lo indicado, el momento transmitido al muro será, Figura 5:

$$M_d = \mu \cdot q_d \cdot b \cdot (l_a^2 - l_b^2)$$

siendo μ el factor de empotramiento definido por

$$\mu = \frac{K_1 + K_2}{16 \cdot (K_1 + K_2 + K_{f_a} + K_{f_b})}$$

donde los valores de K_1 y K_2 expresan las rigideces de los tramos superior e inferior de muro y de los tramos contiguos de forjado:

$$\text{Tramo } a : K_{f_a} = \frac{K_a \cdot b}{l_a} ; \quad \text{Tramo } b : K_{f_b} = \frac{K_b \cdot b}{l_b}$$

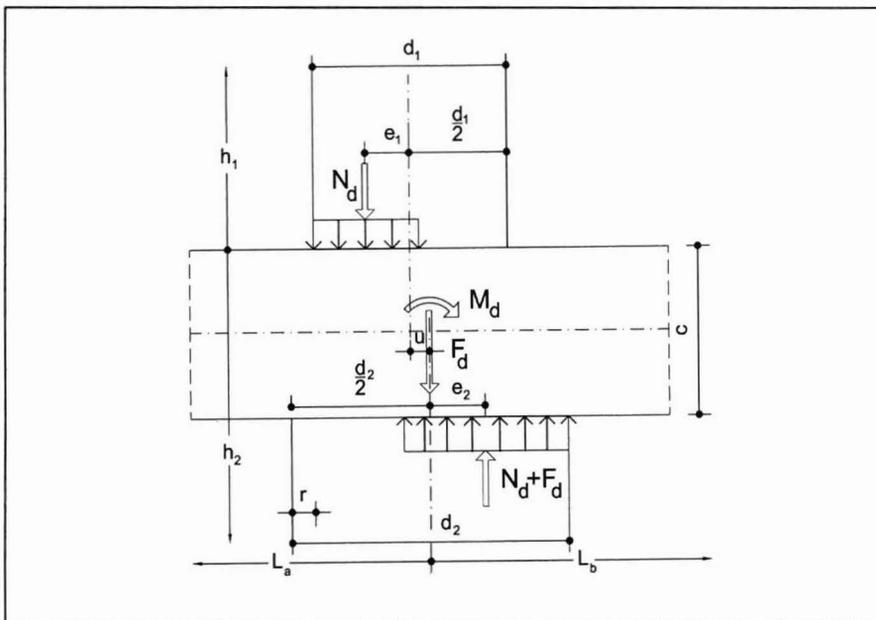


Figura 5

con los significados ya conocidos. El resto del proceso se realiza de la forma indicada anteriormente, sin más que considerar algunos pequeños retoques en la formulación.

Además, en este caso, $r = 0$

En este desarrollo, parece conveniente expresar

$$M_d = \mu \cdot q_d \cdot b \cdot (l_a^2 - l_b^2)$$

como

$$M_d = \mu \cdot b \cdot (q_{a,d} \cdot l_a^2 - q_{b,d} \cdot l_b^2)$$

para recoger la posibilidad de cargas diferentes a ambos lados del apoyo y habilitar la posibilidad de realizar alternancias de sobrecargas, dado que pudiera resultar un caso pésimo cuando las cargas tienen cierta importancia o las luces son desequilibradas.

Sorprende asimismo que la rigidez del forjado se exprese en función del ancho del elemento de fábrica considerado,

b , y no en función de la faja de carga, $l_w = b + \frac{v_1 + v_2}{2}$, que correspondería a la rigidez real del tramo de forjado considerado.

a. MÉTODO DE LA NORMA MV-201

La premisa anterior, $\sigma_1 = f_d$, conduce a

$$e_1 = \frac{d_1}{2} - \frac{N_d}{2 \cdot b \cdot f_d} \quad \text{ya} \quad e_2 = \frac{M_d - N_d(u + e_1)}{N_d + F_d}$$

Valor para el que se comprueba que $\sigma_2 \leq f_d$

b. MÉTODO DE LA NORMA FL-90

Las excentricidades se expresan como

$$e_r = \frac{d_1}{2} - \frac{N_d}{2 \cdot b \cdot f_d} \quad e_r = \frac{d_2}{2} - \frac{N_d + F_d}{2 \cdot b \cdot f_d}$$

El desarrollo del cálculo es totalmente análogo al caso anterior. Se obtiene

$$\Phi = \frac{M_d - N_d \cdot u}{(N_d + F_d)e_r + N_d \cdot e_r}$$

Y las excentricidades promediadas resultan

$$e_1 = \Phi \cdot e_r \quad e_2 = \Phi \cdot e_r$$

Con lo que las tensiones resultan

$$\sigma_1 = \frac{N_d}{(d_1 - 2 \cdot e_1)b} \leq f_d$$

$$\sigma_2 = \frac{N_d + F_d}{(d_2 - 2 \cdot e_2)b} \leq f_d$$

EL COEFICIENTE DE EMPOTRAMIENTO

De acuerdo con el articulado de la norma, los valores de μ se pueden obtener de forma aproximada por medio de una fórmula simplificada, cuyos resultados se encuentran reflejados en la Tabla 5.6. Comparando los valores obte-

nidos por la aplicación del método general y los arrojados por la formulación simplificada, se comprueba que la inercia del forjado a considerar para la determinación del factor de empotramiento ha de ser la del rectángulo capaz. Resulta así de difícil diferenciación el tratamiento de soluciones de forjado de más rigidez, como las placas. Es ésta una carencia que la normativa debería subsanar.

2. MÉTODO DE LA NORMA BS 5628: Part 1: 1992

En el Apartado 31 Excentricidad perpendicular al muro, la norma inglesa establece que:

Preferiblemente la excentricidad de las cargas sobre muros y columnas se debe calcular.

Si bien no se indica el método apropiado para ello. Continúa diciendo que:

[...] se puede asumir que la carga transmitida a un muro por un forjado aislado o cubierta actúa a un tercio de la profundidad del área portante medido desde la cara cargada del muro u hoja portante.

Lo que implica admitir un criterio similar al de FL-90 para el caso del apoyo extremo, pero suponiendo que el punto de aplicación de la reacción se encuentra situado a $a/3$ -de acuerdo con la nomenclatura anterior-, Figura 6, consideración más favorable que la de FL-90 (25% frente a 33% de la zona cargada).

En el caso del apoyo interno, BS 5628 difiere en el planteamiento del nudo con respecto a FL-90, por cuanto opta por no establecer a priori un momento que el nudo debe ser capaz de equilibrar, sino que mantiene el mismo criterio expuesto anteriormente que fija el punto de aplicación de la resultante:

Si un forjado uniforme es continuo sobre el muro, cada lado del forjado se puede tomar como soportado de forma individual por la mitad de la parte portante total.

En estas condiciones, las excentricidades resultantes según BS 5628 resultan ser

$$e = \frac{d}{2} - \frac{a}{3} \quad e = \frac{F_{2d} - F_{1d}}{F_{1d} + F_{2d}} \cdot \frac{d}{3}$$

lo que significa menores excentricidades en el apoyo extremo y mayores en el intermedio. Cabría entonces preguntar el porqué de los valores establecidos para los puntos de aplicación de la carga y que ninguna de las dos normas se molesta en aclarar.

En caso de continuidad establece que:

Si un forjado uniforme es continuo sobre el muro, cada lado del forjado se puede tomar como soportado de forma individual por la mitad de la parte portante total.

Criterio realmente sencillo de afrontar la situación de los nudos interiores. Asimismo señala

Si se emplean perchas para soportar las viguetas se supondrá que la carga se aplica en la cara del muro.

Ahora bien, la hipótesis fundamental del métodos es la consideración de una excentricidad superior nula.

La resultante de la excentricidad de la carga en cualquier nivel se debe calcular en la hipótesis de que la carga vertical total en un muro se encuentra centrada inmediatamente sobre un apoyo lateral.

El método es totalmente análogo al estudio para tramos extremos sin muro superior: supone que el punto de apli-

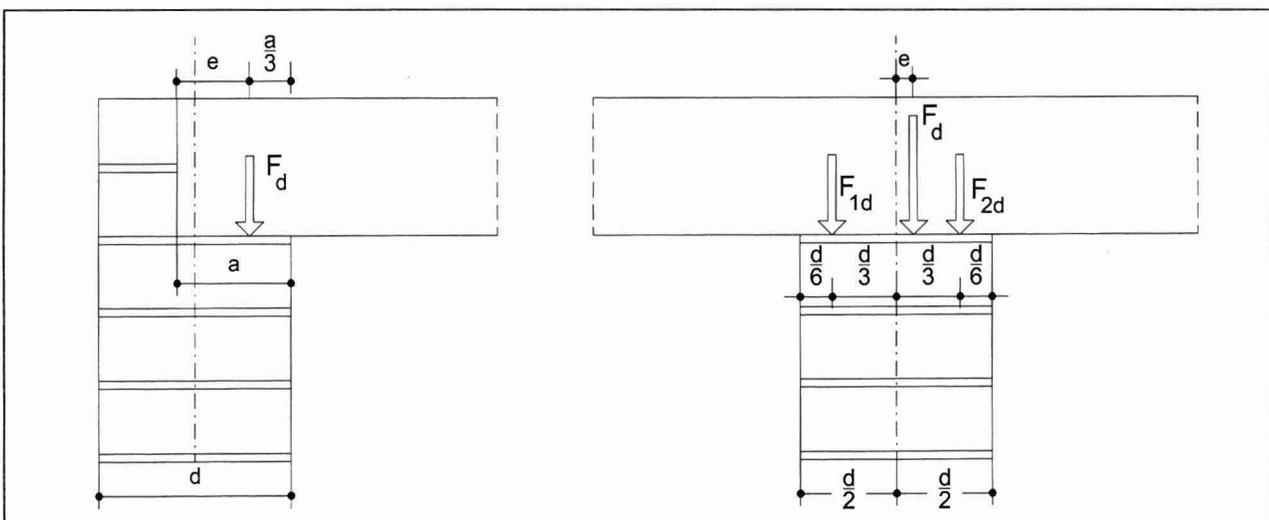


Figura 6

cación de la reacción del forjado se encuentra situado a $a/3$ -de acuerdo con la nomenclatura anterior-, mientras que supone nula la excentricidad con la que se transmite el axil del tramo superior de muro.

La resultante de la excentricidad de la carga en cualquier nivel se debe calcular en la hipótesis de que la carga vertical total en un muro se encuentra centrada inmediatamente sobre un apoyo lateral.

En la Figura 7 se ha representado gráficamente el criterio del método, adoptando la notación de NBE-FL-90 y empleando el criterio tensional que aparece expuesto en el Apartado 21 del Apéndice B de la norma. La Figura 7.a muestra la problemática situación del recubrimiento del nudo externo, con una situación donde la junta entre ambos materiales necesita ser comprobada.

Una diferencia de consideración entre FL-90 Y BS 5628 reside en el valor de la excentricidad a considerar en la parte inferior del muro, nula según la norma inglesa y con un cierto valor en la norma española, diferencia que la Figura 8 trata de aclarar. Ambos métodos precisan considerar el cortante actuante en el muro para conseguir el centrado inferior de la resultante. Es también destacable que esta norma señale que **para excentricidades no superiores al 5% del espesor, el muro se compruebe en una situación de carga centrada**, si bien el valor de la resistencia de cálculo que admite para la fábrica es un 10% inferior al considerado en muros con axil excéntrico.

Nótese que en este método no se establece ningún momento a equilibrar, sino que éste es resultado de una excentricidad predeterminada.

