

Vibraciones en entrepisos

Ing. Pedro Nel Quiroga Saavedra

Ingeniero civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería, máster en estructuras de la Universidad de los Andes; profesor asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

RESUMEN

Se plantea el efecto adverso de las vibraciones en el comportamiento de entrepisos. Se describe en forma simplificada un criterio para el análisis de vibraciones en pisos en ambientes residenciales, de oficinas y comerciales. Mediante un ejemplo se ilustra la aplicación a un caso sencillo.

PROPÓSITO

Algunos entrepisos y varios puentes peatonales construidos con estructura metálica han presentado problemas de vibración y ha sido necesario reforzarlos, con los consecuentes incrementos de costos e incomodidades si la obra ya está en servicio.

El propósito de este artículo es registrar los principios básicos de la metodología propuesta por el AISC para el control de vibraciones e ilustrarlos con un ejemplo sencillo. Por una parte, únicamente se considera el caso de ambientes residenciales, de oficinas o de centros comerciales; por otra, sólo se tiene en cuenta el caso de viguetas y vigas simplemente apoyadas. Para otros eventos, como el análisis de pisos sometidos a actividades rítmicas o de pisos que soportan equipos sensibles o vigas con apoyo a momento o viguetas en celosía, se remite al lector al trabajo de Murray *et al.* (referencia 1), en el cual se basa este artículo.

INTRODUCCIÓN

La vibración de placas de entrepiso o de puentes peatonales, generada por

actividades como caminar o bailar, es un estado límite que se debe analizar explícitamente en estructuras de acero. Se ha encontrado que en ciertas circunstancias las vibraciones de los pisos producen sensación de malestar a los ocupantes de edificios o a usuarios de puentes peatonales, o pueden generar problemas de funcionamiento a equipos sensibles. Remediar un problema de esta naturaleza después de la construcción es complicado y costoso, por lo cual su prevención debe ser parte del proceso de diseño estructural.

La reacción de la gente ante vibraciones de entrepisos depende en gran medida de lo que esté haciendo. Personas en ambientes residenciales o en oficinas, trabajando o leyendo sentadas, por ejemplo, considerarán inaceptables aceleraciones mayores que 0,005 g (siendo g la aceleración de la gravedad), mientras que si están desarrollando ciertas actividades como caminar, bailar, etc., aceptarán vibraciones diez veces mayores (0,05 g) o más. Personas en reuniones al lado de un salón de baile o levantando pesas al lado de un salón de aeróbicos o paradas en un centro comercial considerarán aceptables aceleraciones del orden de 0,015 g.

Es importante anotar que sistemas con frecuencias naturales menores que 3 Hz, pueden entrar fácilmente en resonancia cuando se camina sobre ellos (la frecuencia normal al caminar es del orden de 2 Hz). Más aún, se ha encontrado que sistemas con frecuencias naturales de 4 o 6 Hz pueden entrar en resonancia con el 2º y 3º armónicos, respectivamente. Por otra parte, frecuencias en el intervalo de 5 a 8 Hz pueden producir sensación de gran malestar en las personas, puesto que en este rango están las frecuencias naturales de varios órganos del ser humano (Murray, referencia 3). Los entrepisos de salones de baile y aeróbicos pueden entrar en resonancia si sus frecuencias naturales son menores que 7 a 11 Hz (Allen y Murray, referencia 2).

En el gráfico de la figura 1 se muestran los límites más allá de los cuales las vibraciones de entrepisos probablemente producirán incomodidad o malestar en sus ocupantes, de acuerdo con la norma International Organization for Standardization, ISO 2631-2 (referencia 4). Puede observarse que la aceleración pico aceptable depende de la frecuencia fundamental del entrepiso y del uso.

Con base en varios ensayos y mediciones de la percepción de vibraciones por parte de personas en diferentes ambientes, se han desarrollado diversos criterios para evaluar el comporta-

Algunos entrepisos y varios puentes peatonales construidos con estructura metálica han presentado problemas de vibración y ha sido necesario reforzarlos con los consecuentes incrementos de costos e incomodidades si la obra ya está en servicio.

