

## Capítulo 1 Introducción

### 1.1 Justificación

Durante los últimos años, el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica ( OVSICORI ) ha realizado estudios a partir de los cuales ha planteado la hipótesis de la ocurrencia de un terremoto de magnitud cercana a 7.5 frente a las costas de la Península de Nicoya, para los próximos diez años. Este sismo sería generado por la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa Caribe, con un epicentro cercano a Playa Sámara.

La tesis planteada por el OVSICORI se basa en la identificación de un área por debajo y frente a la península, donde no han ocurrido desplazamientos por sismos en los últimos 45 años, dando lugar a una zona de " brecha sísmica ", con una deficiencia de liberación de energía. La experiencia del terremoto del 22 de diciembre de 1991 en Limón, confirmó que a pesar de su aparente simplicidad estructural, los puentes son obras civiles vulnerables y sujetas a daños considerables cuando sufren el efecto de este tipo de fenómenos naturales. En muchos casos los daños se han debido a desplazamientos relativos excesivos, superiores a los contemplados en el diseño, a dispositivos de apoyo inadecuados, y a veces, pero con menor frecuencia, a deficiencias en el comportamiento de la subestructura.

Si un terremoto de tal magnitud sacudiera la Península de Nicoya, los puentes y el sistema vial en general serían líneas vitales para el acceso a zonas afectadas por la tragedia. El aislamiento de poblaciones debido a una falla en la red vial no sólo dificulta el acceso de cuerpos de socorro en los días inmediatos al evento, sino que puede interrumpir seriamente la actividad económica de la zona.

Este trabajo forma parte del proyecto "Evaluación del Impacto Ingenieril de un Terremoto en la Península de Nicoya" que ha desarrollado el Programa de Ingeniería Sísmica del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales para la Comisión Nacional de Emergencias.

El propósito específico del presente trabajo es evaluar la vulnerabilidad del puente sobre el Río Nosara ante un terremoto como el que se espera en la región. Este puente se encuentra sobre la ruta 160, aproximadamente a 20 km al noroeste de Playa Sámara, y comunica las comunidades de Nosara y Ostional. La falla parcial o total de esta estructura interrumpiría la ruta mencionada, paralela al litoral Pacífico Norte, y dificultaría el acceso por el noroeste a las comunidades de Nosara, Guiones y Garza.

La decisión de estudiar este puente específicamente se resume en lo siguiente:

El sitio de emplazamiento del puente se encuentra sobre la zona de ruptura estimada por el OVSICORI, donde se registrarían las aceleraciones del terreno más altas.

Su configuración estructural con elementos simplemente apoyados lo hace vulnerable, debido a la falta de redundancia en el sistema y al riesgo consiguiente de que se den

desplazamientos excesivos en la superestructura que provoquen pérdida de soporte de la misma. La mayoría de los puentes dañados seriamente durante el terremoto de Limón en 1991 sufrieron grandes desplazamientos relativos entre sus componentes, y algunos de los dispositivos de restricción demostraron no ser adecuados ( ver ref. 22 ).

En Costa Rica, los estudios de vulnerabilidad estructural de puentes elaborados a la fecha son menores en cantidad que los dedicados a edificios u otras estructuras. Por esta razón, este trabajo de graduación constituye una oportunidad de investigar y tratar de aplicar diferentes metodologías y criterios que constituyen el estado del arte en diseño y reforzamiento sísmico de puentes en países como Estados Unidos, Japón o Nueva Zelanda, y que han sufrido cambios acelerados durante la última década, con la experiencia de terremotos como los de Northridge (California, EUA), Loma Prieta (California, EUA) o Kobe (Japón), para citar algunos .

## 1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es evaluar la vulnerabilidad estructural del puente sobre el Río Nosara, ante la ocurrencia de un terremoto de magnitud  $M_w$  7.5 en la Península de Nicoya, por medio de un análisis dinámico elástico lineal.

Como objetivos específicos se mencionan los siguientes:

- Identificar y clasificar los posibles mecanismos de falla en puentes durante terremotos.
- Estimar la aceleración del terreno con base en relaciones de atenuación.
- Generar un espectro de respuesta de aceleraciones para el sitio.
- Describir las características estructurales fundamentales del puente a partir de los planos constructivos y del reporte de inspección.
- Calcular las constantes de rigidez de resortes equivalentes para simular la interacción suelo-estructura.
- Desarrollar un modelo reticular ("stick model") del puente en el programa SEISAB
- Obtener las demandas de fuerzas y desplazamientos por medio de un análisis dinámico, y compararlos con la capacidad de los elementos estructurales
- Recomendar posibles esquemas de reforzamiento.

