

## Capítulo 7

### Conclusiones y recomendaciones

#### 7.1 Conclusiones

- Los daños en puentes durante terremotos se deben fundamentalmente a las siguientes causas:
  - Falla en los tramos debido a desbancamiento en juntas no restringidas.
  - Amplificación de los desplazamientos debido a efectos del suelo.
  - Hundimiento y rotación de bastiones.
  - Falla en columnas en flexión y/o cortante.
  - Fallas en las uniones.
  - Falla en las fundaciones.
- Las relaciones de atenuación desarrolladas por Youngs et al ( ref 3.3 ) derivadas específicamente para terremotos de subducción constituyen el estudio más reciente y completo que se ha publicado en este campo, ya que considera la mayor cantidad de sismos de subducción y de diferentes regiones del mundo. Por tal motivo, constituye una herramienta importante para realizar estudios determinísticos de amenaza sísmica para una región, una vez identificadas las características de la zona de ruptura potencial . Debe tenerse claro que las relaciones derivadas por Youngs et al, tanto para atenuación de la aceleración pico como espectral, tienen una base estadística, ya que fueron desarrolladas a partir de análisis de regresión de registros existentes . Por tanto, no es recomendable aplicar tales ecuaciones con valores fuera de los rangos establecidos tanto para distancia a la fuente sísmica, como para magnitud, ya que no se tendría certeza de la incertidumbre de los datos de aceleraciones obtenidos.
- El valor para la aceleración máxima del terreno de 0.38g obtenida a partir de las relaciones de atenuación desarrolladas por Youngs et al, para terremotos de subducción, es mucho mayor que las que se especifican en los mapas de isoaceleraciones del Código Sísmico de Costa Rica (CSCR). En estos mapas, para el sitio de emplazamiento del puente sobre el Río Nosara, se recomiendan aceleraciones de 0.18g para estructuras tipo B (100 años de periodo de retorno) y 0.28g para estructuras tipo A ( 500 años de periodo de retorno ) . Youngs determino a partir de su investigación, que la razón de atenuación de las aceleraciones pico para terremotos de subducción es menor que para terremotos superficiales en áreas tectónicamente activas. Esta diferencia es significativa cuanto mayor sea la magnitud del sismo. Por tanto, para un estudio determinístico de amenaza sísmica es importante no sólo definir una magnitud y una distancia, sino tener claro la posible causa del sismo para escoger las relaciones de atenuación adecuadas. Las aceleraciones del terreno registradas durante el terremoto del Valle de la Estrella, Limón (1991), confirmaron el hecho de que la zonificación sísmica para Costa Rica recomendada por el CSCR debe ser revisada.

- El programa de cómputo SEISAB ( Seismic Analysis of Bridges ) constituye una herramienta muy útil en el análisis estático y dinámico de puentes, debido a su claridad tanto en la etapa de entrada de datos, como en la interpretación de los resultados.
- Es importante incluir en el análisis dinámico de un puente la flexibilidad del suelo, tanto en las fundaciones como en los bastiones para obtener resultados más cercanos a la realidad. Investigaciones recientes, como las desarrolladas por Martin y Po Lam ( ref. 5.3 ) en California han demostrado que especialmente para puentes cortos y bajos, los efectos de la rigidez en las fundaciones puede afectar significativamente las características de la respuesta dinámica global de la estructura
- Debe tomarse en cuenta el efecto del agrietamiento en la degradación de la rigidez efectiva en elementos de concreto reforzado. En general, se considera suficientemente adecuado tomar la rigidez de la sección agrietada incluyendo el aporte del refuerzo de acero, como la mitad del valor para la sección gruesa. Para elementos preesforzados, puede tomarse la rigidez de la sección gruesa como valor de entrada.
- Para encontrar las constantes de rigidez de resortes equivalentes de placas de cimentación rectangulares según la Teoría del Semiespacio Elástico, debe contarse con los valores dinámicos del módulo de cortante  $G$  y la razón de Poisson  $\nu$  del suelo, a partir de estudios geofísicos, o en su defecto, a partir de medidas indirectas o recomendaciones.
- Las relaciones fuerza-desplazamiento que se dan en los bastiones durante un sismo, constituyen un problema no lineal altamente complejo, afectado por muchas variables, como la naturaleza del suelo de relleno, el grado de compactación, la altura y fricción del muro, y otros. Según Priestley ( ref. 2.3 ), los métodos iterativos para estimar la rigidez en bastiones como el utilizado en este trabajo de graduación, tienen una mejor aplicación en diseño que en la evaluación de estructuras existentes, para la cual, la manera más adecuada de obtener los valores probables de rigidez es sin duda a partir de investigaciones geotécnicas. Sin embargo, la ausencia de tales estudios para el puente sobre el Río Nosara, constituyó una limitación de este proyecto
- Los desplazamientos longitudinales relativos obtenidos entre la superestructura y los apoyos, tanto en bastiones como en la pila, son significativos en comparación con la longitud del banco de apoyo. La ausencia de dispositivos adecuados de restricción longitudinal para los elementos de ambos tramos, convierte al puente sobre el Río Nosara en una estructura vulnerable, en caso de que durante el terremoto se den desplazamientos excesivos, mayores a 20 cm. Tal condición podría provocar el colapso de la superestructura por desbancamiento.
- En la dirección transversal, se revisaron las llaves de cortante para las fuerzas laterales obtenidas del análisis, por medio del enfoque de transferencia de cortante por fricción. El refuerzo de ambas llaves les brinda suficiente capacidad para resistir la demanda sísmica

- El anclaje a base de dovelas utilizado para restringir el tramo de vigas canaleta en el bastión, no tiene capacidad para resistir la demanda de fuerzas cortantes, por lo que se concluye que fallaría durante el terremoto. Este tipo de anclaje ha demostrado ser inadecuado para sacudidas fuertes del terreno, como se comprobó durante el terremoto de Limón (1991) (ref. 2.2).
- La columna de la pila central no tiene capacidad adecuada en flexocompresión en su base, para la combinación de fuerzas axiales y momentos obtenidos del análisis, tanto en la dirección transversal como longitudinal. Para revisar tal condición, se desarrollaron diagramas de interacción en ambas direcciones. Los puntos correspondientes al análisis con el espectro de Youngs quedaron dentro de la frontera del diagrama, mientras que los obtenidos usando CSCR y CALTRANS predicen la falla del elemento (fig. 6.4 y 6.5). Esta diferencia se debe a que tanto el espectro propuesto por el Código Sísmico de Costa Rica como el de CALTRANS, tienen un rango de períodos más grande correspondientes a aceleraciones espectrales altas. Así, para el período de 0.56 s asociado al modo transversal, las aceleraciones espectrales correspondientes a CSCR y CALTRANS son 0.79g y 0.82g respectivamente, mientras que para Youngs el valor cae a 0.53g.
- Las condiciones de apoyo longitudinales mostradas en las figuras 6.1 y 6.2 corresponden a una aproximación del comportamiento real entre la superestructura y la subestructura, ya que por la complejidad del fenómeno, no se tomaron en cuenta los efectos producidos por el impacto entre elementos adyacentes.
- El confinamiento a todo lo largo de la columna de la pila provista por aros #4 separados 30 cm, no es adecuado para soportar rotaciones inelásticas en la base, sin que se de pandeo del refuerzo longitudinal y por consiguiente, degradación significativa de la resistencia del elemento.
- Se revisó la capacidad en cortante de la columna según las ecuaciones recomendadas por Priestley (ref. 2.3) y el ACI 318-95, y para ambos casos resultó aceptable, comparada con la demanda en la base de la misma. Priestley sostiene que las ecuaciones propuestas por el ACI subestiman la capacidad en cortante real de elementos de concreto reforzado sometidos a compresión.
- En general, se concluye que los factores principales que hacen vulnerable al puente sobre el Río Nosara ante el terremoto de Nicoya pronosticado por OVSICORI son:
  - Capacidad limitada en flexocompresión y confinamiento inadecuado de la base de la columna en la pila.
  - Ausencia de dispositivos efectivos de restricción longitudinal para la superestructura.