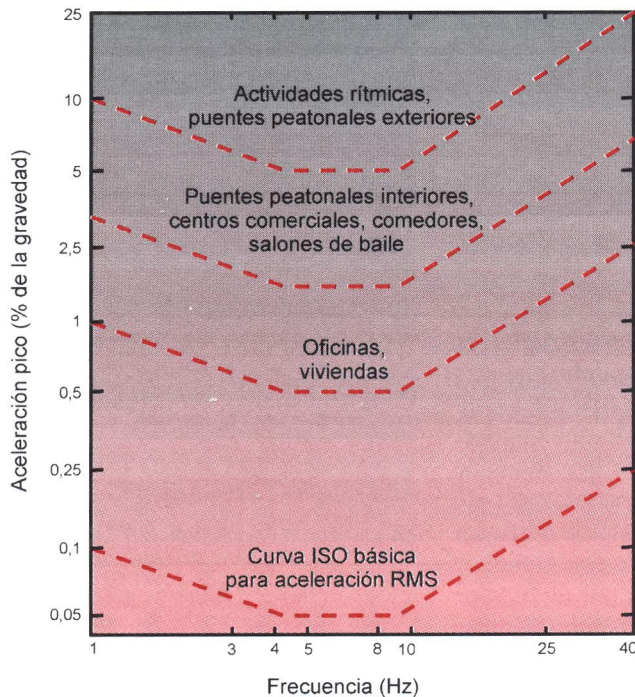


Figura 1. Aceleraciones pico recomendadas para confort humano debido a vibraciones (Allen & Murray, 1993; ISO 2631-2: 1989).

miento de sistemas de entrespiso en lo que a vibraciones se refiere. En un comienzo se pensaba que un piso suficientemente rígido tendría buen comportamiento, por lo cual los primeros criterios establecían un límite a las deformaciones que podrían experimentar los entrespisos. Tradicionalmente, en entrespisos metálicos se ha utilizado el criterio de limitar la deflexión por carga viva a $L/360$, sumado a relaciones luz a altura iguales o menores que 24; sin embargo, los resultados no siempre han sido satisfactorios. Posteriormente, se estableció la importancia del amortiguamiento y de la masa en la prevención de vibraciones. Sólo hace poco se descubrió que la resonancia cumple un papel primordial en el problema. Dependiendo del uso de la edificación, alguno de estos factores tiene mayor importancia que los otros.

En ambientes residenciales o de oficinas, donde se supone que pocas personas caminan simultáneamente y que además lo hacen en forma esporádica, el amortiguamiento podría desempeñar un papel preponderante en el control de vibraciones. En oficinas abiertas, con divisiones livianas, se pueden presentar problemas de vibración debido a que el amortiguamiento es relativamente bajo; de hecho las divisiones permanentes, bien conectadas al

piso y al techo, son una de las fuentes más importantes de amortiguamiento.

En ambientes comerciales, en los que se supone que muchas personas caminan simultáneamente, produciendo un estado de vibración permanente, en el cual tal vez haya grandes espacios abiertos sin divisiones, el control de vibraciones se concentrará en la frecuencia natural de oscilación.

En entrespisos utilizados para actividades rítmicas, como aeróbicos o baile, se debe evitar que la frecuencia natural del piso sea similar a la frecuencia de la excitación y de sus armónicos. Por la naturaleza de estas actividades, que suministran gran cantidad de energía al piso, es posible que el problema de vibraciones se extienda a lugares relativamente lejanos de la estructura. Cuando una actividad de este tipo esté a más de seis pisos de altura se debe considerar la deflexión de las columnas.

Así mismo, algunos equipos requieren que las velocidades pico sean menores que ciertos límites para que su funcionamiento no se vea afectado negativamente.

En la guía de diseño de Murray *et al.* ya citadas (referencia 1), se presentan en forma detallada metodologías para evaluar el comportamiento ante vibraciones de pisos construidos con estructura metálica, para diferentes tipos de uso.

METODOLOGÍA PROPUESTA

Para ambientes residenciales, de oficina y centros comerciales se considera que un piso tendrá buen comportamiento ante vibraciones si se cumple:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_o e^{-0,35f_n}}{\beta W} < \frac{a_o}{g} \quad (1)$$

donde:

- a_p/g = aceleración pico esperada
- a_o/g = límite de aceleración de acuerdo con la figura 1
- f_n = frecuencia natural del piso
- P_o = fuerza constante igual a 0,29 kN (65 lb) para pisos y 0,41 kN (92 lb) para puentes peatonales
- β = amortiguamiento como porcentaje del crítico
- W = peso efectivo del piso.

