

2 INTRODUCCIÓN AL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS JUNTAS EN ESTRUCTURAS DE DOVELAS

2.1 PUENTES DE DOVELAS CON JUNTAS SECAS Y PRETENSADO EXTERIOR

Este tipo de puentes se caracteriza por ser construido a partir de dovelas prefabricadas, sin pretensado interno y sin armadura pasante, sólo con pretensado exterior. Además, no necesitan resina epoxy ya que la protección contra la corrosión se la confieren las vainas y la inyección.

Las dovelas son prefabricadas en un parque, proveyendo a las mismas de unas pequeñas indentaciones (de entre 4 y 6 centímetros de altura) en el alma, y en los forjados a modo de machihembrado. En obra, las dovelas son colocadas a tope unas con otras sobre una cimbra y ensambladas por el pretensado, pasándose tras esta etapa la cimbra o la celosía metálica al vano siguiente. Las luces medias de construcción son de unos 40 metros, siendo la limitación el peso y el precio de la cimbra. La longitud de las dovelas varía entre 2.5 y 6 metros (ver figura 2.1.1).



Figura 2.1.1. Dovelas con llaves

La principal ventaja de este tipo de puentes es la rapidez del proceso constructivo, ya que, al no tener que extender la resina a mano, todas las dovelas que componen un vano se ponen una a continuación de la otra y se pretensan.

Una ventaja de la no adherencia entre acero y hormigón en el pretensado exterior es la facilidad a la hora de realizar una inspección y un posible retesado, importante en una estructura como un puente que debe garantizar de manera especial su seguridad.

El hecho de que la vaina no atraviese las almas de la sección, facilita la labor de hormigonado, permitiendo la vibración por aguja y evitando la aparición de coqueas bajo las vainas.

Las pérdidas por rozamiento son menores que en el pretensado interior. En el pretensado convencional influyen dos variables, el ángulo girado por su trazado, voluntariamente diseñado, así como los ángulos no deseados que toma la vaina entre puntos de amarre que da lugar a desviaciones parásitas. En el pretensado exterior, al presentar la vaina un trazado recto entre anclajes y desviadores, no existen desviaciones parásitas.

Además, el estado de un puente con pretensado exterior se puede evaluar de manera sencilla, empezando por la posibilidad de la inspección visual.

Todas estas ventajas dan lugar a una tipología estructural de puentes: el puente de dovelas prefabricadas de hormigón con pretensado exterior y junta conjugada, cuya principal aportación es la rapidez de su proceso constructivo.

2.2 RESISTENCIA A CORTANTE EN LAS JUNTAS

Uno de los problemas de esta tipología estructural, actualmente en estudio, es la resistencia a cortante en las juntas. Debido a la discontinuidad que se produce en las juntas y a su posible apertura, el elemento calculado no puede considerarse monolítico. Además, debido a la diversidad de tipología de juntas (planas o con llaves, secas o con resina epoxy, etc.) y a su variedad de formas (número de llaves, geometría de las llaves, etc.) es difícil prever el comportamiento de las juntas y su resistencia.

Los puentes de dovelas con pretensado exterior se dimensionan para el estado límite de descompresión de manera que, frente a cargas de servicio, toda la sección quede comprimida y todas las juntas cerradas. En este caso podría considerarse una estructura monolítica y el modelo se comportaría de manera muy similar al caso real. También los tendones serían fácilmente modelizables considerando que la deformación se reparte de manera homogénea en la longitud del cable entre anclajes y/o desviadores, debido a la no compatibilidad en deformaciones con el hormigón. Además, estos incrementos son pequeños y se supone que no habrá deslizamiento entre vainas y desviadores, ya que para el estado límite de servicio no se supera la fuerza de rozamiento necesaria para este deslizamiento.

