

Fallo por rasante en juntas frías en vigas prefabricadas. La necesidad de sustituir varios tableros de la autovía A-4 en las proximidades de Córdoba

Shear failure due to cold joints in precast beams. The need to replace several decks in A-4 Highway near Córdoba

Víctor Bustamante Fernández^a Eduardo Díaz Pavón^b, Ramón Álvarez Cabal^c, Raúl Rodríguez Escribano^d

a: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC). Jefe del Departamento de Puentes. vbustamante@intemac.es

b: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC). Director del Área de Evaluación y Patología de Estructuras. ediazpavon@intemac.es

c: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC). Director Técnico

d: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC). Director de la División de Estudios

RESUMEN

En esta comunicación se analiza la calidad de ejecución y capacidad resistente de algunas vigas prefabricadas de grandes dimensiones y hormigones de alta resistencia (principalmente de puentes y, en menor medida, de edificación) en las que se produjeron juntas frías y segregación del hormigón en el alma durante su fabricación, lo que llevó a un fallo a rasante por deslizamiento en dichas juntas. El enfoque se centra en tres estructuras de la A-4, cerca de Córdoba, donde estos defectos de ejecución se presentaron de forma generalizada en las vigas, mostrando evidencias de un comportamiento estructural anómalo en muchas de ellas.

ABSTRACT

This paper analyzes the execution quality and resistance capacity of some large prefabricated beams and high-strength concretes (mainly in bridges and, to a lesser extent, in buildings), in which cold joints and concrete segregation in the webs occurred during manufacture, leading to shear failure due to sliding in these joints. The focus is on three structures on the A-4 highway near Córdoba, where these execution defects were widespread in the beams, showing evidence of anomalous structural behavior in many of them.

PALABRAS CLAVE: fallo, rasante, prefabricados, ingeniería forense

KEYWORDS: failure, shear stress, precast beams, forensic engineering

1. Introducción

Son numerosas las estructuras construidas con elementos prefabricados debido a las ventajas en calidad, velocidad y coste para ciertos ámbitos. En cuanto a la calidad, la fabricación industrializada permite un mayor control de los productos y la ejecución, lo que a veces se refleja en el diseño mediante la reducción de los coeficientes de minoración de materiales

empleados en los cálculos semiprobabilistas de las normas actuales. Sin embargo, esta calidad presupuestada no siempre se cumple, y a veces surgen defectos no justificables en elementos prefabricados.

Un ejemplo son las vigas prefabricadas pretensadas de puentes y naves industriales, con luces significativas que requirieron hormigones de alta resistencia. En algunos casos, se presentaron fallos por rasante en juntas frías no previstas en el diseño, sobre las cuales ocurrió

segregación del hormigón. A continuación, tres ejemplos:

- Nave industrial construida en 2009 con vigas en doble T, luces de 28 m y hormigón HP-50 (figura 1).
- Puente de 4 vanos (2011), con vigas artesa, luces entre 29 y 38 m, y hormigón HP-60 (figura 3).
- Paso superior en la A-4 cerca de Córdoba (2012), vigas en doble T con luces de 35 m y hormigón HP-55 (figura 3).

En los tres casos, el fallo a rasante obligó a sustituir las estructuras debido a la dificultad de refuerzo.

Los siguientes apartados describen las investigaciones del caso del paso superior de la A-4, donde los defectos fueron generalizados en las vigas, evidenciándose un comportamiento estructural anómalo. La inspección especial concluyó que era necesario reemplazar los tableros, y el estudio forense realizado durante la demolición permitió una mejor caracterización de los defectos. Estos resultados pueden guiar análisis e intervenciones en otras estructuras con defectos similares.

