

Este problema puede simplificarse por medio del llamado *pandeo linealizado* que en la práctica consiste en obviar la matriz de grandes desplazamientos K_L y calcular para qué valor de carga ocurre el pandeo. Se hace partiendo de la configuración deformada en la matriz de primer orden y teniendo en cuenta el nivel de carga en la matriz de rigidez geométrica. Esta simplificación supone llevar el fenómeno del pandeo a calcular: $\det(K_0 + \lambda K_G) = 0$. Matrices generadas a partir de los tensores no lineales oportunos.

Por otra parte en cuanto al tipo de elemento de trabajo, se empleó un elemento de viga que ajuste el campo de desplazamientos de la flexión de Timoshenko para tener así en cuenta la influencia del cortante.

4. ESTUDIOS PREVIOS Y VALIDACIÓN

Para trabajar por medio del método de los elementos finitos se emplea el programa ANSYS 5.3 con el que se han modelizado pórticos biarticulados de una altura para que con sólo darle los valores de cargas, características geométricas del pórtico,... se llegue a calcular su carga crítica y se pueda así despejar el coeficiente de pandeo. Hasta llegar al modelo definitivo se chequearon modelos previos que se comprobaron con la carga crítica de la viga apoyada-apoyada, la viga biempotrada y con los pórticos del caso 1.a de la Norma dando diferencias menores del 0,01%.

Se estudiaron las variables oportunas, cargas uniformes y cartelas, que complementan las situaciones de cálculo de la NBE EA-95. De este modo se tienen situaciones de cálculo más reales y podremos evaluar así la influencia de estos parámetros.

En este sentido se encontró que no se está del lado de la seguridad asociando el estado de carga de dos puntales al de una carga uniformemente distribuida.

Finalmente, al estudiar la influencia de las cartelas se vió una baja influencia de la cartela y que sin embargo el coeficiente de pandeo se encuentra más influenciado por la sección mayoritaria del dintel.

5. ANÁLISIS DE TENDENCIAS

Para definir las tendencias que toma el coeficiente de pandeo en función de las variables de un pórtico se analiza su evolución partiendo de un caso concreto y modificando una variable de cada vez. Así se toma un pórtico biarticulado simétrico a dos aguas sometido a una hipótesis de cargas verticales, de 26 m de luz, altura de pilares 4 m y pendiente 15% con los perfiles y cartelas en el dintel.

Tras modificar de cada vez únicamente una sola de las variables se obtuvieron los siguientes resultados:

- Se observa que a mayor luz y a menor altura mayor coeficiente de pandeo lo que resulta coherente con la teoría de pórticos y las ecuaciones del coeficiente de pandeo de otros métodos.
- También resulta propio que la relación de inercias sea influyente en el valor del coeficiente de pandeo como sucede en los métodos de varias alturas de las Normas y en el de Ortíz Herrera. Esto también puede decirse del caso 1.a de pórticos de una altura de la NBE EA-95 donde la influencia del pilar se ciñe fundamentalmente a la relación entre inercias pilar/dintel, pues el área influye de un modo prácticamente nulo.
- Es muy interesante observar como influye la pendiente en el coeficiente de pandeo. Ninguno de los métodos existentes ofrece esta información por no estar recogida en

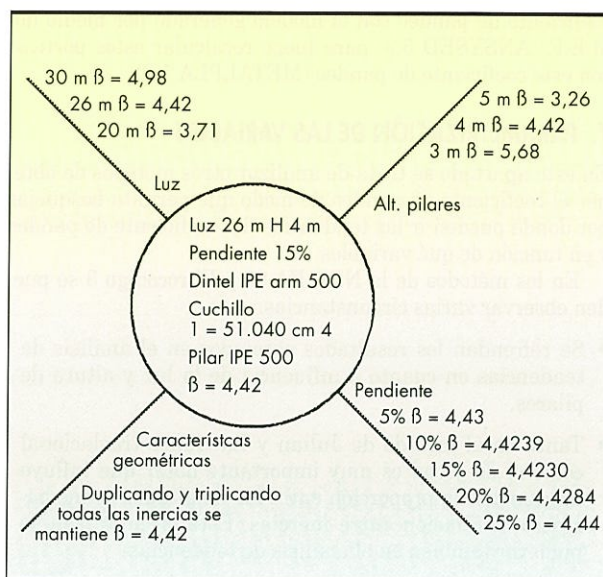


FIGURA 2.