## 7.2 Recomendaciones

Con base en lo expuesto en la sección 7.1, se recomienda tomar medidas de reforzamiento en la estructura del puente sobre el Río Nosara. A continuación se describen algunas de las opciones posibles.

i) Ampliación del banco de apoyo Esta solución es económicamente viable, y puede aplicarse tanto en bastiones como en la pila central, según se muestra en los esquemas de las figuras 7.1 y 7.2. Esta alternativa permite un mayor rango de desplazamientos para la superestructura disminuyendo el riesgo de desbancamiento, y tiene la ventaja de que no transmite fuerzas adicionales a la pila, no contempladas en el diseño inicial. Acerca de las alternativas mostradas en la figura 7.2, para ampliación del banco de apoyo en la pila, la escuadra de acero presenta la ventaja de que podría ser más liviana que el bloque de concreto. En todo caso, es recomendable que el diseño del refuerzo se haga de manera que no haya una diferencia significativa de peso entre los dispositivos colocados a cada lado de la pila.

ii) Incremento del confinamiento en la base de la columna: Para aumentar la ductilidad de la columna en la sección crítica de la base, pueden utilizarse distintas técnicas de encamisamiento. Para este caso, se consideró adecuado un esquema como el mostrado en la figura 7.3, a base de aros o cables presforzados de acero que se colocan alrededor de la columna, cuya separación debe calcularse. Sobre estos cables va un recubrimiento de concreto para proteger el acero contra corrosión, debido a que la base de la pila se encuentra bajo el agua.

Para finalizar, es importante mencionar que debe analizarse en detalle el comportamiento del puente con el reforzamiento incorporado, para verificar que no se den redistribuciones no deseadas de esfuerzos en la estructura. Este paso queda fuera del alcance de este trabajo

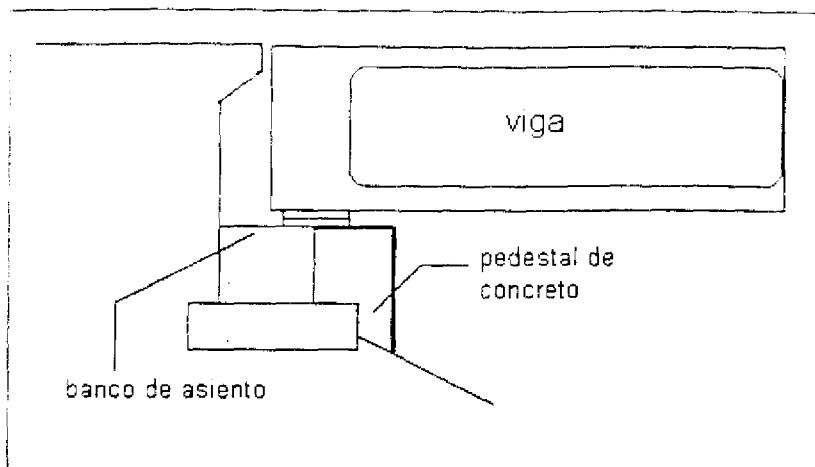


Figura 7.1 : Ampliación del banco de apoyo en bastión.

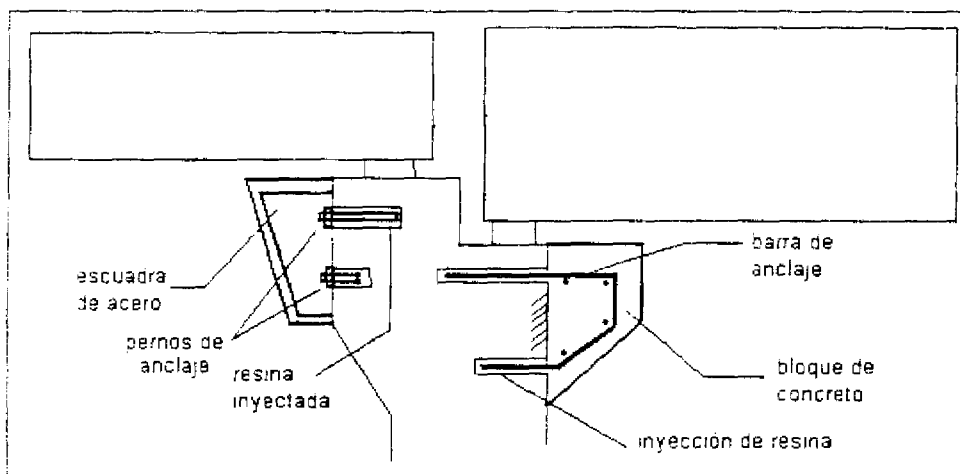
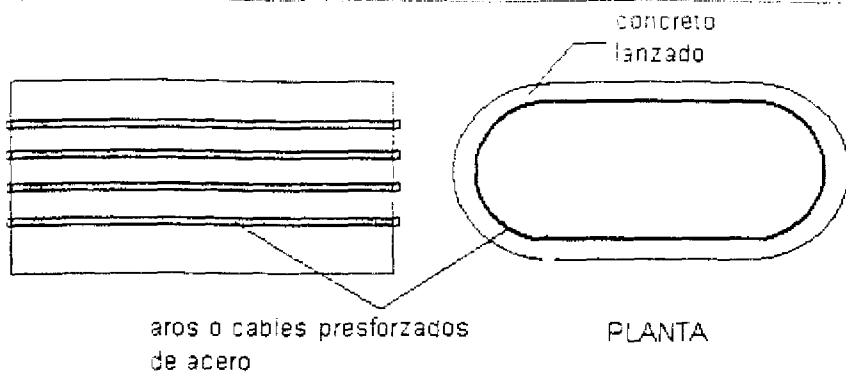


Fig. 7.2 : Alternativas para ampliación de banco de apoyo en pila.



**Figura 7.3 : Encamisado de la columna de pila.**

## 8. Referencias

- 2.1) Buckle, Ian : Friedland, Ian ( Editors ) Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges Federal Highway Administration. 1995.
- 2.2) Mitchell, Dennis. Structural Damage due to the April 22,1991, Costa Rican Earthquake. Canadian Journal of Civil Engineering 1992.
- 2.3) Priestley, M J N et al Seismic Design and Retrofit of Bridges. John Wiley & Sons. 1996.
- 3.1) Lépiz O El sismo de Nicoya ocurrirá. Periódico Campus, Universidad Nacional. Sin fecha.
- 3.2) Nishenko, Stuart Circum-Pacific Potential: 1989-1999. National Earthquake Information Center, United States Geological Survey. Denver,USA. 1991.
- 3.3) Youngs,R et al Strong ground motion attenuation relationship for subduction zone earthquakes. Seismological Research Letters. Vol 68, Número 1 Michigan, EEUU. 1997.
- 3.4) Bravo, A. : Calvo, M. Evaluación del impacto sobre la red vial de un terremoto en la Península de Nicoya. Informe de Trabajo de Graduación. Escuela de Ingeniería Civil, UCR. 1997.
- 3.5) Protti,M et al. The march 25,1990 ( $M_w=7.0$ ,  $M_l=6.8$ ) earthquake at the entrance of the Nicoya Gulf, Costa Rica: its prior activity, foreshocks, aftershocks, and triggered seismicity. Journal of Geophysical Research. Vol.100, No B100 California, 1995.
- 3.6) Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. Código Sísmico de Costa Rica Jorge Gutiérrez G. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 1987.

