

EFFECTO DEL ARRIOSTRAMIENTO DIAGONAL EN EL COMPORTAMIENTO DE UN EDIFICIO DE ACERO SOMETIDO A ESFUERZOS SISMICOS

ray w. clough y victor a. jenschke
boletín de "seismological society of america". vol. 53. n° 2, pp. 389-401 febrero 1963.
traducción del ingeniero señor salomón chornik

Nota de la Redacción:

Cumple la Dirección de esta Revista en agradecer al Arqto. Sr. Oreste Depetris por cuyo gentil intermedio hemos recibido para su publicación en castellano el estudio del Prof. Clough y el Ingeniero Víctor A Jenschke.

SUMARIO

El terremoto del 21 de Mayo, 1960, provocó la falla del arriostramiento diagonal de dos edificios de acero de la Universidad de Concepción.

La estructura no arriostrada resistió nuevamente el terremoto del 22 de Mayo sin daño apreciable, lo que pone en tela de juicio la conveniencia de tal arriostramiento. Para abordar el problema se hizo un estudio con un computador electrónico del efecto resistente del arriostramiento diagonal estando sometidos los edificios a movimientos registrados en tres diferentes terremotos. Se concluyó que para algunos terremotos el arriostramiento puede ser beneficioso. No obstante para otros casos, el arriostramiento da lugar a mayores esfuerzos en la estructura que exceden el aumento de resistencia determinado por el arriostramiento, de lo que resulta contraproducente su empleo.

INTRODUCCION

Se han desarrollado diversos sistemas estructurales para dar a los edificios la resistencia necesaria a los esfuerzos sísmicos.

Los diafragmas verticales o muros de rigidez, los pórticos, las armaduras verticales, son los más frecuentes. En la práctica corriente, con la autorización que otorgan las normas actuales (como el Uniform Building Code, 1961) se hace uso de un sistema combinado que consiste en un aporcado rígido dotado de resistencia lateral adicional mediante muros o arriostramiento lateral en determinados paneles. Con esta disposición se consiguen dos vías para la transferencia de las fuerzas laterales al terreno, proporcionando la estructura más flexible, una segunda línea de defensa si el sistema de arriostramiento rígido llega a fallar.

Debido a la disparidad entre las rigideces de los dos sistemas se hace evidente

que la resistencia total de la estructura combinada no puede ser calculada simplemente sumando las resistencias de los sistemas aislados. Se enjuicia así el principio de las rigideces relativas, aplicado aquí como en cualquier sistema estáticamente indeterminado, así como la efectividad del arriostramiento diagonal en el esfuerzo de la estructura. Cuando la estructura está sometida a cargas dinámicas sísmicas el valor del arriostramiento es aún más discutible, porque en tales condiciones el esfuerzo sísmico total aumenta a medida que se incrementa la rigidez de la estructura. Así pues un sistema de arriostramiento puede aumentar la probabilidad de falla en algunos casos.

El objetivo de la investigación descrita en este informe fue la determinación, al menos para un caso específico del efecto de un arriostramiento diagonal, suplementario en la resistencia sísmica de un edificio de acero. La investigación surgió de la observación de los daños ocurridos en dos edificios de estructura de acero de la Universidad de Concepción, durante los sismos de 1960. No se pretende exactamente determinar la causa de los daños producidos en estas estructuras, porque es poco lo que se sabe de los movimientos sísmicos a los cuales fueron sometidos los edificios. Más bien este es un estudio del efecto que ciertos movimientos sísmicos registrados previamente tendrían en estructuras semejantes a éstas, acentuando el comportamiento comparativo con o sin sistemas de arriostramiento.

COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO

Descripción de la estructura

Antes de presentar los estudios analíticos que se han hecho es de interés describir las estructuras objeto de investigación y examinar su comportamiento sísmico. Estas estructuras albergaban las Escuelas de Ingeniería y Química de la Universidad



Vista general del edificio con estructura de acero de la Universidad de Concepción. Foto de K. V. Steinbrugge.

de Concepción. Son estructuras similares (la única diferencia es que el edificio de la Escuela de Química era algo más largo) y tienen el interés de constituir los primeros edificios de estructura rígida de acero construidos en Chile. Los edificios tienen tres pisos de planta estructural muy simple, como se indica en las figuras 1 y 2. Las columnas son de sección cuadrada hueca ejecutadas con plancha doblada formando canales, soldadas en sus bordes. De la misma manera las vigas y viguetas que soportan las losas de techos y piso eran también canales soldadas de plancha doblada. Las estructuras son poco corrientes en cuanto se refiere a la utilización de los pisos pues el primero es enteramente abierto.

