

**ANALISIS ANTISISMICO DE COMPONENTES:
ESPECTRO DE RESPUESTA DE EQUIPOS MONTADOS**

Guillermo D. Benito
Carrera de Ingenieria Nuclear - Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
S.C. de Bariloche - Argentina

Tullio E. Calderon
INVAP S.E.
S.C. de Bariloche - Argentina

RESUMEN

Este trabajo describe un sistema de generacion de espectros de respuesta de equipos montados en estructuras solicitadas sismicamente, al estar la excitacion sismica definida mediante espectros de respuesta en la base. Se describen y comparan lineas directas e indirectas de generacion. La linea directa demuestra ser satisfactoria y efectiva, y puede ser implementada con facilidad como post-procesador de programas estructurales de elementos finitos.

ABSTRACT

This paper describes a system for the generation of equipment response spectra in seismically loaded structures, when seismic input is defined through ground response spectra. Direct and indirect lines of generation are described and compared. The direct line is shown to be satisfactory and effective and can easily be implemented as a post-processor for structural finite-element codes.

I INTRODUCCION

El diseño de equipos y sistemas en instalaciones nucleares u otras de importancia, sujetas a calificación sísmica, incluye la especificación de la excitación según espectros de respuesta de equipo (ERE) [1,2].

Los criterios más usuales de diseño antisísmico de estructuras de instalaciones nucleares y obras civiles en general, definen la excitación sísmica en base a espectros de respuestas de diseño (ERD) [3,4]. La determinación de los ERE a partir del ERD se efectúa actualmente según dos grandes líneas: una directa y una indirecta. En la línea indirecta primeramente se evalúan acelerogramas artificiales espectro-compatibles, luego se calcula la historia temporal de la respuesta en los puntos de sujeción del equipo a la estructura y finalmente, se calcula el ERE en base a esta historia temporal. En la línea directa los ERE se estiman a partir del ERD y parámetros dinámicos de la estructura, sin el cálculo de historias temporales.

El problema central de la línea indirecta reside en la primera etapa: la definición de acelerogramas espectro-compatibles. Las etapas posteriores se resuelven mediante métodos convencionales, pero pueden llegar a representar un esfuerzo de cálculo considerable para modelos de estructuras complejas. La generación de acelerogramas espectro-compatibles se basa en la representación de la aceleración del suelo, $\ddot{u}_g(t)$, mediante el producto de una función envolvente determinística, moduladora de la amplitud, y una función $\psi(\omega, t)$ que define el contenido de frecuencias:

$$\ddot{u}_g(t) = \xi(t) \cdot \psi(\omega, t) \quad (1)$$

Dada una envolvente $\xi(t)$, el ajuste iterativo de los parámetros de la función $\psi(\omega, t)$ se efectúa de manera tal que el espectro de respuesta calculado ERC (ω) se aproxime al espectro de respuesta propuesto ERP (ω).

En general se presupone que el proceso $\psi(\omega, t)$ es estacionario, es decir que el contenido de frecuencias no depende del tiempo. En ese caso, existe numerosa bibliografía respecto de la generación de acelerogramas espectro-compatibles [6-8,14]. En general se utilizan métodos multietapa, donde en cada etapa se persigue disminuir el error de la aproximación de la forma más eficaz en tiempo de cálculo. El paso de una etapa a otra se efectúa buscando minimizar el tiempo total.

Los registros sísmicos reales muestran una degradación del contenido de frecuencias [10]. Tal comportamiento es tenido en cuenta en la generación de acelerogramas espectro-compatibles en trabajos recientes [9,19].

Existen diversos métodos que implementan la línea directa de cálculo de ERE [13-21]. La dificultad central reside en la predicción de la amplificación de las ordenadas espectrales para las frecuencias de resonancia equipo-estructura. Un enfoque elaborado sobre bases teóricas, que además tiene en cuenta el efecto de la interacción equipo-estructura, es presentado por Kelly y Sackman en refs. 15-17. En general, las amplificaciones en resonancia son definidas mediante coeficientes ad hoc, en función de los amortiguamientos de estructura y de equipo [14,18-21]. Existe consenso en la amplificación de las ordenadas espectrales del ERD en los rangos no resonantes, donde se acepta como válida la superposición cuadrática de las contribuciones de cada modo estructural a la respuesta del equipo [14-21].

En el trabajo a continuación, se presenta un sistema que implementa las líneas directa e indirecta de cálculo de ERE, con distintos métodos de cálculo dentro de cada línea. Se estudian comparativamente los métodos alternativos.

II LINEA INDIRECTA DE CALCULO DE ERE

El sistema MOTEL (MOVimientos TELuricos) implementa la línea indirecta en sus 3 etapas:

Generación de Acelerogramas Espectro-Compatibles

La representación del acelerograma es

$$\ddot{u}_g(t) = \xi(t) \sum_{i=1}^n B_i \sin(\Omega_i t + \alpha_i) \quad (2)$$

donde $\xi(t)$ = función envolvente; Ω_i = frecuencia independiente del tiempo; α_i = ángulos de fase aleatorios con distribución uniforme en $(0, 2\pi)$; B_i = coeficientes de ajuste.

La función envolvente $\xi(t)$ es definible por el usuario.

Las frecuencias Ω_i , en cantidad y magnitud, son elegidas por el usuario. Se recomienda que satisfagan la condición $\Omega_{i+1} < (1 + 2\beta_{ERP}) \Omega_i$.