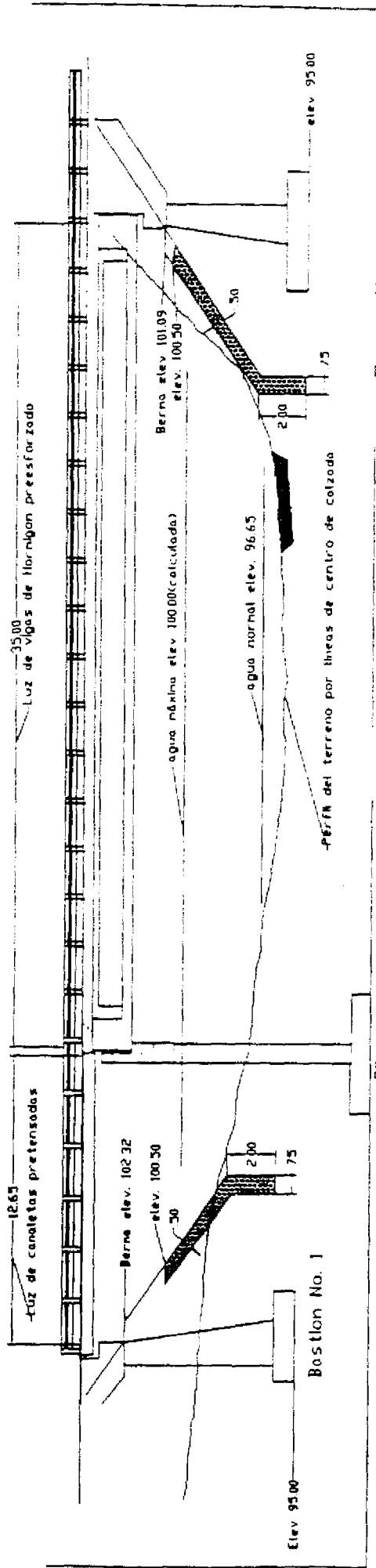
- 3.7) Applied Technology Council Improved Seismic Design Criteria for California Bridges: Provisional Recommendations ATC-32. California, 1996.
- 4.1) American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specification for Highway Bridges. Fourteenth Edition, 1989.
- 5.1) American Association of State Highway and Transportation Officials, Guide Specifications for Seismic Design of Highway Bridges. 1983.
- 5.2) Applied Technology Council, Seismic Design Guidelines for Highway Bridges. Report No. ATC-6, Berkeley, California, 1981.
- 5.3) Martin, Geoffrey ; Imbsen, Roy ; Po Lam, Ignatius. Modeling Bridge Foundations for Seismic Design and Retrofitting. Third Bridge Engineering Conference, Denver, Colorado, March 10-13, 1991.
- 5.4) Gates, J.H and Smith, M. Verification of Dynamic Modeling Methods by Prototype Excitation. Federal Highway Administration Report FHWA/CA/SD-82-07 1992.
- 5.5) Bowles, Joseph. Foundation Analysis and Design. Fourth Edition 1988.
- 5.6) Bridge Design Aids. California Department of Transportation. October, 1989.
- 5.7) Wilson, John. Stiffness of Non-Skewed Monolithic Bridge Abutments for Seismic Analysis. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 16, 1988, pp. 867-883.
- 6.1) Potyondy, Julius. Transverse Load Capacity of Multi-Dowel Anchorages in Concrete. Report of the ACI Committee SP-114.



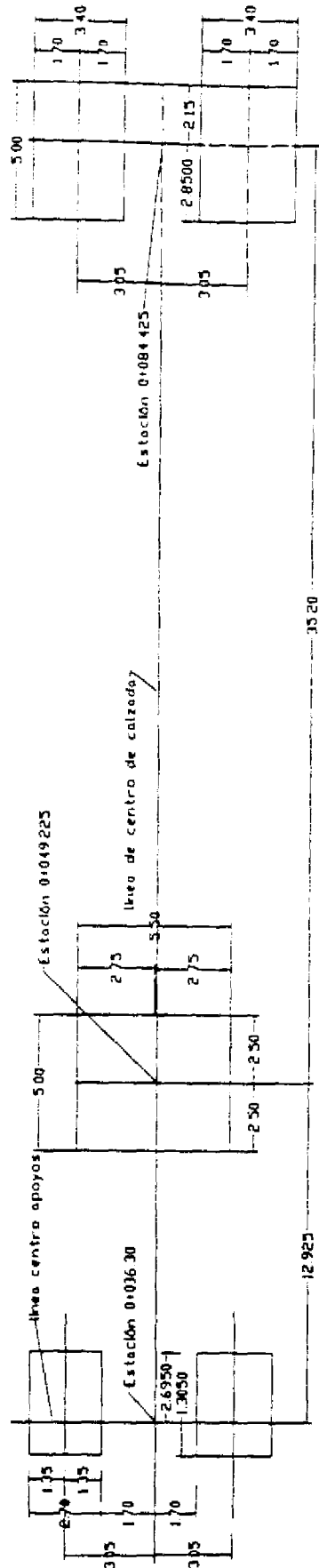
## ANEXO A : DETALLES CONSTRUCTIVOS

Todas las cotas están en centímetros, a menos que se especifique lo contrario.