Sin embargo es el estado límite último el que suele guiar el diseño, y cuando se alcanza este estado el comportamiento es más difícil de modelar y está muy lejos del comportamiento de una estructura monolítica. Conforme la estructura se acerca al estado límite último debido al aumento de las cargas, las juntas se abren ostensiblemente y la estructura pierde rigidez rápidamente, siendo la flecha considerable en el momento de la rotura. Además, las diferencias de tensión entre tramos de cable sí supera el rozamiento que impedía el deslizamiento, por lo que éste sí se produce.

La transferencia de cortante a través de las juntas abiertas como se ha dicho es un tema complejo. La teoría universalmente aceptada propone que el cortante se transmite a través de las juntas por forjados y almas y se produce por dos mecanismos diferentes: uno debido a las fuerzas de rozamiento que aparecen entre superficies planas oponiéndose al deslizamiento y el otro debido a la existencia de las llaves.

El primero es debido a las fuerzas de rozamiento entre superficies planas comprimidas que intentan deslizar, apareciendo en la junta una fuerza que impide el deslizamiento y

contribuye a resistir el cortante. Esta fuerza es directamente proporcional a la compresión que actúa en estas superficies. El coeficiente de proporcionalidad es un coeficiente de rozamiento (μ_1). La resistencia a cortante debida a este mecanismo es:

$$V_{u1} = A_f \cdot \sigma_n \cdot \mu_1$$

Siendo:

V_{u1}	Resistencia a cortante debida a las fuerzas de rozamiento
A_f	Área de forjado comprimido susceptible de transmitir cortante
σ_n	Tensión de compresión que actúa en las superficies
μ_1	Coeficiente de rozamiento

El segundo, recoge el efecto del apoyo de las llaves conjugadas que, cuando están en contacto, transmiten el cortante como hormigón en masa, ya que al ser de pequeño tamaño no suelen ir armadas. La resistencia a cortante por unidad de área debida a este fenómeno se llama cohesión (c). Si además estas llaves están comprimidas, se incrementa la tensión tangencial última de estas pequeñas ménsulas de hormigón en masa proporcionalmente a la tensión de compresión. A este factor de proporcionalidad se le llama coeficiente de rozamiento interno (μ_2). La resistencia a cortante que aportan las llaves conjugadas se calcula como:

$$V_{u2} = A_{kc} \cdot (\mu_2 \cdot \sigma_n + c) + A_{kt} \cdot c$$

Siendo:

V_{u2}	Resistencia a cortante debida a la presencia de llaves
A_{kc}	Área de las llaves en la zona comprimida
A_{kt}	Área de las llaves en la zona de tracción que se encuentran en contacto
σ_n	Tensión de compresión que actúa en las superficies
c	Cohesión
μ_2	Rozamiento interno

Finalmente, la resistencia a cortante de las juntas abiertas sería la suma de las dos:

$$V_u = A_f \cdot \sigma_n \cdot \mu_1 + A_{kc} \cdot (\mu_2 \cdot \sigma_n + c) + A_{kt} \cdot c$$

Se entiende que la resistencia al deslizamiento que desarrollan dos superficies es función de las protuberancias e imperfecciones que tienen y las que se encuentran en contacto. El coeficiente de rozamiento dependerá de la rugosidad de las superficies, pero si de alguna manera estas imperfecciones se ven aplastadas por altas tensiones de confinamiento, el coeficiente de rozamiento podría disminuir. Para juntas no encoladas se recomienda minorar la resistencia a compresión del hormigón un 15 %, para tener en cuenta el efecto de un posible contacto irregular entre ambas superficies.

No obstante, existen diversas propuestas para los valores de los distintos coeficientes, e incluso formulaciones diferentes. Aquí se resumen algunas de las más importantes.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

El Massachusetts Institute of Technology, teniendo en cuenta la variabilidad del coeficiente μ_1 en los ensayos realizados y la bibliografía disponible hasta el momento, propone un límite inferior para el coeficiente de rozamiento $\mu_1 = 0.4$ para superficies lisas. Buyukozturk [6], del mismo Instituto, para sus ensayos realizados con juntas planas secas, utiliza valores de este coeficiente que se encuentran entre 0.5 y 0.8, siendo la resistencia a cortante para las juntas planas secas por unidad de área:

$$\tau_u = \mu_1 \cdot \sigma_n \quad \mu_1 \in [0.5 ; 0.8]$$

Donde:

τ_u Resistencia a cortante por unidad de superficie

El código ACI [3] establece un valor de $\mu_1 = 0.6$.

Para las juntas planas con epoxy, haciendo una regresión lineal de los resultados de los ensayos, y por tanto sin tener en cuenta coeficientes de seguridad, Buyukozturk establece que:

$$\tau_u = 0.851 \cdot \sqrt{f_{ck}} + 0.98 \cdot \sigma_n$$

Donde

f_{ck} Resistencia característica a compresión, en MPa

τ_u Resistencia a cortante por unidad de superficie, en MPa

Para las juntas con llaves conjugadas, se realizan una serie de ensayos con probetas de una sola llave, de cuyos resultados también calcula la regresión lineal. En estas expresiones se describe el comportamiento medio de la junta con llave, esto es, tanto el efecto del apoyo entre llaves como el rozamiento entre superficies de hormigón. Para las juntas con varias llaves estas ecuaciones constituyen un límite superior de resistencia porque implican una distribución uniforme de la tensión tangencial y que las llaves de cortante alcanzan y mantienen su resistencia hasta que todas las llaves se han roto, no teniendo en cuenta la posibilidad de un fallo progresivo de las llaves. Considerando siempre las tensiones expresadas en MPa, la resistencia de las juntas conjugadas por unidad de área sería:

Para juntas conjugadas secas: $\tau_u = 0.647 \cdot \sqrt{f_{ck}} + 1.36 \cdot \sigma_n$

Para juntas conjugadas con epoxy: $\tau_u = 0.922 \cdot \sqrt{f_{ck}} + 1.20 \cdot \sigma_n$

Como aplicación a una sección cualquiera con múltiples llaves conjugadas, la fórmula a aplicar sería:

$$V_u = A_1 \cdot \mu_1 \cdot \sigma_n + A_2 \cdot (\mu_2 \cdot \sigma_n + c)$$

Siendo

A_1 Área de la sección correspondiente a la zona sin llaves

A_2 Área de la sección correspondiente a la zona con llaves

Los valores de μ_1 , μ_2 y c se toman de la tabla 2.2.1 en función del tipo de junta.

TIPO DE JUNTA	μ_1	μ_2	c
Plana, seca	0.5 – 0.8	-	-
Plana, con epoxy	$0.851 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\sigma_n} + 0.98$	-	-
Con llaves, seca	0.5 – 0.8	1.36	$0.647 \cdot \sqrt{f_{ck}}$
Con llaves, con epoxy	$0.851 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\sigma_n} + 0.98$	1.20	$0.922 \cdot \sqrt{f_{ck}}$

Tabla 2.2.1. Valores de μ_1 , μ_2 y c en función del tipo de junta

Además, en los ensayos [6] se observa que las juntas con resina epoxy, sean con o sin llaves, son considerablemente más resistentes que las juntas secas, pero que su mecanismo de rotura es de tipo frágil. Basándose en estudios realizados para modelizar el comportamiento global de vigas construidas por dovelas, y de acuerdo con otros autores, Buyukozturk dice que el comportamiento y la tensión de rotura de vigas con juntas unidas mediante resina epoxy es bastante similar al de vigas monolíticas. Otros estudios realizados concentrados en el comportamiento frente a cortante en las juntas concluyen que los parámetros más importantes que afectan al comportamiento a cortante son: el nivel de pretensado, el espesor de la capa de resina epoxy, la forma de las llaves, la resistencia del hormigón, la preparación de la superficie y el área de contacto de la unión. Además, se concluye que la resistencia a cortante de dovelas unidas por epoxy es similar a la de elementos monolíticos pero con rotura frágil.