La aproximación al ERP (ω) se efectúa en 2 fases. En la primera fase se busca una primera aproximación con error cuadrático medio, \bar{E} , menor de 15%. Se utilizan como puntos de control, ω_i , las mismas frecuencias Ω_i del acelerograma. La redefinición de los B_i se efectúa en la forma usual

$$B_i^j = B_i^{j-1} \frac{ERP(\omega_i)}{ERC(\omega_i)} \quad j\text{-ésima iteración} \quad (3)$$

El paso a la segunda fase se efectúa al disminuir el ritmo de convergencia en \bar{E} por debajo de un valor prefijado por el usuario. En la segunda fase de aproximación, la cantidad de puntos de control se aumenta hasta cumplir o superar lo sugerido por IAEA, SAFETY GUIDE-58, Anexo B, 15). La iteración se realiza calculando y teniendo en cuenta la influencia de B_i sobre ERC (ω_k) con $\omega_k < \omega_i$, presuponiendo que el tiempo al cual se produce la máxima respuesta en $\omega_k < \omega_i$ permanece constante. De esta manera se minimiza el \bar{E} de todos los puntos $\omega_k < \omega_i$, hasta valores del orden del 5%.

El acelerograma calculado se considera definitivo, a opción del usuario, cuando satisface los criterios IAEA SG-58 o cuando el ritmo de convergencia cae por debajo de valores elegidos.

En ambas fases se usa un esquema semi-implícito en la iteración sobre B_i , donde el tamaño de los bloques implícitos se decide de forma tal de minimizar el tiempo de cálculo.

La figura 1 muestra dos acelerogramas espectro-compatibles calculados y sus espectros de respuesta. Se utilizó como ERP (ω) el espectro definido en CIRSOC 103, Zona 4, Suelo 2, Amortiguamiento 5%, [4].

El cálculo de acelerogramas espectro-compatibles con contenido de frecuencia variable puede efectuarse usando la aproximación

$$\ddot{u}_g(t) = \xi(t) \sum_{i=1}^n B_i \sin(\Omega_i \bar{t} + \alpha_i) \quad (3)$$

donde $\bar{t} = \phi(t)$ es una transformación del tiempo, que permite describir la degradación del contenido de frecuencias. Este tipo de transformaciones no lineales $\bar{t} = \phi(t)$, fueron sugeridas en ref. 10, como caracterización sencilla de la degradación particular de un sismo dado. Las transformaciones $\bar{t} = \phi(t)$ utilizadas son polinómicas, cuyos coeficientes surgen de consideraciones sobre la intensidad de cruces por cero $\dot{v}_g(t)$ y la intensidad de máximos $v_g(t)$ de un re-

gistro dado y su definicion es posible si el cociente $\dot{y}_0(t)/\dot{y}_1(t)$ es aproximadamente constante.

La figura 2a muestra un acelerograma espectro-compatible calculado con degradacion del contenido de frecuencias como la registrada en la componente S89E del sismo de Taft, California, 21/7/52. La figura 2b muestra el mismo acelerograma sin degradacion. Se observa la compactacion de picos a tiempos bajos y su expansion a tiempos altos. La figura 2c muestra el espectro de respuesta correspondiente, luego de la primera fase de aproximacion.

Calculo de la Historia Temporal de la Respuesta Estructural

La respuesta en los puntos de anclaje del equipo es calculada mediante programas comerciales de elementos finitos. Las estructuras se excitan en su base con los acelerogramas espectro-compatible calculados.

Calculo del ERE

El ERE se calcula a partir de la historia temporal de sus puntos de sujecion. Esto implica que el equipo está desacoplado de la estructura. Los criterios para la validez de esta hipotesis son analizados en ref. 22.

III LINEA DIRECTA DE CALCULO DE ERE

El sistema REQUIEM (Respuesta de EQUIpos Elasticos Montados) implementa la linea directa en sus dos etapas:

Calculo de Parametros Dinamicos de la Estructura

Los metodos directos requieren la determinacion de las frecuencias ω_k y modos ϕ_k estructurales y del calculo de los coeficientes de participacion Γ_k en cada direccion. Esto se efectua con programas estructurales convencionales. Estos datos, en conjunto con el ERD (ω), son toda la entrada necesaria para el calculo directo de ERE (ω). Por lo tanto, la etapa de la linea directa descripta a continuacion puede implementarse con facilidad como un post-procesador de programas estructurales.

Calculo de los ERE

La aproximacion de los ERE puede analizarse en rangos no-resonantes y rangos resonantes. La definicion precisa de los rangos se considerara mas adelante.

Rango no resonante

En el rango no resonante la frecuencia del equipo ω , fig. 3, esta lejos de las frecuencias estructurales ω_k . Se define el parametro de resonancia ξ_k como $\xi_k = (\omega_k - \omega) / \omega$, en el rango no resonante resulta $|\xi_k| \gg k_{min}$ siendo k_{min} una constante positiva.