## 1.3 Alcance y limitaciones

El análisis a realizar tiene un enfoque determinístico, ya que se evalúa la vulnerabilidad del puente sobre el Río Nosara ante un terremoto de localización y magnitud definidas, sin tomar en cuenta el efecto de otras fuentes sísmicas.

No se realiza ningún estudio de suelos en el sitio del puente. La información o parámetros del terreno necesarios para el modelo del puente se estiman con base en los registros de las perforaciones realizadas por el Laboratorio de Materiales del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, o en su defecto se asumen como valores promedio recomendados por las metodologías utilizadas, para determinar la interacción suelo-estructura

Los resultados de fuerzas y desplazamientos para los diferentes elementos del puente se derivan de un análisis dinámico de tipo elástico lineal. El uso de un enfoque elástico constituye una aproximación del comportamiento real del puente, ya que durante un terremoto existen diferentes fuentes que pueden dar origen a una respuesta no lineal. Estas incluyen entre otras:

- El suelo, cuyo comportamiento influye directamente en el nivel de deformación de la estructura.
- Impacto entre elementos adyacentes, en juntas de expansión.
- Comportamiento complejo de los bastiones.

Con base en los resultados del análisis, se realiza la revisión estructural de los siguientes puntos:

- Desplazamientos relativos máximos entre superestructura y subestructura.
- Capacidad en flexocompresión y cortante de la columna de la pila central.
- Capacidad soportante del suelo y resistencia al volcamiento de la pila
- Resistencia de conexiones y sistemas de anclaje.

Las propuestas de reforzamiento estructural son esquemáticas y no se adjuntan planos constructivos de las mismas. El análisis de la respuesta sísmica del modelo para el puente reforzado queda fuera del alcance de este proyecto.

#### 1.4 Metodología

Para la realización de este proyecto se siguió la secuencia de pasos que se detalla a continuación:

- Clasificación de los tipos de fallas estructurales más comunes en puentes, con base en la experiencia durante terremotos pasados.
- Delimitación de la fuente sísmica, estimación de la aceleración del terreno y creación de un espectro de respuesta específico para las características del terremoto de Nicoya con base en las relaciones de atenuación desarrolladas por Youngs
- Cálculo de las propiedades de sección de la superestructura y de la pila.
- Cálculo de las constantes de rigidez de los resortes equivalentes en las placas de fundación, con base en la teoría del semiespacio elástico.
- Estimación de la rigidez longitudinal y transversal de los bastiones debido a la masa de suelo, según la metodología recomendada por el Departamento de Transportes de California ( CALTRANS ).
- Creación de un modelo tipo reticular ("stick model") del puente en el programa de cómputo SEISAB.
- Aplicación del análisis dinámico al modelo.
- Revisión de elementos con base en los resultados obtenidos en el análisis.
- Elaboración de conclusiones y recomendaciones.

## Capítulo 2

### Vulnerabilidad sísmica y tipos de daños en puentes

#### 2.1 Generalidades

Debido a su simplicidad estructural, los puentes tienden a ser particularmente vulnerables a daño o incluso colapso total, cuando se ven sujetos a sismos de gran magnitud. El desempeño deficiente de muchos puentes en terremotos recientes en regiones de California y Japón, ha sido objeto de estudio durante los últimos años, y en muchos casos se ha atribuido a la filosofía de diseño adoptada o a una falta de atención en los detalles estructurales.

Cuando se trata de edificios, las fallas estructurales no siempre tienen consecuencias fatales, puesto que la alta redundancia propia de estos sistemas permite una redistribución de esfuerzos si es necesario. Por otro lado, los puentes generalmente presentan poca o ninguna redundancia en su sistema estructural, por lo que la falla en un elemento o en la conexión entre tales, pueden provocar daño severo o colapso de la estructura.

Para estar en capacidad de evaluar de manera adecuada la vulnerabilidad sísmica de un puente y plantear estrategias de reforzamiento, es esencial entender de manera clara los tipos de fallas que pueden darse en la estructura. No hay mejor manera para desarrollar esta comprensión que repasar y clasificar de una manera sistemática los tipos de fallas y daños que han ocurrido en diferentes puentes durante terremotos recientes.