pórticos de edificios,... Tras los estudios realizados se vió que el coeficiente de pandeo mínimo fue con pendiente 15%, y que aumentando o disminuyendo ésta entonces crecía β . El orden de magnitud de este crecimiento fue sin embargo escaso. Así las máximas diferencias fueron menores de 0,02 unidades. Se observó también que al multiplicar/dividir todas las longitudes de barras de un pórtico por un mismo valor el coeficiente de pandeo se mantenía.

6. METODOLOGÍA DE TRABAJO EN LA DEFINICIÓN DE LA ECUACIÓN

Recapitulando la situación descrita hasta el momento se puede decir que: por una parte se está del lado de la inseguridad adaptando la NBE EA-95 en el cálculo del coeficiente de pandeo en pórticos de una altura en comparación con lo obtenido con el M.E.F.; mientras que por otra se pueden obtener óptimos resultados del coeficiente de pandeo por medio del pandeo linealizado con una buena eficiencia de cálculo y bajo coste computacional. Surge así la necesidad de plantear un método de cálculo de este valor, de modo que se centra este estudio en los pórticos biarticulados con IPE, acartelados con cuchillos en dinteles y sometidos a cargas verticales uniformemente distribuidas.

Para conseguir una ecuación útil y a tenor del análisis de tendencias, se calcula el coeficiente de pandeo de 165 pórticos para luego obtener una regresión de los datos que sea útil para calcular el coeficiente de pandeo que nos ocupa. Estos 165 pórticos se consiguen tras combinar 11 luces (de 20 a 30 m), 5 alturas de pilares (de 3 a 7 m) y 3 pendientes de 5, 15 y 25%.

El estado de carga dado se define en función de una carga uniforme cualquiera: nieve de 600-800 m de altitud, acciones permanentes en función de correas IPE y 6 m de separación entre pórticos.

El procedimiento seguido para la obtención de los datos fue el siguiente: con un programa de construcción metálica (METALPLA 1.0) [6] se calcula cada pórtico partiendo de unos coeficientes de pandeo 2 (el mínimo) en el plano de la flexión y 0,7 en el transversal. Posteriormente se calculó su

coeficiente de pandeo con el modelo generado por medio del M.E.F. (ANSYSED 5.3) para luego recalcularlo con este coeficiente de pandeo (METALPLA 1.0).

7. PARAMETRIZACIÓN DE LAS VARIABLES

En este apartado se trata de analizar otros métodos de obtener el coeficiente de pandeo de modo que permita bosquejar por donde pueden ir las tendencias del coeficiente de pandeo y en función de qué variables.

En los métodos de la NBE EA-95 y Eurocódigo 3 se pueden observar varias circunstancias:

- Se refrendan los resultados obtenidos en el análisis de tendencias en cuanto a influencia de la luz y altura de pilares.
- Tanto en el método de Julian y Lawrence traslacional como el de Wood es muy importante notar que influye únicamente la proporción entre las longitudes de las barras o la relación entre inercias. Esta circunstancia se pudo ver también en el análisis de tendencias.

Llegado a este punto y tras los antecedentes se deben hacer una serie de reflexiones:

- **Para una pendiente dada, mantener la relación luz-altura de pilares es lo mismo que mantener las relaciones entre las longitudes de las barras, con la ventaja añadida que la luz y la altura de pilares son variables más cómodas de manejar en un pórtico que las longitudes de las barras.**
- **Se debe recordar que en el análisis de tendencias se observó una baja influencia de la pendiente y las cartelas en dinteles sobre el coeficiente de pandeo.**

Todos los métodos parametrizan estas variables en una o dos, de modo que luego trabajan con funciones tipo $f(x)$ o $f(x,y)$. Las regresiones tipo $f(x)$ son las más intuitivas de parametrizar, además son más cómodas para aplicar luego.