En el diseño original se procuró obtener la resistencia sísmica a partir del marco rígido y para tal fin se calcularon las uniones de vigas a columnas capaces de desarrollar la total resistencia a flexión de sus miembros. Sin embargo, los análisis preliminares indicaban que no era económico resistir todo el esfuerzo horizontal con los marcos, por lo que se decidió proveer de arriostramientos diagonales suplementarios en el primer piso. Las dimensiones generales del Edificio de Ingeniería y la disposición del arriostramiento se muestra en figura 2.

Efectos observados de los terremotos

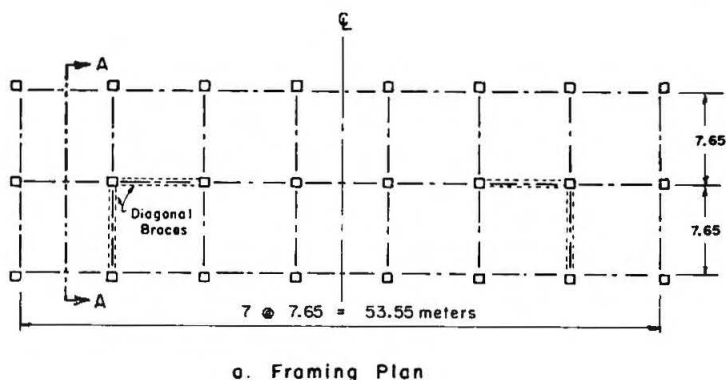
La zona de Concepción fue azotada por dos movimientos de gran intensidad durante los terremotos de Mayo de 1960. El primero ocurrido en la mañana del 21 de Mayo ocasionó la ruptura de los arriostramientos diagonales en ambos edificios

según se informó. Por lo tanto en el momento del segundo choque en la tarde del 22 de Mayo únicamente la estructura aporricada podía resistir los esfuerzos horizontales. Cuando uno de los autores de este informe llegó al lugar del suceso las diagonales habían sido ya retiradas, (la figura 3 muestra el sitio donde una de las diagonales estaba unida) y por lo tanto era imposible inspeccionar las fracturas que según se informó ocurrió en el material de la soldadura, de naturaleza frágil.

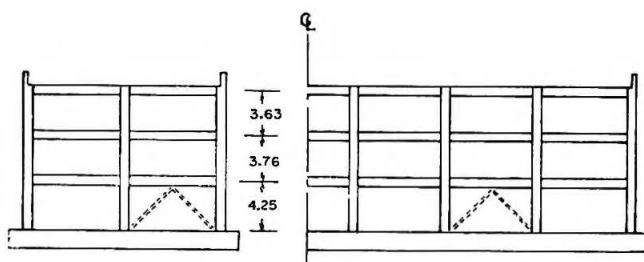
La magnitud de las fuerzas a la que los edificios estuvieron sometidos después de la fractura de los arriostramientos está evidenciada por el estiramiento de los pernos de anclaje en la base de los pilares. Todos los pernos mostraron deformaciones similares de 4 a 6 milímetros. Otras indicaciones de desplazamientos de gran magnitud en las estructuras fueron la trituración producida entre el edificio de Química y un edificio de concreto adyacente; fractura de ventanas en el muro cortina exterior, uniones rotas de la escalera, etc. La indicación más positiva de la amplitud total del movimiento fue proporcionada por las raspaduras hechas por el extremo fracturado de una diagonal en la superficie inferior de la viga a la que estaba soldada. La longitud total de la raspadura fue de 12 cms. implicando desplazamiento del orden de los 6 cms. en cada dirección.

ESTUDIO ANALITICO Propiedades de la estructura

Se eligió como estructura modelo para los estudios analíticos el Edificio de Ingeniería. Pero en vez de hacer un análisis



a. Framing Plan



b. Section A-A

c. Elevation View

Esquema estructural y dimensiones.

sis exacto de esta estructura se combinaron las 8 estructuras transversales en una sola estructura con una resistencia y rigidez equivalente. Así pues se trató con métodos analíticos exactos, está única estructura que soportó el peso de la estructura completa. (fig. 2 b).

En el hecho se consideraron tres estructuras separadas: el marco rígido (sin ningún arriostramiento), el mismo marco con arriostramientos en los tres pisos. Se incluyó este último caso porque tal sistema de arriostramiento se ha instalado ahora en la estructura prototipo, como se ve en la fig. 4 a. La rigidez del marco rígido básico se calculó por medio de procedimientos de análisis estructural con matrices empleando un computador digital. La rigidez de los sistemas arriostrados se determinó simplemente agregando la rigidez de los arriostramientos a la rigidez del marco como si los arriostramientos y marcos actuasen independientes. Las matrices de rigidez para los tres sistemas se presentan en la Tabla I junto con la matriz de masa (la misma en los tres casos).