#### 2.2 Tipos de daños en puentes debidos a terremotos

##### 2.2.1 Desplazamientos

La subestimación de los desplazamientos por sismo basados en un cálculo por teoría elástica, usando la rigidez de las secciones brutas y valores bajos de fuerzas laterales podrían tener la consecuencia directa de que las longitudes de los bancos de asiento resulten muy cortas o que la separación lateral entre estructuras adyacentes no sea la adecuada. Las fallas debidas a desplazamientos excesivos de la estructura pueden deberse a diferentes causas, algunas de las cuales se detallan a continuación.

##### a) Falla en los claros debido a desbancamiento en juntas no restringidas

Hay muchos ejemplos de fallas en puentes causadas por el desplazamiento de los elementos en su dirección longitudinal, excediendo la longitud del banco de apoyo. Esto resulta en un desbancamiento de la superestructura si ésta no está restringida adecuadamente. En muchos casos, la superestructura cae completamente, provocando un colapso espectacular. Este tipo de falla es más frecuente en puentes con elementos simplemente apoyados en varios tramos, como el caso del puente sobre el Río Nosara, donde los apoyos podrían moverse de manera desfasada incrementando el desplazamiento relativo en la junta. Durante el terremoto de Limón en 1991, se presentaron varios ejemplos de este efecto en puentes. En el puente sobre el Río Estrella, los

dos claros principales formados por armaduras de acero con tablero inferior presentaron desplazamientos excesivos que provocaron el colapso de la estructura (ver fig. 2.1) Para este puente se utilizaron dispositivos de soporte pendular en las conexiones entre la superestructura y la pila, los cuales han sido considerados como los soportes más vulnerables ante demandas sísmicas (ref. 2.1) , debido a que tienen una dimensión vertical grande, son difíciles de restringir, y pueden volverse inestables después de un movimiento limitado y volcarse. En la figura 2.2 se aprecia un detalle de soporte de expansión que presentó desplazamientos grandes en el puente sobre el Río Estrella.

El puente sobre el Río Chirripó también presentó una falla por restricción inadecuada durante el terremoto de Limón. De los ocho claros de este puente, los seis tramos internos tienen una superestructura continua a base de vigas de acero, mientras que los dos más pequeños de los extremos son simplemente apoyados. Los elementos del claro del extremo oeste colapsaron debido a la pérdida de soporte en la pila. En la figura 2.3 puede apreciarse un detalle de la conexión donde se dio la falla, y puede apreciarse la ausencia de dispositivos de restricción horizontal. En el puente sobre el Río Nosara, la conexión de la superestructura con la pila es semejante a la mostrada en cuanto a la ausencia de restricción longitudinal , aunque el tipo de apoyo es elastomérico. La estructura fue temporalmente reparada mediante el levantamiento del tramo colapsado, usando material de relleno y colocándolo en los soportes originales en la pila, para poder restablecer el tránsito en la vía. Los trabajos posteriores se encargaron de hacer más grande la fundación de la pila para colocar cuatro columnas de acero, con el fin de proveer soporte adicional a las vigas en este punto. El colapso debido a la pérdida de soporte enfatiza la necesidad de proveer dispositivos de restricción longitudinal entre dos tramos adyacentes simplemente apoyados.

#### **b) Amplificación de los desplazamientos debido a efectos del suelo**

Los puentes que están construidos sobre suelo suaves o licuables tienen un mayor riesgo de desbancamiento, ya que en éstos se podría amplificar la respuesta vibratoria del sistema estructural. Cuando las pilas están soportadas por pilotes sobre limos arenosos saturados o arenas limosas puede ocurrir el fenómeno de licuefacción, dando por resultado una pérdida en la capacidad de soporte de los pilotes o el sistema de fundación utilizado , con desplazamientos verticales y/o laterales excesivos no asociados directamente con la respuesta sísmica. Los puentes con claros simplemente apoyados son particularmente susceptibles a falla como producto de la licuefacción.