Entonces se puede concluir que para obtener una ecuación que nos dé el coeficiente de pandeo esta debe (en principio) depender de un parámetro que englobe en él a las otras variables para luego aplicar la regresión que nos dé los mayores coeficientes de correlación múltiple, R^2 y el coeficiente de correlación ajustado.

Vistas las ecuaciones existentes y las posibles, parece lógico pensar que una ecuación polinómica o una potencial serán a priori las que se adapten mejor a la distribución del coeficiente de pandeo, pues para los casos de pórticos de una altura tenemos un sólo parámetro integrado en polinomios de segundo grado que posteriormente se elevan a 0,5.

Para facilitar la regresión es muy importante concebir bien el parámetro que engloba a las otras variables. Esta es la razón por la que éste debe reflejar bien las características del pandeo para que los pórticos semejantes entren con el mismo valor del parámetro en la ecuación que se aplique. Esto significa que dicho parámetro debe respetar la siguiente condición: para una misma pendiente, igual proporción luz-altura e igual proporción de inercias dintel-pilar, el valor del parámetro debe ser el mismo. Así entramos en la fórmula de la regresión con la misma cifra y obtenemos el mismo coeficiente de pandeo.

Con estas ideas se sientan las bases para la parametrización de las variables, pero antes de darle una forma definitiva conviene analizar la magnitud auxiliar "c" que es la que se emplea en el Caso 1.a de los pórticos biarticulados de una

altura. Por un lado debemos fijarnos en que respeta los criterios mencionados arriba en cuanto a las relaciones de las variables, mientras que por otro lado sabemos que la magnitud auxiliar "s" tiene un valor tan sumamente bajo que aunque se multiplique por 6 apenas influye en el coeficiente. Por eso resulta muy interesante comparar los coeficientes de pandeo de estos dos casos:

Dos pórticos rectangulares (de tres barras), con carga uniformemente distribuida, sin pendiente y biarticulados de las siguientes características, tal y como se aprecia en la tabla 1.

	Pórtico 1	Pórtico 2
Luz (m)	30	20
H (m)	4	4
I. Pilar (cm ⁴)	33.740	50.610
I. Dintel (cm ⁴)	33.740	33.740
C	7,5	7,5

TABLA 1.

Estos pórticos son distintos pero con una cosa en común y es que en ambos la magnitud auxiliar "c" que define la NBE EA-95 en las ecuaciones de pórticos de un vano tiene el mismo valor, $c = 7,5$. El siguiente paso consiste en conocer la versatilidad de este parámetro "c" para conocer como se adapta a nuestra situación. Si "c" fuera un buen parámetro para nosotros, nos debería dar para el mismo valor c un coeficiente de pandeo prácticamente igual, pues con él entraríamos en una ecuación que desconocemos con el mismo parámetro.

El resultado es sorprendente, pues se comprueba que para el primer caso el coeficiente de pandeo es $\beta = 5,207$ mientras que para el segundo $\beta = 4,486$. Esta diferencia permite concluir que la magnitud auxiliar "c" no nos es útil.

Debe pensarse entonces que el aporte de la relación luz/altura al incremento del coeficiente de pandeo no es el mismo que el de la relación entre inercias. Es precisamente esta última conclusión la que indica que manteniéndose las condiciones concluidas hasta ahora, para una pendiente dada, deben remunerarse por separado las influencias del incremento luz/altura y las del incremento inercia del pilar / inercia del dintel.

Por esta razón se parametrizan las variables luz, altura de pilares, inercia de dinteles, inercia de pilares y pendiente del siguiente modo:

$$\alpha_1 (Luz / altura)^m + \alpha_2 (I. pilar / I. dintel)^n + \alpha_3 (pendiente \% - 15\%)^2$$

Esta forma se explica por las siguientes razones: cumple con las características propias de estos coeficientes de parametrización, innova al separar las dos relaciones incrementales, mantiene la adimensionalidad que hasta ahora también se venía dando, es válida para implementar en una función creciente, sigue las premisas dadas por el análisis de tendencias,... etc.