Con el fin de establecer una medida de la resistencia sísmica de las tres estructuras las fatigas en cada una de ellas fueron calculadas como debidas a esfuer-

zos horizontales distribuidos según una fórmula del tipo del Uniform Building Code.

$$F_x = V_{\xi} \frac{W_x \cdot h_x}{W_x \cdot h_x}$$

en el cual

- F carga al nivel x
- W peso al nivel x
- h altura del nivel x sobre la base
- V esfuerzo de corte basal = C. W.
- W peso total de la estructura
- C coeficiente de corte basal.

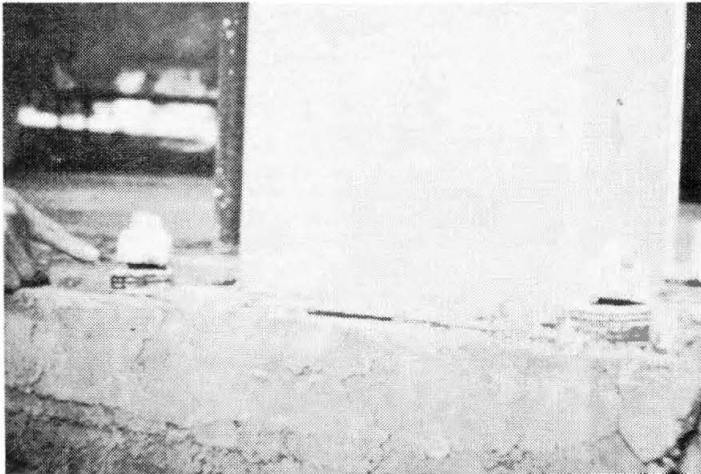
T A B L A I
Propiedades básicas estructurales

Matriz de masa

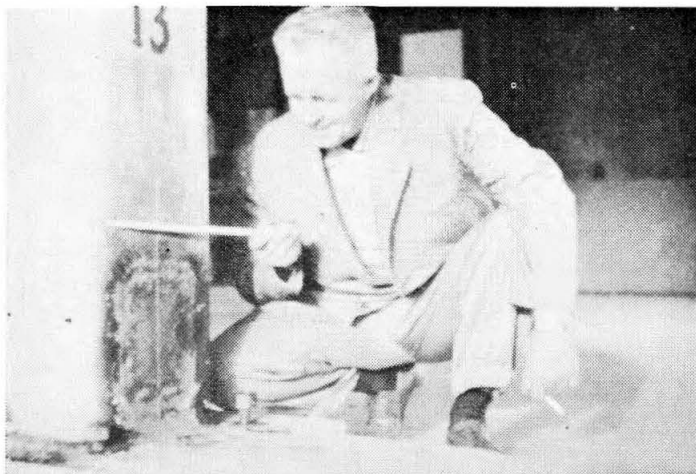
$$M = \begin{bmatrix} 310 & 0 & 0 \\ 0 & 538 & 0 \\ 0 & 0 & 538 \end{bmatrix} \quad \text{toneladas métricas}$$

Matrices de rigidez

$$K = \begin{bmatrix} 68 & -93 & 28 \\ -93 & 236 & -178 \\ 28 & -178 & 292 \end{bmatrix} ; \begin{bmatrix} 68 & -93 & 28 \\ -93 & 236 & -178 \\ 28 & -178 & 597 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 216 & -241 & 28 \\ -241 & 606 & -399 \\ 28 & -399 & 777 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{tons} \\ \text{cm} \end{matrix}$$



Estiramiento del perno de anclaje. Foto de K. V. Steinbrugge.



Encuentro de la diagonal con el pilar. Foto de K. V. Steinbrugge.

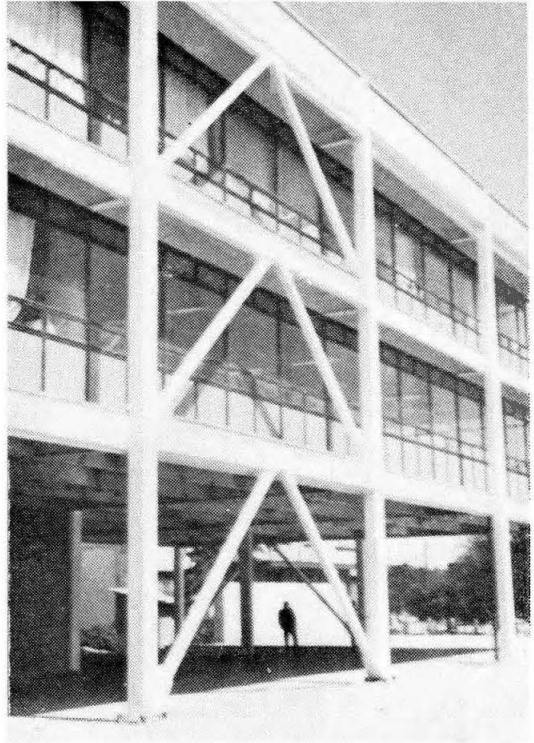
Diagonales de arriostramiento en la estructura reparada. Foto de D. E. Hudson.