En la ecuación 1 se puede observar que esencialmente hay que determinar tres parámetros: la frecuencia natural de vibración del entrespiso, el amortiguamiento y el peso efectivo del piso.

Frecuencia natural de vibración

Aunque la determinación de la frecuencia de vibración de un sistema de entrespiso es un problema complejo, en dicha guía se propone el siguiente procedimiento simplificado para establecer la frecuencia natural de vibración de una viga o vigueta *simplemente apoyada*:

$$f_n = \frac{\pi (g E_s I_t)^{1/2}}{2 (w L^4)^{1/2}}$$

la cual se puede reescribir así:

$$f_n = 0,18 (g/\Delta)^{1/2}$$

donde:

- f_n = frecuencia natural fundamental, Hz
- g = aceleración de la gravedad 9,86 m/s²
- E_s = módulo de elasticidad del acero
- I_t = momento de inercia de la sección transformada (momento de inercia transformado efectivo, si se incluyen deformaciones por corte)
- w = carga uniforme por unidad de longitud (cargas vivas y muertas reales, no de diseño) soportada por el miembro
- L = luz
- Δ = deflexión en el centro de la luz (en algunos casos se debe incluir la deformación por corte).

En general los entrepisos de estructura de acero están conformados por una placa de concreto con lámina de acero o sin ella, apoyada sobre viguetas, las cuales a su vez van apoyadas sobre vigas. Las deflexiones, y por ende la frecuencia natural de vibración, dependen tanto de la rigidez de las vigas como de la de las viguetas. Por ello se propone que la frecuencia del sistema se calcule con la relación de Dunkerley:

$$\frac{1}{f_s^2} = \frac{1}{f_j^2} + \frac{1}{f_g^2}$$

donde:

- f_s = frecuencia del sistema
- f_g = frecuencia de las vigas principales
- f_j = frecuencia de las vigas secundarias o de las viguetas.

Esta expresión se podría reescribir así:

$$f_s = 0,18 (g/(\Delta_j + \Delta_g))^{1/2}$$

donde Δ_j y Δ_g son las deflexiones debidas a la carga en las viguetas y en las vigas principales, respectivamente.

En el cálculo de la frecuencia natural se debe usar el momento de inercia de la sección compuesta si la placa o el tablero de acero está en contacto con la viga, aun si no hay conectores de cortante, puesto que las fuerzas cortantes generadas en este proceso entre la placa y las vigas

se pueden transmitir mediante fricción o por los puntos de soldadura. Si la viga y la placa no están en contacto, por ejemplo cuando las viguetas pasan sobre las vigas o cuando las viguetas en celosía se apoyan sobre la aleta superior de las vigas, no se puede usar la sección compuesta. En estos casos, si se quisiera considerar acción compuesta, se debería colocar algún mecanismo de transmisión del cortante entre la placa y la aleta superior de la viga.

Peso efectivo

El peso efectivo se puede calcular así:

$$W = wBL$$

donde:

- w = peso del entrepiso por unidad de área
- L = luz del elemento
- B = ancho efectivo

Para viguetas o vigas secundarias el ancho efectivo es:

$$B_j = C_j (D_s / D_j)^{1/4} L_j$$

pero no mayor que 2/3 del ancho del piso
donde:

- C_j = 2,0 para vigas o viguetas en la mayor parte de los sitios
= 1,0 para vigas o viguetas paralelas a un borde interior
- D_s = Momento de inercia por unidad de longitud de la sección transformada en acero de la placa = $d_c^3 / (12 n)$ mm³
- d_c = espesor efectivo de la placa de concreto, usualmente el espesor de concreto sobre la lámina de acero más la mitad de la altura de la lámina
- n = relación dinámica de módulos elásticos = $E_s / 1,35 E_c$
- E_s = módulo de elasticidad del acero
- E_c = módulo de elasticidad del concreto
- D_j = momento de inercia de la sección transversal por unidad de longitud de ancho de las viguetas o vigas secundarias = I_t / S
- I_t = Momento de inercia efectivo de la viga T.

Para las vigas principales el ancho efectivo es:

$$B_g = C_g (D_j / D_g)^{1/4} L_g$$

pero no mayor que 2/3 del ancho del piso
donde:

- C_{ng} = 1,6 para vigas que soportan viguetas conectadas a la aleta superior de la viga
- = 1,8 para vigas que soportan viguetas conectadas al alma de la viga
- D_{ng} = momento de inercia por unidad de longitud de la sección transformada de la viga
- = I_g/L_j para todas las vigas, excepto las de borde
- = $I_g/2L_j$ para todas las vigas de borde
- L_{ng} = luz de la viga.