Se obvia la influencia de las cartelas por dar diferencias muy bajas entre ellas y siempre en el mismo sentido por lo que tenerlos en cuenta solo influiría en una curva más o menos tendida. Así se toma sólo la inercia del dintel de la sección constante.

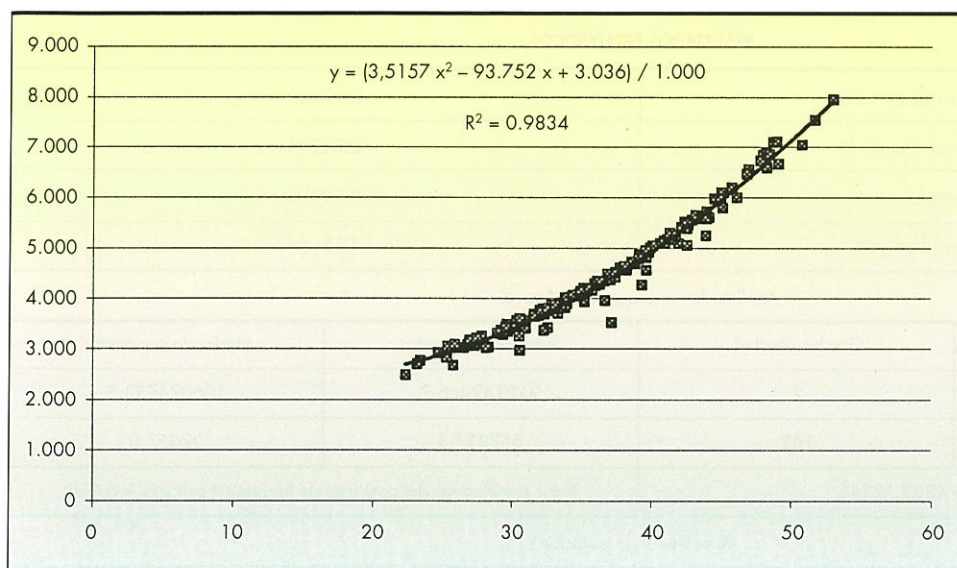


FIGURA 3.

8. OBTENCIÓN DE LA ECUACIÓN

Con esta forma de parámetro el siguiente paso es trabajar iterando con los valores de α_1 , α_2 , α_3 , m y n hasta tener la regresión por medio de un programa estadístico que nos dé los mayores coeficientes de correlación múltiple, el cuadrado de este coeficiente y el coeficiente de correlación ajustado. Finalmente se obtuvo la siguiente ecuación que se representa en la figura 3.

Se prefirió trabajar con el coeficiente de pandeo multiplicado por 1000 para que salga la ecuación de grado 2 de coeficientes más cómodos.

Esto explica que en la gráfica aparezca partida por 1.000. Se obtuvo $\alpha_1 = 6$; $\alpha_2 = 11,15$; $\alpha_3 = 0,005$ m = 0,79 y n = 0,88.

Así la ecuación queda como se aprecia en la figura 4. Posteriormente se explicará la razón por la que se mayoría dividiendo entre 950 y no entre 1.000.

9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA ECUACIÓN

A continuación se dan los resultados que ofrece el paquete estadístico y posteriormente se ofrece la interpretación de los mismos.

Como los contrastes de hipótesis indican la asociación tanto global como individual de las variables de la ecuación con un nivel de confianza del 95%, se concluye que la ecuación refleja los valores del coeficiente de pandeo que tomaron los distintos casos.

