
BIBLIOGRAFIA

La resistencia al corte de piezas de hormigón armado.

ACI-ASCE COMMITTEE 426. The shear strength of reinforced concrete members. *Journal of the American Concrete Institute, Proceedings*, vol. 70, n° 7 (julio 1973) pp. 471-473.

El conocimiento y la comprensión de los mecanismos de transferencia de cizalle en varios tipos de piezas de hormigón estructural ha hecho progresos significativos desde el informe emitido por este Comité en 1972. Este progreso se ha producido en tres direcciones: mayor conocimiento de los mecanismos fundamentales de transferencia de cizalle, mejor evaluación cuantitativa de la resistencia al cizalle de estructuras, y el estudio de nuevos tipos de estructuras o condiciones de carga.

El Comité ha presentado un nuevo informe que se publicó en los Proceedings ASCE, Revista de la División Estructural, junio de 1973, y es una puesta a punto de *La resistencia al cizalle de piezas de hormigón armado*. El presente resumen es traducción, con pequeñas alteraciones, del que aparece en la revista del ACI de julio de 1973.

En el informe se pasa revista a los resultados de recientes investigaciones y proposiciones de cálculo para la transferencia de cizalle en estructuras de hormigón armado. Si bien no se presentan recomendaciones específicas de cálculo, es de esperar que este informe ayudará a los calculistas, a los investigadores y a los autores de especificaciones para llegar a conceptos de cálculo simple y de aplicación general. A pesar del gran número de publicaciones sobre este tema, el problema de la resistencia al cizalle está lejos de haber sido resuelto. Hay casos en que las explicaciones del comportamiento y los conceptos de cálculo que se presentan tienen

caracter especulativo y pueden cambiar a medida que se obtenga más información.

MECANISMOS BASICOS DE TRANSFERENCIA DEL CIZALLE

El cizalle se transmite de un plano a otro en diversas formas en las piezas de hormigón armado. El comportamiento, incluso el modo de falla, depende del modo de transmisión del cizalle. La evaluación definitiva de la contribución de cada uno de estos componentes a la resistencia al corte es todavía sólo tentativa.

Los principales tipos de transferencia de cizalle son los siguientes:

- a) *Transferencia de cizalle por tensiones de corte en el hormigón.* El más directo de los métodos de transferencia es por tensiones de cizalle. Esto ocurre en miembros no agrietados o en las partes no agrietadas de las piezas estructurales. La interacción de las tensiones de cizalle con tensiones de tracción y compresión produce tensiones principales que pueden dar lugar a grietas inclinadas o a una falla del hormigón por aplastamiento. En el informe se pasa breve revista a la resistencia del hormigón sometido a tensiones principales o a combinación de tensiones de cizalle y normales.
- b) *Transferencia de cizalle en la interfaz.* Hay varias situaciones en que el cizalle puede transferirse a través de un plano definido o una superficie donde puede haber deslizamiento. Los investigadores han dado diversos nombres a este mecanismo, como traba de los agregados, rugosidad superficial, transferencia de cizalle, fricción por cizalle, transferencia tangencial de cizalle, pero en este informe se usa la denominación *transferencia de cizalle en la interfaz* para denotar la fuerza de cizalle transmitida a través de una grieta o de un plano tal como el de una junta de construcción.

Si el plano que se considera es una grieta o una interfaz existente, la falla generalmente implica deslizamiento o movimiento relativo a lo largo de la grieta o plano. Si el plano está ubicado en hormigón monolítico, se produce una serie de grietas diagonales a través de la interfaz y la falla se parece a una acción de celosía a lo largo del plano, compuesta de tracción en las barras que atraviesan el plano y compresión en puntales entre las grietas diagonales.