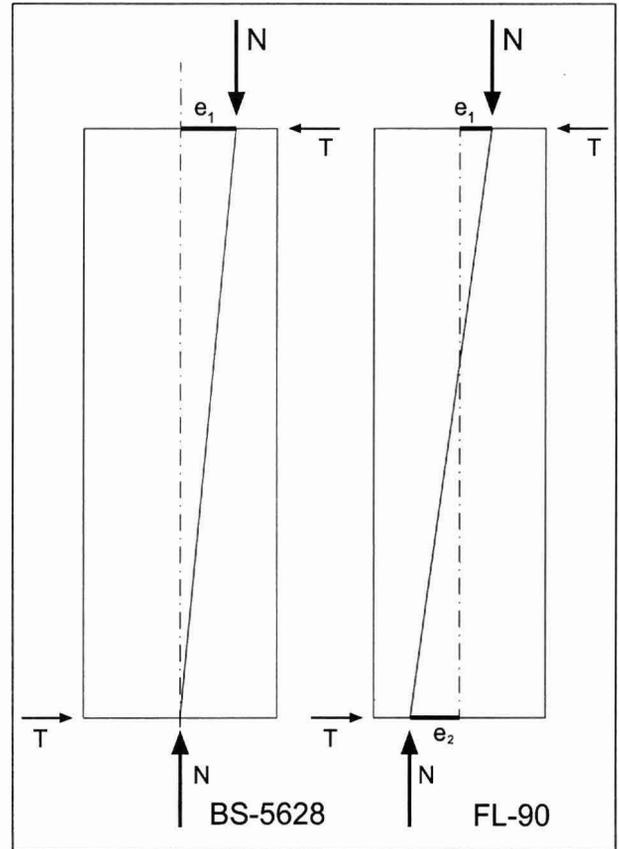


Figura 8

3. MÉTODO DE HISPALYT

El planteamiento del método es aparentemente parecido a BS 56628: se acepta -como BS 5628- que la excentricidad en el pie del tramo de muro es nula, esto es, que la

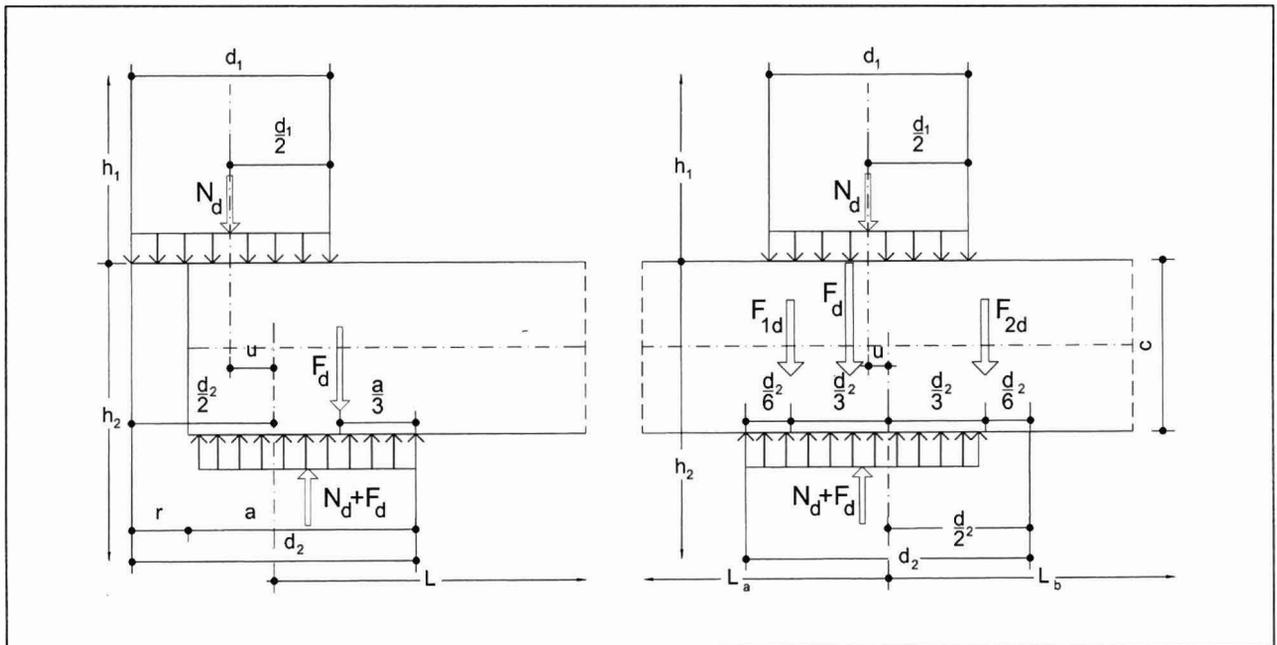


Figura 7

resultante de las cargas verticales pasa por el eje del muro en la parte inferior de éste. El método fija la excentricidad a considerar en la parte superior del muro, punto en el que se separa de la referencia anterior. Para un muro sujeto a cargas verticales, las excentricidades que considera el método son las siguientes:

- excentricidad e_w debida a las acciones horizontales -viento- sobre el muro
- excentricidad e_f debida al empotramiento entre forjado y fábrica
- excentricidad estructural e_r debida al posible ensanchamiento de la fábrica
- excentricidad accidental e_A debida a las tolerancias de ejecución, de valor $h/300$.

La consideración de una excentricidad nula en pie de muro es, junto con la consideración de la excentricidad accidental -con el valor que una versión previa de EC-6 atribuía a la Categoría de Ejecución C, la peor de las consideradas y que cuyo valor posiblemente se debiera reconsiderar-, la única diferencia en la consideración de excentricidades con respecto a NBE-FL-90, puesto que todas las anteriores se encontraban recogidas en NBE-FL-90, bien de forma implícita -como la debida al viento- bien dentro de los planteamientos de equilibrio del nudo -ensanchamiento de la fábrica-. En el planteamiento se echa de menos la consideración de algún tipo de excentricidad mínimo absoluto.

EXCENTRICIDAD DEBIDA AL EMPOTRAMIENTO DEL MURO

El método considera actuando los siguientes momentos en las uniones nudo forjado:

- Forjados en coronación del muro: *Momento nulo en cualquier caso*

- Forjados intermedios:

Biapoyado
$$M_A = \frac{q \cdot l^2}{100}$$

Tramo Exterior F. Continuo
$$M_B = \frac{q \cdot l^2}{160}$$

Tramo Interior F. Continuo
$$M_C = \frac{l}{400} (q \cdot l_{\max}^2 - g \cdot l_{\min}^2)$$

siendo:

q = carga total por unidad de longitud ($q = g + s$)

g = carga permanente por unidad de longitud

l_{\max} = luz mayor de los forjados que acometen al nudo

l_{\min} = luz menor de los forjados que acometen al nudo.

De acuerdo con el método, la excentricidad e_f se calcula a partir de estos valores divididos por la carga total debida al forjado. Sin embargo, el método no aclara el mecanismo resistente del nudo.

Obviamente, el método no considera excentricidad en los forjados de cubierta por este motivo. De todas formas, no olvidemos que se ha de verificar la excentricidad accidental e_A , que de acuerdo con lo anterior, para un muro de 3,00 m de altura toma un valor de 1 cm, muy lejos de los valores considerados por NBE-FL-90.

De esta forma, si consideramos la carga transmitida al muro por el forjado en cada caso, tendremos una indicación de las excentricidades que plantea el método. Suponiendo -como valor de referencia-, que luces y cargas son iguales en todos los tramos y que la relación $s/g = 3/7,5$, de acuerdo con ENSIDESA [11] los cortantes transmitidos al muro para los forjados intermedios resultan ser

Biapoyado:
$$R_A = 0,50 \cdot q \cdot l$$

Tramo Exterior F. Continuo:
$$R_B = 0,395 \cdot q \cdot l$$

Tramo Interior F. Continuo:
$$R_C = 1,131 \cdot q \cdot l$$

Y las excentricidades resultantes en estas condiciones son

Biapoyado
$$e_{F,A} = \frac{l}{50} \quad (8 \text{ cm})$$

Tramo Exterior F. Continuo
$$e_{F,B} = \frac{l}{63,2} \quad (6,33 \text{ cm})$$

Tramo Interior F. Continuo
$$e_{F,C} = \frac{l}{1131} \quad (0,35 \text{ cm})$$

con lo que, para un forjado de 4,00 m de luz, resultaría -sólo por este concepto- una excentricidad de 8; 6,33 y 0,35 cm. La impresión que producen estos valores es que tal vez el método precise de algún ajuste. Entre otras cosas, reducir el problema del empotramiento del forjado a la luz de éste puede parecer un poco excesivo.

EXCENTRICIDAD ESTRUCTURAL e_r DEBIDA AL ENSANCHAMIENTO DE LA FÁBRICA

Llamando r al aumento de espesor del muro de la planta inferior con respecto al de la superior, y considerando siempre centrada la carga correspondiente al muro superior, la excentricidad toma los valores:

- Muro que ensancha por un solo lado un valor r :

$$e_R = \frac{r}{2}$$

- Muro con ensanchamientos r_1 y r_2 por cada lado:

$$e_R = \frac{r_2 - r_1}{2}$$

La excentricidad así obtenida se suma algebraicamente a las demás.

COMPROBACIONES A EFECTUAR

Dado que la carga en la parte inferior se considera siempre centrada, la comprobación estructural se ha de realizar en cabeza del muro.

En cuanto a las excentricidades para la comprobación del tramo del muro, se establecen dos comprobaciones:

- *excentricidad máxima en cabeza de muro*

$$e_1 = |e_F + e_R| + |e_A| \leq \frac{t}{3}$$

- *excentricidad máxima en máximo momento de viento*

$$e_2 = \frac{e_l}{2} + |e_{v1}| \leq \frac{t}{3}$$

excentricidades que en ningún caso podrán superar el tercio del espesor de la pieza (límite máximo).

El método señala que la excentricidad debida a la aplicación de las cargas varía de forma lineal entre e_1 y 0 mientras que la debida al viento lo hace de forma parabólica con valores nulos a la altura de los forjados.

El método se desvincula totalmente de la realización constructiva de las uniones y no proporciona criterios para el análisis de situaciones extraordinarias, como pueden ser algunas soluciones de la edificación medieval en las que el tramo superior de fachada avanzaba sobre la calle, Figura 9.

El planteamiento descrito para la determinación de las excentricidades equivale a considerar articulado el muro en su parte inferior y que el empotramiento afecta sólo al forjado superior.

4. MÉTODO DEL EUROCÓDIGO EC-6

Como es sabido, la comprobación de un muro de fábrica según EC-6 para la cima o base del muro viene dada por la expresión

$$N_{sd} \leq N_{rd} = \Phi_i \frac{b \cdot t \cdot f_k}{\gamma_m}$$

donde
$$\Phi_i = \left(1 - \frac{2 \cdot e_i}{t}\right)$$

siendo
$$e_i = \frac{M_i}{N_i} + e_{hi} + e_a \geq 0,05 \cdot t$$

con

- M_i : momento flector de cálculo en la cima o base del muro, resultante de la excentricidad de la carga del forjado

- N_i : carga vertical de cálculo en la cima o base del muro

- e_{hi} : excentricidad debida a las acciones horizontales en cima o base del muro

- e_a : excentricidad accidental, que de acuerdo con DNA, para categoría B -única definida tienen el valor $h_f/450$.

De acuerdo con EC-6 4.4.7.1 (2), el cálculo de las excentricidades se realizará considerando las propiedades del material dadas en el Capítulo 3 de la norma, el comportamiento de las juntas y los principios del cálculo estructural, tras lo cual se remite al Anexo C (normativo). En éste se establece que el cálculo de la excentricidad del esfuerzo normal se puede realizar admitiendo *secciones no fisuradas y comportamiento elástico* de la fábrica y permite dos tipos de análisis:

. *análisis de pórtico*

. *análisis de nudo*

El método de análisis que la norma llama Análisis de pórtico, más allá de las cuestiones anteriores, queda sobreentendido puesto que no se detalla la forma de realizarlo.

Para el análisis de nudo, la norma parte de un nudo de cuatro barras en ángulo recto, con referencias 1 para el muro inferior, 2 para el muro superior, 3 para el forjado izquierdo y 4 para el derecho (Figura 10). Señala que si algún elemento no existe, no se tendrá en cuenta en el análisis.