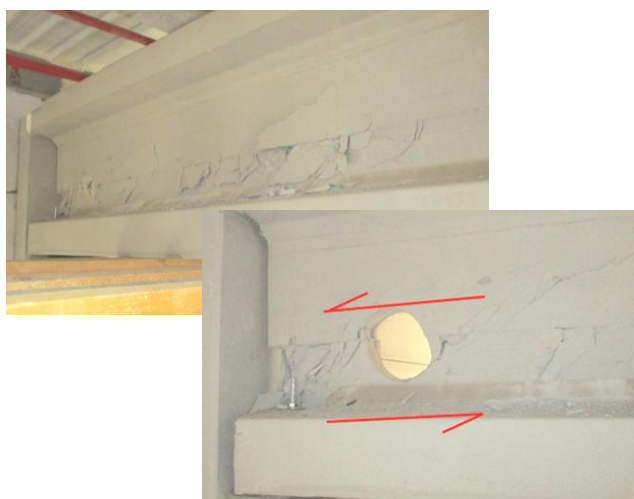


Figura 1. Fallo a rasante en una de las vigas de la cubierta prefabricada de una nave industrial construida en 2009



Figura 2. Fallo a rasante en una de las vigas artesa de un puente construido en el año 2011



Figura 3. Fallo a rasante en una de las vigas en doble T de una de las estructuras de la A-4 en las proximidades de Córdoba

2. Descripción de los defectos que presentaba la estructura

2.1. Defectos apreciables por simple inspección visual

Como se muestra en la figura 3, se trata de tres estructuras que permiten el paso de la autovía A-4 sobre un enlace cercano a Córdoba. La longitud total de los tres puentes es de 68,5 metros, distribuidos en 3 vanos: 17 m (dos vanos extremos) y 34,5 m (vano central). En todos los casos, el tablero consistía en 4 u 8 vigas prefabricadas pretensadas (según el ancho) con una losa superior de hormigón.

Durante las inspecciones realizadas como parte de los trabajos adjudicados a la UTE INTEMAC-FHECOR para revisar el estado de uno de los lotes de estas estructuras, se detectaron anomalías en algunas vigas, indicativas de un comportamiento estructural anómalo que podría comprometer la seguridad.

Estas anomalías incluían la presencia de juntas frías en el alma de varias vigas, que provocaban fisuración excesiva y desconchones del hormigón. Los desconchones mostraban material sin árido, resultado de una segregación del hormigón durante la fabricación. En una de las vigas, también se observó una deformación significativa. Las figuras 4 y 5 muestran algunas de estas anomalías.



Figura 4. Vistas de algunas de las fisuras y desconchones detectados en las vigas, en torno juntas de hormigonado



Figura 5. Obsérvese la acusada deformación que presentaba una de las vigas que presentaba mayores defectos

Los defectos de fabricación de las vigas habrían causado un fallo a rasante en el alma, lo que representaría un grave riesgo estructural para la seguridad de los tableros.

Esta incertidumbre sobre la seguridad se comunicó de inmediato a la Unidad de Carreteras del Estado en Córdoba, sugiriendo una inspección especial de los tableros y la revisión de la documentación técnica disponible, junto con las comprobaciones de cálculo pertinentes. La Unidad adoptó medidas cautelares, como el desvío del tráfico pesado y el apeo de los tableros más afectados, para minimizar el riesgo de fallo en la junta.

2.2. Ensayos realizados para la caracterización de las juntas frías

La inspección especial contempló distintas investigaciones orientadas a la caracterización de las juntas frías y los defectos referidos en el punto anterior. En particular, fueron las siguientes:

- La inspección de detalle de las vigas, lo que permitió comprobar el deslizamiento ocurrido en las juntas de hormigonado de algunas de ellas, caracterizándose dicho movimiento a lo largo de su longitud (figura 6).