Cuando las viguetas son continuas en los apoyos (incluyendo secciones laminadas unidas a las almas de vigas con conexiones a corte) y la luz adyacente es al menos $0,7 L_j$, la masa efectiva se puede tornar un 50% mayor, debido a que la continuidad hace que los paneles adyacentes tomen parte en la vibración del panel considerado.

Amortiguamiento

El amortiguamiento depende principalmente de los elementos no estructurales (divisiones, cielos rasos, ductos), del amoblamiento y de los ocupantes. Las divisiones desempeñan un papel muy importante, pues pueden proporcionar la mayor parte del amortiguamiento, dependiendo de si van de piso a techo y del grado de fijación al sistema de entrepiso. En la tabla 1 se muestran los valores recomendados de β con base en la información disponible.

Los valores de β en ambientes de oficinas y residencias pueden variar entre 0,05 para pisos con divisiones que van de placa a placa, y 0,02 para pisos con pocos componentes no estructurales. Valores del orden de 0,01 resultan recomendables para puentes peatonales o para pisos sin elementos no estructurales o pocos ocupantes.

EJEMPLO

En la figura 2 se muestra un panel típico exterior de un entrepiso metálico formado por viguetas en celosía apoyadas sobre vigas de alma llena, las cuales a su vez descansan en las columnas. El entrepiso tiene en total tres paneles de largo (en dirección de las viguetas) por tres de ancho y se utilizará para una oficina abierta con divisiones livianas de baja altura. Las características de la losa de concreto, de las viguetas y de las vigas se dan a continuación. Verificar el comportamiento en lo que a vibraciones se refiere.

Placa altura total (incluida la lámina de acero)	= 100 mm
espesor efectivo	= 75 mm
m_c	= 2400 kg/m ³
f_c	= 30 MPa
E_c	= 19000 MPa