Si se denota K_i a la rigidez a flexión de la barra i -con $i=1, 2, 3$ ó 4 - referida a la *luz libre* del elemento (Figura 10), el momento que ha de soportar el Muro 1 viene dado por la expresión:

$$M_1 = \frac{K_1}{K_1 + K_2 + K_3 + K_4} \left[\frac{q_3 \cdot l_3^2}{12} - \frac{q_4 \cdot l_4^2}{12} \right]$$

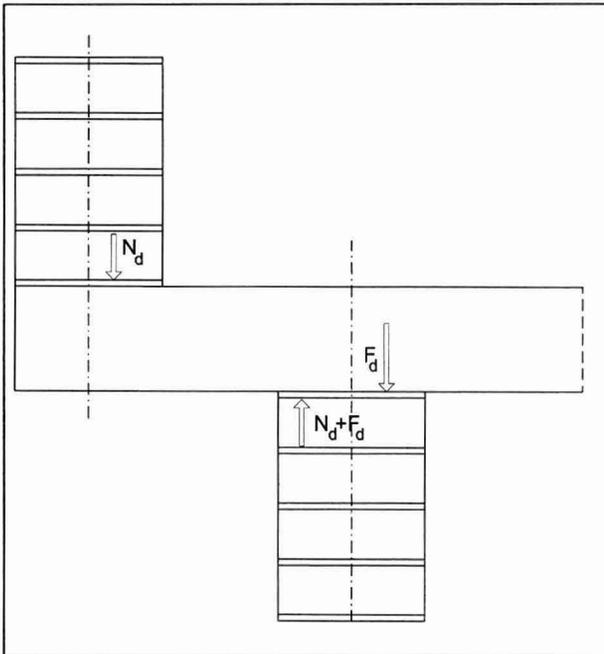


Figura 9

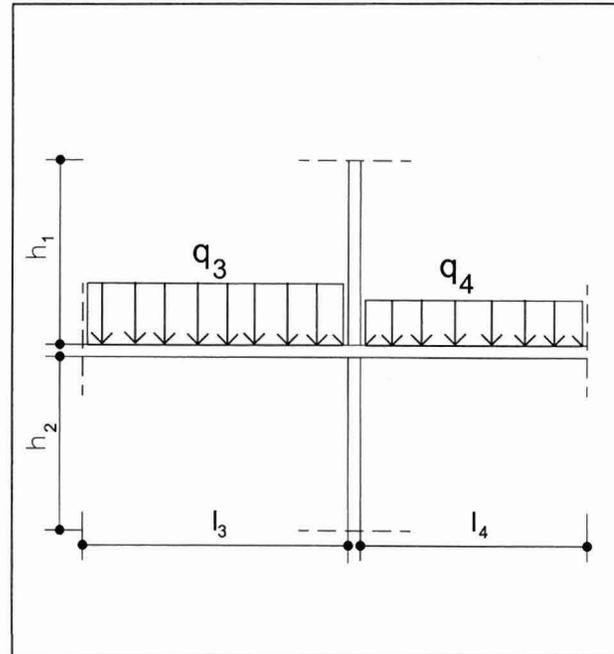


Figura 10

donde $K_i = \frac{4 \cdot E_i \cdot I_i}{l_i}$ si la barra se encuentra empotrada

en ambos extremos y $K_i = \frac{3 \cdot E_i \cdot I_i}{l_i}$ en otro caso

Los valores de q_i corresponden a la carga uniforme de la carga considerada, con los coeficientes de seguridad establecidos en la Tabla 2.2 de Eurocódigo para efecto desfavorable en ambos casos -lo que implica no realizar alterancia de sobrecargas-.

Si la tensión vertical de cálculo en el espesor del muro es superior a 0,25 Mpa, EC-6 admite reducir el valor anterior multiplicándolo por

$$M_i' = M_i \left(1 - \frac{k}{4} \right)$$

con $k = \frac{\sum K_{n_{forjado}}}{\sum K_{nmuros}} = \frac{K_{n_3} + K_{n_4}}{K_{n_1} + K_{n_2}} \leq 2$ siendo

$$K_{n_i} = \frac{E_i \cdot I_i}{l_i}; \quad \text{esto es reduciendo la excentricidad } e$$

En caso contrario -tensión inferior a 0,25 Mpa- o si la excentricidad obtenida con el método anterior superase el valor de $0,4.t$; el cálculo puede realizarse de obteniendo el espesor eficaz que hace falta para soportar la carga transmitida con la única condición de que resulte inferior a $0,2.t$ -lo que equivale a decir que la excentricidad tiene que superar $0,4.t$ y, obviamente, ser inferior a $0,5.t$ -. El método es especialmente indicado para cubiertas según EC-6.

Llama profundamente la atención el admitir el cálculo en situación elástica y lineal para una sección no fisurada mientras que para la comprobación de la sección se emplea un criterio de análisis plástico. Sorprende también la total ausencia de vinculación de la solución constructiva con el método de cálculo desarrollado, así como el em-

pleo de $K_i = \frac{4 \cdot E_i \cdot I_i}{l_i}$ ó de $K_{n_i} = \frac{E_i \cdot I_i}{l_i}$ según el caso.

Da la impresión de que el criterio debiera mantenerse en ambos casos, y tampoco parece que las diferencias sean sustanciales como para justificar la modificación.

Asimismo señalar que, congruentemente con la aceptación de la situación elástica, la base del cálculo es el momento de empotramiento perfecto, pero referido a la luz libre de los elementos, si bien sorprende la *marcha atrás* al considerar excesivo el valor resultante y permitir una reducción posterior.

ANÁLISIS DESARROLLADO

1. COMPARATIVA DE LAS FORMULACIONES

El primer elemento que llama la atención es el planteamiento abstracto de HISPALYT y de EC-6, totalmente independiente de la solución constructiva que adopte el apoyo del forjado en el muro de fábrica. Planteamiento que posiblemente provenga de la influencia de los métodos de análisis de estructuras continuas, de nudo rígido, pero que parece altamente discutible para la fábrica.

Resalta la contradicción implícita en EC-6 cuando admite el análisis en una situación elástica y lineal -sea de análisis de nudo o análisis de pórtico- mientras el método de comprobación corresponde a una situación de agotamiento. Además el análisis de tipo pórtico (se sobreentiende *de nudos rígidos*) para este tipo estructural no se acompaña de matizaciones sobre la rigidez del nudo que es básica en la formulación de tipo pórtico.

Tanto EC-6 como NBE-FL-90 parten del reparto de un momento en el nudo, y, con la diferencia de partir del momento de empotramiento perfecto EC-6 y del momento de semiempotramiento perfecto NBE-FL-90, existe coincidencia en el porcentaje del momento asignado inicialmente a los muros que concurren en el nudo -suma de los correspondientes al muro superior e inferior-, si bien parece más correcta la consideración de rigideces que plantea EC-6. EC-6 alarmado por el valor del momento inicialmente asignado al muro, introduce un factor corrector que lo reduce y que oscurece la formulación.

Si suponemos -para un muro de ladrillo de 24 cm y un forjado de hormigón de 26 cm- un orden de inercias similares y una relación entre los módulos secantes instantáneos del forjado y de la fábrica del orden de 3 -valor resultante al aplicar las definiciones que de éste hacen EHE-98 [12] para HA-25 y las de EC-6-, así como una relación de luz del forjado a altura del muro de 1,5 -4,5 m de luz para 3 m de altura-, los valores correctores resultantes son de 0,50 para un nudo intermedio y de 0,8125 para el nudo extremo, lo que significa unos momentos de cálculo de

$$M_i = \frac{K_1}{K_1 + K_2 + K_3 + K_4} \left[\frac{q_3 \cdot l_3^2 - q_4 \cdot l_4^2}{24} \right]$$

para el tramo inferior de nudo intermedio; y

$$M_i = \frac{K_1}{K_1 + K_2 + K_3} \cdot \frac{q_3 \cdot l_3^2}{14,77} \text{ para el tramo inferior de}$$

nudo extremo. Estos valores son que sumados a los momentos del tramo superior correspondiente, resultan ser valores mayores que los considerados por NBE-FL-90 en el caso del nudo extremo y menores para el nudo intermedio.

Las excentricidades de cada tramo EC-6 las establece como

$$e_i = \frac{M_i}{N_i}$$

planteamiento que resulta independiente de la materialización del nudo y que sólo responde a ella cuando se mantienen los ejes de los muros superior e inferior y, en el caso de nudo extremo, no existe trasdosado del forjado. En este sentido parece que faltase una excentricidad similar a la definida por HISPALYT como *excentricidad estructural* e_R *debida al posible ensanchamiento de la fábrica*.

Además, el método ofrece un sistema alternativo para situaciones de grandes excentricidades o de pequeñas tensiones, que también se quiso verificar. Una última consideración: el método, al referir expresamente los coeficientes de seguridad, indica la renuncia a considerar alternancia de sobrecargas, de tal forma que para nudos intermedios con forjados de igual carga y luz, la excentricidad resultante es cero. De todas formas, no nos olvidemos que el método de comprobación establece una excentricidad mínima de $0,05 t - 12$ mm para un muro de 24 cm-.

NBE-FL-90 tampoco plantea la necesidad de alternancia de sobrecargas en nudo intermedio, dado que incluso no contempla ni la posibilidad de diferentes cargas a ambos lados del apoyo. Sin embargo, es inmediato reescribir la fórmula para que sí lo contemple -así se ha hecho con carácter investigador-.

De hecho, cuando la formulación planteada por EC-6 se confronta con la realidad constructiva, el planteamiento propuesto sólo garantiza el equilibrio del nudo -y su validez- cuando coinciden los ejes de los muros superior e inferior, y, en el caso de nudo extremo con tramo superior de muro, cuando no existe trasdosado de fábrica del forjado. En otro caso, el método exige algún tipo de corrección, como ocurre en las situaciones representadas en la Figura 11. Para el caso del nudo extremo con entrega total, ésta podría ser simplemente la reducción de la excentricidad de cada muro en un porcentaje del desfase de ejes de muros existente, función de la rigidez relativa entre elementos. En todo caso, esto obliga a abandonar la interpretación literal. También situaciones como las de la Figura 9 plantean problemas al método.

HISPALYT ofrece un planteamiento al problema que estamos señalando, al considerar como una excentricidad la distancia entre los ejes de muros. De todas formas su método de cálculo da lugar a que se produzcan excentricidades muy superiores en la parte superior de la pieza.

En lo tocante a NBE-FL-90 se han detectado que la formulación planteada desprecia la contribución del trasdosado del forjado, de tal forma que situaciones como las recogidas en la Figura 5 no son admisibles para la norma. Existen también algunos errores en la imposición de los límites máximos de las excentricidades, debidos quizás al deseo de realizar una exposición sucinta. Estos errores se han corregido en el desarrollo de la rutina de cálculo. Además, al realizar la comparación de los valores de coeficientes de empotramiento que resultan de la aplicación de la formulación general con aquellos contenidos en la *Tabla 5.6* de NBE-FL-90, se deduce que la inercia que la norma considera para el forjado no es la de la sección en T, sino la de la sección rectangular bruta. Este resultado se ha tenido en cuenta igualmente en la programación. Obviamente, esta cuestión plantea la duda -irresuelta- de cómo considerar la inercia de una placa maciza en la formulación, cuestión sin duda a reconsiderar.