El puente sobre el Río Viscaya sufrió colapso total durante el terremoto de Limón. La pila central se volcó debido a la falla de los pilotes por licuefacción, causando el colapso de dos tramos, como se observa en la figura 2.5. Cada tramo simplemente apoyado de este puente consistía de una losa de tablero de 18 cm de espesor construida de manera compuesta con dos vigas I postensadas, una configuración para la superestructura semejante a la del tramo mayor del puente sobre el Río Nosara. En la figura 2.6 se muestra un detalle del dispositivo de restricción usado en la pila que no presentó colapso total, el cual consiste de una conexión articulada cerca de la parte inferior de las vigas. El puente estaba soportado por pilotes de

concreto reforzado de sección cuadrada de 36 cm. Los bastiones contaban con tres pilotes verticales y tres inclinados ( 1.5 ), mientras que las pilas tenían seis pilotes verticales.

El puente sobre el Río Bananito también sufrió daños considerables durante el terremoto de Limón (1991) (ver fig 2.7) . Este puente con soportes sesgados en los bastiones, tenía dos tramos simplemente apoyados de 25 y 28 m. con vigas I postensadas (ref 2.2). Durante el sismo se dio una pérdida de soporte en la pila central. Los detalles del soporte y dispositivo de restricción se muestran en la figura 2.8 . Las vigas I tenían una placa en su parte inferior, la cual descansaba a su vez en una almohadilla de neopreno, y estaba anclada al soporte de concreto por pernos de 32 mm de diámetro y 30 cm de longitud. Con el fin de permitir movimiento horizontal sobre la pila central, los huecos de los pernos de anclaje tenían una muesca u "ojo chino" en la dirección del eje longitudinal del puente. Este detalle de anclaje proveía restricción horizontal para desplazamientos que se excedieran cerca de 15 mm

La pérdida de soporte fue causada por la ruptura de los pernos de anclaje (ref. 2.2). El detalle de anclaje en los bastiones era idéntico al mostrado en la figura 2.8 , excepto por que en lugar de un ojo chino de 66 mm de largo, el perno estaba anclado en un hoyo de 35 mm de diámetro, prácticamente sin permitir desplazamiento longitudinal. Ambos bastiones estaban fundados sobre arena de grano fino, y tanto éstos como la pila tenían como sistema de fundación pilotes de concreto reforzado de sección cuadrada de 36 cm. En contraste con el puente sobre el Río Viscaya, el puente sobre el Río Bananito tenía cuatro pilotes más en la pila central, siendo todos inclinados con una pendiente 1:10.

La diferencia de los detalles en las pilas y los pilotes junto con la diferencia en los detalles de restricción longitudinal explican las razones para los distintos mecanismos de falla que presentaron estas dos estructuras. El puente sobre el Río Viscaya con su relativamente débil sistema pila-pilote y su relativamente resistente dispositivo de restricción lateral, sufrió la falla en una de sus pilas. En contraste, el puente sobre el Río Bananito, con una sistema fuerte pila-pilote y su relativamente más vulnerable dispositivo de restricción, falló en el anclaje de las vigas, causando la pérdida de soporte de los claros, y el consiguiente colapso.

Debe notarse que en el puente sobre el Río Bananito, los apoyos en bastiones y pilas se hallaban sesgados respecto al eje longitudinal del puente. Se ha observado que claros sesgados desarrollan mayores desplazamientos que los tramos alineados (ref. 2.3), como consecuencia de la tendencia física del tramo sesgado a rotar en la dirección tal que disminuye su sesgo. Este comportamiento se debe a una combinación de respuesta longitudinal y transversal.

### **c) Hundimiento y rotación del bastión**

Esta falla se presenta generalmente en presencia de suelos blandos y rellenos no consolidados sobre los que se apoya el bastión. La aceleración del terreno durante el sismo puede provocar un aumento en la presión de tierra sobre el bastión. El impacto del puente con el bastión pueden generar presiones pasivas altas, las cuales a su vez inducen un incremento en las presiones laterales en niveles por debajo del punto de impacto de la superestructura. Si el suelo o relleno está mal compactado, este tiende a hundirse hacia la superestructura, empujando la parte inferior del bastión. Como en la parte de arriba el movimiento del bastión se ve limitado por el

contacto con la superestructura, entonces tiende a rotar sobre este punto, como se muestra en la figura 2.9. Las consecuencias más comunes de este tipo de falla es el daño de la parte superior del muro frontal del bastión debido al impacto de la superestructura, y el daño al sistema de soporte con pilotes, si la rotación es muy grande. Durante el terremoto de Limón, esta falla se presentó entre otros, en los puentes sobre los Ríos Cuba y Blanco, como se muestra en las figuras 2.10 y 2.11 respectivamente.

## 2.2.2 Daños en columnas

### a) Falla por flexión

Se pueden presentar problemas en el comportamiento de la estructura, si en el diseño se usan niveles bajos para los valores de fuerzas laterales por sismo. Se ha apreciado que la respuesta elástica excede a veces el cien por ciento del peso de la estructura, cuando las fuerzas de diseño se especifican por lo general muy por debajo de esta magnitud. Si se utiliza análisis elástico, tal discrepancia no resulta tan grave debido al enfoque conservador propio de este método para el diseño a flexión de la columna. Sin embargo, la ausencia de detallado en los elementos que garantice una ductilidad adecuada puede ser de considerable riesgo.

La distribución del acero de refuerzo en el elemento es de vital importancia para que pueda responder de manera adecuada ante la demanda sísmica. Si se traslapa el refuerzo longitudinal de la columna inmediatamente por encima de la fundación, y además se utiliza una longitud de traslape inadecuada, el refuerzo no va a poder desarrollar su resistencia. Durante el terremoto de Kobe, en 1995, cerca de 50 columnas del Hanshin Expressway fallaron debido a deficiencias en la soldadura del refuerzo longitudinal en puntos críticos cerca de la base de la columna.

Para que una estructura pueda resistir sismos fuertes, debe poder desarrollar una adecuada ductilidad, es decir, la capacidad de deformarse por varios ciclos de desplazamientos varias veces mayores al desplazamiento de fluencia, sin pérdida sensible de resistencia. Si el nivel de ductilidad no es adecuado, las deformaciones a compresión en el concreto en las zonas de rótulas plásticas puede exceder la capacidad de deformación inconfina del concreto, y el recubrimiento se revienta. Aunque el núcleo de concreto esté bien confinado por aros, el agrietamiento puede llegar rápidamente hasta él, provocando el pandeo de acero longitudinal. Esto puede provocar una degradación seria de la resistencia, e incluso, incapacidad para sostener la carga gravitacional.

Otro error en el diseño o en el proceso constructivo que puede volver vulnerable la columna, es el corte prematuro del refuerzo longitudinal. Los cortes de varilla basados sólo en la envolvente de momentos, no consideran el efecto de desplazamiento del diagrama debido al agrietamiento por tensión diagonal. Durante el terremoto de Kobe, muchas otras columnas del Hanshin Expressway fallaron por este motivo (fig. 2.12). Si el corte de varilla no es adecuado, se obliga al gozne plástico a formarse por arriba de la base, donde no se beneficia del confinamiento que le provee la fundación.

## b) Falla por cortante

La resistencia a cortante de la sección de una columna de concreto resulta de la combinación de varios mecanismos, como transferencia del cortante por compresión del concreto, el efecto de traba entre los agregados y la acción de arco sostenida por las cargas axiales. En general, la falla por cortante es frágil e implica una degradación muy rápida de la resistencia, por lo que deformaciones inelásticas por cortante no son apropiadas para garantizar una respuesta dúctil de la estructura ante el sismo. Las columnas cortas son en particular vulnerables debido a la razón grande de cortante respecto a momento. Durante los terremotos de San Fernando, en 1971, Northridge en 1994, y Kobe, en 1995, se presentaron gran cantidad de fallas por cortante en estructuras de puentes. Muchas de las fallas ocurridas durante el terremoto de San Fernando, permitieron llegar a la conclusión de que la resistencia al cortante en las regiones donde se forman goznes plásticos es menor que en el resto del elemento. Esto es una consecuencia de la reducción en el efecto de transferencia del cortante por interacción de los agregados en la zona de gozne plástico conforme aumenta el espesor de las grietas por flexión-cortante, al darse rotaciones inelásticas grandes. (ref. 2.3). En la figura 2.13 se observa la falla por cortante en una columna en el cruce de Mission/Gothic en California, durante el terremoto de Northridge.

### 2.2.3 Fallas en las uniones

Las juntas viga-columna en pilas pueden ser vulnerables a falla por cortante. La transferencia de fuerzas en los miembros a través de las conexiones resulta en fuerzas horizontales y verticales de corte en el nudo, que puede ser varias veces más grandes que los cortantes en los propios miembros conectados. Ha sido común que estas fuerzas de cortante generadas en los nudos no sean consideradas en el diseño de puentes. No es sino hasta recientemente, que se ha considerado un diseño por cortante en las uniones apropiado. El patrón de agrietamiento por cortante generalmente se presenta como en la figura 2.14. Cuando el refuerzo longitudinal de la columna se ancla simplemente por una extensión recta de la varilla dentro del nudo, el mecanismo de transferencia de momentos de la columna a la viga no es obvio, particularmente para momentos que tienden a abrir la junta.