- c) *Cizalle en las barras.* Si una grieta está atravesada por barras de armadura, los desplazamientos por cizalle a lo largo de la grieta deben ser resistidos en parte por las barras. La fuerza en las barras origina tensiones en el hormigón circundante y éstas, en combinación con la acción de cuña de los resaltes, producen grietas de hendimiento a lo largo de la armadura. Esto a su vez reduce la rigidez del hormigón alrededor de la barra y en consecuencia el efecto de espiga. Después del hendimiento, la fuerza que ejercen las barras es una función de la rigidez del hormigón que está directamente debajo de las barras y de la distancia desde el punto en que actúa el cizalle y el primer estribo que envuelve a la barra. A veces la falla por compresión debajo de la barra afecta su comportamiento, especialmente en losas o en hormigón en masa.
- d) *Acción de acero.* En vigas y losas altas partes de la carga se transmite a los apoyos por efecto de arco. Este no es un mecanismo de cizalle puesto que no transmite una fuerza a un plano paralelo vecino. Sin embargo, la acción de arco permite la transferencia de una fuerza vertical concentrada al apoyo en un elemento alto y por tanto alivia la contribución de las otras formas de transferencia de cizalle.
- Para que se desarrolle el efecto de arco, se requiere una componente horizontal en la base del arco. Esta reacción la proporciona, generalmente en vigas, la acción de tirante de las barras longitudinales y la falla puede ocurrir por pérdida de anclaje de estas barras.
- e) *Armadura de cizalle.* Ha sido usual considerar la acción de la armadura transversal de las vigas como parte de una celosía.

Esta analogía ayuda a simplificar los conceptos y métodos de cálculo. Sin embargo, no considera los diversos tipos reales de formas de transferencia de cizalle.

Fuera del cizalle tomado por el estribo en sí, cuando una grieta inclinada atraviesa la armadura de cizalle, el acero puede contribuir significativamente a la capacidad del elemento, aumentando o manteniendo el cizalle transferido por transferencia de interfaz, acción de espiga y efecto de arco. Así, la armadura de cizalle reduce la abertura de las grietas inclinadas en las vigas y esto, a su vez, retarda la disminución de transferencia de cizalle superficial o la pérdida de fuerzas de espiga.

Estos mecanismos ocurren con grados ampliamente variables en varios tipos de piezas estructurales. En el caso de vigas, la mayor parte de los procedimientos de cálculo actuales asignan cuotas del cizalle total a la zona de compresión y a los estribos. Sin embargo, se ha hecho evidente en los últimos años que el cizalle tomado por el acero longitudinal (efecto espiga) y la transferencia de cizalle en la interfaz a lo largo de la grieta afectan significativamente la capacidad y modo de falla.

COMPORTAMIENTO Y RESISTENCIA DE VIGAS QUE FALLAN POR CORTE

Modos de grietas inclinadas y fallas por corte

Las fallas por corte de vigas se caracterizan por la ocurrencia de grietas inclinadas. En algunos casos la grieta inclinada es seguida inmediatamente por falla de corte y en otros casos, las grietas inclinadas se estabilizan y se pueden aumentar las cargas de cizalle antes de la falla.

Las grietas inclinadas en el alma de una viga se pueden desarrollar sea antes de que se produzca una grieta de flexión en su vecindad (grietas de cizalle del alma) sea como una extensión de una grieta de flexión previamente desarrollada (grieta de flexión-corte). En el informe del Comité se pasa revista a los modos en que se desarrollan esas grietas y a una serie de métodos para predecir las cargas de agrietamiento.

La falla por corte en las vigas puede producirse por el agotamiento de cualquiera de las maneras por las cuales se transmite la fuerza de corte a través de la sección, y los

mecanismos dominantes son diferentes en diferentes tipos de vigas. Cada uno de los modos en que la fuerza es transmitida en las vigas, aparte de la fuerza resistida por los estribos, tiene una curva carga-deformación que inicialmente sube rápidamente seguida por una zona de descenso. En el caso de la fuerza tomada por la zona de compresión la parte descendente es del mismo tipo que la del hormigón sometido a tensión combinada de cizalle y compresión. La falla de espiga tiene una zona descendente muy abrupta, excepto donde la espiga está reforzada respecto a hendimiento por estribos que rodean las barras longitudinales. La falla de transferencia de cizalle en la interfaz puede ser muy abrupta, especialmente si la grieta está inclinada en la mayor parte de su longitud y el movimiento predominante a través de la grieta tiende a abrirla más que cizallarla. Debido a esto es muy difícil decir cuál mecanismo de transferencia de fuerza es el que produjo falla, excepto cuando se produce la falla explosiva de vigas sin estribos que se distingue claramente del comportamiento más dúctil de vigas con estribos. Este problema se discute más ampliamente en el informe completo.