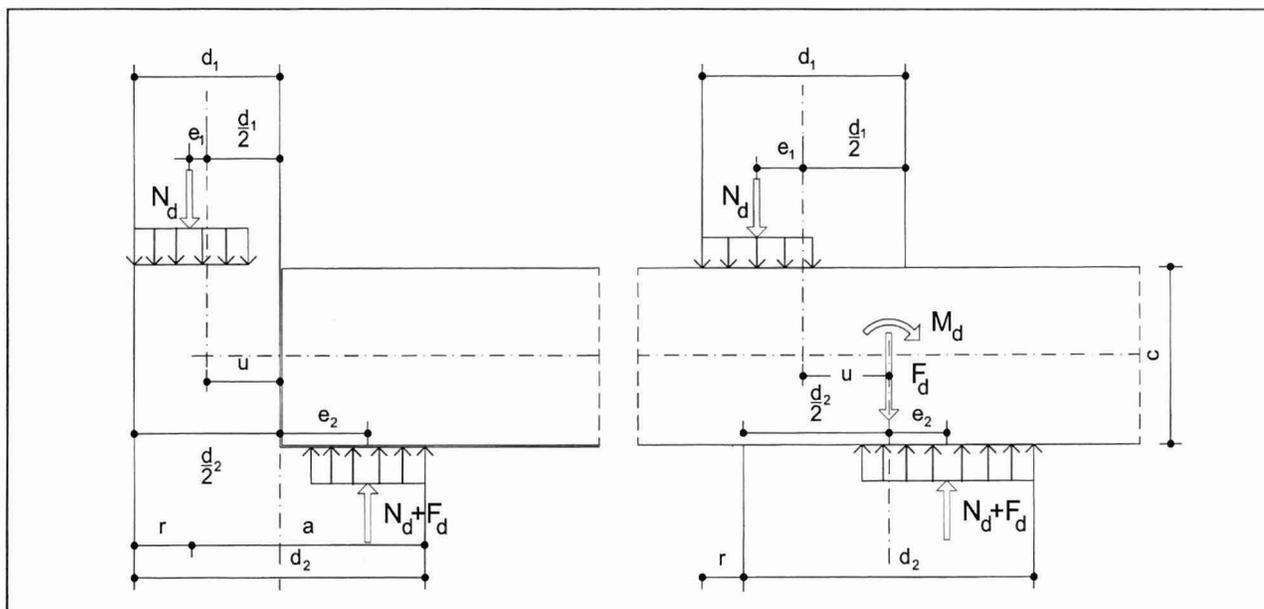


Figura 11

De la formulación de BS-5628 choca su independencia de las rigideces de los elementos que considera, estableciendo directamente el punto de paso de la resultante. También parecería conveniente que se definiese -o al menos se identificasen- el/los métodos de cálculo de las excentricidades en los nudos. De todas formas, el método que plantea invita poco a utilizar cualquier método alternativo.

Llama la atención que en ninguno de los métodos se propongan métodos para la consideración de la acción de los voladizos.

2. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

Se han analizado las cuatro situaciones de muros que diferencia NBE-FL-90, esto es

- *Nudo Superior Extremo, NSE*
- *Nudo Superior Intermedio, NSI*
- *Nudo Inferior Extremo, NIE*
- *Nudo Inferior Intermedio, NII*

Estos cuatro casos se han estudiado con muros de 12 y 24 cm de espesor, con una altura de 3 metros entre caras superiores de forjados, en situaciones de forjados aislados, vano extremo de forjado continuo de infinitos vanos de igual luz, primer apoyo de forjado continuo con infinitos vanos de igual luz y también cuando el primer forjado tiene luz mitad.

Se ha considerado una carga total de 700 kg/m², situación usual, con una sobrecarga de uso de 200 kg/m². Como forjado se ha tomado un forjado de 22+4 con intereje de 70 cm y vigueta de 12 cm de ancho. Las luces del forjado

se han variado entre 2,00 m y 6,00 m en intervalos de 10 cm. La fábrica se ha supuesto de ladrillo perforado, con un peso específico de 1.500 kg/m³ de acuerdo con NBE-AE-88 [13].

Para el Análisis de Pórtico de EC-6 se ha supuesto un pórtico rectangular de nudos rígidos empotrado en cimentación que se han analizado por métodos matriciales [07]. El pórtico está formado por cinco vanos iguales y cinco alturas, todas de 3 m. Las luces de los vanos se han variado entre 2 y 6 m, con incrementos de 50 cm. En lo tocante a las cargas aplicadas, los vanos se han supuesto cargados uniformemente con la carga descrita anteriormente, mientras que el peso del muro se ha representado mediante una carga puntual aplicada a la mitad de la altura del tramo. Se ha supuesto una faja de un metro de ancho, tomando el muro con una inercia derivada de una sección rectangular y el forjado correspondiente a una sección en T.

a. Nudo Extremo Superior:

La Figura 12 muestra la comparativa de las excentricidades en el tramo extremo de un forjado de cubierta que contemplan los métodos de NBE-FL-90, BS 5628 y de EC-6 de acuerdo con el método de los nudos, tanto en tramo aislado como continuo. La aplicación del método de cálculo tipo pórtico de EC 6 proporciona en este caso valores muy superiores para las excentricidades, que exceden el rango de la tabla (comienzan con un valor de 25,42 cm y llega a alcanzar los 71,97), razón por la que se han excluido del gráfico. En el caso de NBE-FL-90 y BS 5628 el gráfico pone de manifiesto la crítica que se avanzaba: ambos métodos ignoran la deformabilidad del forjado que recibe, y mantienen la misma excentricidad -6 y 4 cm- tanto para un forjado de 2 como de 6 m de luz.

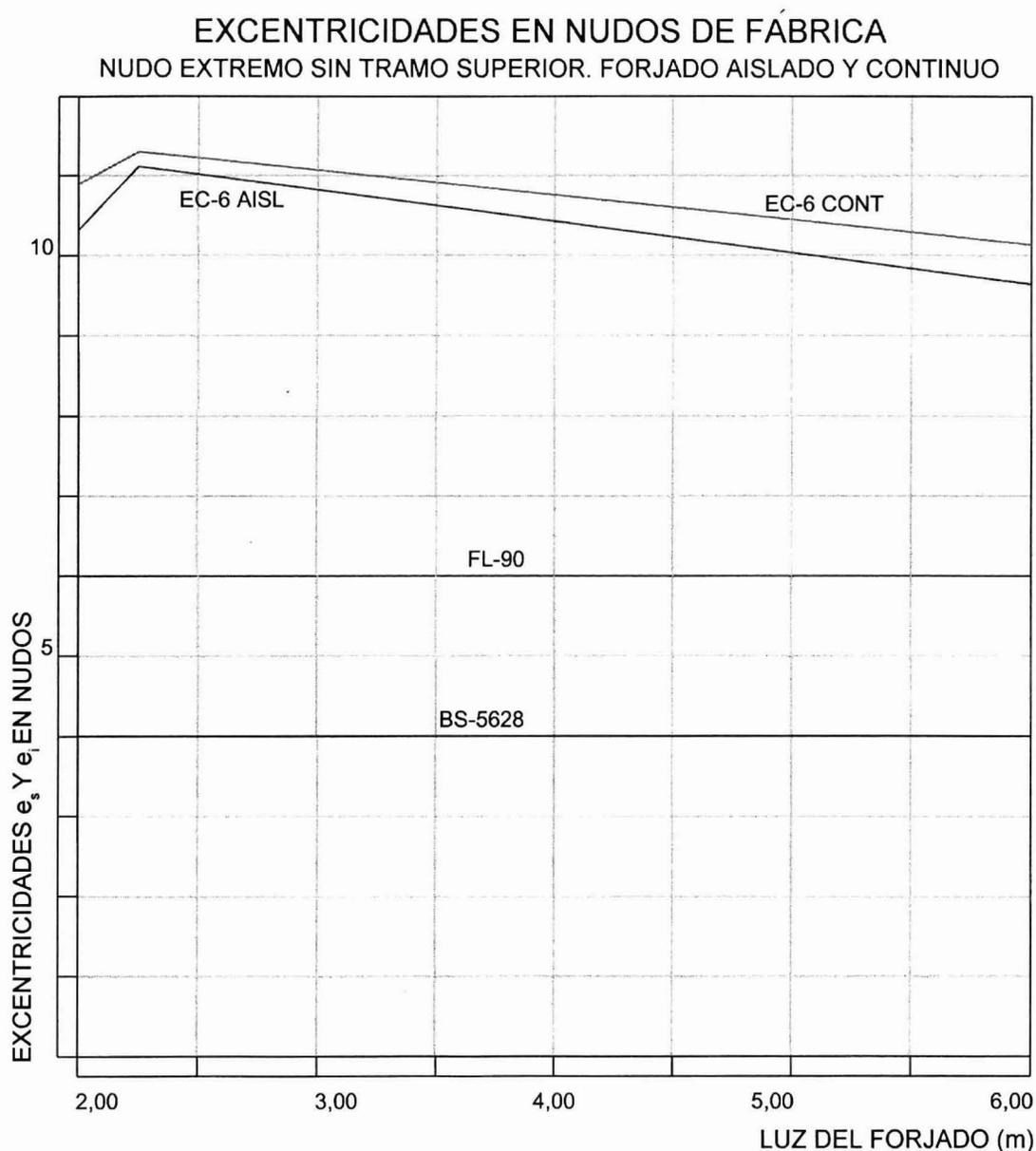


Figura 12

Las excentricidades que contempla EC-6 son muy superiores a las de NBE-FL-90 y BS 56 28. Las derivadas del Análisis de Nudo de EC-6 vienen determinadas por el método recomendado para cubiertas. En este método, la excentricidad es la máxima que permite a la sección soportar el axil aplicado, por lo que resulta superior en el caso de un forjado continuo que en el caso de un forjado aislado de igual luz -dado que la reacción sobre el apoyo es menor en el continuo por efecto del cortante hiperestático-. El resultado contradice la lógica que indica que el forjado aislado es más deformable y debería introducir una excentricidad mayor, pero es el resultado de la premisa establecida. En todo caso con estas excentricidades el cumplimiento de la sección queda asegurado.

b. Nudo Intermedio Superior:

Como en el caso de nudos intermedios, al ser las cargas y las luces de los forjados que concurren en el nudo iguales, los métodos de NBE-FL-90, BS 5628 y el Análisis de Nudos de EC-6 conducen a excentricidad nula. En lo tocante al Análisis de Pórtico de EC-6, el método sí conduce a excentricidades que se han representado junto a las provocadas en los nudos inferiores en la Figura 19 que luego se analiza.

En este segundo análisis, Figura 13, se plantea una situación de un forjado de planta superior que es el primer apoyo en continuidad, y que recibe por un lado un forjado de

EXCENTRICIDADES EN NUDOS DE FÁBRICA

NUDO INTERMEDIO SIN TRAMO SUPERIOR. RELACIÓN DE LUCES 1:2

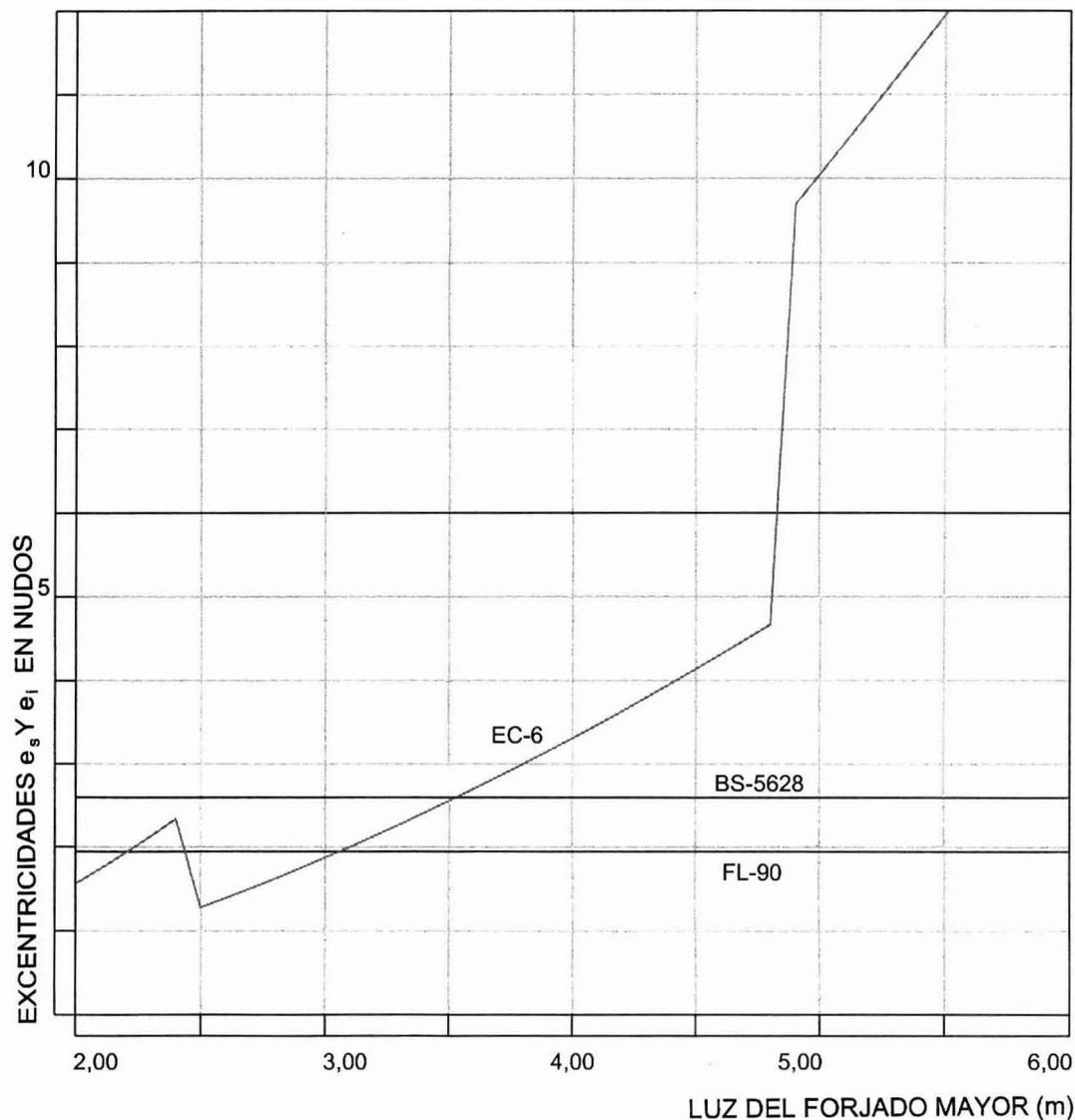


Figura 13

luz doble que del otro, debido a que con los métodos de cálculo propuestos para luces iguales se llegaría a una situación de excentricidad nula. Dado que se mantiene aproximada la proporción entre los cortantes transmitidos en ambos lados del apoyo, las gráficas de NBE-FL-90 y BS 5628 tienden a ser dos rectas en el entorno de 2,00 y 2,60 cm, indicativos de la escasa sensibilidad que tienen estos métodos: en este tipo de apoyos, un criterio de excentricidad mínima evitaría su análisis.