En este rango existe concordancia entre distintos metodos directos. La expresion para el ERE (ω) en el r-simo nodo de la estructura es

$$ERE(\omega) = \left\{ \left[\sum_{k=1}^N \frac{\Gamma_k \phi_k^r}{1 - (\frac{\omega}{\omega_k})^2} ERD(\omega_k, \beta_k) \right]^2 + \sum_{k=1}^N \left[\frac{\Gamma_k \phi_k^r}{1 - (\frac{\omega}{\omega_k})^2} \right]^2 ERD^2(\omega, \beta) \right\}^{1/2} \quad (5)$$

siendo β_k, β los amortiguamientos modales estructurales y de equipo. Este re-

Resultado se obtiene en un analisis donde se supone el equipo interactuando con los N modos estructurales, formando N sistemas de 2 g.d.l. Si la respuesta maxima es calculada usando transformada de Laplace, el primer termino puede definirse como la contribucion de los polos estructurales y el segundo como la del polo del equipo. La superposicion cuadratica se considera valida y la interaccion equipo estructura se desprecia en esta formulacion [16,17]. La prediccion del ERE (ω) mediante modelos de estructura-equipo (N+1 modos) y analisis modal con superposicion cuadratica concuerda con esta formulacion, siendo este criterio de superposicion el usualmente aceptado en este rango [17-19].

Rango Resonante

En el rango resonante, la frecuencia del equipo es cercana a alguna frecuencia estructural:

Resulta allí $\xi_1 = \frac{\Omega_k - \omega}{\omega} < k_R$, siendo k_R una constante positiva.

Los valores maximos del ERE (ω) ocurren para $\xi = 0$. Existen en la literatura distintas formulaciones para la estimacion del ERE(ω) en el rango resonante. En el sistema REQUIEM se han implementado las siguientes:

a) Metodo Kelly - Sackman (KS)

En refs. 15-17, Kelly y Sackman presentan un metodo simple basado en el analisis del transitorio del sistema equipo-estructura. El desarrollo utiliza transformadas de Laplace para el calculo de la respuesta del sistema y establece ciertas hipotesis para arribar a resultados simples. La interaccion equipo-estructura es tenida en cuenta.

La expresion propuesta para el calculo del ERE(ω) en el r-simo nodo estructural es

$$ERE(\omega) = \left\{ \left[\sum_{k \neq l}^N \frac{f_k \phi_k^r}{1 - (\frac{\omega}{\Omega_k})^2} ERE(\Omega_k, \beta_k) \right]^2 + \left[\sum_{k=l}^N \frac{f_k \phi_k^r}{1 - (\frac{\omega}{\Omega_k})^2} \right]^2 ERE^2(\omega, \beta) + \left\{ F_{KS} \cdot \sum_{k=1}^N \phi_k^r ERE\left(\frac{\omega + \beta_1}{2}, \frac{\beta + \beta_1}{2}\right) \right\}^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

donde $F_{KS} = \frac{e^{-\gamma}}{(\gamma + \xi^2 + 4\beta\beta_k)^{1/2}}$; $\gamma = \frac{m}{M_k} \phi_k^r$; m masa equipo ; M_k masa modal k

$$\alpha = (\gamma + \xi^2 - (\beta - \beta_1)^2)^{1/2} / (\beta + \beta_1) ; K = \frac{2 \arctan \alpha}{\alpha}$$

Las principales hipotesis simplificadoras son:

H1: La diferencia entre las contribuciones a la respuesta de los polos del modo estructural y del equipo resonante no son significativas.

H2: La duracion de la excitacion t_1 , es mucho menor que el periodo de batedo presente en la respuesta del equipo resonante:

$$t_1 \ll 2\pi/\eta$$

siendo

$$\eta = [\gamma - (\beta - \beta_1)^2]^{1/2} \frac{\omega}{2}$$

H3: El tiempo al que ocurre la maxima respuesta del modo estructural, t^* , es mucho menor que el tiempo t^e al que ocurriria la del equipo resonante si tuviera amortiguamiento $\frac{1}{2}(\beta + \beta_1)$

b) Metodo de Kelly - Sackman, - Modificacion 1 (KS1)

Si se relaja la hipotesis H1, se obtiene una expresion analoga a la ec. (6) pero con el factor de amplificacion

$$F_{KS1} = \frac{\omega \Omega_1}{d} \max \left\{ \left[\frac{A_1}{b^2} e^{2\alpha t} + \frac{A_2}{d^2} e^{2\alpha t} - \frac{2A_1 A_2 \cos(b-d)\tau}{bd} \right]^{1/2} \right\} \quad (7)$$

donde A1, A2, a, b, c, d, se definen en funcion de los parametros del equipo y la estructura (19). Esta expresion es mas precisa en el rango resonante, a expensas de una mayor complejidad. No necesita sin embargo, de otros datos que los utilizados en ec. (7).

c) Metodo de Kelly - Sackman - Modificacion 2 (KS2)

La hipotesis H3 restringe el campo de validez del metodo KS a excitaciones cortas. En los casos donde el maximo de respuesta del equipo se alcanza durante la excitacion, caso usual en sismos largos, la hipotesis H3 no es correcta. Se implementa en este metodo una correccion mayorante (19). La expresion resultante es analoga a ec. (6), siendo el factor de amplificacion:

$$F_{KS2} = e^{(\beta + B_E)\omega} U(t_{ef}, t^*) \cdot F_{KS} \quad (8)$$

donde

$$U(t_{ef}, t^*) = \begin{cases} 1 & t_{ef} \geq t^* \\ t_{ef}/t^* & t_{ef} < t^* \end{cases}$$

con t_{ef} = tiempo efectivo del sismo ; $t^* = \arctan [2\eta / \omega (\beta + B_E)] / \eta$

En particular si t_{ef} tiende a cero, esta formulacion, KS2, tiende a KS1. La aplicacion de este metodo implica una suposicion sobre la duracion e intensidad del sismo, para poder definir t_{ef} .