Por este procedimiento se encontró que los coeficientes de corte basal requeridos para producir fluencia (en el punto más altamente fatigado) en la estructura sin arriostramientos fue de 16%, en la estructura en el primer piso arriostrado fue de 23% y en la estructura con los tres pisos arriostrados fue de 44%. Como el Uniform Building Code exige un coeficiente básico de corte entre 5 y 8% en las distintas estructuras es evidente que las estructuras son extraordinariamente resistentes. También es claro que el arriostramiento es sumamente efectivo en el aumento de la resistencia estática. Una mayor indicación de la efectividad estática del arriostramiento está dada por la comparación de las deformaciones producidas por la distribución de las cargas. Con un coeficiente básico de corte de 5% en cada caso la deformación en el piso superior era de 2,25 cm. en la estructura sin arriostramiento, 1,41 cm. en la estructura con un piso arriostrado y 0,51 cm. en la estructura arriostrada totalmente.

Método de análisis

La respuesta de estas estructuras idealizadas a específicos movimientos del terreno fue calculada por el método de superposición nodal. Usando un programa standard de computador digital. El procedimiento envuelve una determinación de los modos fundamentales de vibración y frecuencia de las estructuras, con los resultados que se muestran en figura 5. La respuesta de cada modo al movimiento sísmico dado fue determinada entonces por un cálculo numérico de la integral de Duhamel. Para todos los modos se consideró un amortiguamiento crítico de 5%. Finalmente la respuesta total de la estructura se obtuvo por superposición de las contribuciones de los tres modos, de vibración para cada caso.

Se obtuvo dos tipos de información: desplazamientos de piso y esfuerzos en los elementos. Cada esfuerzo se dividió por el esfuerzo de fluencia en ese lugar, de modo que los resultados de las fuerzas deben entenderse relativos a los valores de fluencia. Así pues, una comparación directa de estas razones indica cual es el punto crítico en la estructura y la razón en el punto crítico muestra directamente a qué fracción de la carga de fluencia está sometida la estructura. Tanto los des-



plazamientos por piso como los esfuerzos en los elementos se calcularon durante el desarrollo completo del movimiento sísmico. Los valores máximos de cada resultado, se eligieron como valores significativos para delinear la envolvente.

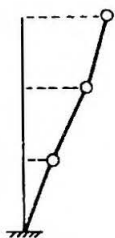
Movimientos sísmicos

Puesto que se desconocía el movimiento sísmico real al cual estuvo sometida la estructura prototipo, se decidió hacer uso de tres registros de terremotos en los estudios analíticos. Estos correspondieron al terremoto de El Centro 1940 (componente N° 5) Olimpia 1949 (E. O.) y el Centro 1934 (E. O.). Para evitar pérdidas de tiempo de computación se decidió utilizar solamente la parte más intensa (6 a 8 segundos) de cada registro. No se pretende que los resultados coincidan plenamente con los que se habrían obtenido con el sismo completo, pero no hay duda que ellos son igualmente representativos de condiciones sísmicas posibles.

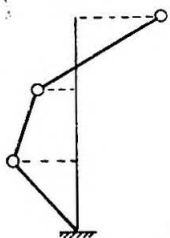
Resultados

La intención primitiva de este estudio era simplemente someter las tres estructuras realizadas a los movimientos sísmicos elegidos y calcular el máximo esfuerzo relativo en los elementos de cada estructura y para cada caso. Una comparación de los esfuerzos relativos para las tres estructuras indica cual tiene la mayor resistencia sísmica. Sin embargo, los resultados en las tres estructuras sometidas a los tres movimientos sísmicos tipos no permitieron obtener conclusiones respecto de la efec-

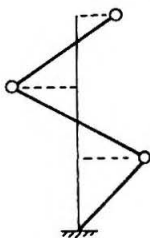
NO BRACING



$T_1 = 1.06$ secs

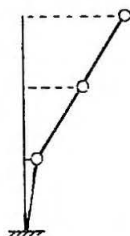


$T_2 = 0.38$ secs

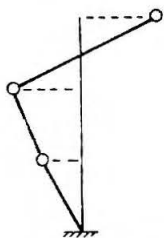


$T_3 = 0.21$ secs

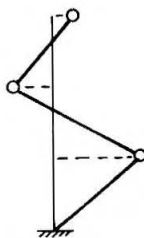
ONE STORY BRACED



$T_1 = 0.80$ secs

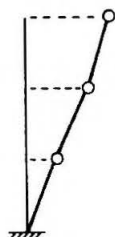


$T_2 = 0.30$ secs

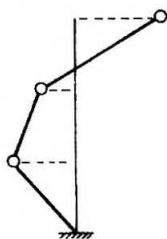


$T_3 = 0.18$ secs

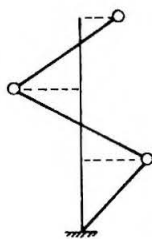
THREE STORIES BRACED



$T_1 = 0.52$ secs



$T_2 = 0.20$ secs



$T_3 = 0.13$ secs

Medios de vibrar y períodos de vibración.