La gráfica de EC-6 muestra en este caso el tránsito por los tres criterios de comprobación que se recogen en la norma. Los cambios entre criterios son abruptos porque los incrementos son discretos y de 10 cm de valor. La crítica

es obvia: no parece lógico que estas situaciones tengan tratamientos tan diferentes con pequeños cambios en la luz de las piezas. Parece conveniente refinar los mecanismos para llegar a un criterio menos drástico.

c. Nudo Inferior Extremo:

La Figura 14 muestra los resultados obtenidos con el criterio de NBE-FL-90, la Figura 15 corresponde a la aplicación de BS 5628, la Figura 16 a la del Análisis de Nudo de EC-6 y, finalmente, la Figura 17 a la del Análisis de Pórtico de EC-6. Es preciso indicar que, salvo la gráfica que corresponde al Análisis de Pórtico de EC-6, todas las gráficas contienen la verificación resistente de la sección. Este criterio es el que origina el trazado vertical final de las

EXCENTRICIDADES EN NUDOS DE FÁBRICA

NUDO EXTREMO 24 cm CON TRAMO SUPERIOR. NÚMERO VARIABLE DE PLANTAS

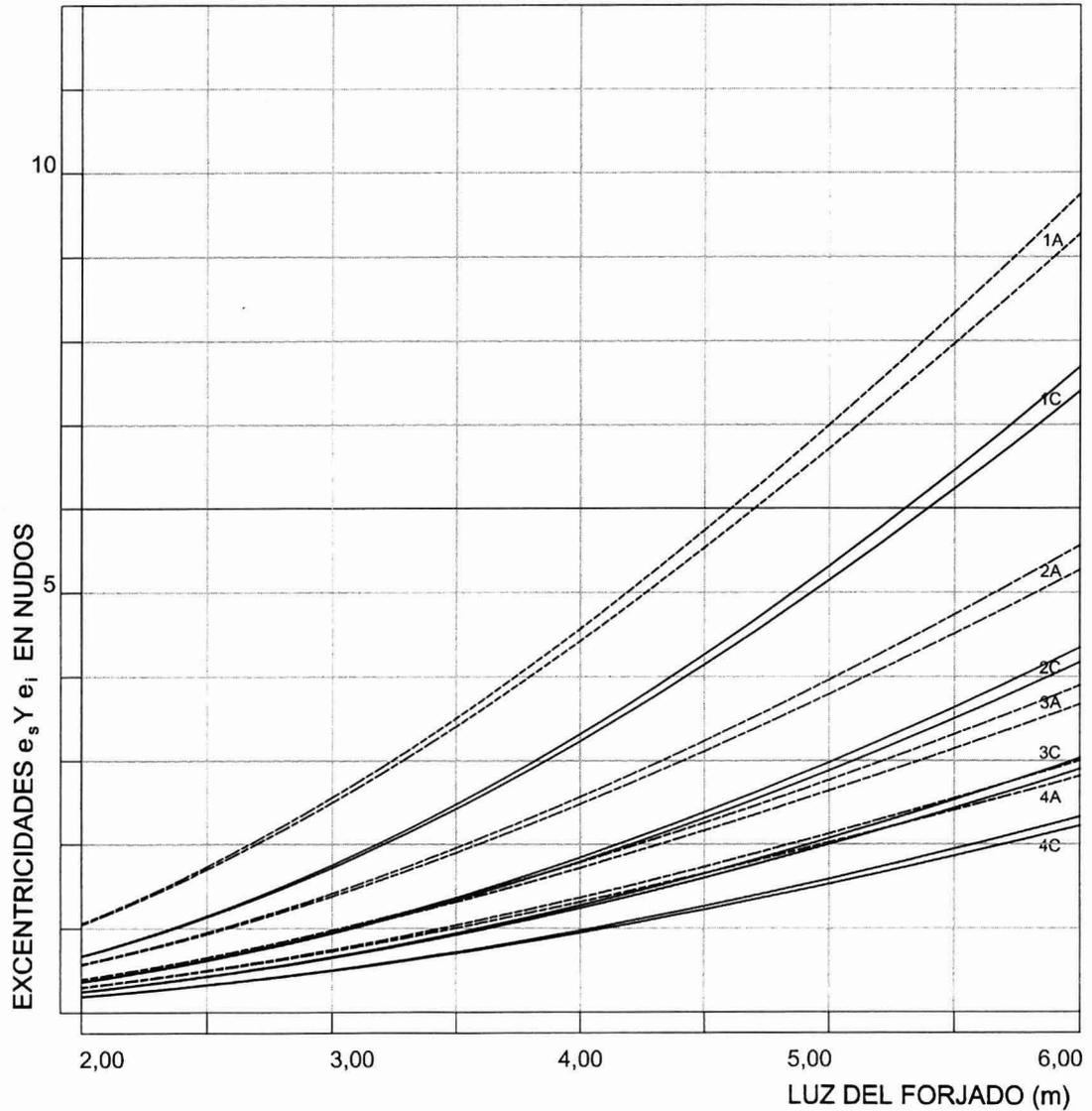


Figura 14

gráficas del método de nudos de EC-6, que corresponden a la situación a partir de la cual la sección ya no obtiene valores válidos de tensión. Queda también a juicio del lector la validez del método de pórtico de EC-6 cuando los valores proporcionados para la planta de cubierta no resultan admisibles en ningún caso.

Se representan los casos correspondientes a 1, 2, 3 y 4 plantas por encima del nudo considerado, en cada caso correspondiente a forjado aislado (A) o continuo (C) de luz en vanos constante. En cada caso, se han representado los valores correspondientes a las excentricidades superior e inferior que actúan sobre los muros de igual

tipo -salvo para BS 5628 en la que se supone que la excentricidad superior es nula-.

La revisión general de las gráficas muestra que BS 5628 proporciona las menores excentricidades, seguida por NBE-FL-90, y ambos métodos de EC-6 (que se alternan en función de luz y nº de plantas).

Llama la atención la proximidad entre las excentricidades superior e inferior del nudo que muestran las curvas de NBE-FL-90: obviamente, son piezas con la misma rigidez, diferenciándose en la carga de un forjado que recibe a mayores el muro inferior con respecto al superior, lo que

EXCENTRICIDADES EN NUDOS DE FÁBRICA

NUDO EXTREMO 24 cm CON TRAMO SUPERIOR. NÚMERO VARIABLE DE PLANTAS

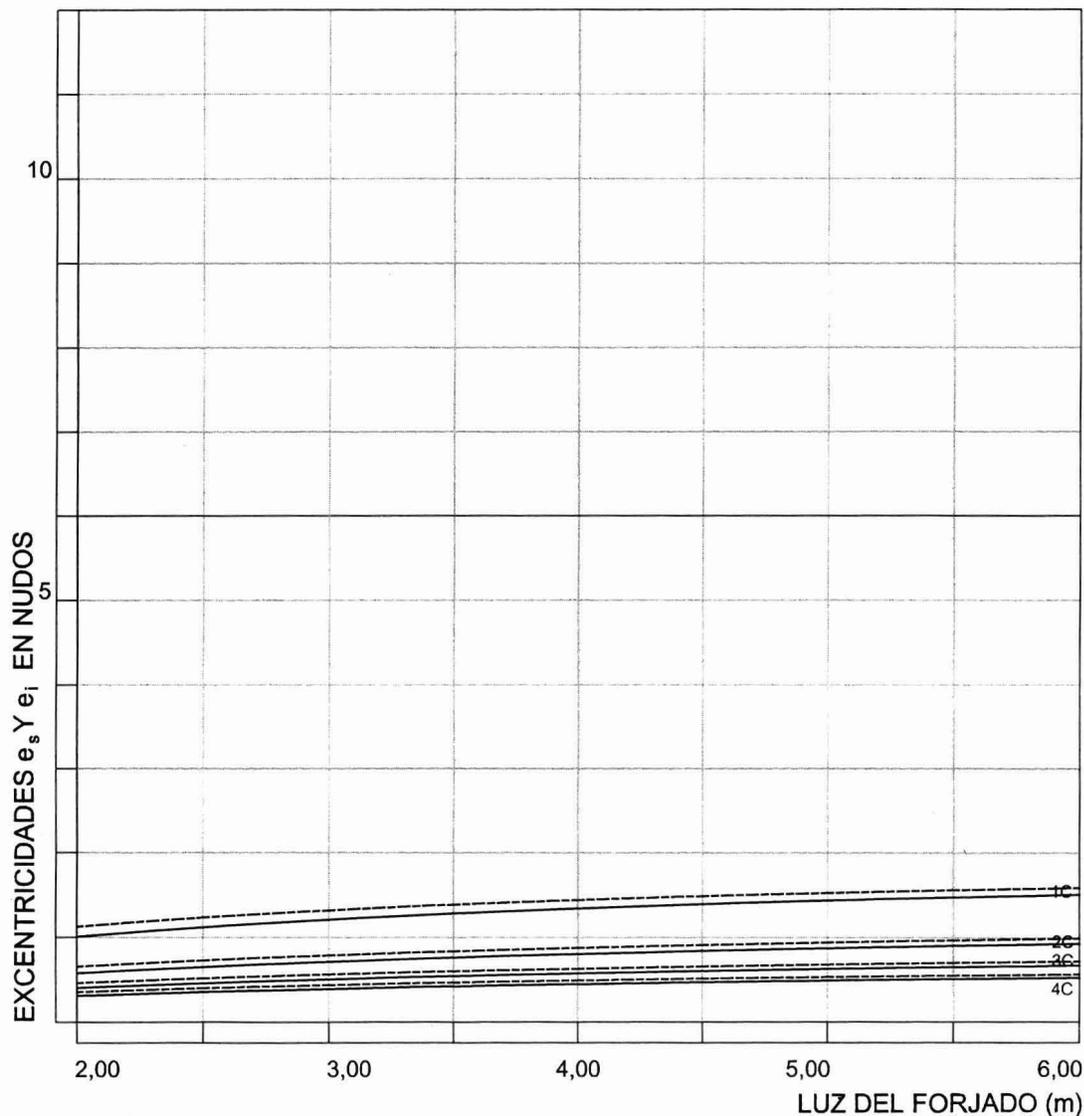


Figura 15

explica que la excentricidad superior siempre sea ligeramente más alta. Además la similitud de los valores tiene que ver con el criterio de suponer un mismo reparto porcentual de la excentricidad frente a la excentricidad límite.