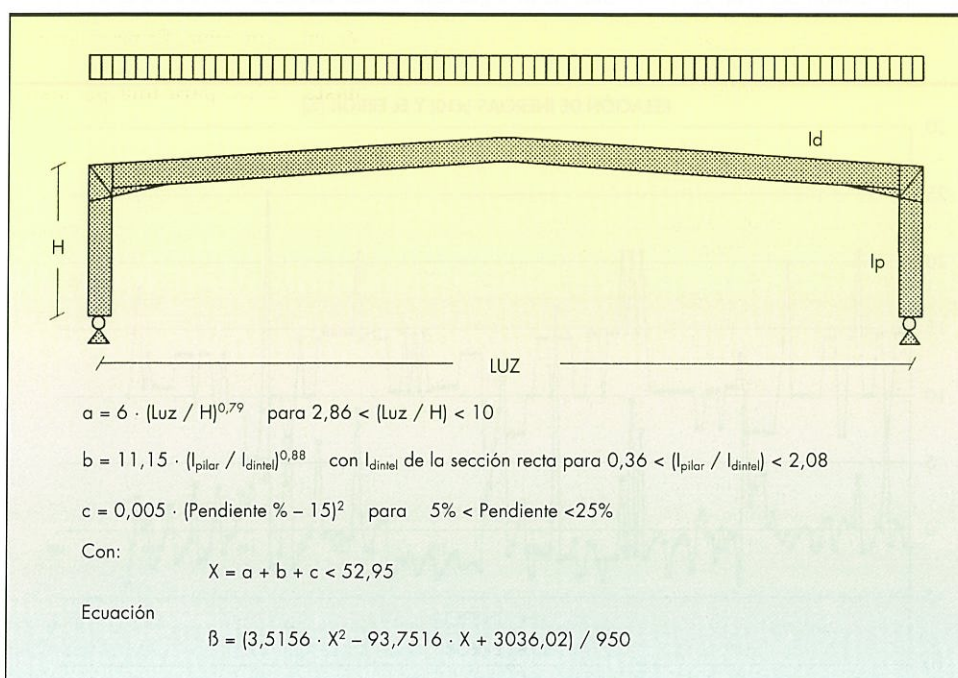


FIGURA 4.

RESULTADOS ESTADÍSTICOS					
Coeficiente de correlación múltiple		0.99168			
Coeficiente de correlación R ²		0.98344			
R ² ajustado		0.98323			
Error estándar (β por mil)		148.51594			
Análisis de varianza (Tabla Anova)					
	Grados libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados		
Regresión	2	212149466.7	106074733.3		
Residuales	162	357323.3	22057.0		
Estadístico F = 4809.12245		Valor significativo del contraste de hipótesis (rechazo) = 0.000			
Variables en la ecuación					
Variable	B	SE B	Beta	T	Valor significativo de T
X	-93.751646	16.107964	-0.557509	-5.820	0.000
X ²	3.515658	.218062	1.544329	16.122	0.000
Constante	3036.02275	290.362343		10.456	0.000

TABLA 2.

10. ANÁLISIS DE ERRORES, INFLUENCIA DE LA INERCIA

Este apartado tiene el objeto de adaptar la ecuación teórica a una real de modo que no se cometan errores del lado de la inseguridad.

Es importante destacar que a pesar del alto coeficiente de correlación, podríamos estar cometiendo errores en la estimación tales que ofreciesen valores por debajo del real. Esto

puede estudiarse como sigue: partiendo de los datos que se usaron en los 165 pórticos modelizados, se les aplica la ecuación y se comparan los resultados con los del M.E.F. Además se conoce así el orden de error que se tiene. En la figura 5 se representa el error en tanto por ciento frente a la relación de inercia del pilar / inercia del dintel multiplicado por 10.