tividad comparativa de los arriostramientos, pues una estructura diferente desarrolló el mayor esfuerzo con un movimiento sísmico distinto. Se atribuyó este raro comportamiento a la forma caprichosa del espectro de respuesta para estos sísmos, y esos pequeños cambios en los períodos de vibración de las estructuras darían probablemente resultados diferentes. Entonces para eliminar este accidental "efecto de período de vibración" en el análisis se decidió variar el período de vibración de las estructuras por incrementos del 4% desde el 80% al 120% del valor original. Así pues se consideró un total de 11 rigideces diferentes para cada tipo de estructura, un total de 33 análisis para cada uno de los tres diferentes terremotos. Para el objetivo de este estudio se supuso que los cambios de período se realizaron

sin alterar la resistencia de la estructura (como resultado de un cambio del módulo de elasticidad, por ejemplo).

Los resultados de estos 99 análisis se presentan gráficamente en las figuras 6, 7, 8. Dos tipos de datos se presentan en cada figura. Los más importantes son los esfuerzos y momentos máximos relativos, en función del período fundamental de vibración. Estos muestran la relación entre las fatigas de fluencia y las fatigas máximas desarrolladas en los arriostramientos y elementos del marco. Donde exceden la unidad son simplemente hipotéticos, pero muestran la respuesta relativa de intensidad al movimiento sísmico. En las estructuras arriostradas tanto las fatigas relativas de marco y arriostramiento se presentan, pero únicamente la mayor de las dos es significativa en cualquier