La representación es una curva continua, como consecuencia de un único criterio de comprobación. Aquí la impresión intuitiva es de corrección, al proponer la norma valores más altos de excentricidad para los tramos aislados que para los continuos -lo que también ocurre con BS 5628, Figura 15-, frente a la situación que representa la Figura 16.

Sorprende el reflejo del criterio empleado: se define un momento en el nudo constante, cuando lo que a priori parecería lógico es que aumentase el empotramiento del forjado en la fábrica al crecer el número de plantas soportado. La duda de si no deberían ser las excentricidades más parejas y variable el momento acompaña la revisión de los gráficos.

Con respecto a BS 5628, las excentricidades que se derivan son notablemente inferiores al resto y su forma de crecimiento es también diferente: si en los otros métodos los mayores incrementos se producen al incrementarse la luz, en este caso el método muestra un crecimiento asintótico.

EXCENTRICIDADES EN NUDOS DE FÁBRICA

NUDO EXTREMO 24 cm CON TRAMO SUPERIOR. NÚMERO VARIABLE DE PLANTAS

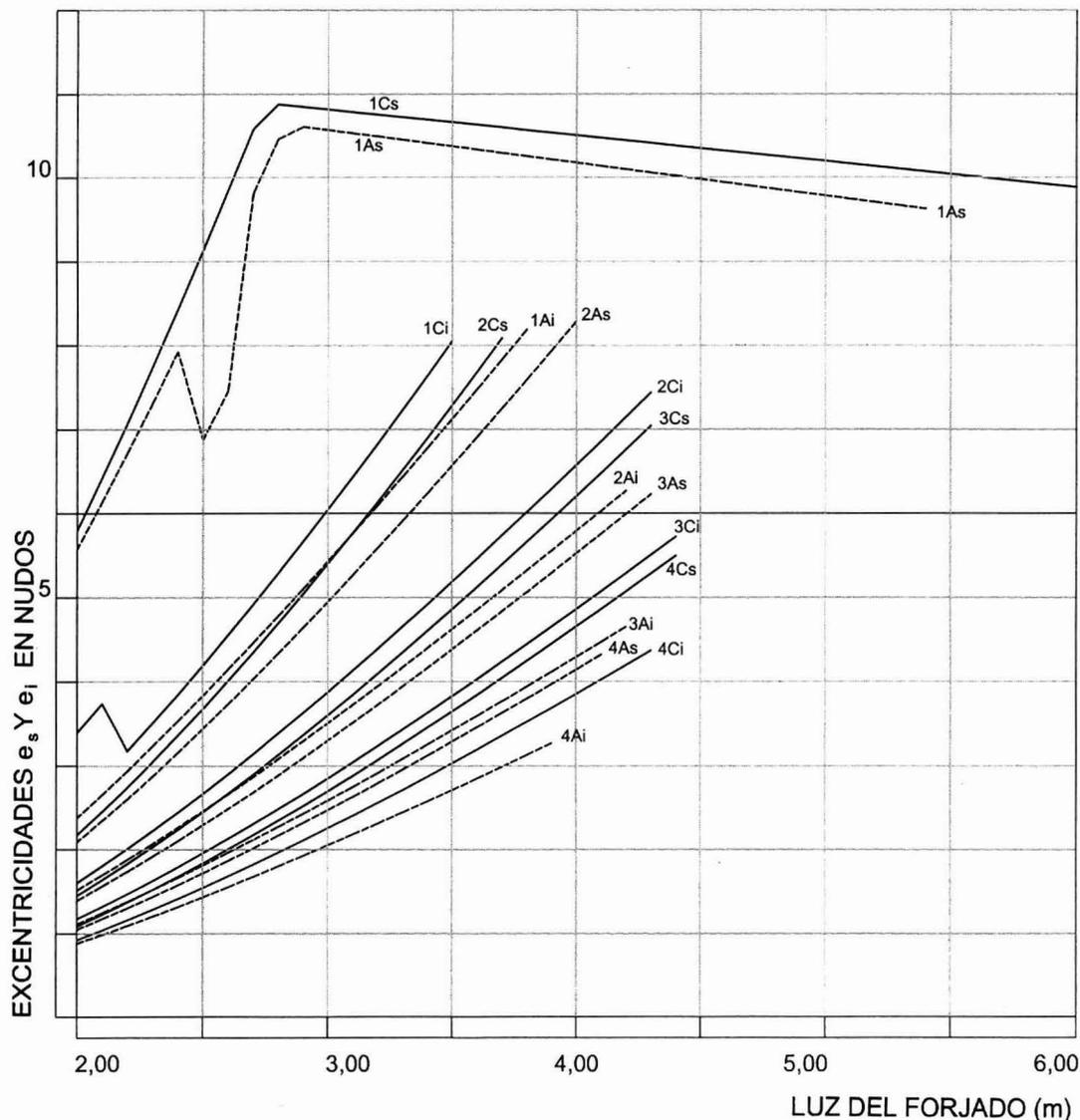


Figura 16

En lo referente a las gráficas derivadas de EC-6 decir que la recta de pendiente muy elevada establece el tránsito entre los dos últimos valores de la iteración: el penúltimo es una situación tensional admisible, del último ya no.

Sorprende que los valores sean siempre superiores a los derivados de las otras referencias, y también las diferencias que surgen entre las excentricidades superior e inferior de un mismo caso, debido al cambio de criterio de comprobación. Sigue sorprendiendo la asignación de mayores excentricidades al tramo aislado frente a los tramos continuos.

El emparejamiento entre gráficas se produce entre las excentricidades superior e inferior del tramo, que obviamente corresponden a dos nudos correlativos, lo que

mejora el comportamiento del tramo en el estudio del pandeo.

De todas formas, no se puede dejar de observar que en el intervalo entre 3,5 y 4,5 m se produce el fallo de la sección, y, por lo tanto, el tramo deja de ser válido.

Las curvas que se derivan del Análisis de Pórtico de EC-6 recuerdan a la forma de crecimiento de las curvas de excentricidades derivadas del criterio de FL-90, si bien con valores notablemente más altos. Sin embargo, el trazado tiene cierta armonía, pero con valores de excentricidades muy altos. Quizás introducir algún criterio de reducción de rigidez o de plastificación del nudo -aparentemente justificable teóricamente- confieran verosimilitud al método.

EXCENTRICIDADES EN NUDOS DE FÁBRICA

NUDO EXTREMO 24 cm CON TRAMO SUPERIOR. NÚMERO VARIABLE DE PLANTAS

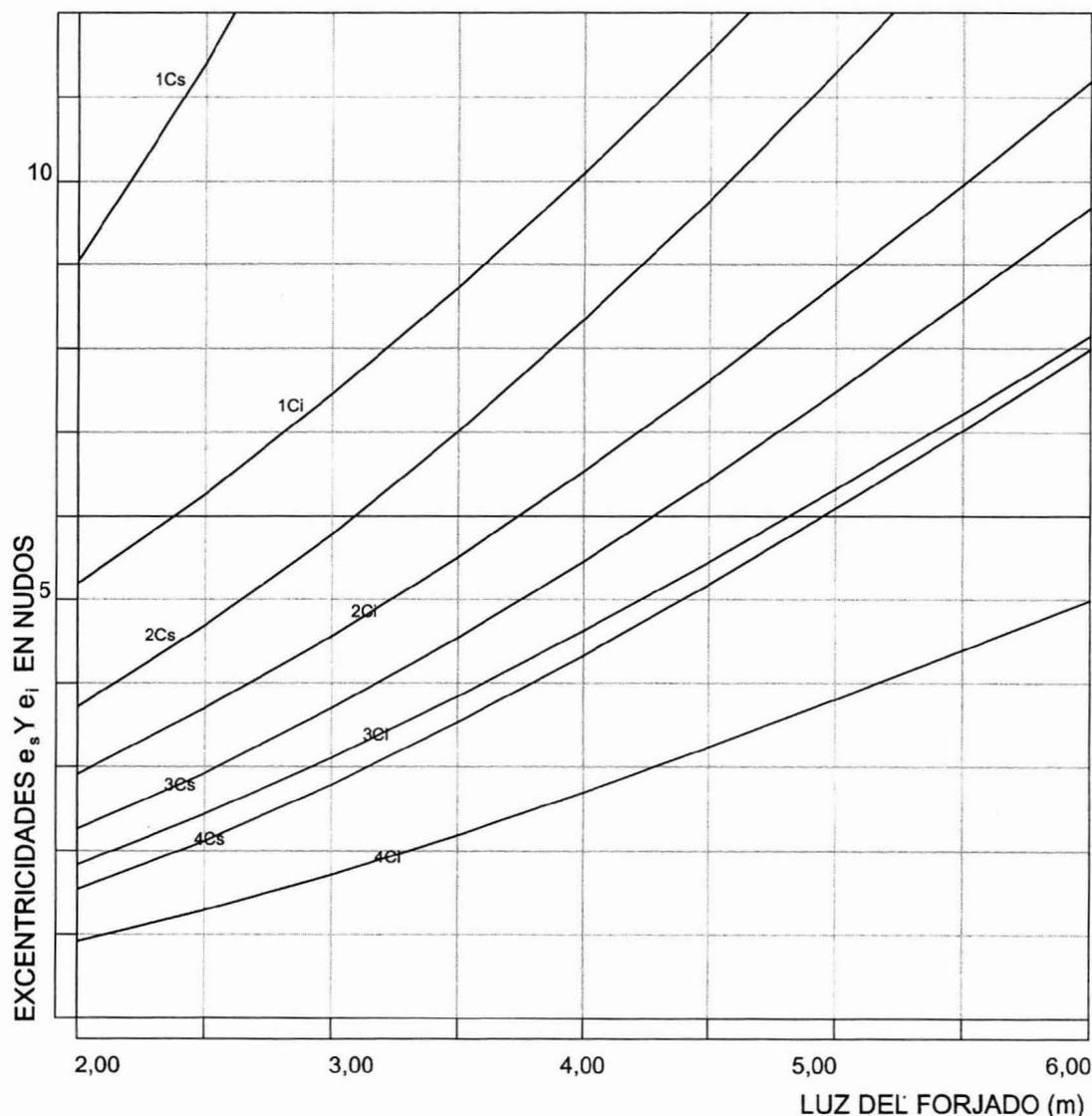


Figura 17

La Figura 18 recoge la comparativa de los valores de excentricidades para un nudo sobre el que graviten tres forjados más. Por valores BS 5628 es la más permisiva y EC-6 aporta los valores más altos. En razón a su forma, las gráficas de NBE-FL-90 y EC-6 Análisis de Pórtico parecen ser homotéticas. Nótese que con BS 5628 y NBE-FL-90 se podrían alcanzar -a expensas de la comprobación de pandeo- inicialmente valores de 6 m de luz, que con EC-6 Nudos están descartados.

d. Nudo Inferior Intermedio:

De los métodos estudiados y debido a su formulación, tan sólo el Análisis tipo pórtico de EC-6 proporciona valores de excentricidad para nudos intermedios correspondientes al primer apoyo interior, nudos a los que acometan forjados

de igual luz y carga por ambos lados. Aún así, se ha forzado las formulaciones para estudiar también el efecto de la alternancia de sobrecargas (200 kg/m^2) en forjados continuos de igual luz, pero los resultados muestran que quedan cubiertos siempre por la excentricidad mínima.

Los valores de excentricidad resultantes del Análisis de Pórtico de EC-6 en función del número de plantas y de la luz del vano se recogen en la Figura 19, indicando si se trata de excentricidades en la transmisión del axil superior ($-e_s$) o del nudo inferior ($-e_i$). Estas excentricidades se dan en valor absoluto, por cuanto el sentido de la excentricidad varía en las diversas situaciones.