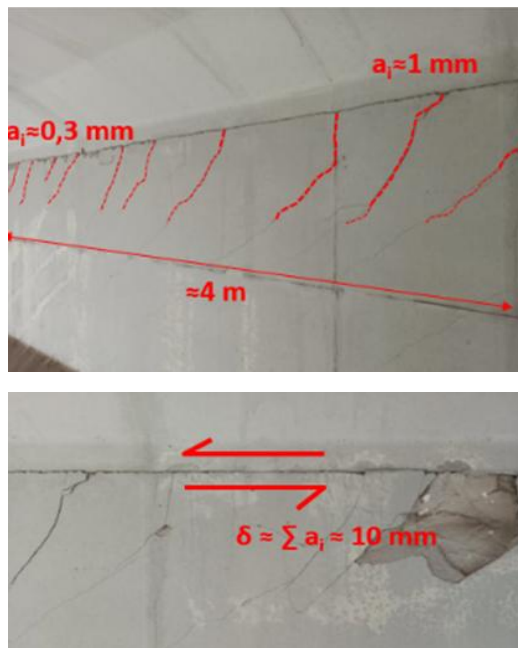


Figura 6. Caracterización de la abertura de fisuras en torno a una de las juntas frías

- La realización de algunas calas para comprobar el estado de las armaduras y del hormigón en torno a las juntas. Como era previsible, el hormigón de recubrimiento se desprendió fácilmente, incluso sin medios mecánicos. Además, estas calas permitieron verificar la clara segregación del hormigón en torno a las juntas, así como medir la acusada deformación que habían sufrido algunas armaduras (figura 7).



Figura 7. Cala realizada en torno a algunos desconchones existentes en una de las juntas frías

- La limpieza de las vigas con lanza de agua, lo que permitió comprobar la existencia de varias juntas de hormigonado en el alma de muchas de las mismas, muchas de ellas ocultas por la pintura que las recubría (figura 7).
- Extracción de testigos de algunas de las juntas de hormigonado, los cuales confirmaron la formación de las juntas frías ya descritas (los testigos se separaban inmediatamente en sus dos mitades), así como los defectos existentes en torno a las mismas (porosidad de las superficies, filtraciones a través de estas, la presencia de una capa de lechada, probablemente producida por segregación y exudación del hormigón durante su colocación, etc.: véanse las figuras 8 a 11).



Figura 8. Obsérvese la existencia de varias juntas de hormigonada en el alma de la viga



Figura 9. Obsérvese la humedad existente en la junta fría



Figura 10. Obsérvese la existencia de varias juntas de hormigonada



Figura 11. Obsérvese la porosidad del material de la junta

2.3. Seguimiento del proceso de demolición de los tableros

Estos trabajos permitieron contrastar la información sobre la configuración y armado de las vigas, y corroborar las características y alcance de las anomalías que motivaron la demolición. La demolición también reveló la extensión de algunas juntas a lo largo de toda la viga, en algunos casos casi horizontales.

Como ejemplo, en la figura 12 se muestra una junta, evidenciando su extensión, la segregación superficial de la tongada inferior, y la falta de tratamiento previo antes del hormigonado de la siguiente tongada. Además, se observó la ausencia de contacto entre los lados de la junta debido a los deslizamientos descritos previamente.



Figura 12. Obsérvese la extensión y horizontalidad de una de las juntas frías, así como su aspecto superficial

3. Trascendencia de las juntas frías y medidas adoptadas

La presencia de juntas frías y la segregación del hormigón en las vigas eran problemas graves que comprometían la seguridad de la estructura. Además, los deslizamientos observados evidenciaban el fallo a rasante en dichas juntas, reduciendo la capacidad del tablero por debajo de lo exigible. Las fisuras en el alma de algunas vigas indicaban que su capacidad estaba agotada.

El fallo de algunas zonas de la junta produjo una redistribución de esfuerzos hacia otras áreas menos solicitadas de la viga y las vigas adyacentes, evitando el colapso global del tablero. Sin embargo, la redistribución dentro de la viga era limitada debido a la disposición de la armadura transversal, lo que podría haber provocado un fallo casi simultáneo en todas las vigas.