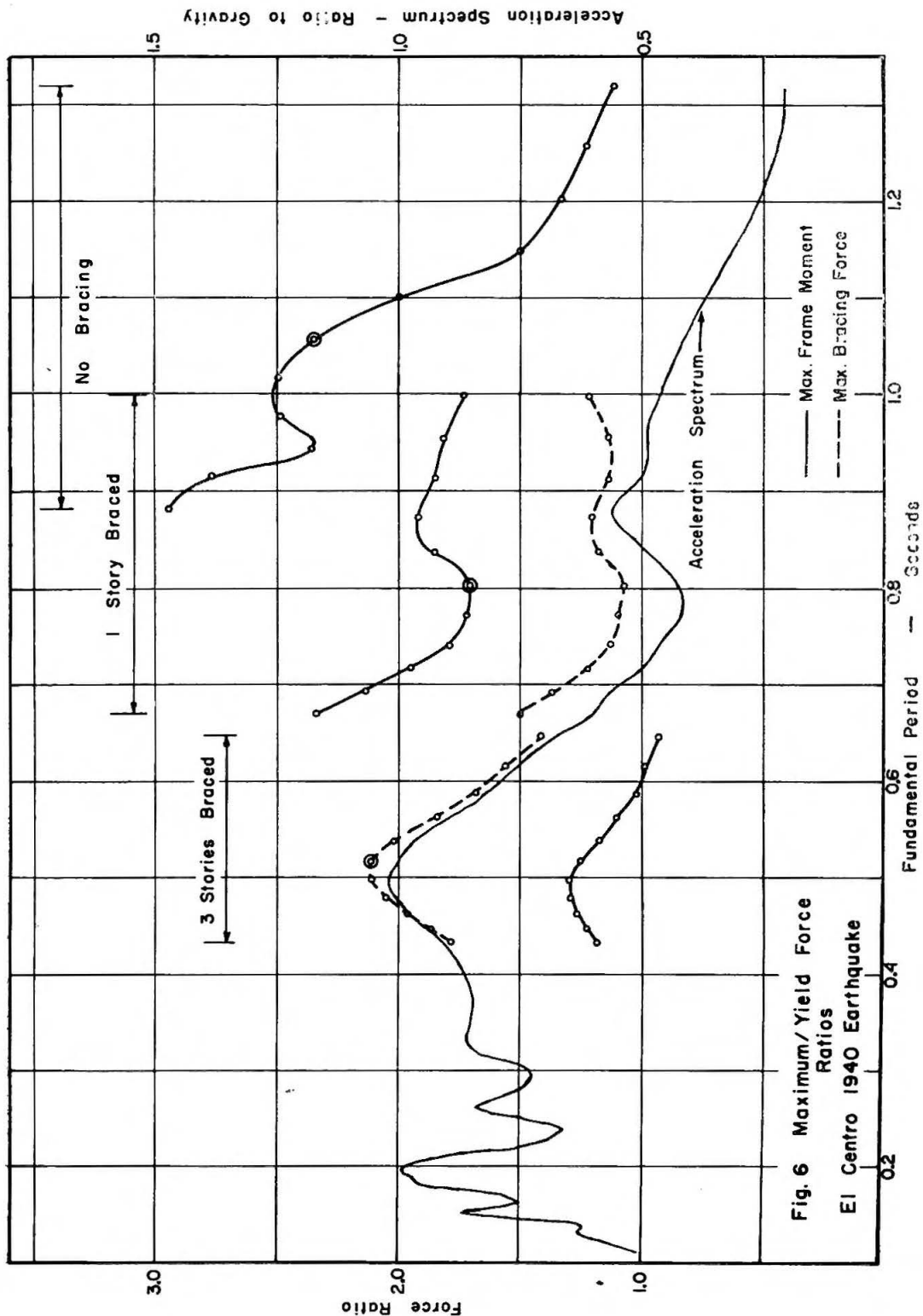


Fig. 6 Maximum/Yield Force Ratios
El Centro 1940 Earthquake

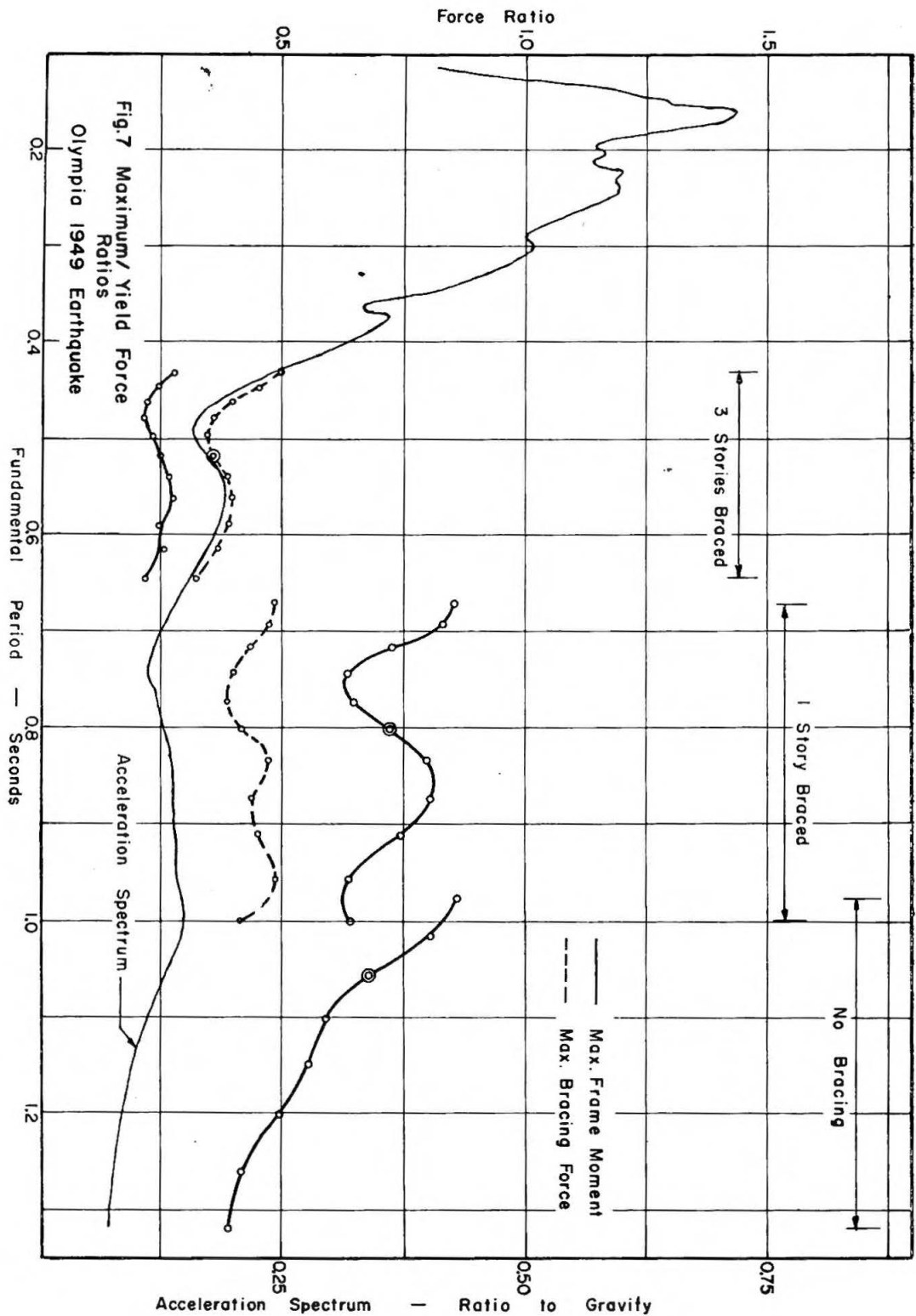
caso. (el mayor representa la razón crítica).