En esta gráfica los errores positivos son los que están del lado de la seguridad, donde nunca se sobrepasa el 5%, de he-

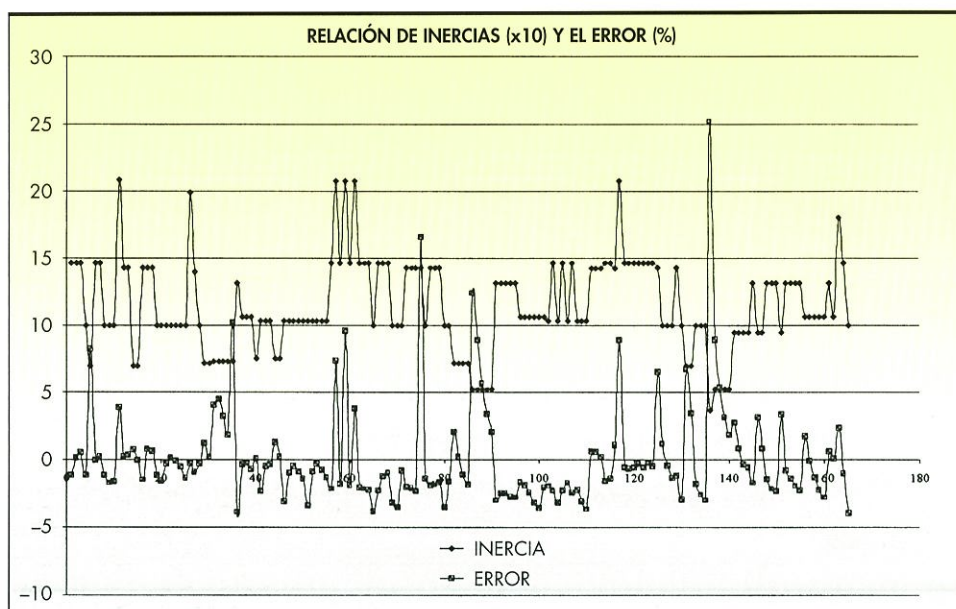


FIGURA 5.

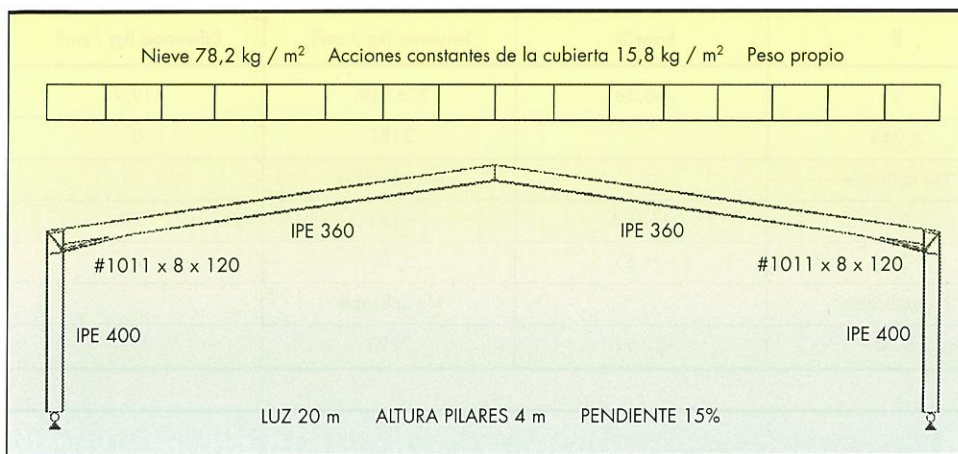


FIGURA 6.