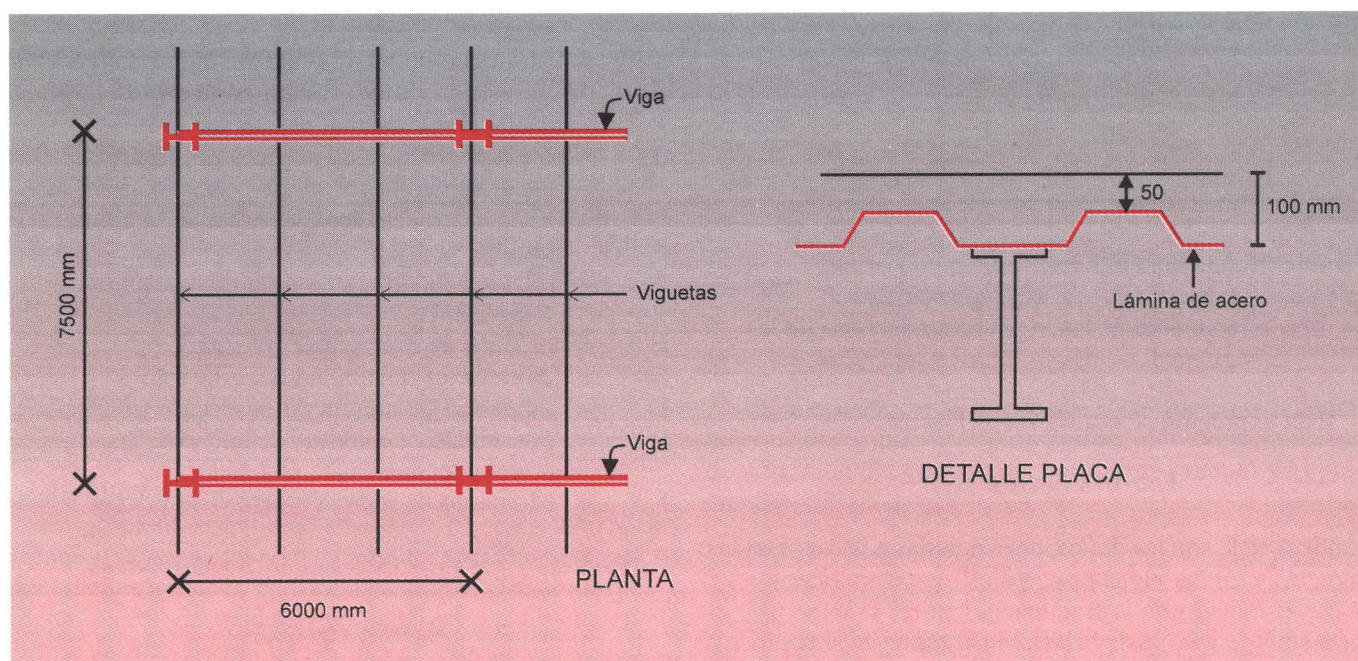


Figura 2. Panel típico exterior de un entrepiso metálico formado por viguetas en celosía.

Tabla 1
VALORES RECOMENDADOS DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN 1 Y LÍMITES DE a_0/g
(Murray *et al.*, referencia 1)

	Fuerza constante P_0	Amortiguamiento β	Aceleración límite $a_0/g \times 100$
Oficinas, viviendas, iglesias	0,29 kN (65 lb)	0,02 - 0,05*	0,5%
Centros comerciales	0,29 kN (65 lb)	0,02	1,5%
Puentes peatonales interiores	0,41 kN (92 lb)	0,01	1,5%
Puentes peatonales exteriores	0,41 kN (92 lb)	0,01	5,0%

* 0,02 para pisos con pocos elementos no estructurales (cielos rasos, ductos, divisiones, etc.) Ejemplo zonas de trabajo abiertas e iglesias.
 * 0,03 para pisos con elementos no estructurales y muebles, pero con pocas divisiones desmontables, típicas de oficinas abiertas.
 * 0,05 para divisiones que van de piso a techo.

Viguetas W 14 x 22

$$\begin{aligned} I &= 8,28 \times 10^5 \text{ mm}^4 \\ A &= 4187 \text{ mm}^2 \\ d &= 349 \text{ mm} \end{aligned}$$

Vigas W 14 x 26

$$\begin{aligned} I &= 10,2 \times 10^5 \text{ mm}^4 \\ A &= 4961 \text{ mm}^2 \\ d &= 353 \text{ mm} \end{aligned}$$

Propiedades en dirección de las viguetas

$$n = E_s / 1,35E_c = 200000 / (1,35 \times 19000) = 7,80$$

$$y = \frac{4187(349/2) + (2000/7,80) * (50 * (50/2 + 50 + 349))}{4187 + (2000/7,80) * 50} = 362,6 \text{ mm}$$

es decir, 36,4 mm por debajo de la parte superior del tablero

$$I_j = 8,28 \times 10^5 + 4187(362,6 - 349/2)^2 + (2000/7,80) * 50^3 / 12 + (2000/7,80) * 50 * (50/2 + 36,4)^2 = 200 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

La carga actuante sobre cada vigueta es:

$$w_j = 2(0,5 + 1,7 + 0,2 + 0,8 + 0,16) = 6,72 \text{ kN/m}$$

que incluye 0,5 kPa de carga viva y 0,2 kPa de cielo raso. La deflexión correspondiente es:

$$\Delta_j = 5W_j L^4 / 384 E_s I_j = 6,92 \text{ mm}$$

La frecuencia natural de oscilación es:

$$f_j = 0,18 (g/\Delta_j) = 6,76 \text{ Hz}$$

Usando un espesor promedio de la placa de 75 mm, el momento de inercia de la sección transformada es:

$$D_s = d_c^3 / (12n) = 75^3 / (12 * 7,8) = 4507 \text{ mm}^3$$

El momento de inercia transformado por unidad de ancho en dirección de las viguetas es:

$$D_j = 200 \times 10^6 / 2000 = 100000 \text{ mm}^3$$

El ancho efectivo del panel con $C_j = 2,0$ es:

$$B_j = C_j (D_s / D_j)^{1/4} L_j = 6911 \text{ mm} < 2/3 (18000) = 12000 \text{ mm}$$

El peso del panel, considerando un incremento del 50% por continuidad, es:

$$W_j = 1,5 (w_j/S) B_j L_j = 1,5(6,72/2)(6,91 \times 7,5) = 261 \text{ kN}$$

Propiedades en dirección de las vigas

Tomando un ancho efectivo de $0,4 L_g = 0,4 \times 6 = 2,40 \text{ m} < L_j$ y considerando el concreto en las nervaduras del tablero metálico, el centroide de la sección transformada está localizado a una distancia:

$$y = \frac{4961 * 353 / 2 + (2400 / 7,8) * 75 * (353 + 25 + 75 / 2)}{4961 + (2400 / 7,8) * 75} = 373,2$$

es decir, 42,3 mm por debajo del centroide de la sección efectiva de la placa.