Además de las fatigas relativas, se indica el espectro de respuesta de aceleración para los tres terremotos. Estos fueron determinados durante el curso del análisis y se definió mediante 99 puntos para cada terremoto. Una comparación del espectro de respuesta y estos gráficos de fa-

tigas relativos es muy significativa en cuanto demuestra la dependencia de la respuesta total respecto del primer modo de vibración.

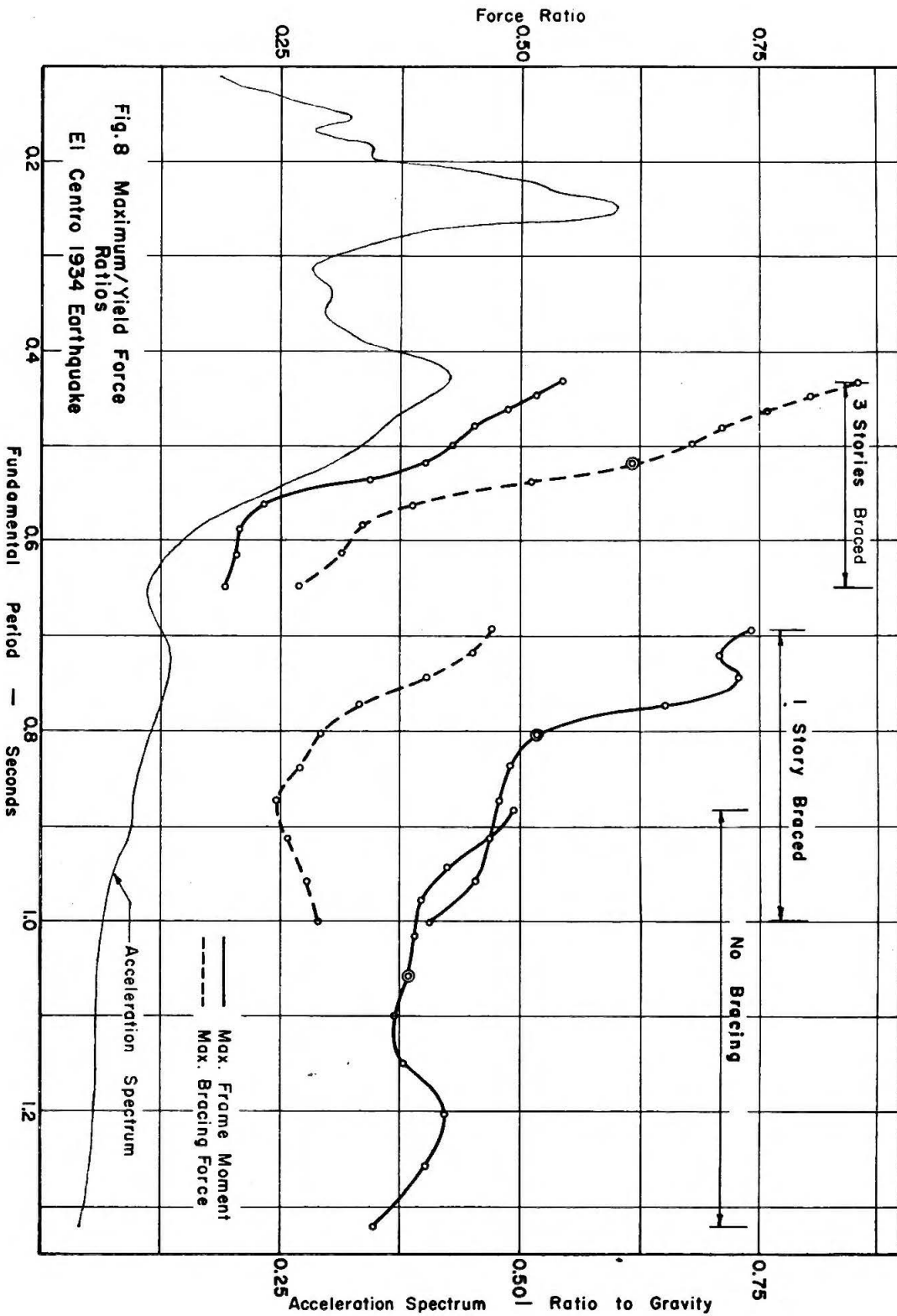
Discusión de los resultados

Los resultados de las figuras 6, 7, 8, muestran claramente cuán poco puede



aprenderse del estudio de sólo tres estructuras para cada terremoto (los resultados obtenidos de la investigación inicial se muestran en los gráficos con círculos agrandados). Sin embargo las curvas obtenidas variando el período de vibración hace posible separar el efecto resistente del arriostramiento del simple efecto rigi-