d) Metodo de Peters, Schmitz, Wagner (PSW)

Este metodo propone (18) la siguiente expresion mayorante del valor $ERE(\omega)$ en el pico de resonancia.

$$ERE(\omega = \Omega_L) = \left\{ \left[F_{PSW} \sum_k \Phi_k^2 E_{RD}(\Omega_k, B_L) \right]^2 + \sum_{k=1}^N \left[\frac{V_k \Phi_k^2}{1 - (\frac{\Omega_k}{\omega})^2} E_{RD}(\Omega_k, B_k) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

donde

$$F_{PSW} = \frac{1}{2\beta(\beta + B_E)^{1/2}}$$

Esta expresion es analoga a ec. (6) propuesta por Kelly-Sackman. Se diferencia por no tener en cuenta la contribucion del equipo en los modos no resonantes que no es significativa en resonancia y por el factor F de amplificacion. Este factor F es definido ad hoc, tal que para distintos β, B_L constituya una estimacion conservativa de los factores de amplificacion calculados a partir de registros reales. Se presupone que F_{PSW} depende solo de los amortiguamientos, y no de otros parametros estructurales o de equipo. El metodo no aspira a tener en cuenta interaccion equipo-estructura.

e) Newmark, Walker, Veletos, Nosborg (NWN)

En la implementacion PSW se modifica el valor del factor de amplificacion f al sugerido por Newmark et al. y mencionado en ref. 18:

$$F_{MNR} = \frac{1}{\beta + \beta_2}$$

IV DEFINICION DE LOS RANGOS RESONANTES Y NO RESONANTES

La definicion precisa de los rangos resonantes y no resonantes no es indispensable para la utilizacion ingenieril de los ERE. Los picos en los rangos resonantes son ensanchados utilizando criterios conservativos para no hacer sensible el diseno a incertezas en los distintos parametros de los modelos de estructura y equipo. En el caso mas extremo se puede utilizar para el diseno una envolvente de los picos resonantes del ERE.

La validez de las hipotesis de superposicion se diluye para rangos no resonantes de estructuras de modos cercanos. El ensanchamiento de picos en estos casos puede relativizar la importancia de la estimacion del ERE entre ellos.

El criterio aqui utilizado para la definicion de rangos es un porcentaje de la frecuencia de resonancia, definido por el usuario.

Rango resonante $|\xi| \leq k_R$

Rango no resonante $|\xi| \geq k_{NR}$

Los rangos intermedios, $k_R < |\xi| < k_{NR}$, se definen mediante interpolacion lineal.

En el caso de ser admisible una sobrevaloracion del ERE en los rangos no resonantes, se ha encontrado que la extension del KS1 permite una aproximacion continua conservativa, no siendo por lo tanto necesaria la definicion de rangos resonantes y no resonantes.

V RESULTADOS

ERE Mediante Linea Indirecta

Utilizando el sistema MOTEL se generaran 10 acelerogramas espectro-compatibles de distintas duraciones, utilizando como ERD el dado por CIRSOC 103, Zona 4, Suelo 2, $\delta = 5\%$. La figura 4 muestra el promedio de los 10 ERC correspondientes y su desviacion standard. Cada acelerograma fue aplicado a 2 modelos de estructuras simplés de distintas rigideces. Las características dinámicas de los modelos estructurales se resumen en la Tabla 1.

El promedio de los ERE y su desviacion standard para el extremo superior de las estructuras (Nodo 7) se muestra en las figuras 5a, 5b. Se observa el aumento de la desviacion standard de los ERE, frente a la de los ERC, especialmente en los rangos resonantes. Este resultado ha sido manifestado en ref. 12, donde además se señala el aumento de las ordenadas de los ERE con la duracion del acelerograma espectro-compatible. Este comportamiento se verifica en las figuras 6a, 6b. Allí se grafica para ambas estructuras, los valores resonantes máximos ERE ($\omega = \omega_1$) vs. el tiempo efectivo t_{eq} del acelerograma, definido según Vanmarcke et al. en funcion de la intensidad de Arias.

Las figuras 6c, 6d y 6e, 6f muestran las correlaciones entre los valores resonantes máximos ERE ($\omega = \omega_1$) con el tiempo de la máxima respuesta estructural en el nodo de montaje del equipo, t_{est} y con el tiempo de la máxima respuesta del equipo t_{eq} . En ambos casos se observa una tendencia al aumento de la respuesta máxima del equipo ERE (ω_1) con los tiempos t_{est} y t_{eq} . En particular la relacion ERE (ω_1) vs. t_{eq} incluye el punto predicho en ref. 17, para excitaciones muy cortas ($t_{eq} \rightarrow 0$) donde el fenómeno de batido gobierna manifiestamente

la transferencia de energía entre estructura y equipo resonante. La evolución de la respuesta del equipo resonante para acelerogramas de $t_{ef} = 6.2$ s. y $t_{ef} = 2.0$ s. se muestra en las figuras 6g, 6h.

ERE Mediante Línea Directa

Método KS

La figura 7 muestra el ERE medio y su desviación standard calculado para los 10 acelerogramas espectro-compatibles y el ERE calculado a partir del ERD, mediante el método KS para la estructura 1 con $\beta = 5\%$, con interacción equipo-estructura despreciable ($\gamma = 0.0005$).