Y el momento de inercia de dicha sección es:

$$I_g = 10,2 \times 10^5 + 4961(373,2-353/2)^2 + (2400/7,8)(75)^3/12 + (2400/7,8)(75)(42,3)^2$$

$$= 245 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Para cada viga la carga equivalente es:

$$w_g = L_j(w_j/S) + \text{peso propio viga}$$

$$w_g = 7,5(6,72/2) + 0,39 = 25,6 \text{ kN/m}$$

y la deflexión correspondiente es:

$$\Delta_g = 5W_g L^4 / 384 E_s I_g = 8,82 \text{ mm}$$

La frecuencia natural de oscilación es:

$$f_g = 0,18 \sqrt{(g/\Delta_j)} = 6,09 \text{ Hz}$$

Con $D_j = 100000 \text{ mm}^3$ y $D_g = I_g/L_j = 33700$ el ancho efectivo del piso, usando $C_g = 1,8$ es:

$$B_g = C_g(D_j/D_g)^{1/4} L_g$$

$$B_g = 14,2 \text{ m} > 2/3 * 3 * 6 = 12 \text{ m},$$

por tanto se tomará:

$$B_g = 12 \text{ m}$$

El peso del panel es:

$$W_g = (w_g/L_j)B_g L_g = (25,6/7,5)(12,0 \times 6,0) = 244 \text{ kN}$$

Propiedades combinadas

Puesto que la luz de las vigas: 6 m, es menor que el ancho efectivo de viguetas: 6,91 m, la deflexión de las vigas se reducirá así:

$$\Delta'_g = (L_g/B_j)\Delta_g = (6,0/6,91)8,82 = 7,66 \text{ mm}$$

la frecuencia natural del entrespacio es:

$$f_s = 0,18 (g/(D_j + D'_g)) = 4,67 \text{ Hz}$$

y el peso equivalente combinado es:

$$W = \frac{\Delta_j}{\Delta_j + \Delta_g} W_j + \frac{\Delta_g}{\Delta_j + \Delta_g} W_g = 252 \text{ kN}$$

Para oficinas con particiones livianas $\beta = 0,02$

$$\beta W = 0,02 \times 252 = 5,04 \text{ kN}$$

$$a_p/g = P_o e^{-0,35f_s} / \beta W = 0,0112$$


que es mayor que el límite $a_o/g = 0,005$

Es decir, que el entrespacio no sería adecuado para una oficina abierta con divisiones livianas. Si el entrespacio tuviera divisiones ancladas a piso y techo de tal manera que $\beta = 0,05$, a_p/g daría 0,0045 y sería aceptable.

Si se requiere que las divisiones sean livianas, la alternativa sería aumentar el espesor de la losa o la rigidez de las vigas. Probablemente la solución óptima consistirá en un incremento del espesor de la placa, sumado a un aumento de la rigidez de las vigas.

REFERENCIAS

1. Murray, T.; Allen, D. & Ungar, E., "Floor Vibrations due to Human Activity", *Steel Design Guide Series*, N° 11, AISC.
2. Allen, D. y Murray, T., "Design criterion for Vibrations Due to Walking", *Engineering Journal*, 4th quarter, AISC, 1993.
3. Murray, T., "Building Floor Vibrations", *Engineering Journal*, AISC, 3rd quarter, 1981.
4. ISO, "International Standard ISO 2631-2", International Organization for Standardization



REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE

INGENIERIA

Una publicación trimestral de la Escuela Colombiana de Ingeniería con toda la actualidad en la materia así como variados artículos de interés general.


Concédase el placer de estar bien informado

Cancele su suscripción con tarjeta de crédito, cheque o efectivo

.....

MAYOR INFORMACIÓN: Centro Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería
Avenida 13 No. 205-59 (Autopista Norte km 13 - costado occidental)
PBX (091) 6763888 - 6762666 Exts. 243 y 258 Telefax 6762655 e-mail: editor@escuelaing.edu.co

¡SUSCRÍBASE!
llamando al 6762655!



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA