

Uno de los aspectos de mayor incidencia en el fallo frágil y súbito de los edificios ha sido la colocación precaria del acero en los nudos y la deficiencia de los mismos por su debilidad inherente, debido a la excentricidad de las vigas en su conexión con los pilares y por la falta de dimensiones adecuadas de los elementos estructurales.



Foto 5.12: Redondos de solape en pilar con ganchos y a tope al inicio del entrepiso.

En general, puede afirmarse que no hubo capacidad de deformación sin daño y que las estructuras fallaron súbitamente sin disipar energía inelástica. Por esta razón, se presentó una situación poco usual después de la ocurrencia de un sismo: los edificios presentaron en su mayoría daños severos, que se traducen en muchos casos en colapso, o no presentaron daños estructurales. Sólo en muy pocos casos se encontraron daños graves, moderados o leves, típicos de una respuesta estructural con alguna capacidad de disipación de energía. La mayoría de los edificios que sobrevivieron probablemente no excedieron el límite elástico de los materiales, lo que permite inferir que en muchos lugares las aceleraciones no fueron muy fuertes, tal como lo confirman los registros.

Es importante mencionar, no obstante, que en lugares cercanos a la zona epicentral, donde el terremoto en términos de ingeniería podría considerarse de campo cercano, la directividad y el carácter impulsivo el sismo también contribuyeron a que no se alcanzara a desarrollar un mecanismo de disipación de energía, incluso en edificios competentes. El diagrama de radiación del sismo indica que las dos componentes de aceleración horizontal registradas coinciden en ser las más fuertes aproximadamente en el mismo instante, lo que significa un fuerte impacto sobre los edificios que impide desarrollar ciclos de histéresis, resultado de la acción alternada de esfuerzos a consecuencia de la vibración de la estructura.

A pesar de contar con una norma sismorresistente idónea, su desconocimiento, la falta de control y en algunos casos de ética profesional han contribuido en forma significativa a que los edificios sean altamente vulnerables. Tal como se mencionó antes, por emulación se ha construido en la zona un número muy amplio de edificios sin la participación de ingenieros y arquitectos conocedores de la normativa y, en general, de los requisitos del diseño sismorresistente. Estos edificios, que a primera vista se les ve con una adecuada rigidez, a menudo sólo la tienen en una dirección, siendo muy insuficiente en la otra, dado que los pilares son muy delgados y esbeltos. Sin duda, la práctica de la construcción informal de edificios de hormigón armado no ha sido buena. Desafortunadamente, la informalidad en la construcción en esta zona se ha fomentado incluso por políticas que han promovido la construcción de varios pisos adicionales sobre los edificios existentes (Foto 5.13). Este aspecto seguramente contribuyó al mal comportamiento de muchos edificios.

No deja de ser asombroso, sin embargo, que edificios antiguos de mampostería no reforzada de ladrillo, adobe y madera, incluso mezquitas y sus esbeltos minaretes no presentaron daños severos. Algunas de ellas se les ve en muy buen estado. Es posible que el contenido frecuencial del sismo las haya favorecido.

Los espectros de respuesta indican que la aceleración en edificios con periodos entre 0.3 y 0.5 segundos pudo llegar a ser del orden de 0.7g, lo que podría explicar la concentración de daños en los edificios de hormigón armado de varios pisos afectados por el terremoto.



Foto 5.13. Edificio informal de siete pisos que originalmente fue de tres.

Los edificios afectados, en su mayoría, se han proyectado y construido sin un control de calidad adecuado y un debido seguimiento o supervisión de la obra. Existe un consenso en los especialistas locales que el control no se ha realizado o ha sido insuficiente y que incluso los edificios se han construido con mano de obra deficiente en términos técnicos. La posibilidad de poder cubrir con acabados arquitectónicos las estructuras que claramente dejan ver en las obras que están en ejecución que su construcción ha sido muy deficiente, se ha convertido en una alternativa poco ética de algunos profesionales para evitar demoliciones o reparaciones de elementos estructurales que en la construcción no han quedado en forma adecuada (Foto 5.14). Habitualmente no se realiza ningún tipo de prueba de la resistencia del hormigón ni del acero, ni se hacen otras pruebas clásicas o ensayos que exigen las normativas de construcción para la supervisión técnica.

Quizás la falta de control y de supervisión idóneas han contribuido hasta tal punto al daño generalizado en la zona afectada que se podría decir que éstos son los factores más graves desde la perspectiva de la responsabilidad técnica, profesional y administrativa. Muchos edificios que sufrieron daños severos eran iguales en su configuración y características a otros que, estando cercanos, no tuvieron daño alguno. Si bien la aleatoriedad del daño puede ser el resultado de innumerables factores que escapan a las posibilidades de explicación con total certeza, no es difícil afirmar que la inadecuada configuración estructural, la deficiente resistencia de los materiales, las dimensiones insuficientes de los elementos estructurales y la ausencia de un correcto detallado del refuerzo indican no sólo un desconocimiento de las disposiciones de construcción sismorresistente existentes sino también una alarmante ausencia de supervisión técnica. Esto compromete de manera ineludible a los profesionales de la construcción, desde el diseño hasta la ejecución de los proyectos. Una vez ocurrido el terremoto, la población llegó a sentenciar rápidamente que los daños se debían en buena parte no sólo a la severidad del sismo sino a la mala calidad de la construcción. El apelativo de "asesinos" fue expresado con mucha frecuencia por los sobrevivientes, para referirse a los profesionales de la construcción responsables de los proyectos y

construcción de cientos de edificios que colapsaron o tuvieron daños tan graves que su demolición posterior era inevitable.



Foto 5.14: La ausencia de control facilita que se cometan errores en la construcción.

Por otra parte, la falta de control por parte de las autoridades, de la aplicación de los requisitos sismorresistentes en el diseño y en la construcción de las obras, también establece una responsabilidad administrativa o institucional por parte del Estado, quien debe proteger al ciudadano de eventuales errores e incluso de la eventual mala fe de constructores que falten a la honestidad. Infortunadamente, en este caso, el gobierno central se eximió de cualquier responsabilidad al indicar que este tipo de control debe ser ejercido por los niveles locales debido al proceso de descentralización administrativa que desde hace algunos años se realiza en Turquía. Algunos políticos, aprovechando la situación, incluso han argumentado en contra de la autonomía local y la descentralización, amparados en la incapacidad de los gobiernos locales para ejercer dicho control. Sin embargo, esta circunstancia está ligada al nivel de desarrollo institucional en los niveles locales, que es apenas incipiente, y a la deficiente asesoría que en el proceso de descentralización le ha dado la nación y las provincias a las municipalidades. Sin duda, las administraciones locales e incluso parte de la comunidad misma también tienen responsabilidad en la vulnerabilidad sísmica existente por negligencia y omisión en el control, pues la falta de organización y desarrollo institucional o el desconocimiento de la ley no exime de responsabilidad. Pero de esta manera la responsabilidad finalmente se diluye en inculpaciones mutuas y demuestra la influencia de factores políticos, sociales y económicos en la vulnerabilidad sísmica de la región.

5.2.2. Daños no estructurales

Generalmente, los daños no estructurales se deben a la unión inadecuada entre los muros de relleno o divisorios, las instalaciones y la estructura, o a la falta de rigidez de la misma, lo que se traduce en excesivas deformaciones que no pueden ser absorbidas por este tipo de componentes. Los daños no estructurales más comunes son el agrietamiento de elementos divisorios de mampostería, el aplastamiento de las uniones entre estructuras y los elementos no estructurales, el desprendimiento de acabados y la rotura de vidrios y de instalaciones de diferente tipo. En los muros divisorios de mampostería, el cortante produce grietas diagonales usualmente en forma de equis. La

tendencia de vuelco de los mismos y la flexión pueden producir grietas verticales en sus esquinas y en su zona central. Efectos perjudiciales de este tipo se producen durante casi todos los terremotos, particularmente cuando se trata de sistemas estructurales flexibles que contienen tabiques o muros que llenan parcial o totalmente con mampostería rígida de ladrillo el entramado de vigas y pilares. Los pórticos con tabiques de relleno se vuelven más rígidos una vez que la estructura hace contacto con el tabique de relleno, incrementando la rigidez y cambiando las propiedades dinámicas de la estructura. Cuando los tabiques están distribuidos en forma asimétrica, pueden excitar además modos de vibración torsionales, dando lugar a un comportamiento muy desfavorable de la estructura. Estos tabiques se agrietan severamente si no han sido diseñados para soportar las fuerzas de interacción con el pórtico durante el terremoto e incluso pueden causar un efecto muy nocivo, pues dichas fuerzas pueden también producir graves daños en el propio pórtico. Un incremento inadvertido de resistencia y rigidez en los pisos superiores de un edificio por la mencionada interacción puede crear en los pisos inferiores el efecto de piso blando o flexible al cual ya se hizo referencia en el apartado anterior. Debido a la presencia de tabiques de relleno parcial entre los pilares, que cubren verticalmente el espacio desde el piso hasta el umbral de una ventana, se han producido en muchos casos daños severos e incluso colapsos por el conocido efecto de pilar corto o cautivo. Dicho pilar tiende a fallar en forma frágil al ser sometido a esfuerzos cortantes excesivos que se generan al ser impedida su deformación hasta la altura de los tabiques.