### 2.2.4 Falla en las fundaciones

Comparativamente con otros tipos de daños, hay pocos reportes de fallas en la cimentación causadas por la acción de sismos. Esto puede deberse a que no se desarrollan las fuerzas máximas permitidas debido a una falla prematura en la columna por flexión o cortante, o debido a un efecto de volcamiento de la placa que evita fuerzas sísmicas excesivas. Otro motivo es que simplemente sea difícil acceder a ellas luego de un sismo para evaluar el daño producido.

Según Priestley (ref. 2.3) algunos de los tipos de deficiencias que pueden hacer vulnerable la cimentación son:

- Resistencia inadecuada a flexión, debido a la ausencia de refuerzo superior
- Detallado inexistente para desarrollar resistencia a cortante.



- Refuerzo inadecuado de la junta columna-placa, donde se desarrollan fuerzas cortantes considerables
- Anclaje y desarrollo deficiente del refuerzo de la columna dentro de la placa.



**Figura 2.1: Colapso de los dos tramos principales del puente sobre el Río Estrella, durante el terremoto de 1991.**

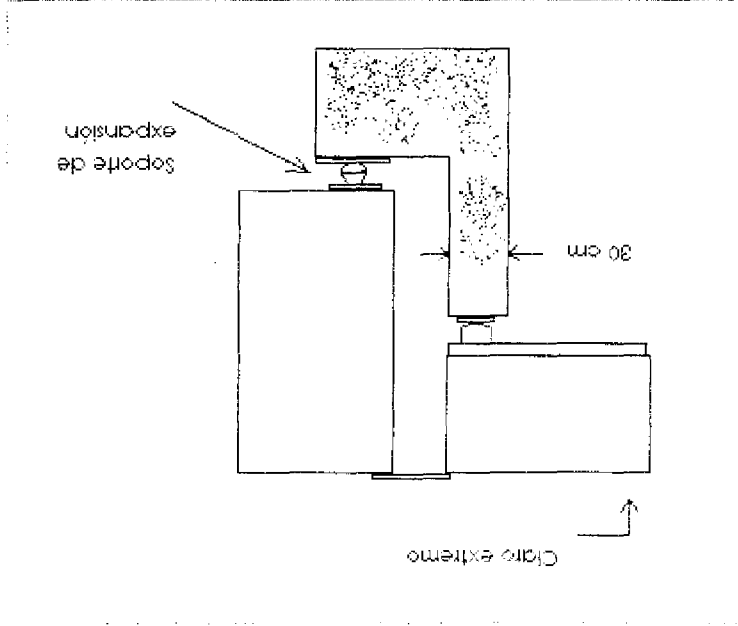


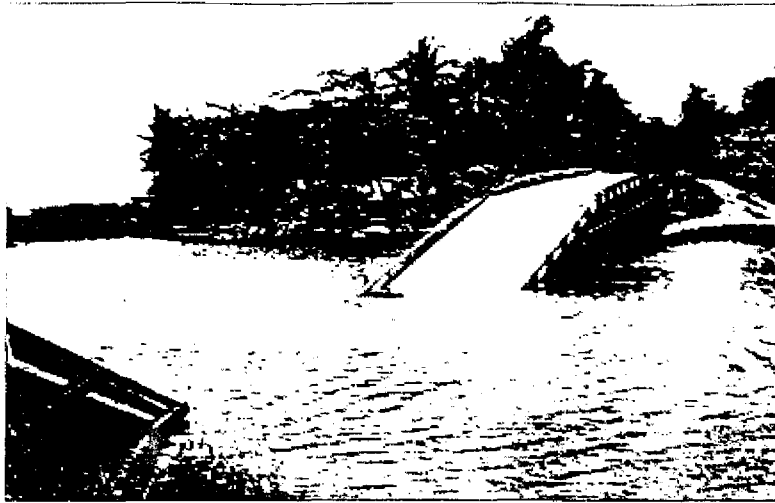
**Figura 2.2 : Falla en conexión, puente sobre el Río Estrella.**