En el informe se discute con mucho detalle el efecto de variables tales como tamaño, forma, cuantía, detalles de armadura, fuerzas axiales, pretensión, métodos de carga, y tipos de hormigón en la resistencia y comportamiento al corte.

Cálculo de vigas al corte

En el cálculo de vigas deben considerarse los modos de falla posibles siguientes:

- a) Falla por corte de vigas sin armadura en el alma - iniciada por grietas diagonales.
- b) Falla por corte iniciada por fluencia de los estribos.
- c) Falla por corte iniciada por aplastamiento del alma.
- d) Falla por corte iniciada por aflojamiento de los anclajes de los estribos.
- e) Falla por corte iniciada por fallas del tirante de tensión.
- f) Falla iniciada por separación de las alas y el alma.
- g) Falla de servicio debido a abertura excesiva de las grietas inclinadas.

En el informe se analiza cada uno de estos factores con más amplitud.

RESISTENCIA AL CIZALLE DE PIEZAS ESPECIALES

El capítulo 11 de la Ordenanza de Construcciones ACI (ACI 318-71) contiene disposiciones especiales para vigas altas, cartelas, conexiones viga-pilar, y muros de corte. Muy a menudo estas piezas especiales tienen la característica de ser relativamente cortas y altas, teniendo razones luz de corte a altura efectiva, N/Vd , menor que 2.5. Otra característica común de muchas de estas piezas especiales es que, además de armadura principal de flexión, contienen armadura transversal distribuida a lo largo de la pieza. En consecuencia, los métodos usuales para calcular la resistencia a la flexión y al corte posiblemente son conservadores.

Pueden incidir cargas concentradas o reacciones en las fibras extremas en compresión o en tensión de las vigas, o a través de otras piezas estructurales que están unidas a los lados de la viga. Cuando las cargas se aplican a un elemento corto, alto, sin armadura de cizalle, en puntos concentrados de aplicación en las partes de arriba y de abajo de la viga, la resistencia límite al cizalle excede la del cizalle que produce grietas inclinadas. Por otra parte, si las cargas aplicadas están distribuidas a lo largo de los lados de una pieza, la resistencia al cizalle y el comportamiento al agrietamiento será aproximadamente el mismo que en piezas similares con una razón a/d de 2.5 o más.

A medida que la razón N/Vd de una viga corta y alta disminuye desde 2.5 a 0, la armadura transversal de cizalle se hace menos efectiva que en una viga ordinaria. Al mismo tiempo la armadura distribuida paralelamente al eje longitudinal aumentará la capacidad de cizalle. A medida que la razón a/d se acerca a 0, esta armadura resiste el cizalle por fricción. El refuerzo diagonal es también efectivo para resistir cizalle.

La capacidad límite de una pieza a cizalle puede estar regulada por la resistencia al aplastamiento del hormigón en el alma y esto fijaría, un límite superior a la resistencia adicional que es capaz de desarrollar la pieza agregándole armadura de corte.

En piezas cortas y altas, las grietas inclinadas en algunas circunstancias se extienden a todo lo largo de la luz de cizalle. Si la armadura a cizalle no es totalmente efectiva, pue-

den desarrollarse tensiones de tracción grandes en la armadura longitudinal en secciones en que el momento resultante es nulo. Deben proveerse armaduras suficientes bien ancladas para resistir esta tracción. Este problema puede ser especialmente severo en puntales, machones o antepechos que contienen un punto de inflexión, especialmente si están sometidos a carga alternante. Es esencial también el anclaje adecuado de los estribos.