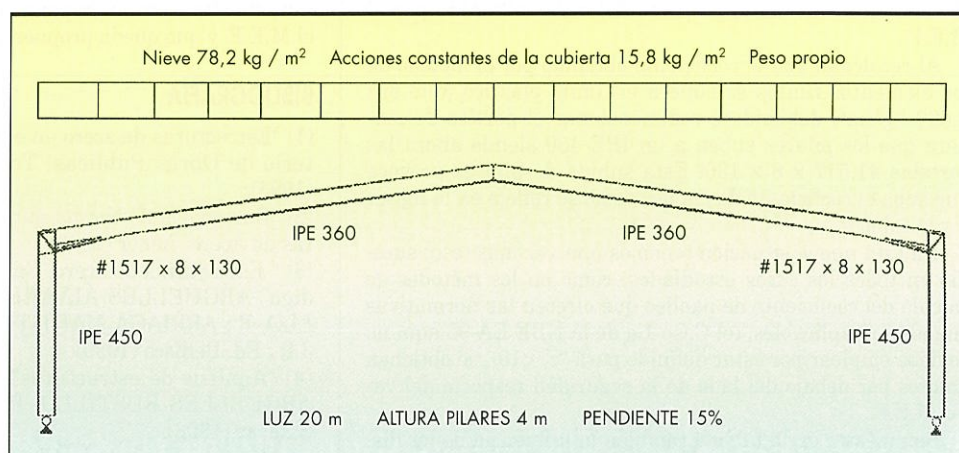


FIGURA 7.

cho el mayor valor en este lado (errores negativos) fue el pórtico 165 con un error del $-3,96\%$. Del lado de la seguridad los errores por encima del 10% fueron 4 y por encima del 5% 14.

Se puede observar en la curva inferior (la del error $\%$), la fuerte asociación que existe entre los errores importantes y relaciones de inercia altas (mayores de 2) y bajas (0,3). Se debe a la baja adaptación que tienen los cambios de inercia a la curva. Esto no debe sorprendernos pues también sucede en otros métodos, así en la ecuación de la norma NBE EA-95 se limita el valor de "c" a 10, de modo que cuando la relación entre inercias es grande este valor también crece y puede llegar a superar el valor de 10.

No obstante **en los casos extremos de inercia la expresión tiene la virtud de ponerse del lado de la seguridad.**

Finalmente y de cara a estar siempre del lado de la seguridad, debido a que el error máximo cometido fue del $3,96\%$ del lado de la inseguridad, se pondera la ecuación en un 5% y para redondear se soluciona dividiendo entre 950 (en vez de entre 1.000) de modo que realmente se pondera en un $5,26\%$.

11. INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE PANDEO EN LA INSEGURIDAD DE LAS TENSIONES CÁLCULO

En este apartado se busca exponer mediante un ejemplo como podemos llegar a tener tensiones de cálculo inferiores a las que se obtienen si nos apoyamos en el método de los

elementos finitos. Así si se tiene un pórtico calculado con un coeficiente de pandeo $\beta = 2$, (que es el valor mínimo para los pórticos biarticulados, aunque máximo según alguna bibliografía), se verá como el coeficiente de pandeo calculado con nuestro modelo provoca que tengamos que redimensionar sus pilares.

Se ejemplifica esta situación en el pórtico de la figura 6.

Si se hubiera calculado sin otras mayoraciones que las que define la Norma NBE EA-95 con un coeficiente de pandeo 2 en el plano de la flexión y 0,7 en el transversal el pórtico cumpliría. En la tabla 3 se disponen los coeficientes de

Método	β	Error %
Mínimo	2	$-53,66$
M.E.F.	4,316	
EA-95 CASO 1.a	3,90	$-9,481$
EA-95 Edificios	3,23	$-25,18$
Eurocódigo 3	3,5	$-18,90$
Ortiz Herrera	No aplicable	
Ecuación	4,54	$+5,19$

TABLA 3.

Método	β	Error %	Tensiones (kg / cm ²)	Diferencia (kg / cm ²)
Mínimo	2	-60,38	2061,06	-119,94
M.E.F.	5,048		2181	0
EA-95 CASO 1.a	No aplicable		No aplicable	
EA-95 Edificios	4,29	-15,016	2131	-50
Eurocódigo 3	3,9	-21,55	2109	-72
Ortiz Herrera	No aplicable		No aplicable	
Ecuación	5,70	+12,91	2233	+52

TABLA 4.

pandeo que se obtendrían por los distintos métodos así como el error que se comete respecto del valor obtenido por el M.E.F.

Al recalcular con el coeficiente obtenido por el método de los elementos finitos se supera el límite elástico (que era 2.600 kg/cm²) debiéndose redimensionar el pórtico de manera que los pilares suban a un IPE 450 siendo ahora las cartelas #1.517 × 8 × 130. Esta subida de pilares provoca que suba el coeficiente de pandeo como se refleja en la figura 7 y la tabla 4.