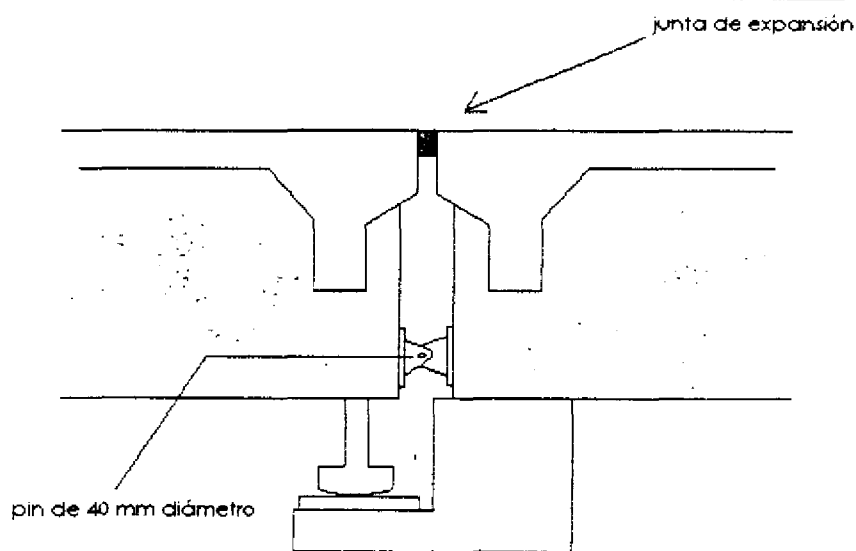
Figura 2.4 : Colapso del tramo final del puente Chirripó por pérdida de soporte en la pila.

Figura 2.3 : Detalle de conexión en puente Chirripó que falló durante el terremoto de Limón.





**Figura 2.5 : Colapso de dos tramos del puente sobre el Río Viscaya por falla en la pila central.**



**Figura 2.6 : Detalle de unión entre vigas en pila del puente sobre el Río Viscaya.**



Figura 2.7 : Colapso del puente sobre el Río Bananito.

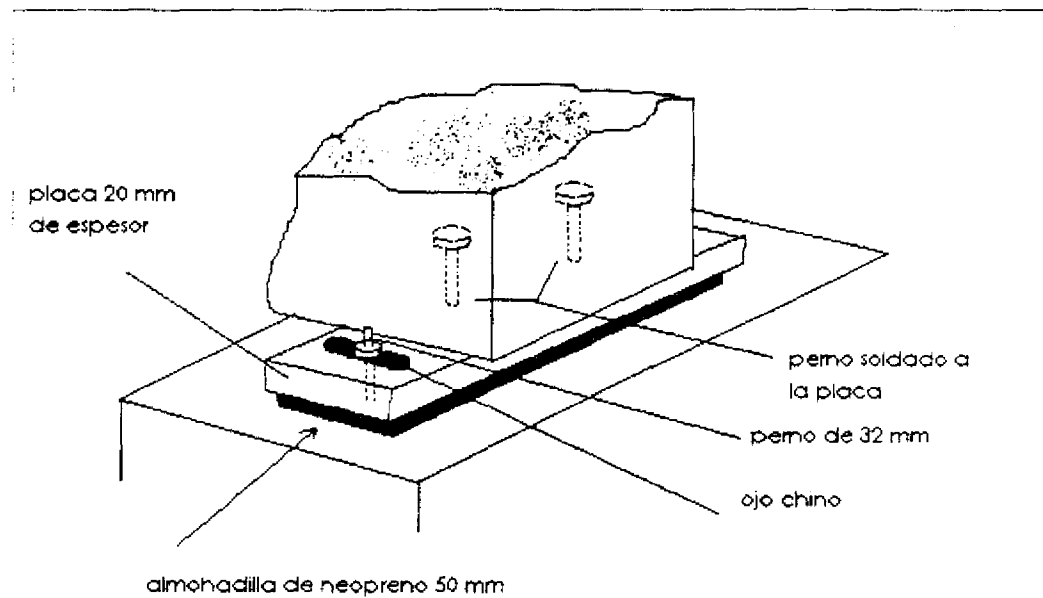
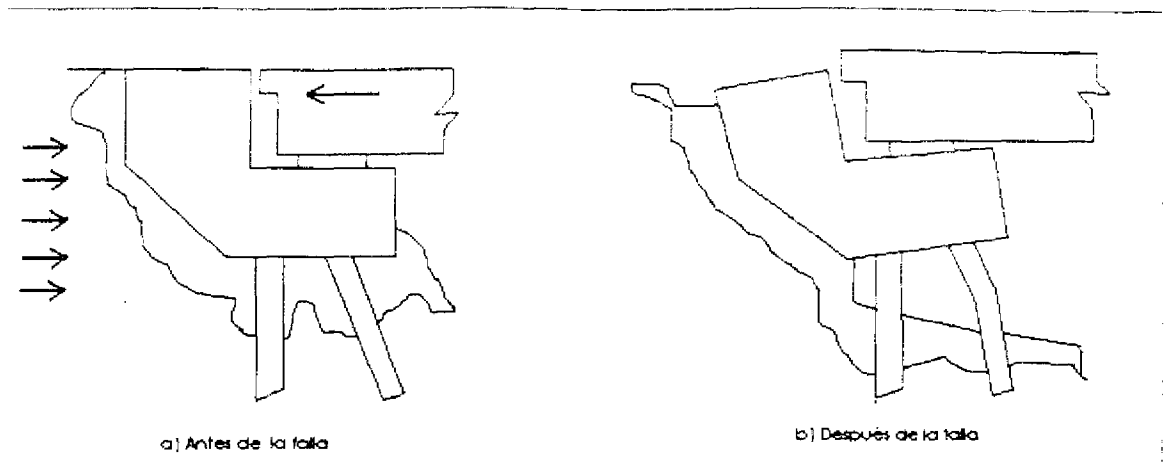