Se nota que el método directo KS no amplifica la desviación standard de los ERC y el ERE obtenido a partir del ERD es prácticamente coincidente con el ERE medio.

La figura 8 muestra la variación del ERE calculado mediante KS para masa de equipo variando 4 órdenes de magnitud (1 kg $\leq m \leq$ 10000 kg). La curva es cotada contra la respuesta del equipo evaluada con un modelo estructura-equipos resonante excitada con un acelerograma espectro-compatible que satisface de manera aproximada las hipótesis H2-H3 de KS. Se observa que el método predice bien las tendencias de la interacción equipo-estructura, evaluando en este caso, $\beta = 5\%$, las respuestas por defecto en aprox. 10%.

Métodos KS, KS1, KS2, PWS, NwM

La figura 9 muestra los ERE calculados a partir del ERD mediante los 5 métodos descritos, para la estructura 2. La banda sombreada corresponde a la del espectro medio más y menos su desviación standard, obtenido con los 10 acelerogramas espectro-compatibles calculados con la línea indirecta.

Para $\beta = 5\%$ se observa que los métodos KS y KS1 son similares en los rangos resonantes, donde son cercanos al límite inferior de la banda de la línea indirecta. Esto es esperable pues los ERE son inferiores para sismos cortos, que satisfacen H2 y H3. Los métodos KS2, PWS, NwM mayoran sensiblemente los picos de resonancia, siendo NwM mejor que PWS en bajos amortiguamientos. Los puntos correspondientes a un cálculo por espectro de respuesta sobre modelos estructura-equipos donde el amortiguamiento es la única cota a la amplificación resonante sobreestiman exageradamente la banda de la línea indirecta.

Para $\beta = 0.5\%$ el método KS mayoran ligeramente la banda de la línea indirecta, mientras el método KS1 coincide en resonancia con el espectro medio indirecto y mayoran en rangos no resonantes. Los métodos KS2, PWS y NwM sobreestiman fuertemente los picos resonantes.

La figura 10 contrasta la banda de la línea indirecta con las aproximaciones de los métodos KS, KS1 para las dos estructuras analizadas para $\beta = 0.5\%$, 2%, 5%. La concordancia global es muy buena. Para amortiguamientos bajos (0.5%, 2%) los métodos KS y KS1 tienden a coincidir o superar la media de las predicciones indirectas. Para amortiguamientos de 5% tienden a coincidir con el rango inferior de la banda de la línea indirecta, que corresponde a sismos de corta duración. La aproximación en rangos no resonantes es muy buena para el método KS y conservativa para el método KS1 continuo.

VI CONCLUSIONES

El sistema REQUIEM/MOTEL descrito permite la generación de ERE según normas vigentes. La línea directa de cálculo a través de los métodos KS, KS1 se

muestra como muy satisfactoria al compararse con la línea indirecta que posee dispersiones intrínsecas en el estado actual de las normas aplicables.

El sistema REQUIEM permite una generación eficiente de ERE al evitar el cálculo de acelerogramas espectro-compatibles e historias temporales. Su implementación como post-procesador de programas estructurales de elementos finitos es inmediata.

VII REFERENCIAS

- [1] GUPTA, A.K., "Seismic Qualification of Equipment for Nuclear Power Plants", Nuclear Safety, 26(2), 1985, 169-178.
- [2] IAEA, SG-S2, "Análisis y Ensayos Sísmicos de las Centrales Nucleares", 1981
- [3] IAEA, SG-S1, "Earthquakes and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Siting", 1979
- [4] INPRES-CIRSOC, Reglamento 103, "Normas Argentinas para Construcciones Sísmorresistentes", PARTE 1, INTI, 1983
- [5] IAEA, SG-S8, "Safety Aspects of Foundation of Nuclear Power Plants", Preprint 1984
- [6] KOST, G. et al., "Automated Generation of Spectrum-Compatible Artificial Time Histories", Nuc.Eng.Des., 45, 1978, 243-249
- [7] PREUMONT, A., "A Method for the generation of Artificial Earthquake Accelerograms", Nuc.Eng.Des., 59, 1980, 357-368
- [8] DOBLARE, M. et al., "A Comparison among Different Spectrum Compatible Earthquake Simulation Methods", App.Math.Modelling, 5, 1981, 348-354
- [9] PREUMONT, A., "The Generation of Non-Separable Artificial Earthquake Accelerograms for the Design of Nuclear Power Plants", Nuc.Eng.Des., 88, 1985, 59-67
- [10] ZUNIGA H., J., "Caracterización de Acelerogramas con Contenido de Frecuencia Variable", Anales 4tas. Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, UTFS-ACHISINA, Tomo 2, 1986, F-32
- [11] JEANPIERRE, F.; LIVOLANT, M., "Direct Calculation of Floor Response Spectra from the Fast Fourier Transform of Ground Movement-Application to the Superphenix Fast Reactor Project", Nuc.Eng.Des., 41, 1977, 45-51
- [12] PRATO, C.; ALVAREZ, L.; GODOY, A., "Influencia de la Duración del Sismo en los Espectros de Piso", presentado en Coloquio 1985.
- [13] SATO, H. et al., "An Extensive Study of a Simple Method for Estimating the Response Spectrum Based on a Simulated Spectrum", Nuc.Eng.Des., 50, 1978, 399-440
- [14] ALVAREZ, L.; PRATO, C., "Direct Method for Deriving Seismic Response Spectra for Secondary Systems", Proc. of the 5th EMD of ASCE, Univ. of Wyoming, Vol. 1, 1984, 340-343
- [15] KELLY, J.; SACKMAN, J., "Response Spectra Design Methods for Tuned Equipment Structure Systems", J. Sound Vib., 59(2), 1978, 171-179
- [16] KELLY, J.; SACKMAN, J., "Shock Spectra Design Methods for Equipment-Structure Systems", The Shock & Vibration Bull., 49, 1979, 171-176
- [17] KELLY, J.; SACKMAN, J., "Equipment Response Spectra for Nuclear Power Plant Systems", Nuc.Eng.Des., 57, 1980, 277-294
- [18] PETERS, K.; SCHMITZ, D.; WAGNER, U., "Determination of Floor Response Spectra on the Basis of the Response Spectrum Method", Nuc.Eng.Des., 44, 1977, 255-262
- [19] BENITO, G., "Análisis Antisísmico de Equipos", Trabajo Especial de Graduación, Carrera de Ing. Nuclear, Inst. Balseiro, U.N. de Cuyo, 1986
- [20] PENZIEN, J.; CHOPRA, A., "Earthquake Response of Appendage on a Multistory Building", Proc. of the 3rd World Conference on Earthquake, Eng. II, 1965
- [21] PENZIEN, J., "Earthquake Response of Irregularly Shaped Buildings", Proc. of the 4th World Conference of Earthquake Engineering, II, 1969
- [22] CHEN, C., "The Uncoupling Criteria for Subsystem Seismic Analysis", Nuc. Eng. Des., 57, 1980, 245-252