En esta nueva situación tenemos una vez más (esto sucedió en todos los casos estudiados) como en los métodos de cálculo del coeficiente de pandeo que ofrecen las normativas cuando son aplicables, (el Caso 1.a de la NBE EA-95 aquí no se debe emplear por estar definido para " c " <10), se obtienen valores por debajo del lado de la seguridad respecto del valor M.E.F.

Se muestra en la tabla 4 también la influencia de los distintos coeficientes de pandeo en las tensiones para la hipótesis más desfavorable en el dimensionamiento del pórtico (que coincide con la de cálculo de este coeficiente de pandeo).

12. CONCLUSIÓN

Finalmente se pueden recapitular los resultados obtenidos diciendo que se obtuvieron con el M.E.F. valores del coeficiente de pandeo mayores que los que se pueden extraer adaptando las normas existentes, lo que nos dispone del lado de la inseguridad. Por ejemplo hemos encontrado como valores máximos de $\beta = 7.98$ con el M.E.F frente a 4.73, va-

lor máximo que propone la norma española. Para cuantificar esta situación se propone una ecuación de β extraída por el M.E.F. y que queda propuesta en la figura 4.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) "Estructuras de acero en edificación. NBE EA-95" Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente (1995).
- (2) "Eurocódigo 3" Norma europea de Proyecto de Estructuras de Acero. Aenor (1996).
- (3) "Estructuras de acero. Cálculo, Norma Básica y Eurocódigo" ARGÜELLES ÁLVAREZ, R.; ARGÜELLES BUSTILLO, R.; ARRIAGA MARTITEGUI, F.; ATIENZA REALES, J.R.; Ed. Bellisco (1999).
- (4) "Análisis de estructuras" ARGÜELLES ÁLVAREZ, R.; ARGÜELLES BUSTILLO, R. Fundación Conde del Valle Salazar (1996).
- (5) "Fundamentos de la Elasticidad y su programación por Elementos Finitos" ARGÜELLES ÁLVAREZ, R. Ed. Bellisco (1992).
- (6) METALPLA 1.0. Versión Windows. Manuales de trabajo. ARGÜELLES ÁLVAREZ, R.; ARGÜELLES BUSTILLO, R.
- (7) "Cálculo de estructuras por el Método de los Elementos Finitos. Análisis estático lineal" EUGENIO OÑATE. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (1995).
- (8) "Nota relativa a la determinación de longitudes de pandeo en los pórticos metálicos a dos aguas" ORTIZ HERRERA, J.; "Informes de la Construcción" n° 324. Páginas 37 a 45.

ST Redes de Catalunya se consolida en el mercado

Con el nombramiento de D. Honorato García como Director General dentro de la organización por Unidades de Negocio

Sintel, empresa líder en la integración de Redes y Sistemas de Telecomunicación, proyectos y construcción de todo tipo de redes de comunicaciones, reestructuró en diciembre su esquema de operaciones en respuesta a las necesidades de evolución impuestas por el mercado, implantando una nueva Organización claramente orientada a sus Clientes e involucrando a sus principales Filiales.

ST Redes, su filial en Catalunya, ha sido una de las primeras compañías del Grupo en afrontar esta nueva etapa con el nombramiento de su nuevo Director General D. Honorato García, proveniente del sector privado de la Industria Química y Automoción.

Los objetivos primordiales de ST Redes son aumentar, tanto en cantidad como en calidad, el servicio a sus actuales clientes y participar en nuevos proyectos como instalaciones de líneas de fibra óptica, instalaciones de alumbrado en carreteras con sistema fotovoltaico, instalaciones de potabilización de agua para el consumo urbano, proyectos conjuntos en el sector de gas en diferentes países del área mediterránea como Malta, Argelia, Turquía, etc. En definitiva, continuar su trayectoria ascendente y ampliar sus perspectivas creando nuevas líneas de negocio.