La gravedad de los daños también se reflejó en las condiciones de seguridad derivadas de las comprobaciones de cálculo, que arrojaron márgenes de seguridad muy bajos, incluso considerando un modelo que incorporase el efecto pasador, no recogido en la normativa vigente. En términos reglamentarios, la capacidad de las juntas es nula. Estos

aspectos se profundizan en los siguientes puntos:

- Por un lado, aparte de las importantes consecuencias sobre la estabilidad de los tableros, los desprendimientos del hormigón de recubrimiento de las armaduras transversales suponían un peligro adicional para el tráfico bajo las estructuras.
- Por otro, la progresiva degradación de la junta flexibilizaría el tablero, afectando igualmente a sus condiciones de servicio. Debe tenerse en cuenta que el agotamiento de la junta considerando cierto comportamiento dúctil de la misma como se ha expuesto anteriormente, supone la existencia de unas deformaciones incompatibles con el normal funcionamiento del puente.
- Además, las propias juntas suponían una zona de acumulación de humedad y agua, especialmente en las vigas de borde en las que existen importantes escurrimientos, motivando la prematura oxidación de la armadura transversal y mermando aún más la capacidad de dichas vigas.
- La gravedad de los defectos observados en muchas de las vigas -las citadas juntas frías y la segregación- cuestionan el propio proceso de fabricación de estas, con las incertidumbres que ello suponía sobre sus prestaciones en relación con las especificaciones de diseño.

Todo lo anterior justificaba las decisiones adoptadas, tanto a efectos de tomar medidas cautelares de carácter inmediato (desvío de vehículos pesados y apeo de los tableros más afectados) como la posterior sustitución de los tableros.

4. Análisis sobre el comportamiento de las juntas frías

4.1. Comportamiento nominal

Los deslizamientos observados en varias vigas evidenciaban el fallo a rasante en las juntas frías, reduciendo la capacidad del tablero por debajo de lo exigible. Este fallo ocurrió a pesar de que las tensiones tangenciales en la junta eran relativamente bajas (aproximadamente 5 MPa como máximo, considerando el proceso evolutivo de carga: pretensado y peso propio de la viga y la losa sobre la viga aislada, como se muestra en la figura 13).

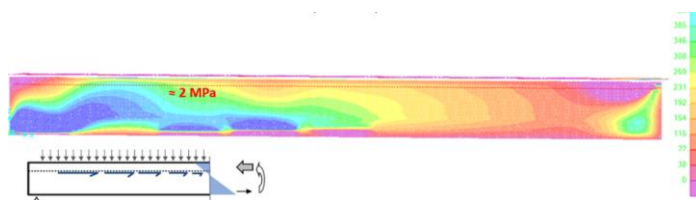


Figura 13. Tensiones tangenciales en la viga frente a los esfuerzos del pretensado, el peso propio de la viga y el peso de la losa

Es más difícil estimar la capacidad de las juntas frías, como se detalla en el siguiente apartado. Como se mencionó antes, creemos que no es posible formular modelos fiables para valorar su comportamiento, ya que es difícil estimar los parámetros de entrada, como las propiedades del material en esas juntas. Sin embargo, se realizó un ejercicio teórico para cuantificar el efecto de la junta fría sobre la viga, sin considerar la segregación del hormigón debajo de la junta.

Dado que la rugosidad de las superficies de la junta era limitada (muchas veces lisa o con rugosidad que desaparecía al deslizarse), no se puede suponer otro mecanismo de transmisión de esfuerzos que el correspondiente al efecto pasador de la armadura. Para este efecto, se utilizó la formulación del Model Code 2010 [1], ya que incluye el término correspondiente (lo

cual no está contemplado en la normativa vigente):

$$\tau_{Rdi} = C_r \cdot f_{ck}^{1/3} + \mu \cdot \sigma_n + \kappa_1 \cdot \rho \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) + \kappa_2 \cdot \rho \cdot \sqrt{f_{yd} \cdot f_{cd}} \leq \beta_c \cdot v \cdot f_{cd}$$

En esta expresión, el primer término corresponde al efecto de cohesión y engranaje de áridos en la junta; el segundo al rozamiento movilizado por las compresiones normales; el tercero al rozamiento inducido por la compresión generada por el alargamiento de la armadura (corte-fricción); y el último al mecanismo de efecto pasador (dowel action). Los coeficientes κ_1 y κ_2 consideran la interacción entre estos dos últimos mecanismos, así como que su contribución máxima ocurre para distintos deslizamientos en la junta.

Se consideró una rugosidad lisa de la junta, a la que le corresponden los siguientes parámetros:

$$C_r = 0; \kappa_1 = 0.5; \kappa_2 = 1.1; b_c = 0.4; m = 0.6$$

Para valorar la junta fría, se consideró una resistencia del hormigón de $f_{ck} = 55$ MPa, correspondiente a la resistencia nominal de la viga. Sin embargo, este valor no pudo justificarse técnicamente, como demostraron los ensayos, que indicaron resistencias características significativamente inferiores, alrededor de 40 MPa. No se contempló la reducción de la resistencia a rasante debido a las acciones dinámicas ni la posible disminución del efecto pasador, ya que el recubrimiento nominal de 25 mm es inferior al mínimo de 3Φ requerido por el Model Code 1990 [5] para estribos $\Phi 12$.

Con base en estas consideraciones, se compararon las tensiones solicitantes de la junta (ubicada entre el alma y la tabla superior de la viga) con la capacidad de la formulación anterior. Los resultados se muestran en el diagrama de la figura 14, donde las líneas continuas azul y naranja corresponden a la posición del vehículo pesado en una sección a

5,44 m del apoyo de la pila 1 y en el centro del vano, respectivamente. El escalonamiento refleja la posición del vehículo y la discretización del modelo.

Los diagramas incluyen tanto el régimen elástico como una distribución plástica de las tensiones en tramos donde el armado transversal es constante. Como se observa, la capacidad a rasante en cada tramo (líneas discontinuas azul y naranja) es claramente insuficiente.

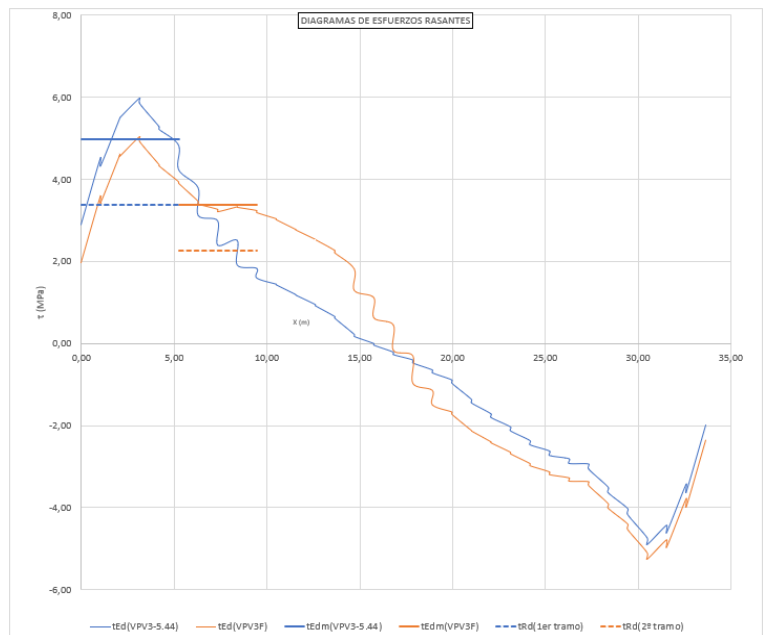


Figura 14. Diagramas de esfuerzos rasantes. En línea continua, solicitaciones de cálculo; en línea discontinua, la capacidad de los dos primeros tramos: en azul, resultados correspondientes al primer tramo de armado (cercos $\Phi 12$ separados 10 cm); en naranja, resultados correspondientes al segundo tramo de armado (cercos $\Phi 12$ separados 15 cm). Los tramos de líneas horizontales se corresponden con la distribución plástica de la solicitación.

Para resaltar la gravedad de los resultados, en la figura 15 se muestran los máximos esfuerzos rasantes que podrían transmitirse en cada tramo de junta, suponiendo un comportamiento plástico en cada uno, a pesar de los condicionantes de servicio, como la pérdida de rigidez de las vigas y los desprendimientos por deslizamientos en la junta, ya ocurridos. Según el diagrama, el esfuerzo axial total que podría

transmitirse, considerando la capacidad a rasante de la viga debido a la junta, sería de 6.060 kN, muy inferior a los 11.620 kN de capacidad a tracción de la sección en situación nominal.

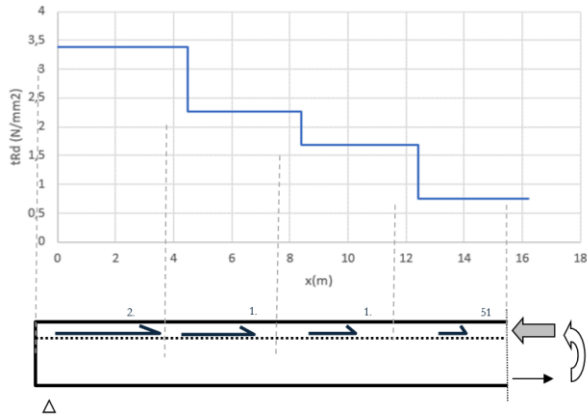


Figura 15. Diagramas de esfuerzos rasantes. Capacidad a rasante por tramo considerando un comportamiento plástico

En esas condiciones, el momento máximo que resistiría la sección del centro de vano sería de solo 9.037 m×kN, frente a los 17.320 m×kN en situación nominal. Este momento sería alcanzado prácticamente por las cargas permanentes (8.951 m×kN), siendo mucho menor que el momento calculado considerando las sobrecargas (14.416 m×kN).

En resumen, la capacidad a flexión de la viga estaba limitada por la insuficiente capacidad para transferir los esfuerzos rasantes a través de la junta, lo que la hacía incapaz de resistir las solicitaciones de cálculo para las que fue diseñada.

4.2. Situación de deslizamiento de la junta

Los resultados anteriores ya evidencian la gravedad de las juntas frías en el alma de las vigas, no previstas en su diseño. La situación era aún más crítica al evaluar los posibles mecanismos resistentes en la junta y las implicaciones de los daños detectados (deslizamientos de hasta 10 mm):

- **Cohesión y engranaje de los áridos** (*mechanical interlocking & adhesive bonding*). Este mecanismo no es viable una vez ocurrido el deslizamiento, ya que su contribución desaparece con desplazamientos superiores a 0,05 mm [2].
- **Rozamiento.** La única compresión normal a la junta, suponiendo contacto entre la parte inferior y superior de la viga (contacto que, como se describió, no siempre es garantizado), correspondería a las cargas muertas, excluyendo el peso de la parte inferior de la viga. Incluso con un coeficiente de rozamiento $\mu=0,6$, la contribución de este efecto es mínima:

$$N_{cargas_permanentes} = 1259,5kN$$

$$\tau_{rozamiento} = \frac{\mu \times N_{cargas_permanentes}}{L/2 \times b} = 0,24MPa$$

- **Corte-fricción.**

El estado de la superficie en la cara de la junta de las muestras extraídas muestra que no se ha producido fricción entre caras, apreciándose una superficie porosa con bolsas de aire (figuras 11 y 12 anteriores), por lo que el contacto entre las dos piezas en las que queda separada la viga no está ofreciendo oposición al deslizamiento (ni por lo tanto se pueda contar con ella ante nuevas cargas).

- **Efecto pasador (*dowel action*).**

Como se ha indicado, es el principal mecanismo resistente cuando se trata de juntas con superficie lisa como es el caso. Sin embargo, la degradación del espesor del material segregado -cuyas propiedades, insistimos, son absolutamente inciertas- hace que la separación entre las rótulas que se forman en la barra sea significativa y,

por lo tanto, las reacciones horizontales necesarias para el equilibrio de la barra (que son las que contribuyen al paso de rasante por este efecto), sean muy reducidas. De la misma manera, el efecto *kinking* ([1] y [2]) debido a la componente horizontal de la tracción en la armadura, es muy reducido (el ángulo de la barra con la horizontal es próximo a 90 ° (figura 16).

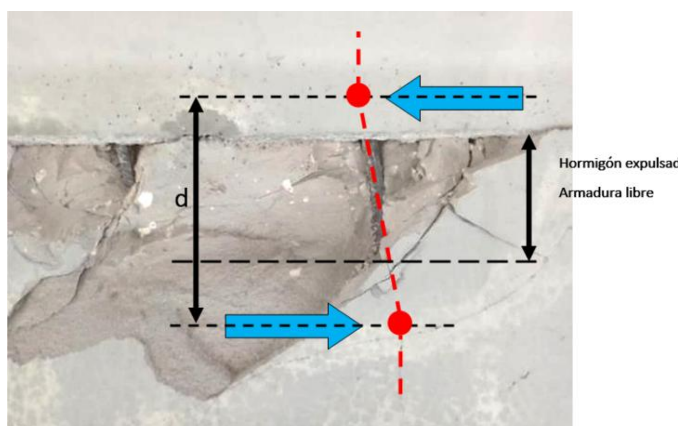


Figura 16. Deformación de la armadura transversal en viga 3 E-2.2. Efecto pasador de las armaduras

Admitiendo, a modo de ejemplo, que dicha distancia entre rótulas es $d=25$ cm, la contribución por este efecto pasador sería de apenas 0,1 MPa (la armadura en la zona objeto de estudio está compuesta por cercos $\phi 12$ separados 15 cm y que el espesor del alma es de 180 mm):

$$M_{pl} = f_y \times \pi \times \phi^3 / 6 = 0,36 \text{ kN} \times \text{m}$$

$$V_{pl} = M_{pl} / d = 1,45 \text{ kN}$$

$$V_{pasador} = 2 \times V_{pl} = 2,90 \text{ kN}$$

$$\tau_{pasador} = \frac{V_{pasador}}{b \times s} = 0,11 \text{ MPa}$$

- Corte-fricción para grandes deformaciones

Aunque la componente horizontal por el efecto *kinking* es muy pequeña debido a los aspectos mencionados, y dado que las superficies de las juntas apenas están en contacto, impidiendo el

desarrollo de fricción, el deslizamiento de la junta provocará grandes deformaciones antes de su fallo completo. Esto obligará a que los bloques superior e inferior entren en contacto, como se muestra esquemáticamente en la figura 17.

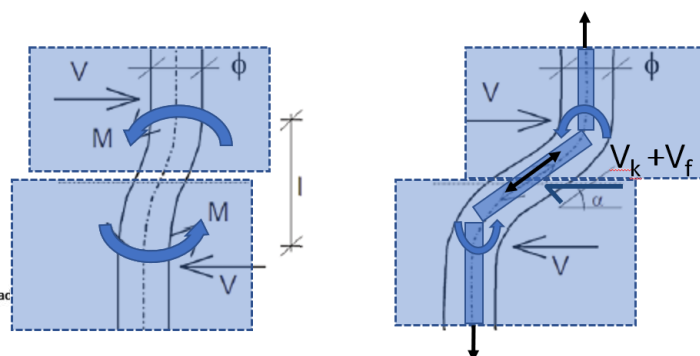


Figura 17. Efecto pasador (izquierda) y efecto pasador (muy reducido por la plastificación de la barra por tracción)+kinking+fricción (derecha) para grandes deformaciones en la junta y contacto entre bloques

En estas condiciones, se desarrollará una fuerza de rozamiento entre las superficies y crecerá la componente horizontal de los cercos (efecto *kinking*), permitiendo que se genere una fuerza rasante. A medida que estos mecanismos se desarrollan, la componente por el efecto pasador disminuye, y los cercos perderán su rigidez y capacidad a flexión, reduciendo el cortante asociado.