Más allá de los valores resultantes, resulta destacable que cada planta y para cada excentricidad -superior o inferior-

EXCENTRICIDADES EN NUDOS DE FÁBRICA

NUDO EXTREMO 24 cm CON TRAMO SUPERIOR. NÚMERO VARIABLE DE PLANTAS

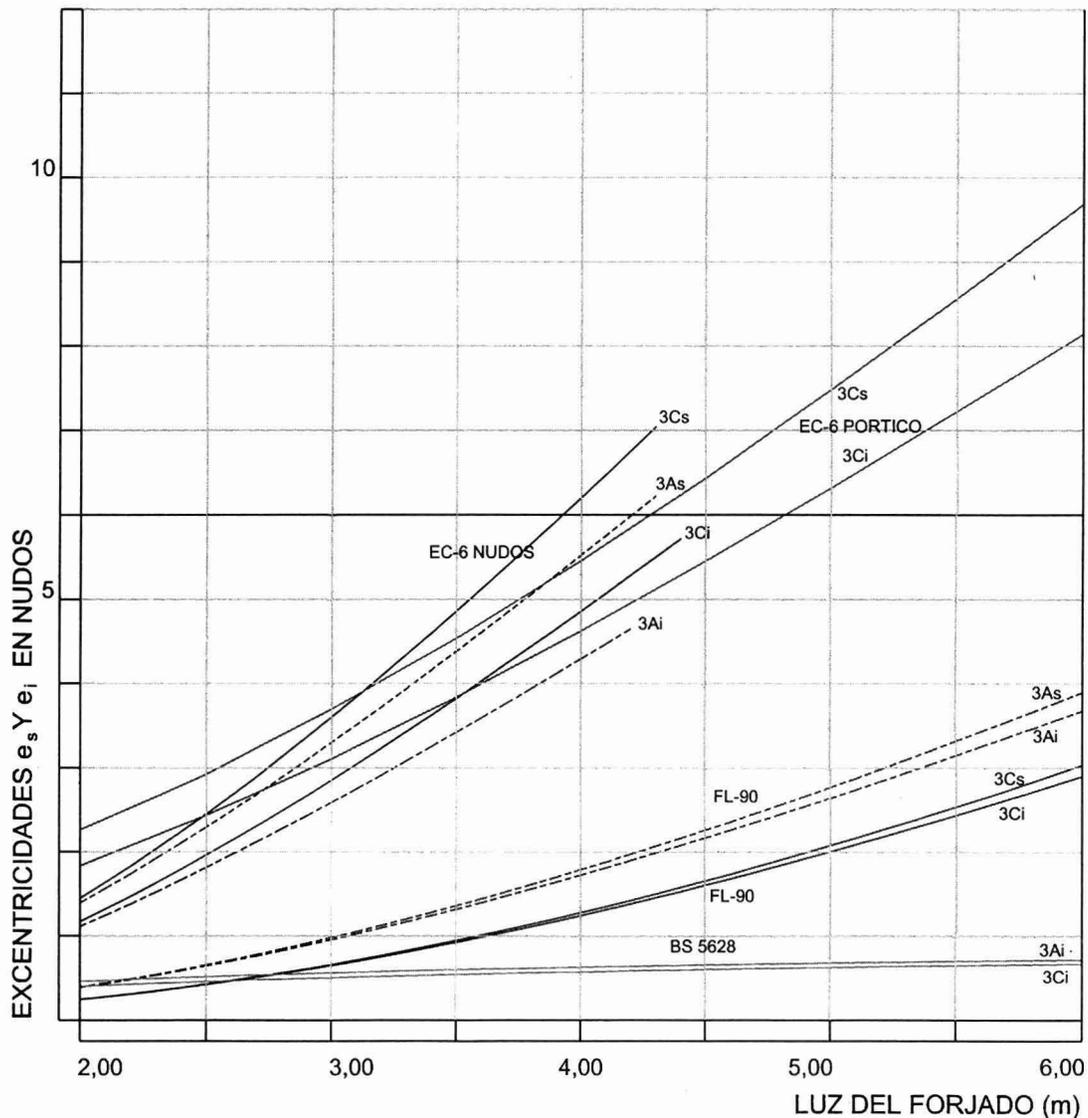


Figura 18

existe un mínimo que se encuentra hacia la mitad del intervalo y que depende del nudo analizado. Es más, para el mismo tipo de excentricidad -superior o inferior- el mínimo tiende a estar en el mismo sitio cada dos plantas, mientras que en las intermedias la posición del mínimo oscila de forma variable a derecha o a izquierda.

La Figura 20 recoge los resultados de un nudo inferior intermedio que recibe la carga de un número variable de plantas situadas sobre él. Este nudo, que se ha considerado el primer nudo interior, recibe un forjado del lado de fachada de luz mitad al que recibe por el lado interior. Se supone que esta segunda luz se repite en un número infinito de tramos. Esta figura se ha obtenido considerando para

NBE-FL-90 una inercia del forjado equivalente a la de una sección rectangular, por la razón justificada en el apartado anterior. Para el caso del Análisis de Nudo de EC-6 se ha considerado la inercia real de la sección en T del forjado, dada la precisión y el detalle con el que se expone la formulación. Se considera también BS 5628 pero no el Análisis de Pórtico de EC-6.

En esta situación, resalta poderosamente el divorcio entre los tres métodos. BS 5628 proporciona gráficas casi horizontales, con las menores excentricidades en la zona cuyas luces corresponde a la mayor aplicación práctica. Las gráficas derivadas de NBE-FL-90 se asemejan a las de EC-6, si bien con menores excentricidades, encontrándo-

EXCENTRICIDADES EN NUDOS DE FÁBRICA

NUDO INTERMEDIO 24 cm CON TRAMO SUPERIOR. NÚMERO VARIABLE DE PLANTAS

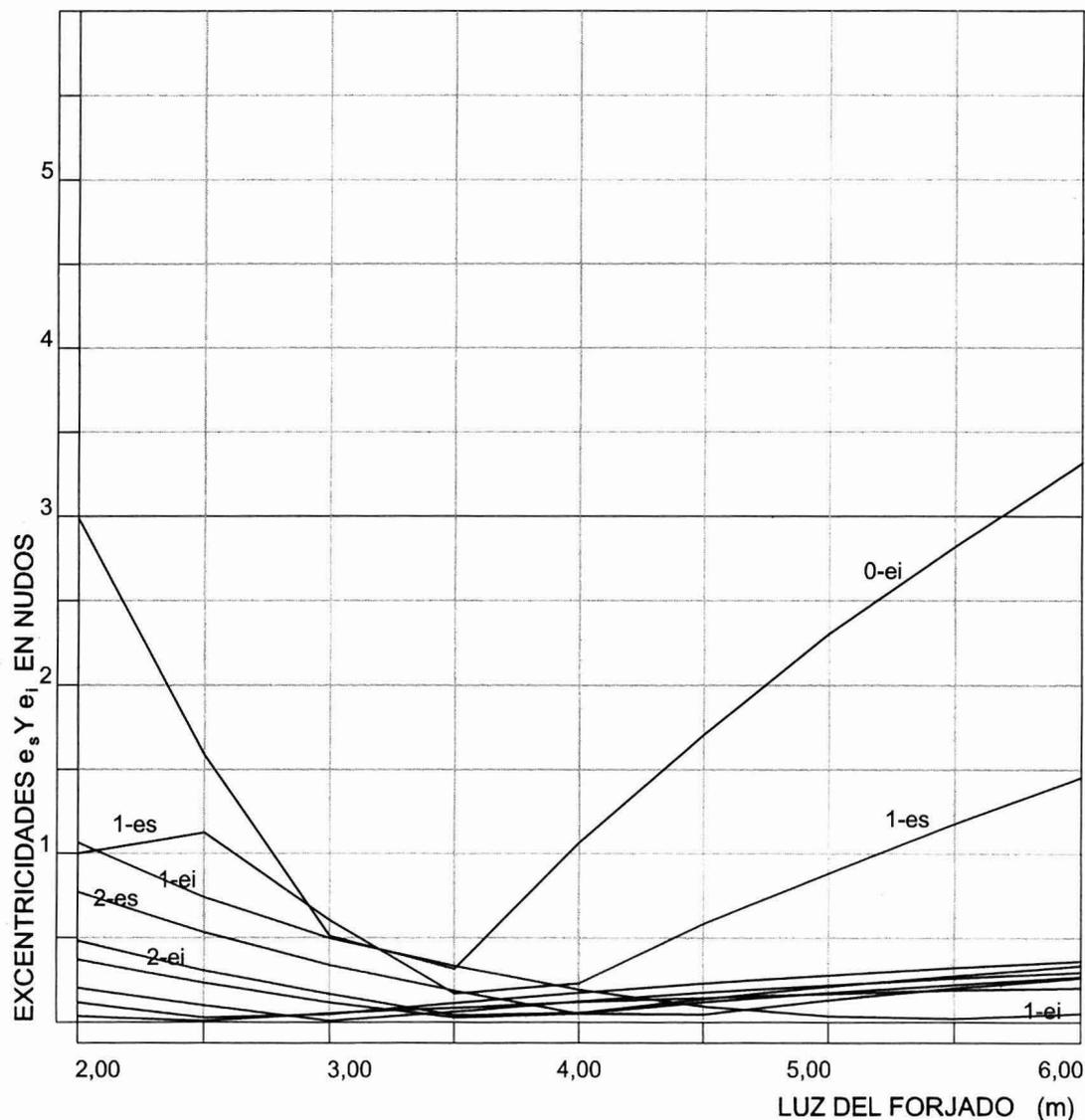


Figura 19

se cercanas las excentricidades superior e inferior de cada tramo de muro, mientras que en FL-90 se encuentran próximos los valores superior e inferior del nudo.

La problemática del gráfico coincide con la expuesta anteriormente. De acuerdo con el criterio de NBE-FL-90 y de BS 5628, de considerarse una excentricidad mínima como la planteada por EC-6, se dependería que para este tipo de nudos rige la excentricidad mínima.

Como cuestión de estudio se ha decidido emplear en el cálculo, con la misma situación anterior, la inercia correspondiente a una sección rectangular también para EC-6, Figura 21. En esta situación los valores se aproximan a

FL-90, y, aunque esta situación sólo tiene un valor testimonial, este caso se cubriría con la excentricidad mínima definida. A trazos se han representado las excentricidades superiores de los nudos.

4. CONCLUSIONES

. El método de análisis de nudos de FL-90 precisa de un *aggiornamento* en su exposición, así como pequeños retoques debido a la mayor precisión léxica actual -como, por ejemplo, en las rigideces asignadas a los forjados- y a pequeños problemas de definición de límites máximos en cada situación.