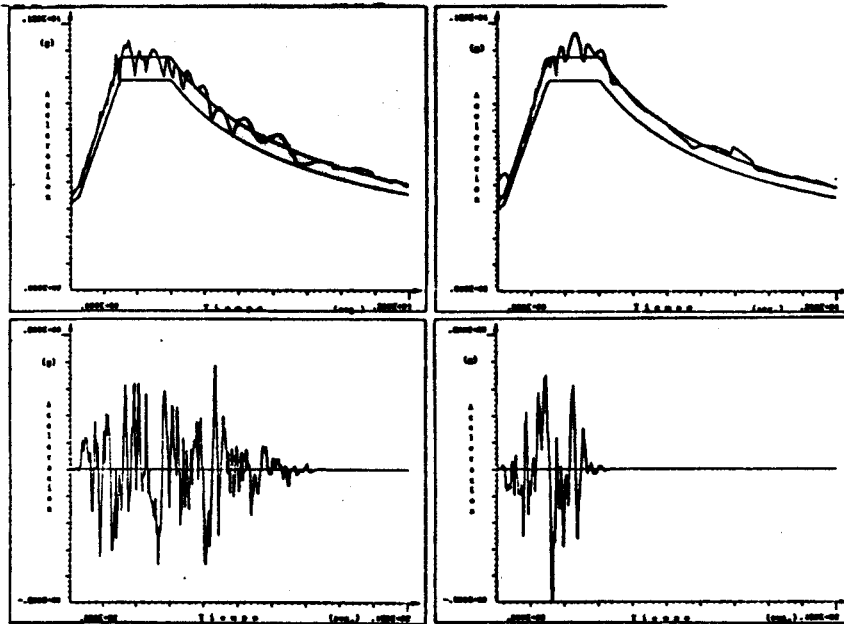


Fig. 1 Ejemplo de acelerogramas espectro-compatibles calculados

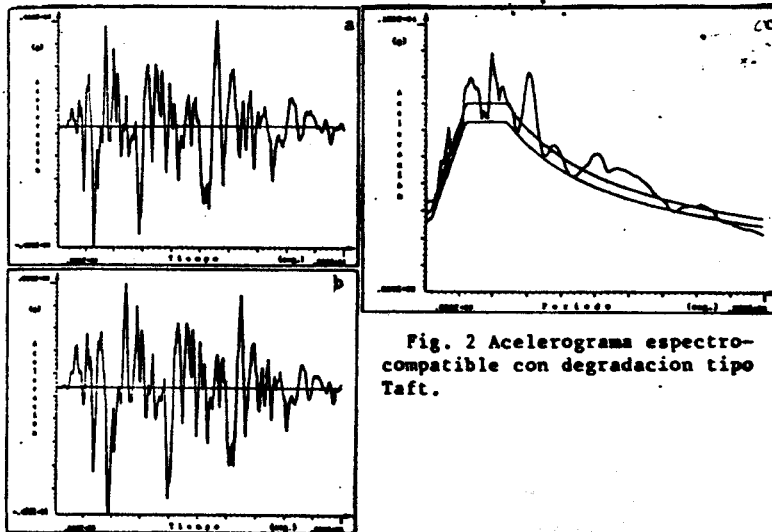


Fig. 2 Acelerogramas espectro-compatibles con degradación tipo Taft.

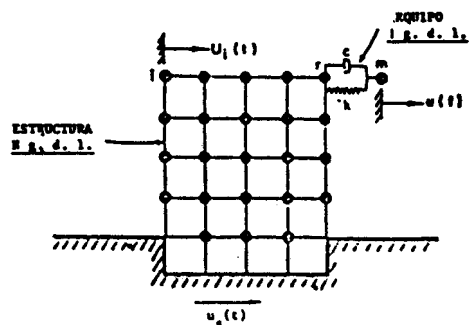


Fig. 3 Sistema Equipo-Estructura

MODO	FREC. [Hz]			FACTOR DE	MODO [E-05]						
	1ESTR.	2ESTR.	PART.		NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7
1	0.810	1.400	633.	0.	9.6	35.7	73.8	120.	170.	223.	
2	5.150	8.920	-349.	0.	-50.2	-137.	-181.	-137.	-9.15	165.	
3	14.5	25.2	204.	0.	113.	188.	47.7	-142.	-123.	119.	