dizante. Considerando la fig. 6 por ejemplo, se ve claramente que de agregar el sistema de arriostramiento del primer piso se obtuvo una reducción definitiva en las fatigas críticas de flexión (aun cuando la flexión todavía es crítica trasladando la zona crítica al segundo piso. Agregando arriostramientos a los pisos superiores, se



reducen más las fatigas de flexión por cierto, pero en este caso los esfuerzos axiales, de los arriostramientos se hacen críticos. También en este caso la rigidez aumentada, introducida por los arriostramientos adicionales desarrolla fuerzas que sobrepasan su efecto resistente y la estructura resulta menos resistente al te-

remoto de El Centro 1940 en la condición de arriostramiento completo.

Conclusiones similares aunque menos acentuadas se desprenden del estudio de los otros terremotos. El mayor efecto resistente de los arriostramientos se ve claramente en fig. 7 por ejemplo, pero en este caso el mayor efecto rigidante causa sufi-

ciente aumento de los esfuerzos para sobrepasar el mayor efecto resistente, y la estructura con primer piso arriostrado es menos resistente a este movimiento que en el caso de la estructura sin arriostramiento. Cuando se somete al movimiento sísmico correspondiente al terremoto El Centro 1934 el efecto rigidizante del arriostramiento sobrepasa su mayor efecto resistente y la estructura no arriostrada muestra fatigas menores que cualesquiera de los sistemas arriostrados.

CONCLUSIONES

La principal conclusión que puede deducirse de estos estudios es que no puede predecirse de antemano cuando un sistema de arriostramiento suplementario puede ser o no beneficioso. Claramente estos estudios han mostrado que el arriostramiento refuerza la estructura si este efecto se considera independiente de la influencia rigidizante. Así pues una estructura arriostrada de un período de vibración dado será más resistente a los terremotos que la correspondiente estructura no arriostrada. Por el otro lado el arriostramiento rigidiza la estructura y por lo tanto tiende a incrementar los esfuerzos sísmicos en la estructura. La magnitud en que estas fuerzas se incrementan dependen como es evidente de las características del movimiento sísmico. En algunos casos el efecto rigidizante puede equiparar el mayor efecto resistente, llevando a la conclusión de que el arriostramiento tiene un efecto negativo. Con otros terremotos el incremento de los esfuerzos resultantes del efecto rigidizante puede ser reducido y el efecto general del arriostramiento puede ser beneficioso.

Otro factor que debe ser debidamente considerado al evaluar los resultados de este estudio es el hecho de que sólo fue considerado la respuesta elástica puesto

que se supuso que la estructura respondía linealmente a través del terremoto. Como se vé en fig. 6. Sin embargo puede esperarse que un terremoto de cierta intensidad provoque fluencia en los elementos de la estructura, y posible fractura de los arriostramientos. Si este comportamiento inelástico fuera considerado, los beneficios relativos del arriostramiento hubiesen sido indudablemente diferentes. Particularmente si la soldadura de los arriostramientos no se ejecuta con gran cuidado se puede esperar que ellos contribuyan poco a la absorción de energía mientras la fluencia de los elementos del pórtico pueda absorber gran cantidad de energía. En tal caso aparecería que el arriostramiento contribuiría poco a la seguridad del sistema que está fatigado más allá del límite de fluencia.

Por otro lado la estructura no arriostrada es extremadamente flexible y está sometida a un gran desplazamiento de piso a piso, aún durante terremotos medianos. Tales desplazamientos que pueden causar serios daños a las cañerías y tabiques puede ser controlada efectivamente con el arriostramiento. Así pues es evidente que deben ser considerados muchos factores en el diseño de un sistema resistente a esfuerzos sísmicos y no es posible establecer un predicamento simple respecto de la conveniencia de usar arriostramientos diagonales.

AGRADECIMIENTOS

Los estudios analíticos descritos en este informe fueron ejecutados con el Computador Electrónico I B M 704 operado por el Centro de Computación de la Universidad de California.

Universidad de California
BERKELEY, CALIFORNIA
Víctor A. Jenschke, con licencia de la Universidad de Chile.