EXCENTRICIDADES EN NUDOS DE FÁBRICA

NUDO INTERMEDIO 24 cm CON TRAMO SUPERIOR. NÚMERO VARIABLE DE PLANTAS

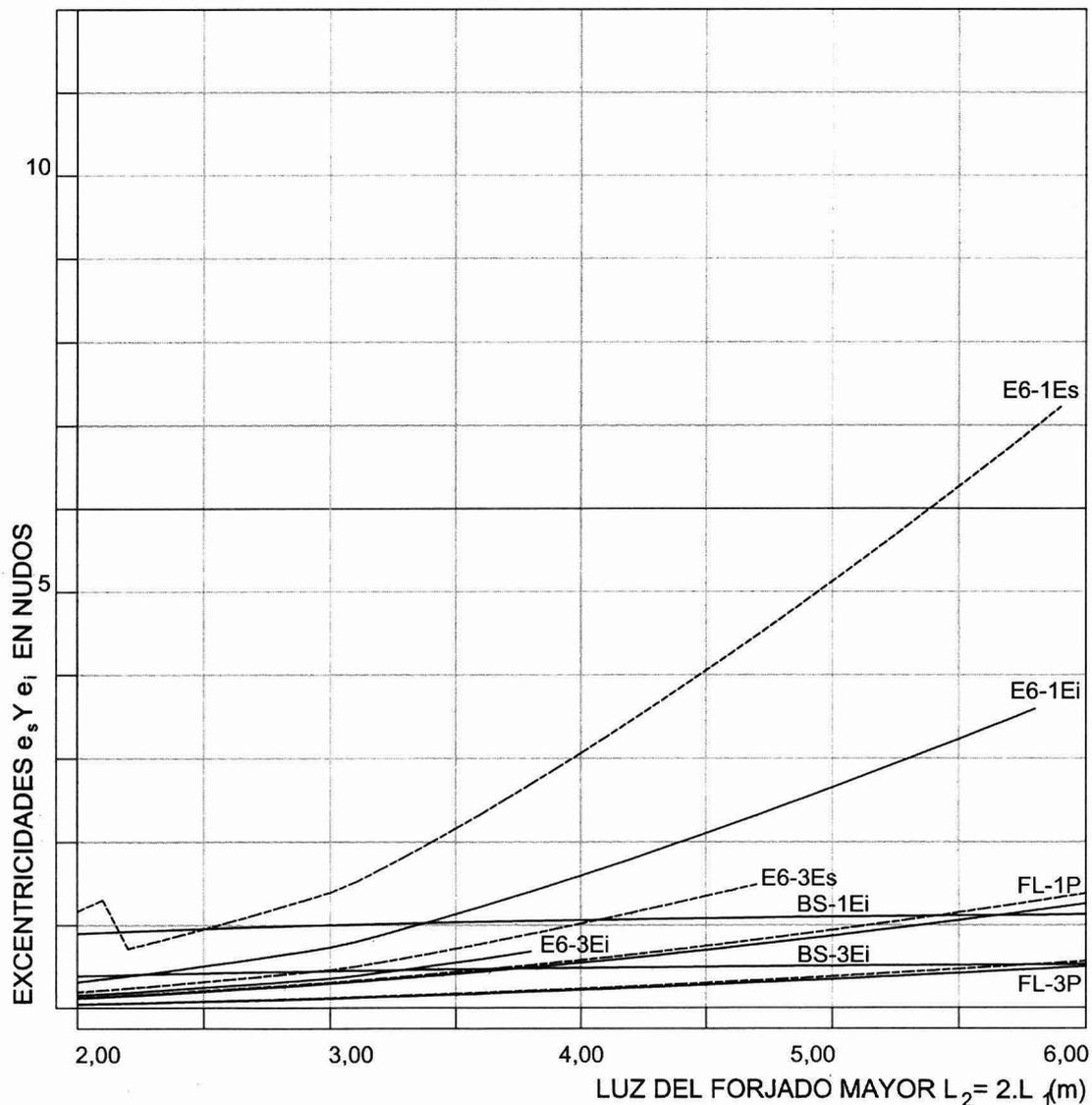


Figura 20

. Este método no contempla la colaboración del trasdosado del forjado en la capacidad portante del nudo. Sin embargo incorpora al análisis la solución constructiva del nudo, lo que permite estudiar situaciones dispares empleando sus criterios. Como ejemplo, podría citarse el efecto de centrado de cargas de un voladizo.

. El criterio del coeficiente ψ de NBE-FL-90 surge como consecuencia del análisis en agotamiento del nudo. Dado que el nudo puede estar perfectamente en situación elástica, la norma debería definir un diagrama de cálculo de la fábrica para situaciones en las que no se alcance el estado de agotamiento.

. El método de Análisis de nudo de EC-6 no contempla la relación del cálculo con la ejecución material de la fabri-

ca, de tal forma que exclusivamente con la formulación de EC-6, sólo se podrían analizar donde no hubiese alteraciones en el eje del muro y la entrega fuese completa, ya que en otro caso la formulación propuesta no garantiza el equilibrio del nudo. En caso de nudo extremo con entrega completa semeja factible la corrección mediante un coeficiente que distribuya el efecto de la excentricidad entre ejes, pero para otras situaciones no parece haber otra vía que realizar un análisis de nudo del tipo de FL-90.

. ACI-512 2.002 contiene un sistema de dimensionado geométrico de la fábrica, en la tradición de la antigua tratadística, que puede ser un ejemplo a considerar para la redacción de normativas de fábrica.

. El método de estimación de excentricidades de BS 5628 conduce a los menores valores de éstas, pero su forma de

EXCENTRICIDADES EN NUDOS DE FÁBRICA NUDO INTERMEDIO CON TRAMO SUPERIOR. SECCIÓN COMO PLACA

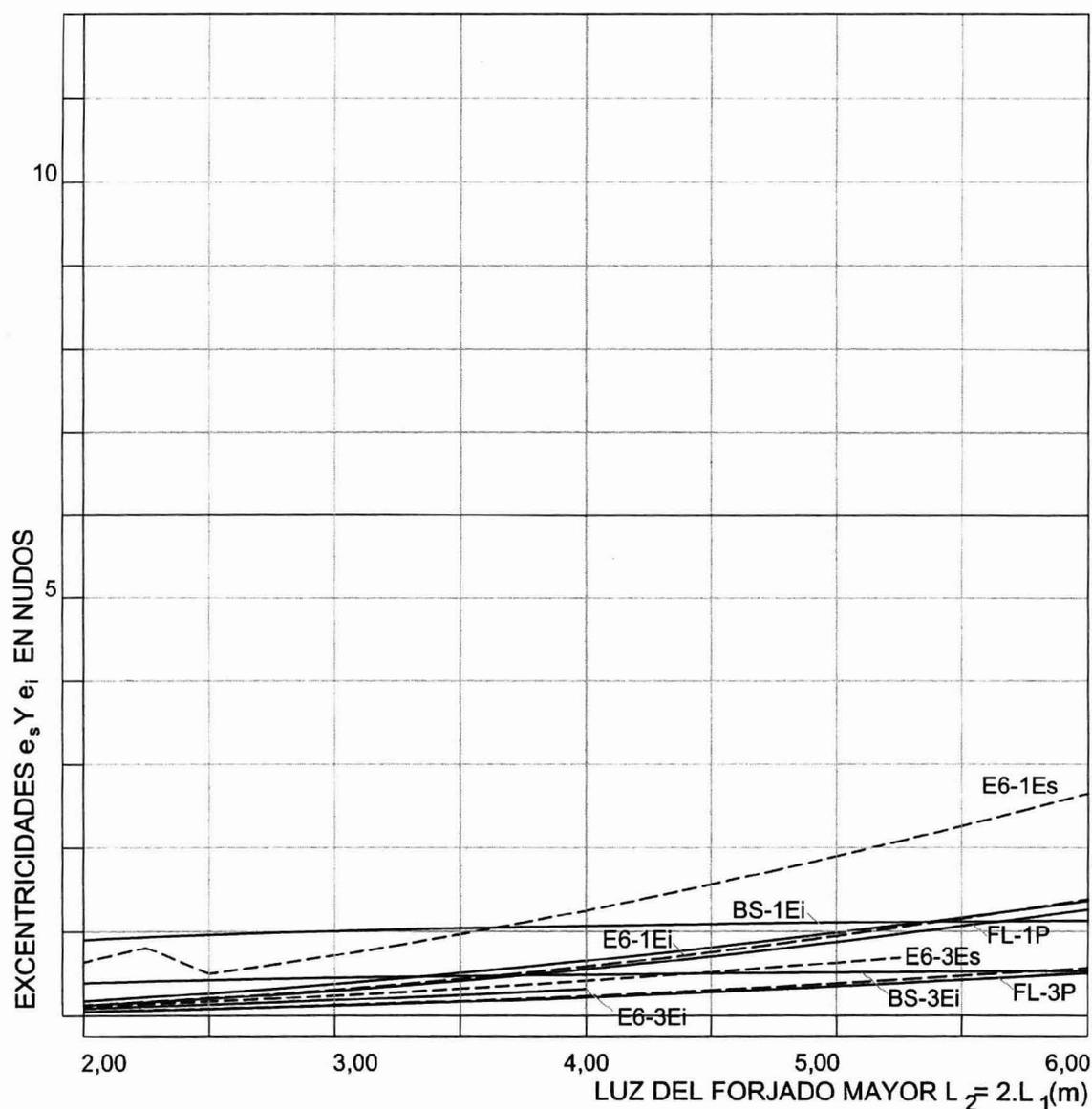


Figura 21

crecimiento no concuerda con la de los otros métodos. En lo tocante a la excentricidad mínima, plantea un criterio opuesto (considerar el muro a compresión centrada si la excentricidad no supera el 5% del espesor) al de EC-6 (excentricidad mínima de 5% del espesor).

. El criterio de HISPALYT conduce a excentricidades muy elevadas, como consecuencia del criterio de suponer nula la excentricidad en la base de cada tramo.

. El método de análisis de Pórtico de EC-6, si bien conduce a gráficas de trazado creíble, proporciona valores de excentricidades excesivamente altos. Para que este método resulte operativo precisa posiblemente una matización y clarificación.

. De los resultados numéricos obtenidos representados en los gráficos se desprende que el método de Análisis de

Nudo de EC-6 necesita una revisión en lo tocante a los cambios de criterio de respuesta de la fábrica, que resultan demasiado bruscos, así como en las excentricidades que asigna a tramos aislados y continuos y que son mayores en estos últimos. Especialmente llamativa es la situación del forjado superior intermedio, que al aumentar las luces de forjado entre 2,5 y 5,5 m pasa por tres criterios resistentes diferentes.

. La representación de los gráficos de excentricidades de nudos inferiores despierta la duda de si no sería más correcto de considerar el momento que debe soportar el nudo referido a las cargas que gravitan sobre él -una suerte de momento variable con excentricidades más parecidas-, en vez de considerar que el momento es inmutable y que las variaciones las sufran las excentricidades.

. A la luz de los resultados correspondientes a nudos intermedios, en situaciones de cargas similares pero con luces bastante desequilibradas, el efecto se puede cubrir perfectamente introduciendo una excentricidad mínima y obviando el cálculo. Es en los nudos extremos en los que el cálculo se vuelve trascendente.

. A la vista de los resultados numéricos obtenidos y volcados gráficamente se puede concluir que el método de análisis de nudos de NBE-FL-90 es más favorable que el de EC-6, si bien menos que el de BS 5628.

BIBLIOGRAFÍA

- [01] *Muros Resistentes de Fábrica de Ladrillo, MV-201 1972*. Ministerio de la Vivienda. Madrid, 1972.
Modificaciones y corrección errores, R. D. 996/99 (BOE 24-06-99).
- [02] *Muros Resistentes de Fábrica de Ladrillo, NBE-FL-90*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. R. D. 1723/90 de 20-12-90 (B.O.E. 4-01-90).
- [03] *British Standard BS 5628*:
Part 1: 1992 Structural Use of unreinforced masonry.
Part 3: 1985 Materials and components, design and workmanship.
- [04] *Eurocódigo nº 1 6. Proyecto de estructuras de fábrica*.
Parte 1-1: Reglas Generales para Edificios. Reglas para Fábrica y Fábrica Armada.
Versión Española: febrero 1997.
- [05] *Building Code Requirements for Concrete Masonry Structures ACI-531 y Specification for Masonry Structures, ACI 530.1-02*. American Concrete Institute - Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers - The Masonry Society, 2002.
- [06] Adell Argiles, J. M.; Bedoya Frutos, C.; de Isidro Gordejuela, F.; Fombella Guillén, R.; Gómez López, E.; Neila González, J.; Puerta García, A.; Soriano Santandreu, F.: *El muro de ladrillo*. HISPALYT Asociación Española de Fabricantes de Ladrillo y tejas de arcilla cocida. Madrid, 1992.
- [07] Martín Gutiérrez et alii; *Análisis Matricial de Sistemas Estructurales Planos. Programa X7*. Departamento de Tecnología de la Construcción de la Universidad de La Coruña-Tórculo Artes Gráficas, Santiago, 1997
- [08] Freire Tellado, M. J.: *La Sección Eficaz en la Estructura de Fábrica*.
Informes de la Construcción-C.S.I.C., Vol. 49 nº 449, mayo/junio 1997, págs. 23-36.
- [09] Freire Tellado, M. J.: *Comparativa del cálculo de pandeo en métodos basados en la sección eficaz*. Informes de la Construcción-C.S.I.C., Vol. 52 nº 467 mayo/junio 2000, págs. 31-46.
- [10] *Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Forjados Unidireccionales de Hormigón Armado o Pretensado, EF-96*. RD.2608/96, de 20-12-96, Ministerio de Fomento (BOE 22-01-97).
- [11] AAVV: *Bases de Cálculo y Valores Estáticos de Perfiles de Acero Laminado*. Tomo 0. Empresa Nacional Siderúrgica, S.A., Madrid, 1.989.
- [12] *Instrucción del Hormigón Estructural, EHE-98*
Ministerio de Fomento. Madrid, 1998.
- [13] *Norma Básica de la Edificación Acciones en la Edificación, NBE-AE-88*, M.O.P.U., 1988.

* * *