5.3. Vulnerabilidad de edificios existentes

Cuando se lleva a cabo un proyecto estructural, en realidad se está proponiendo una estructura con una configuración, unas dimensiones y unos materiales, que al evaluarle su vulnerabilidad, ante la demanda de los sismos factibles que la pueden afectar durante su vida útil, demuestra que tendrá un comportamiento adecuado. Teniendo como referencia los requisitos mínimos establecidos en las normas sísmicas, se considera como aceptable un proyecto estructural cuando el modelo propuesto cumple o excede dichos requisitos. Así, la vulnerabilidad de una estructura nueva, en consecuencia, es baja si se tiene como referente la normativa utilizada y la severidad de los sismos considerados como factibles. Si se utilizarán otros requisitos más exigentes o se tuviese como referente un sismo más severo, la misma estructura podría considerarse en algún grado más vulnerable, en forma comparativa, dado que ofrecería algunas deficiencias relativas. Por esta razón, el análisis de vulnerabilidad de un edificio existente, usualmente se entiende como la estimación de sus deficiencias a la luz de unos requisitos establecidos. Sin embargo, la evaluación de la vulnerabilidad estructural también puede entenderse como el cálculo de la capacidad que dicha estructura tiene para soportar las sollicitaciones sísmicas reales. Esta evaluación difiere sustancialmente del proceso inverso de análisis que se realiza en la fase de diseño, pues en este caso las cargas deben ser las reales, al igual que la resistencia y la ductilidad de la estructura, sin considerar los tradicionales factores de seguridad.

Métodos convencionales de análisis y cálculo estructural que obedecen a técnicas de modelización de comportamiento elástico sirven para la realización de algunas verificaciones, pero no pueden considerarse por sus hipótesis, sus algoritmos utilizados e incertidumbres involucradas, como óptimos para hacer un análisis de vulnerabilidad. En la mayoría de las ocasiones, estos modelos se consideran tan aproximados como los

llamados métodos cualitativos o de revisión rápida. Algunos especialistas consideran en estos casos como métodos analíticos más apropiados aquellos que realizan un análisis dinámico inelástico o no lineal, que permiten conocer, paso a paso, el proceso de plastificación y colapso de la estructura, conocidos los ciclos de histéresis de sus componentes. Otros métodos, también considerados como analíticos, son versiones simplificadas de los anteriores que pretenden calcular la demanda de ductilidad exigida por las solicitaciones, la disponibilidad de la misma y la capacidad de disipación de energía que tiene la estructura. Finalmente, los cada vez más utilizados métodos de confiabilidad, en los que se basan las técnicas del diseño al límite, también vienen siendo utilizados para efectuar análisis probabilistas de fallos estructurales, lo que permite realizar estudios de vulnerabilidad de edificios existentes.

Sin embargo, la vulnerabilidad estructural no en todos los casos se puede modelizar acertadamente con las técnicas modernas de análisis estructural. La mayoría de estos métodos tienen limitaciones que los hacen tan aproximados como otros menos refinados cuando se trata de estudiar, por ejemplo, edificios históricos. Estos casos deben tratarse e manera especial e incluso pueden sorprender porque edificios que a primera vista podrían considerarse muy vulnerables no lo son (Ferrigni 1990).

En general se acepta que la vulnerabilidad de un edificio puede ser estructural y no-estructural. La vulnerabilidad estructural está relacionada fundamentalmente con la capacidad que tiene la estructura para soportar los desplazamientos y los esfuerzos que uno o varios movimientos sísmicos pueden causarle durante su vida útil (Atkan y Ho 1990). La vulnerabilidad no-estructural, por otra parte, está relacionada con la operación o funcionamiento del edificio, lo que depende del comportamiento de elementos tales como acabados, divisiones, instalaciones, equipos, etc. De su desempeño en el caso de un sismo depende que el edificio mantenga su operación y pueda seguir ofreciendo sus servicios. Este aspecto es de máxima importancia en el caso de aquellos edificios cuya función es vital, como es el caso de los edificios esenciales. Infortunadamente, los últimos terremotos han demostrado graves "colapsos" funcionales, en particular en hospitales, aún cuando sus estructuras han tenido daños leves. Esta circunstancia ha motivado la revisión de normas, y en particular del coeficiente de importancia asignado a estos edificios, que ha demostrado que no es una garantía suficiente para lograr un buen comportamiento. Esta situación ha sido desafortunada en el caso de hospitales, que deben cumplir ineludiblemente su función después de un sismo y en donde el coste de la estructura es apenas un porcentaje que varía entre el 12% y el 18% del coste total del hospital (Cardona 1993b). Por esta razón, se han realizado importantes cambios o ajustes en las técnicas de diseño y evaluación de estructuras de edificios. Nuevos enfoques en relación con el nivel de riesgo sísmico aceptable se han promovido al introducir en las normas o códigos el que ha sido llamado el *Diseño por Comportamiento* (FEMA, 1997).

En este enfoque se define un objetivo de seguridad o desempeño de la estructura, que va desde un estado previo al colapso con un daño severo hasta un estado sin daño estructural y no-estructural y un funcionamiento sin interrupciones del edificio, según varios niveles de sollicitación sísmica. Dichas sollicitaciones corresponden a sismos de diferente intensidad que varían en su período de retorno, y por lo tanto implican una estimación de la amenaza sísmica para varios sucesos con diferente probabilidad. De esta forma se diseña o se evalúa una estructura no sólo para una demanda sísmica, como ha sido tradicional, sino a varias demandas con probabilidades de excedencia