# Puente sobre Río Nosara



## Elevación



## Planta de Fundaciones

Figura A1: Elevación principal

# Puente sobre Río Nosara

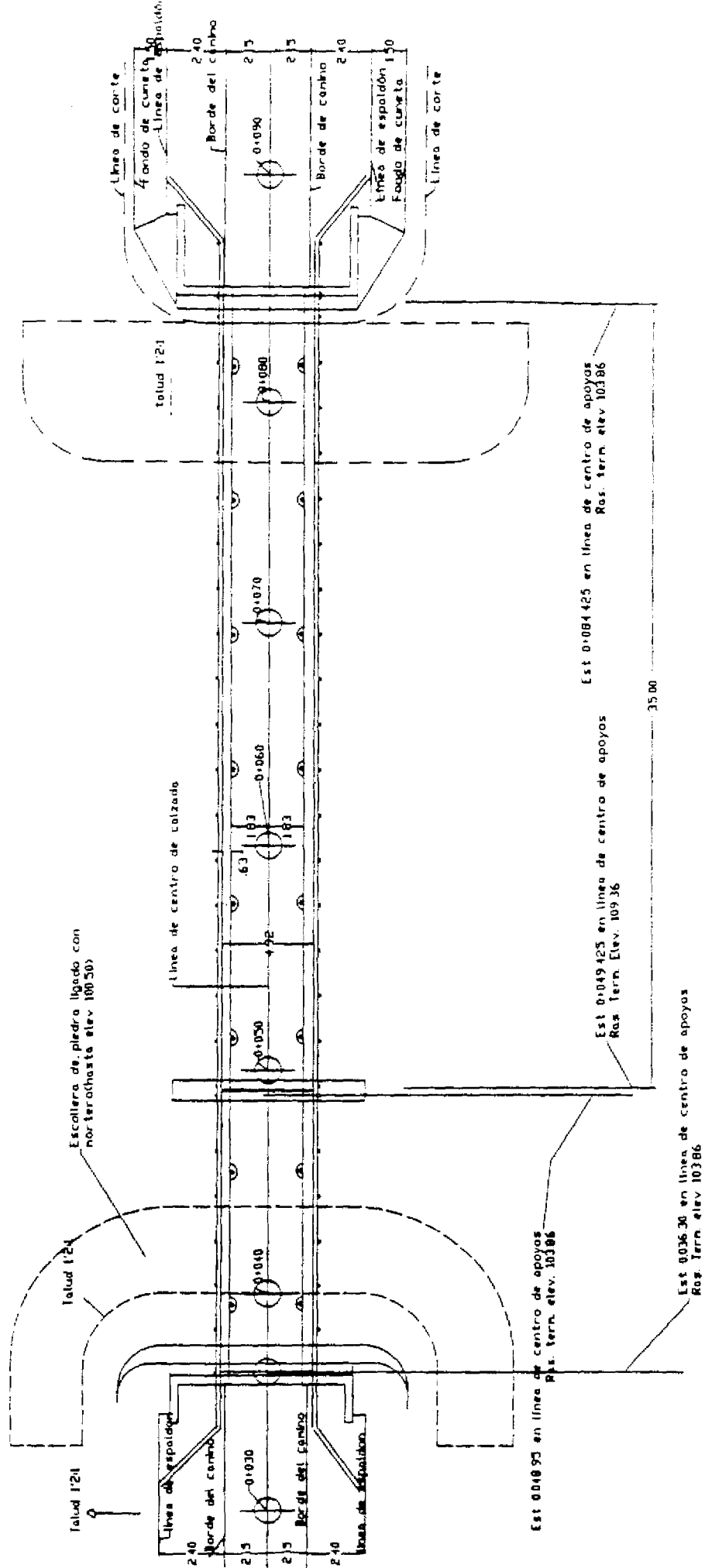
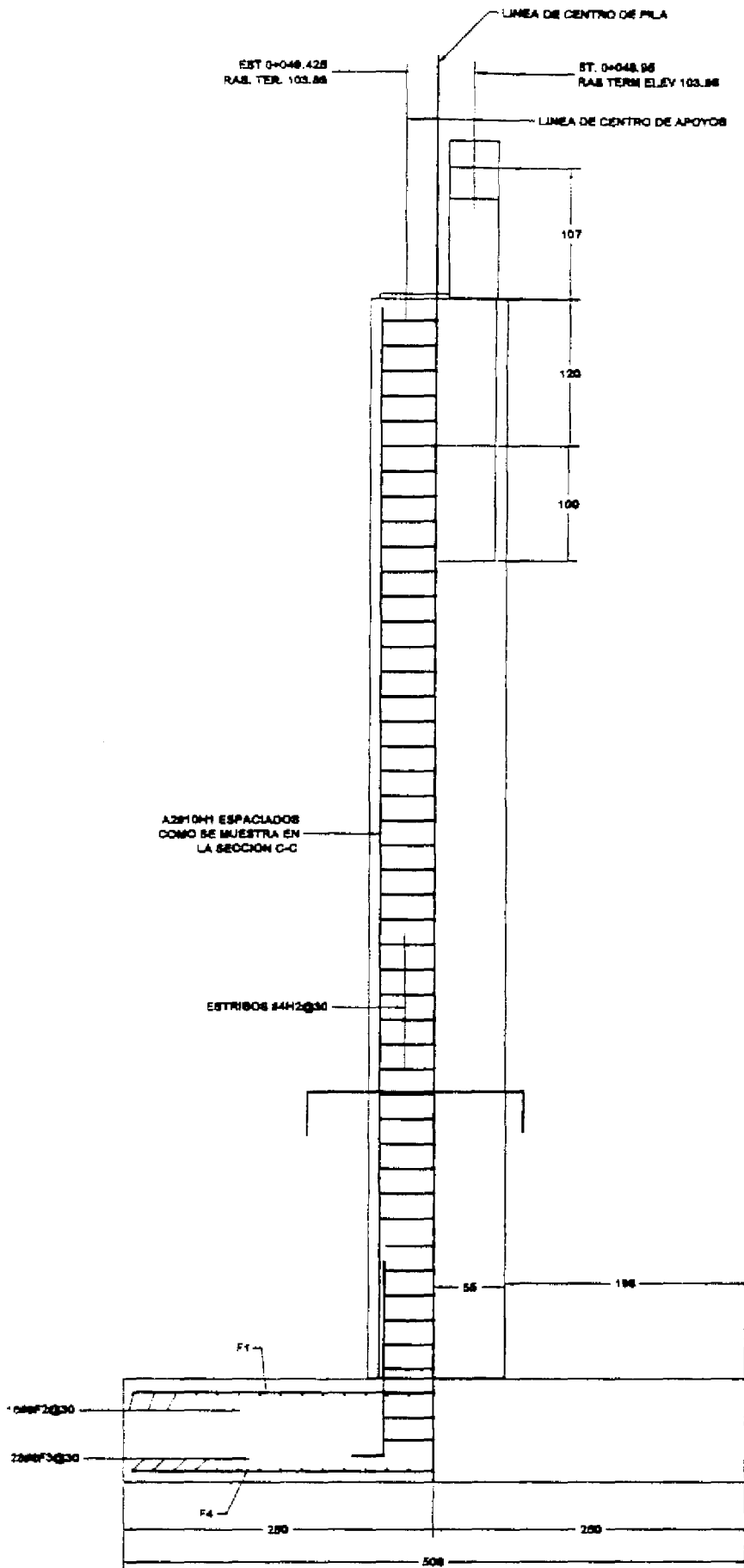


Figura A2: Planta general

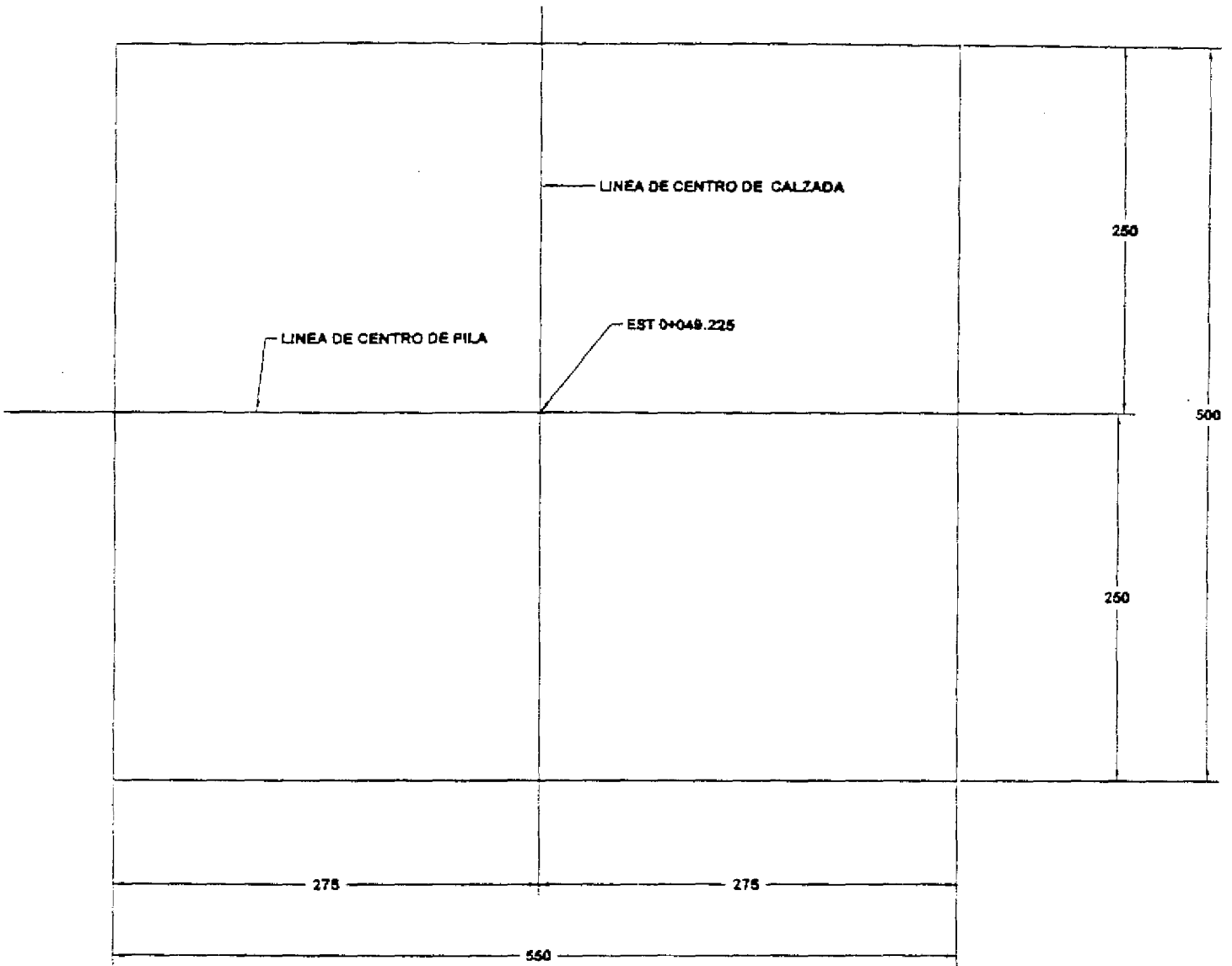
Programa de Ingeniería Sísmica LANAMME.  
U.C.R. Enero 1998.