Finalmente, el informe pasa revista a las investigaciones recientes sobre la resistencia al cizalle de vigas altas, cartelas, muros de corte, vigas con perforaciones, columnas, y uniones viga-columna. Donde es posible se explican las bases de los procesos usuales de cálculo.

REFERENCIAS

En el informe del Comité se dan más de 200 referencias que tratan varios aspectos de la resistencia y el comportamiento al cizalle. La mayoría de estos trabajos se publicaron a partir de 1960.

Resumen del JACI

Efecto de las restricciones, cambios de volumen y armaduras en el agrietamiento del hormigón en masa.

ACI COMMITTEE 207. Effect of restraint, volume change, reinforcement on cracking of massive concrete. *Journal of the American Concrete Institute, Proceedings*, vol. 70, n^o 7 (julio 1973) pp. 445-470.

En este informe se discute detalladamente la incidencia que tienen el desprendimiento de calor y los cambios de volumen en el cálculo y comportamiento de estructuras macizas de hormigón.

En el hecho, ninguna variación de volumen produciría grietas si fuera uniforme, pero, como existen restricciones externas o internas que impiden el libre movimiento de las partes, ellas se producen. La limitación del tamaño y número de grietas se logra reduciendo las variaciones de volumen y también disminuyendo las restricciones; ambas medidas pueden combinarse. El primer efecto se puede obtener actuando sobre el contenido o tipo de cemento usado, por refrigeración previa o posterior, por aislación térmica

y por otros medios parecidos; el segundo, por juntas de contracción o expansión. En lugar de recurrir a los métodos anteriores, se pueden colocar armaduras a propósito para distribuir las grietas y reducir su tamaño de abertura a límites tolerables.

Las restricciones pueden ser continuas, como es el caso de las líneas de contacto del hormigón con cualquier material sobre el cual ha sido depositado, y entonces dependen de las dimensiones, de la resistencia y de la relación entre los módulos de elasticidad de ambos materiales. Se han desarrollado fórmulas para calcular las tensiones y momentos que se originan y aquellos que dan lugar al comienzo de las grietas; en este informe se presentan algunas de uso práctico.

Hay restricciones discontinuas, como son las que se producen en los apoyos, nudos, intersecciones, etc.; también éstas se pueden analizar cuantitativamente y para este efecto se presentan en este informe fórmulas apropiadas.

Existen, por último, restricciones internas, originadas por distribuciones no uniformes de calor o temperatura en las diversas zonas del elemento de hormigón. Estas se pueden asimilar a restricciones continuas y para ellas son válidas las fórmulas de ese primer caso, con algunos ajustes que se señalan en el informe.

Los cambios de volumen del hormigón en masa son función de las variaciones térmicas e higrométricas. La generación de calor en el interior de la masa depende del tipo, contenido y grado de finura del cemento y de las temperaturas a que se produce la hidratación; éstas, a su vez, dependen del tamaño y de las condiciones de aislación del elemento hormigonado. Este conjunto de factores hace que el fenómeno sea complejo; sin embargo, ha sido ampliamente estudiado y se han logrado conclusiones empíricas bien precisas, que se exponen en este trabajo en varias gráficas. Los cambios provenientes de variaciones higrométricas dependen de la relación volumen superficie; si ésta es pequeña, la contracción por secado aumenta las tensiones internas en todo el espesor, las que deben contrarrestarse por armaduras adicionales; si es, en cambio, grande, el efecto es sólo superficial y da lugar a grietas de poca penetración. La contracción por secado se asimila a un cambio ficticio de temperatura.

En resumen, se trata de calcular el cambio

máximo de temperatura que se puede producir y éste es la suma de tres componentes: la diferencia entre la temperatura de colocación y la de operación, el aumento de temperatura debido a hidratación y la temperatura equivalente a la contracción por secado. El manejo de todos estos factores se ilustra en dos ejemplos numéricos en los que se hace uso de las fórmulas y gráficos incluidos en el texto.

El informe se refiere también a las propiedades del hormigón que afectan a la formación y control de grietas, haciendo un análisis de la influencia de la resistencia a compresión, de la resistencia a tracción, del módulo de elasticidad, de la fluencia lenta y de las propiedades térmicas.

El ancho o abertura de las grietas debe ser limitado para proteger de la corrosión, prevenir filtraciones y por razones estéticas. El Comité no considera recomendable exagerar la limitación, porque en ese caso se requerirían muchas barras muy próximas entre sí y, en consecuencia, hormigón con más agua y con áridos de menor tamaño máximo; estos cambios favorecen la formación de grietas, anulando el efecto favorable de la mayor cuantía de acero. Se recomienda entonces una abertura límite de 0.009 pulgadas y el uso de la fórmula de Gergely y Lutz para calcular la tensión del acero.

En el capítulo final del informe se desarrolla el cálculo de las cuantías de acero para limitar las grietas tomando en cuenta todos los factores expuestos en los capítulos anteriores, y se aplica el procedimiento en tres ejemplos prácticos.

E. GOMEZ G.

Primeras Jornadas de Durabilidad.
 INSTITUTO EDUARDO TORROJA DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO. *Materiales de construcción. Ultimos avances*, nºs 150 - 151 (abril - septiembre 1973) 353 pp.

Es éste un número doble de esta revista en el cual se da cuenta de las primeras jornadas de durabilidad desarrolladas en el Instituto Eduardo Torroja de Madrid, España, en octubre de 1972, que se refirieron exclusivamente a obras de hormigón.

El problema de cuánto dura el hormigón,

que es el de ver y conocer qué agentes lo afectan o lo dañan y en qué plazos, ha sido un poco y a veces un mucho dejado a la suerte, con la idea de que estos daños o ataques son ocurrencias fortuitas y forman unos casos aislados y poco frecuentes dentro de la nutrida colección de obras de hormigón.

Sin embargo, el panorama puede estar cambiando de una condición en que aquello era cierto porque en los emplazamientos de las obras se evitaban los sitios y lugares en los cuales se tenían ambientes agresivos, a otra en que cada vez quedan menos posibilidades de elegir. Se debe esperar, entonces, el aumento de los casos de ataque a obras de hormigón y se debe agradecer que diversos grupos de personas hayan mantenido una mirada alerta sobre estos problemas y hayan ido recopilando la información y organizando el conocimiento que se tiene de ellos.

Esta publicación tiene el interés de hacer conocer las experiencias y los puntos de vista de uno de esos grupos, el del prestigioso Instituto Eduardo Torroja, que además ha convocado a otros especialistas españoles para dar la partida a una exploración sistemática de los problemas de la durabilidad de los materiales.

Las jornadas abarcaron cinco temas, cada uno de los cuales recibió colaboraciones de varios participantes y terminó con un coloquio de discusión. Todos los trabajos presentados tuvieron interés y constituyeron aportes valiosos a cada particular problema que abordaron. Valdría comentarlos todos; sin embargo, en beneficio de la brevedad nos referiremos sólo a los que tienen más actualidad o relación con problemas que se han presentado en Chile. Pasaremos de largo, por ello, el Tema I sobre OBRAS SUBTERRANEAS E HIDRAULICAS y el II sobre OBRAS URBANAS Y MARITIMAS.

El Tema III versó sobre CORROSION DE ARMADURAS, que nos toca muy a lo vivo, porque fue el deterioro provocado por la corrosión el que obligó a demoler el Hotel Pacífico de Arica hace más de 15 años y es este mismo tipo de ataque el que está presente en algunas construcciones importantes del norte de Chile y a lo largo de nuestras costas. Abrió el tema el Dr. José Callejas, con una exposición sobre *Análisis crítico de los fac-*

tores que intervienen en la corrosión de las armaduras, en que desarrolla e ilustra el problema en sus aspectos básicos. Analiza la influencia de los diversos tipos de cemento y hace ver que el portland provee mejores defensas por el elevado pH de su pasta y por su gran reserva alcalina, mientras que los cementos puzolánicos y siderúrgicos, por fijar la cal y rebajar por ello la alcalinidad de la pasta, tienden a facilitar la corrosión, cuando otras circunstancias concurren a producirlas.