De manera simplificada, y para estimar órdenes de magnitud, el desplazamiento del bloque superior sobre el inferior para alcanzar la plastificación de las armaduras (con $d=25$ cm) sería de unos 17 cm (como se muestra en la figura 41, con $\alpha=56^\circ$). Este desplazamiento y giro de la armadura no pueden ocurrir en la práctica debido a las limitaciones impuestas por el bloque de hormigón por encima de la junta. El rasante en la junta resultaría de la suma de las componentes de rozamiento (con un coeficiente $\mu=0,6$) y efecto *kinking*:

$$V_{kinking} = 2 \times \pi \times \frac{\varphi^2}{4} \times f_y \times \cos(\alpha) = 55,2kN$$

$$V_{grandes_deformaciones} \sim V_{rozamiento} + V_{kinking} = 104,0kN$$

$$\tau_{grandes_deformaciones} = \frac{V_{grandes_deformaciones}}{b \times s} = 3,9MPa$$

$$V_{rozamiento} = 2 \times 0,6 \times \pi \times \frac{\varphi^2}{4} \times f_y \times \text{seno}(\alpha) = 48,8kN$$

Si bien en esta hipótesis sí se puede justificar una capacidad a rasante significativa (todavía inferior a las sollicitaciones, como se mostró anteriormente), dicho rozamiento plantea, como se ha indicado, importantes incertidumbres y, sobre todo, estas grandes deformaciones son incompatibles con el uso de la

estructura (no sólo por las propias deformaciones sino también por los desconchones que se producirían a lo largo de toda la viga, como de hecho ya había empezado a ocurrir). De hecho, ninguna normativa contempla este comportamiento.

Por lo tanto y acorde a lo anterior, una vez producido el fallo y deslizamiento en la junta, no es posible considerar (al menos con suficientes garantías y acotando las incertidumbres de manera razonable), capacidad alguna en la junta para transmitir los esfuerzos rasantes.

5. Conclusiones

Con base en los resultados de la investigación realizada sobre los defectos que presentaban las vigas de las estructuras de la autovía A-4 descritas en los apartados anteriores, así como del análisis de anomalías análogas en otros elementos prefabricados que presentaban los mismos defectos, cabe concluir:

- La existencia de juntas frías en este tipo de vigas prefabricadas tiene una grave trascendencia estructural, y suele exigir la adopción de medidas de seguridad urgentes, así como, en la mayoría de los casos, la sustitución de la estructura.
- La gravedad de dichos defectos -las citadas juntas frías y la segregación asociada en la mayoría de los casos- cuestionan el propio proceso de fabricación de este tipo de elementos, con las incertidumbres que ello supone sobre sus prestaciones en relación con las especificaciones de diseño.
- Si bien no es posible generalizar, hemos detectado que muchos elementos prefabricados de los años 2005-2015, para luces significativas y que requirieron el empleo de hormigones con requisitos resistentes relativamente

elevados, presentan importantes defectos de fabricación que cuestionan los estándares de calidad supuestos para este tipo de elementos.

- Por lo anterior, se recomienda prestar especial atención a las estructuras construidas con este tipo de elementos en dichas fechas, por si presentaran indicios de defectos de ejecución y/o defectuoso comportamiento estructural, que pudieran comprometer su seguridad.

6. Referencias

- [1] FIB. Model Code for concrete structures 2010. 2013.
- [2] Randl, N. - Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010. FIB WILEY. Structural Concrete 14 (2013) No 3.
- [3] Código Estructural. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Secretaría General Técnica. 2021.
- [4] IAP-98 Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 1998.
- [5] CEB-FIP. Model Code 90. 1993.