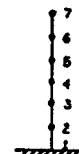


Tabla 1 Parámetros de las estructuras

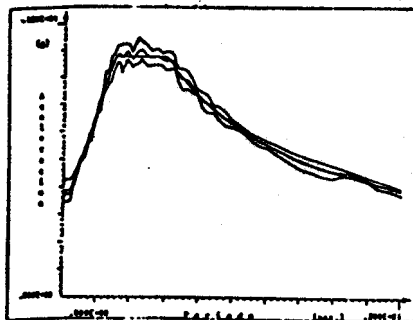


Fig. 4 Línea indirecta: ERC
Promedio y banda de desviación
ERP: CIRSOC 103, Zona 4, Suelo 2

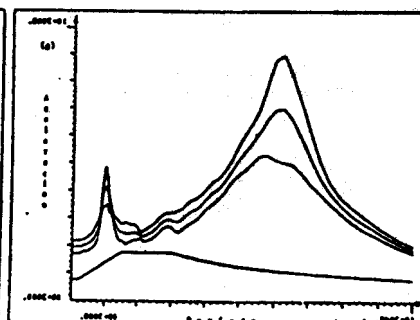


Fig. 5 Línea indirecta: ERE
Promedio y banda de desviación
Estructura 1

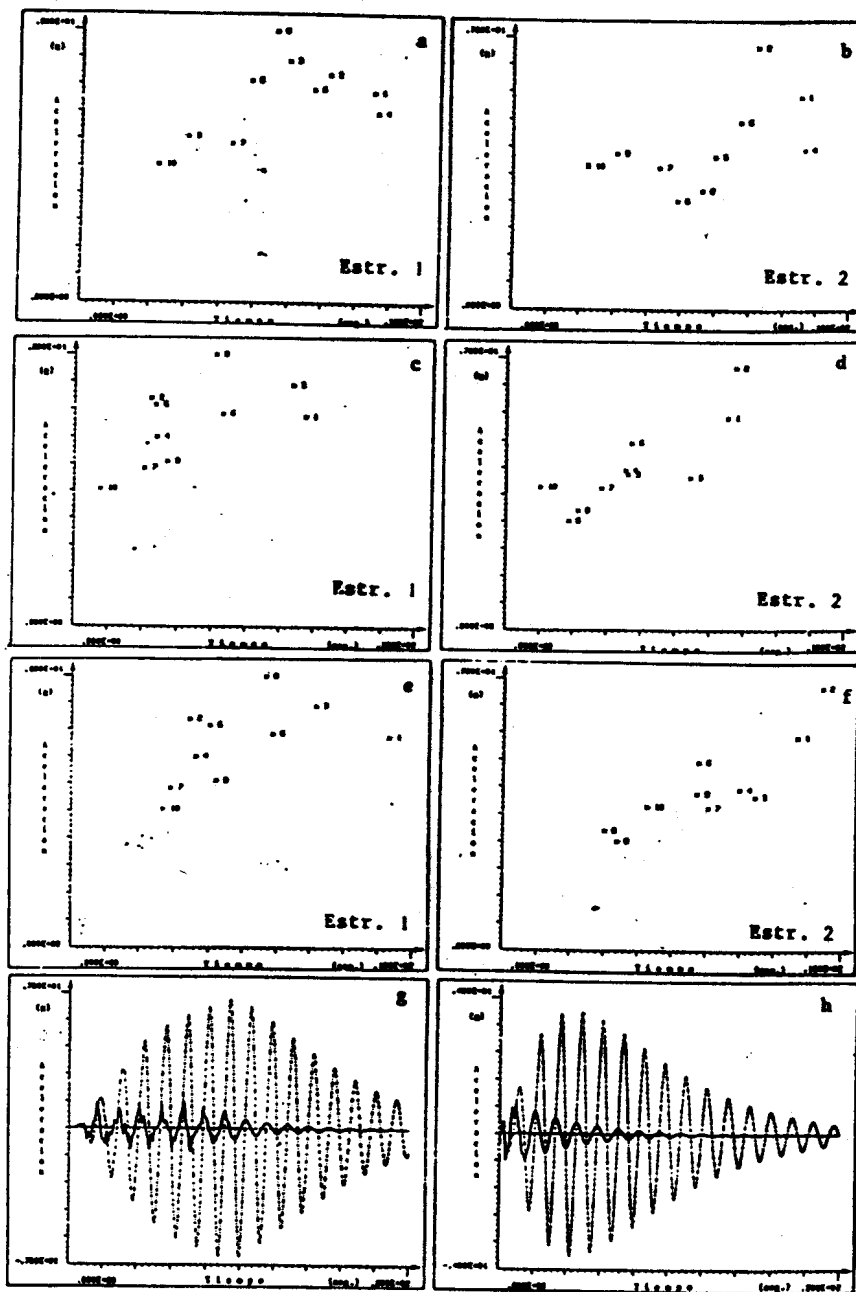


Fig. 6 (a-f) Maxima respuesta del equipo vs. tiempos relevantes
(g-h) Historia temporal de la respuesta de la estructura y el equipo