VISTA LATERAL

Figura A4: Vista lateral de pila



PLANTA DE FUNDACION

Figura A5: Planta de placa aislada en pila

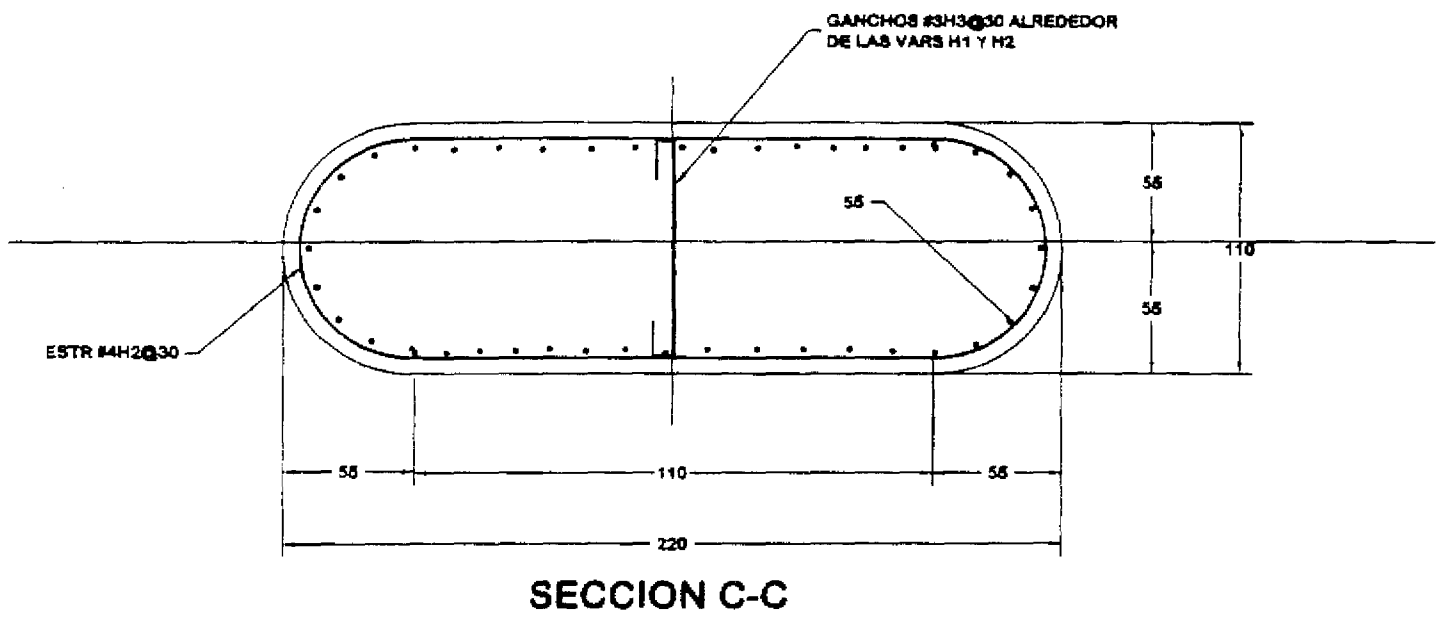
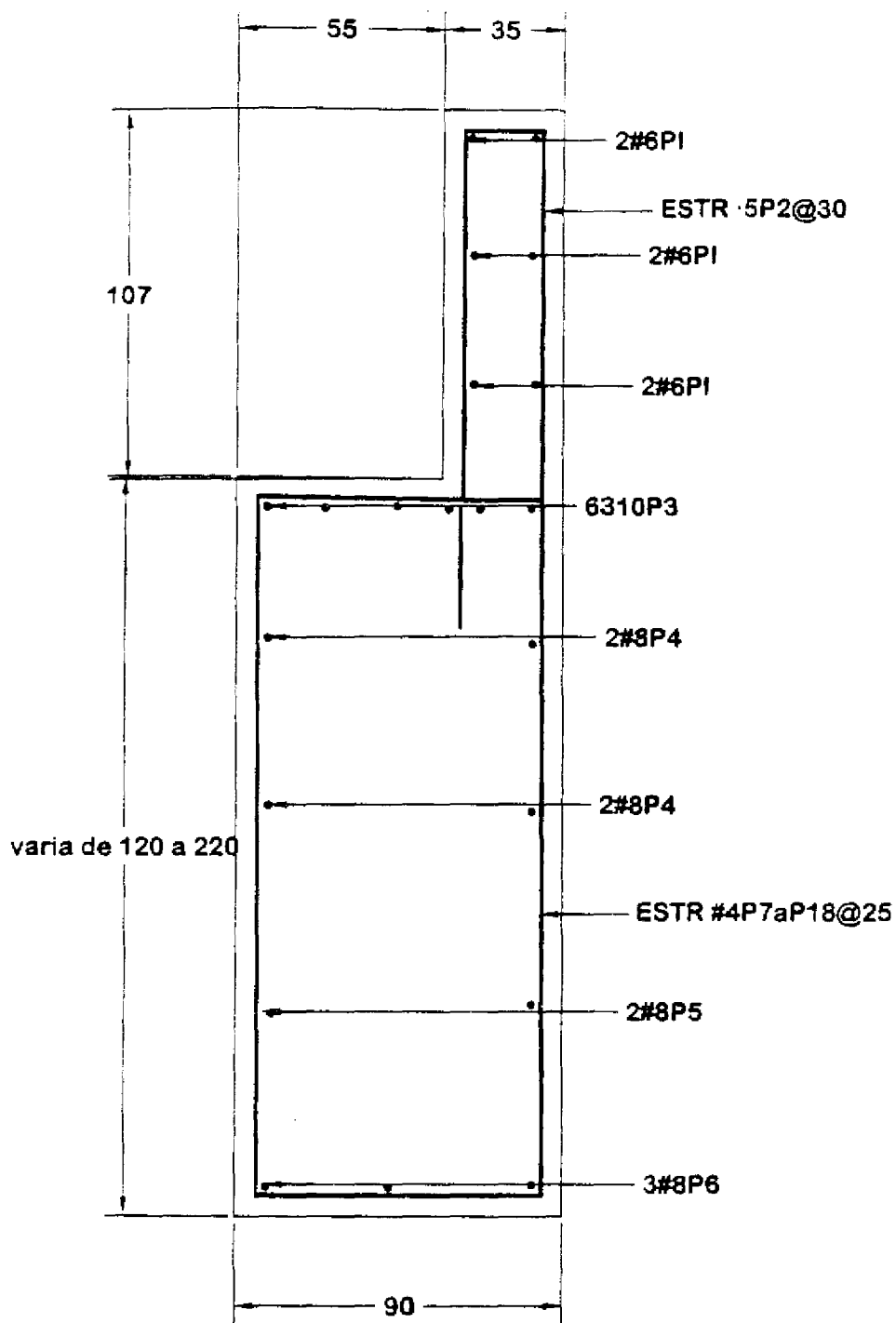


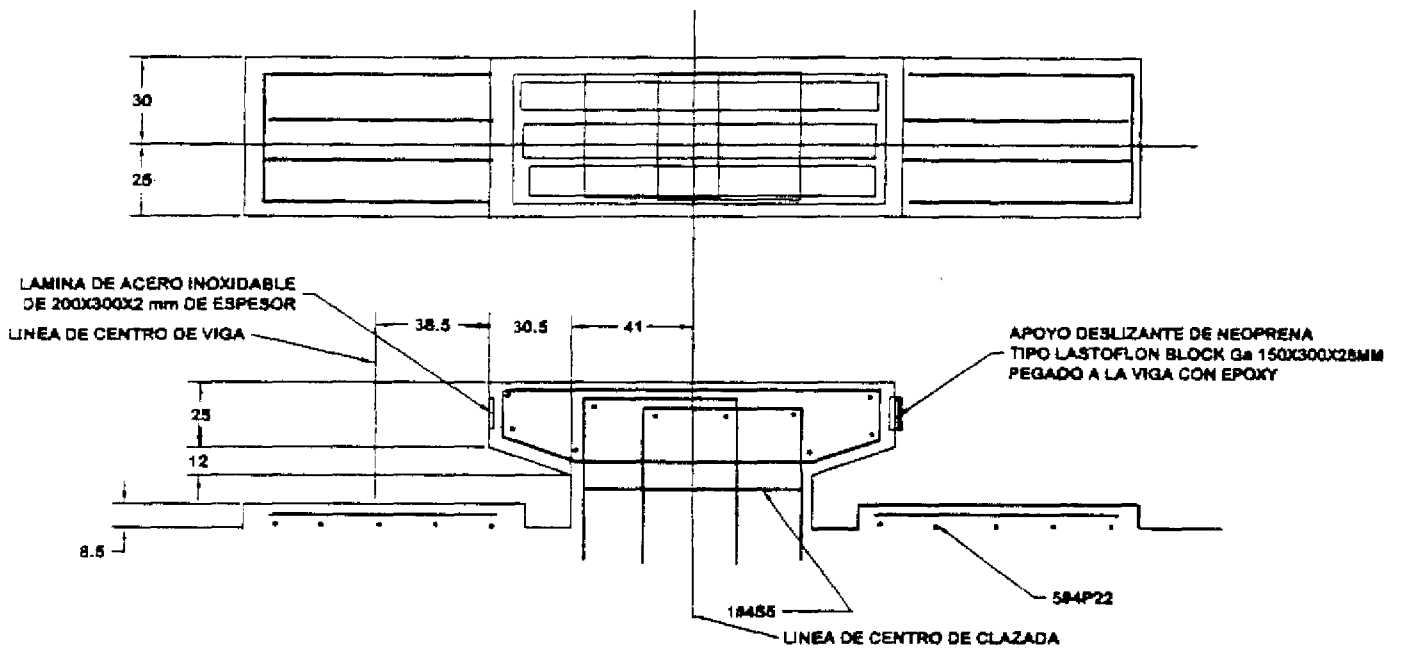
Figura A6: Sección transversal de columna en pila



## SECCION B-B

Figura A7: Detalle de cabeza de pila





**DETALLE DE LLAVE SISMICA Y PEDESTAL**

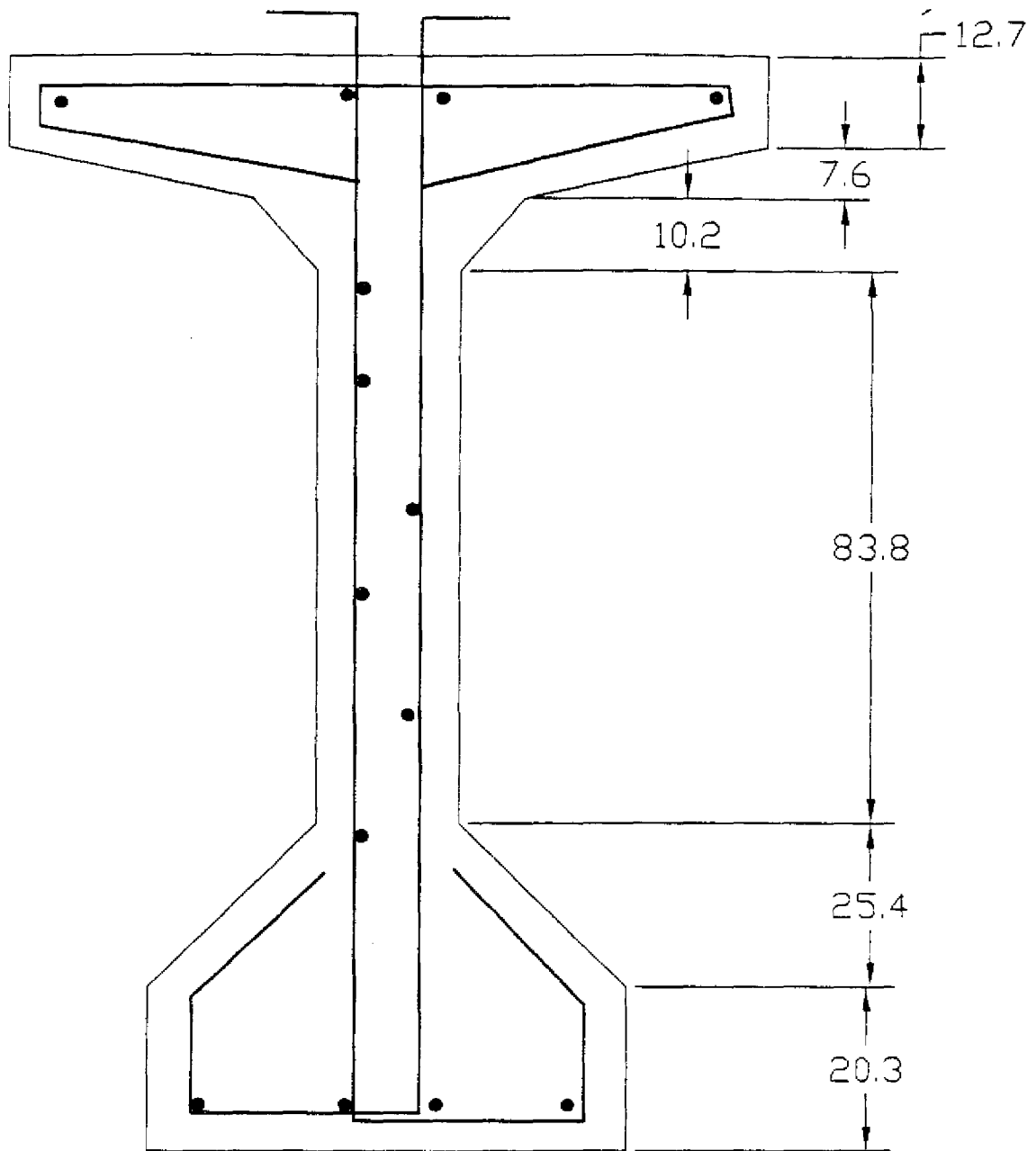
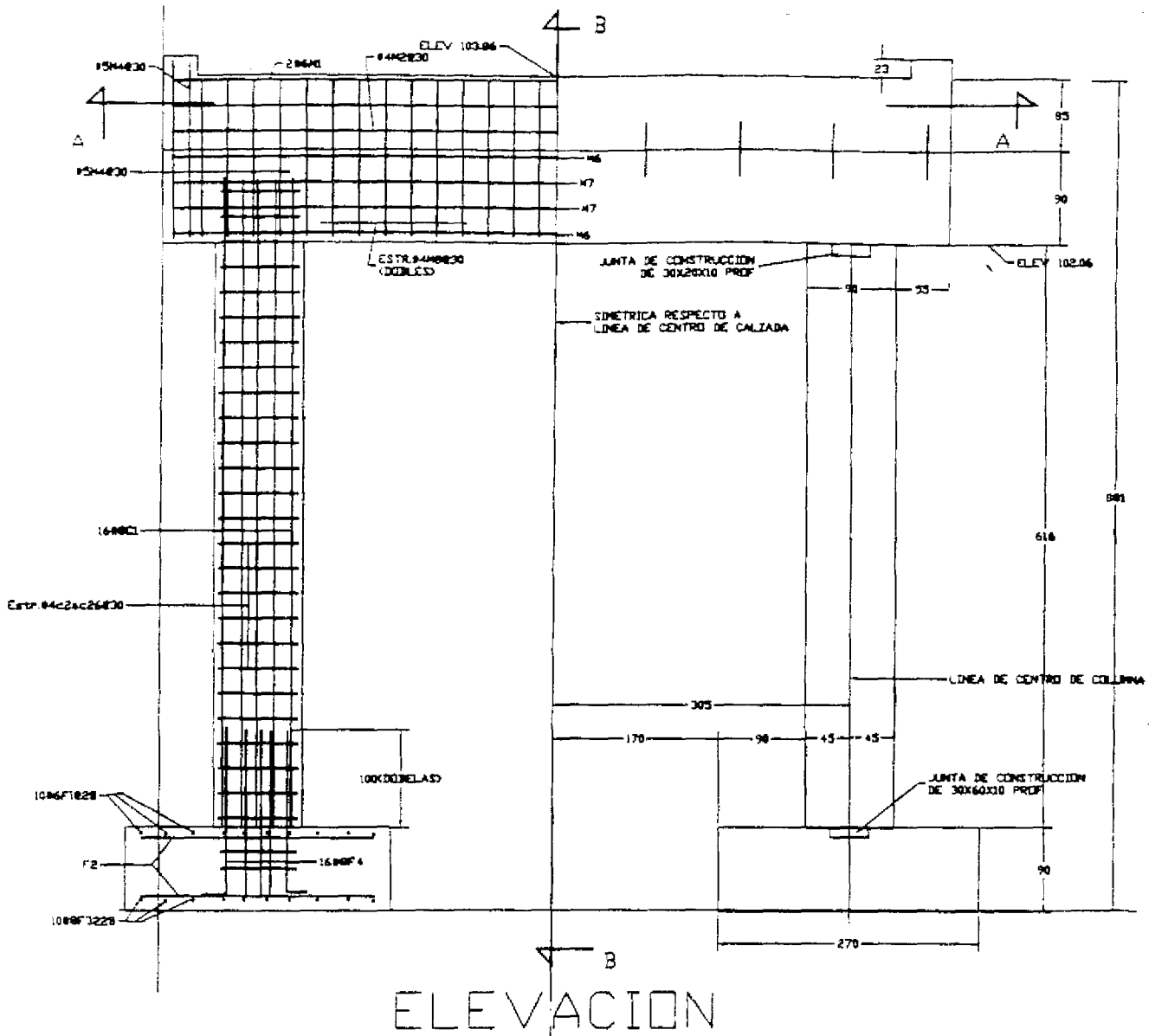
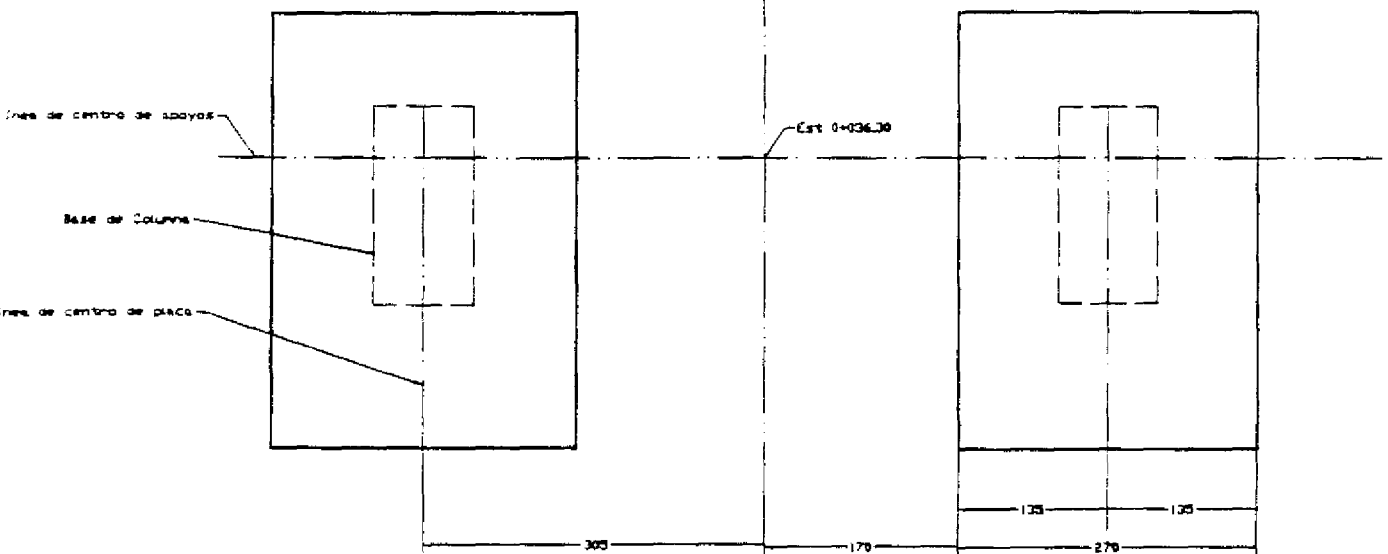


Figura A9: Sección transversal de viga I postensada



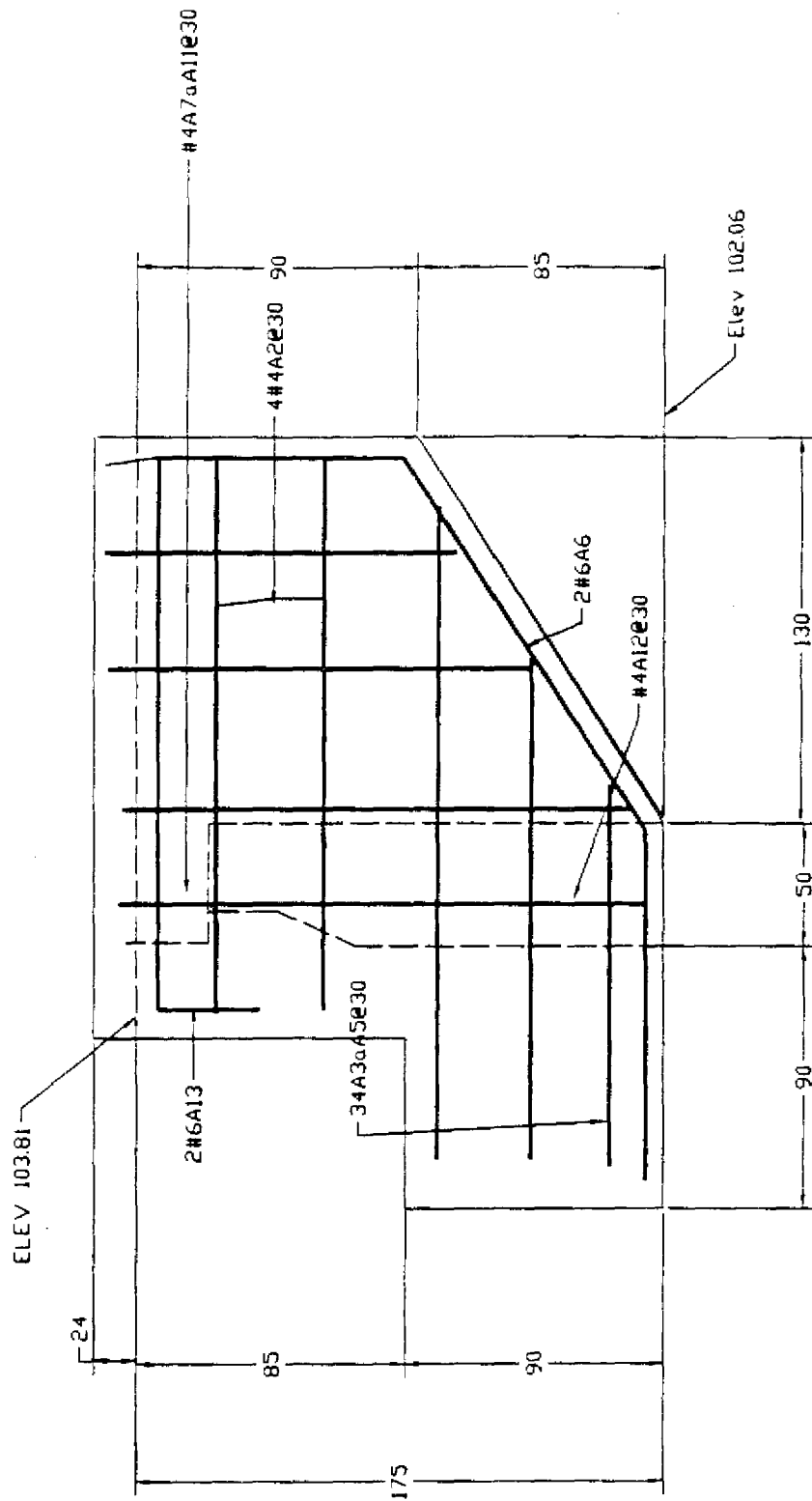
ELEVACION



Planta de Fundación  
Escala 1:40

A-11

Figura A10 :Vista frontal de estructura de los bastiones



VISTA D-D

Figura A12: Detalle de muro aletón en bastiones

# ANEXO B : DIAGRAMAS

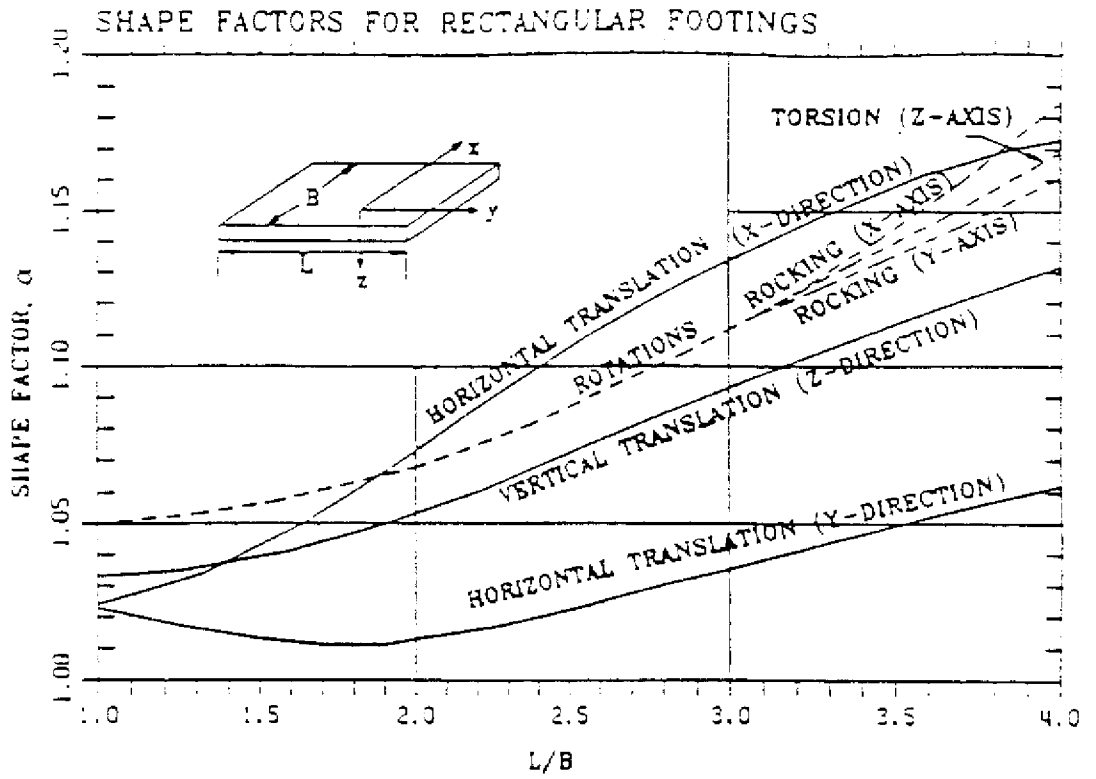


Figura B1: Factores de forma para placas rectangulares

EMBEDMENT FACTORS FOR FOOTINGS,  $\beta$

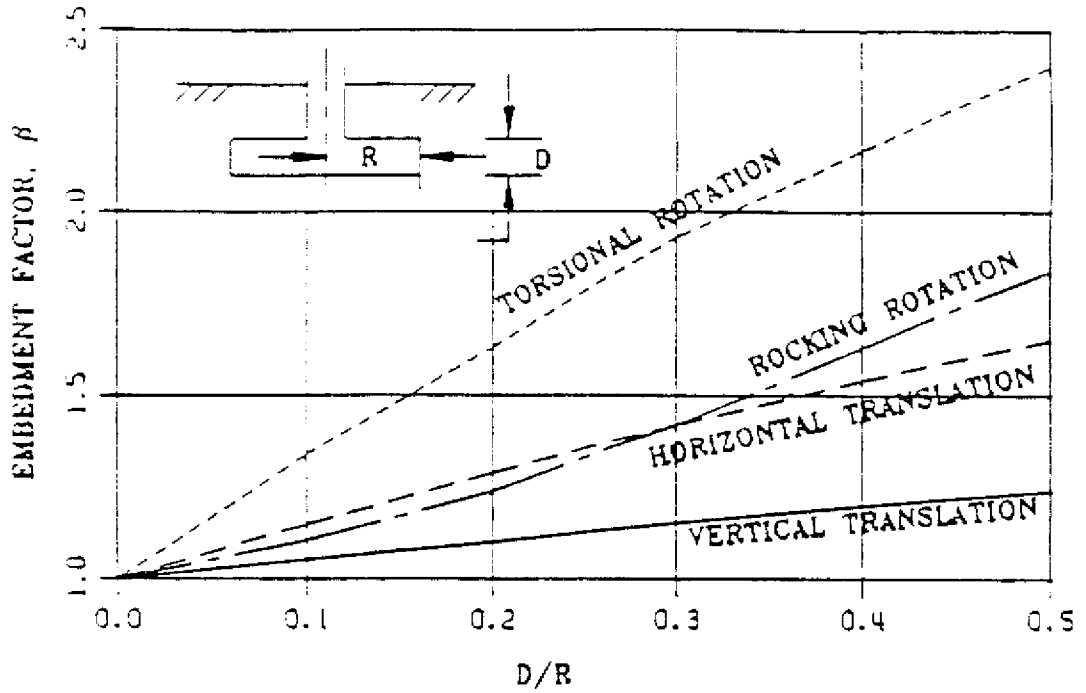


Figura B2: Factores de empotramiento para placas