Figura 2.8 : Detalle de apoyo en pila central del puente sobre el Río Bananito.



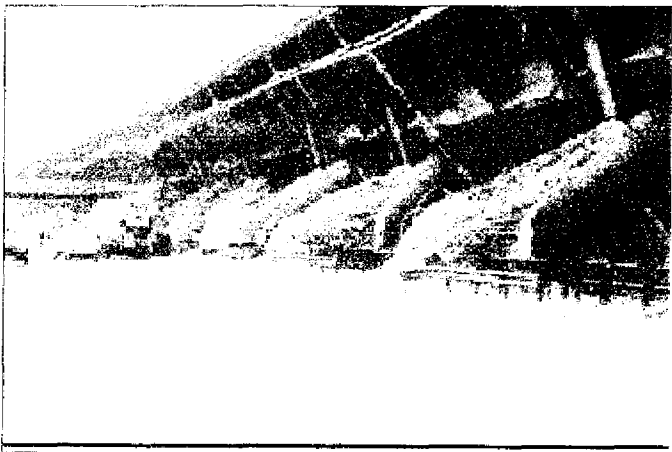
**Figura 2.9 : Hundimiento y rotación del bastión debido a las presiones generadas en el terreno por el sismo.**



**Figura 2.10 : Rotación del bastión en el puente sobre el Río Cuba. Obsérvense los pilotes levantados y quebrados.**



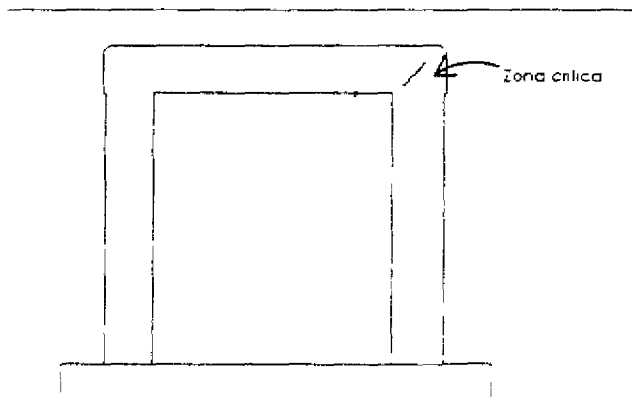
**Figura 2.11 : Desplazamiento y volcamiento de bastión en puente sobre el Río Blanco, durante el terremoto de Limón, 1991.**



**Figura 2.12 : Falla a flexión sobre la base de las columnas en el Hanshin Expressway, debido a corte prematuro del refuerzo longitudinal y confinamiento inadecuado. Terremoto de Kobe, 1995.**



**Figura 2.13 : Falla por cortante en columna.  
Terremoto de Northridge, 1994.**



**Figura 2.14: Patrón típico de agrietamiento  
debido a cortante en unión viga-columna.**