Hay un fenómeno que reduce la protección del hormigón, es el de la carbonatación de la cal de la pasta por el anhídrido carbónico, pues esa acción rebaja el pH de la pasta de cemento de alta a débilmente alcalino y aun a ácido. La pérdida de protección depende del avance de la carbonatación, que a su vez está regulado por la porosidad del hormigón y condiciones ambientales.

Los áridos pueden tener influencia en la corrosión si son oxidables o reactivos, porque destruyen o debilitan la capa de recubrimiento. El caso de los áridos impregnados de sales (Hotel Pacífico) es más crítico, porque inevitablemente dan lugar a corrosión.

El agua de amasado puede introducir agentes corrosivos, si contiene determinados iones disueltos.

Los aditivos, por su gran variedad de composición, juegan un papel más complejo en el fenómeno de la corrosión: hay algunos que pueden producirla o favorecerla, y otros que pueden atenuarla o evitarla. Entre los primeros están los que contienen cloruro cálcico y los segundos son los inhibidores de corrosión.

Finalmente, un factor de primerísima importancia es la calidad del hormigón, que importa que sea compacto, impermeable y adherente.

En un trabajo sobre inhibidores, con el título *Prevención de la corrosión de armaduras en el hormigón mediante aditivos inhibidores*, cuyos autores son José Callejas y M.C. Andrade, se profundiza y extiende un punto tocado por el Dr. Calleja en su puesta a punto, vale decir, el de los inhibidores de corrosión. Allí se da una visión completa de los métodos de protección, tanto de los que operan sobre el acero como de los que actúan sobre o en el seno del hormigón. Entre los últimos están los inhibidores, defendidos por unos, condenados por otros, apoyándose

cada cual en resultados experimentales que no son concordantes. Los autores aportan sus propios resultados provenientes de una serie experimental realizada en el Instituto Eduardo Torroja y presentan sus conclusiones que tienen el aspecto de ser de muy buena estirpe y de gran valor práctico. Dicen que si el hormigón está bien ejecutado y no contiene aditivos, no se produce corrosión; que la presencia del 2% de Cl_2Ca provoca siempre corrosión por picaduras y que, de los inhibidores ensayados, el único eficaz frente al Cl_2Ca parece ser el NO_2Na en la misma proporción.

Hay un artículo de M.C. Andrade y J.C. González, dentro del mismo tema, sobre *Técnicas para el estudio de corrosión de armaduras en el hormigón armado y pretensado* que informa sobre los métodos experimentales de determinación de las velocidades de corrosión, señalando sus alcances e inconvenientes. De entre los varios que exponen, los autores destacan las ventajas del método de la resistencia de polarización, porque no es destructivo, permite comparar resultados de probetas muy diferentes y es aplicable en obra.

El Tema IV fue sobre PROTECCION Y CUESTIONES VARIAS y el Tema V, sobre NORMAS Y ENSAYOS. En éste se comentan normas sobre durabilidad y sobre ensayos de varios países e instituciones europeas. Hay también un trabajo sobre *Permeabilidad al aire del hormigón* por Rafael Muñoz M. y una conferencia sobre *La penetrabilidad del hormigón al agua y a los iones agresivos como factor determinante de su durabilidad* por el profesor Arturo Río; ambos tocan el punto clave en el problema de la durabilidad, que es el de la penetración y desplazamientos de las sustancias agresivas.

Estas primeras jornadas cumplieron los objetivos que señala el Dr. Calleja en la introducción de la publicación: "reunir el mayor número posible de datos y detalles sobre casos reales de destrucción de hormigón, a fin de ordenarlos, sistematizarlos y someterlos a un análisis y estudio que, como en medicina, permita diagnosticar, pronosticar, curar y, lo que es aun más importante, prevenir."