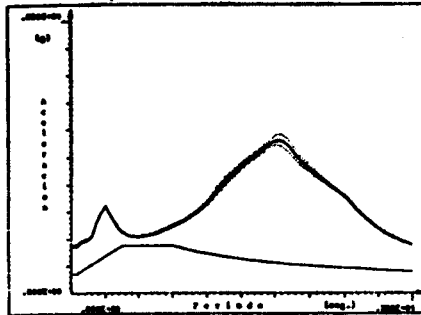


Fig. 7 Linea directa, método KS, ERE Promedio, banda de desviacion y BRE a partir de ERD=CIRSOC 103, Zona 4, Suelo 2

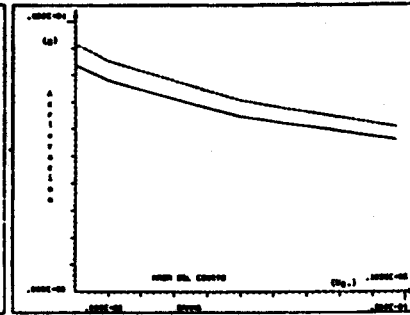


Fig. 8 Linea directa, método KS Sensibilidad a la masa del equipo

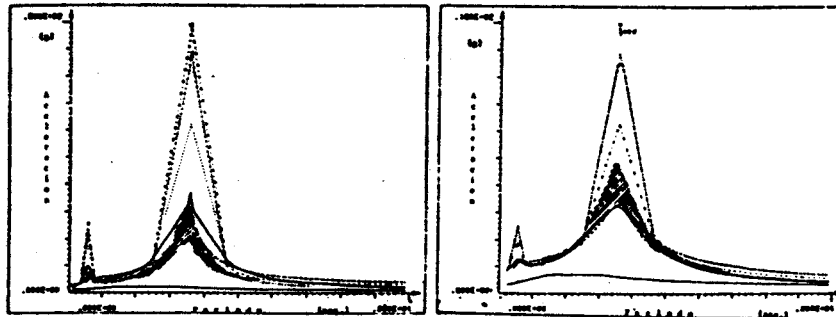


Fig. 9 ERE comparativos. Métodos KS, KS1, KS2, PSW, NWVM. Estructura 2, amort.=0.5%, 5%

KS —————
 KS1 - - - - -
 KS2
 PSW - · - · -
 NWVM.....

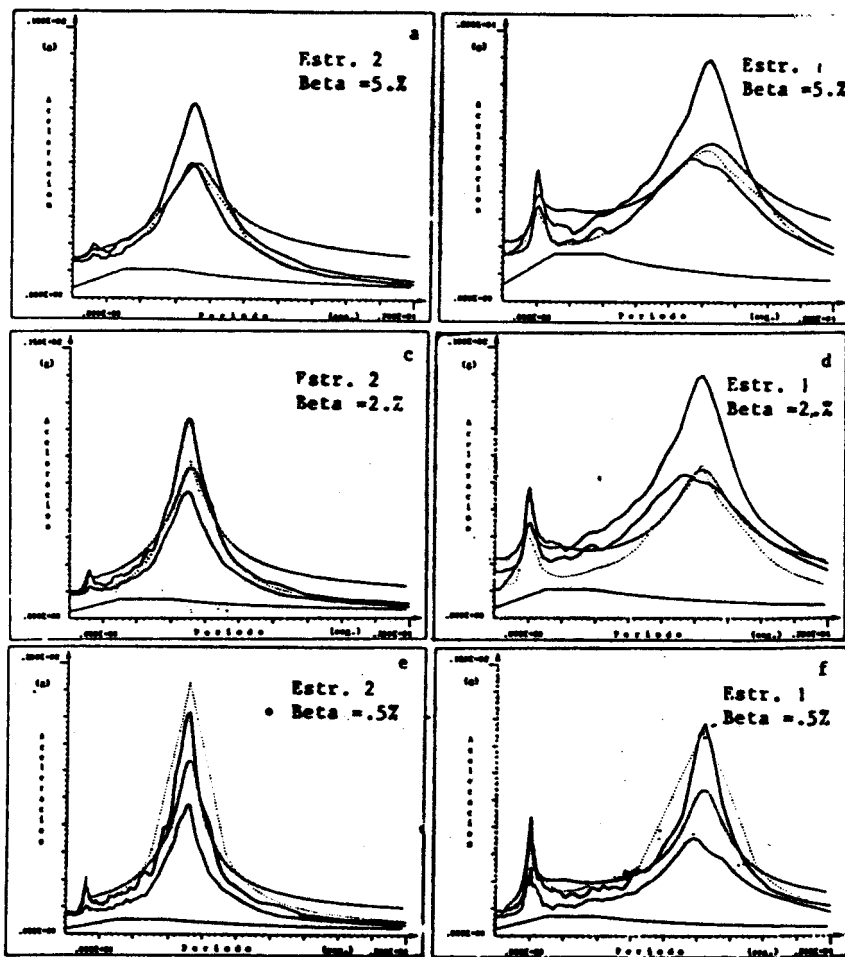


Fig. 10 Línea directa, métodos KS y KS1
ERE directos vs. banda ERE indirectos
Estructuras 1 y 2, Beta=5.2, 2.2 y 0.52

KS
KS1 -----