En general, el objetivo del diseño a cortante en vigas de hormigón armado pretensado o no pretensado, incluyendo los puentes de dovelas prefabricadas, es evitar la rotura frágil por cortante. Numerosas recomendaciones son establecidas en las diversas normativas con este fin. En el código ACI y en el AASHTO se contemplan como situaciones a evitar la fisuración del alma debida al cortante, la fisuración por flexión y cortante combinados y el fallo por cortante debido al aplastamiento de las bielas diagonales de compresión. Pero Buyukozturk [6] indica que, además, puede darse el fallo a cortante de las juntas debido a la rotura a cortante de las llaves, no contemplado hasta ahora. Por tanto, en el caso de puentes de dovelas de hormigón prefabricadas, debe ser añadida otra consideración para prevenir este modo de fallo.

El mecanismo de rotura de las llaves es bastante distinto en el caso de juntas conjugadas según sea la unión seca o con resina epoxy, como se describe a continuación.

En el caso de junta seca la primera fisura se produce para una carga del 70 % de la tensión máxima que soportará la junta. Esta fisura que aparece en la esquina inferior de la llave se propaga por un plano de cortante a 45° (ver figura 2.2.1.a). Antes de que se produjera la fisura, la carga era resistida por la fricción existente entre las dos superficies de la junta en contacto y por el apoyo en la parte inferior de la llave, en el

que el hormigón se comporta como una ménsula. Sin embargo, después de la formación de la fisura la mayor parte de la carga es transferida por este apoyo de la llave. Conforme aumenta la carga, pequeñas fisuras diagonales comienzan a formarse a lo largo de la base de la llave, que crecen y forman bielas de compresión (ver figura 2.2.1.b). A la carga máxima, las fisuras se unen y se produce la separación de la llave del resto de la pieza, produciéndose un gran deslizamiento entre ambas superficies (ver figura 2.2.1.c).

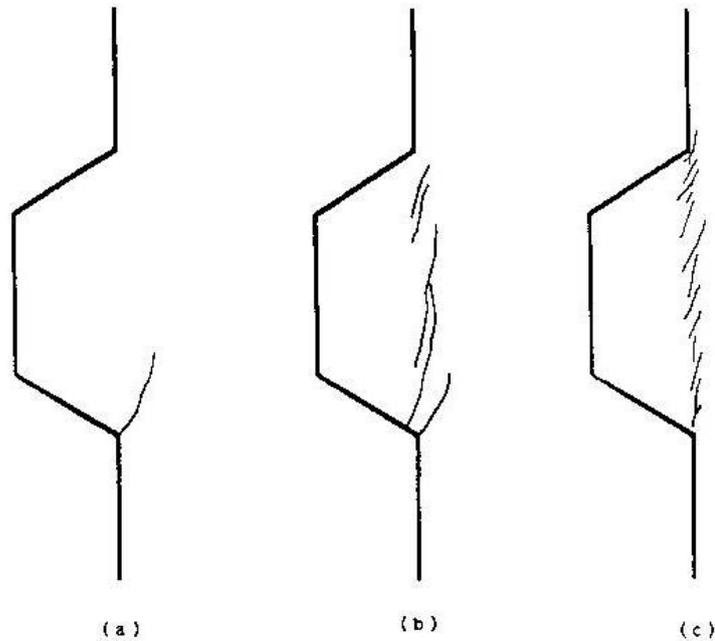


Figura 2.2.1. Secuencia de fisuras en junta seca con una llave

Este mismo tipo de llaves pero con una tensión de confinamiento mayor, presenta un comportamiento parecido, pero con una carga de rotura mucho mayor. Además, la grieta inicial formada en la base de la llave no crece tanto, lo que sugiere que las fuerzas de confinamiento mayores reorientan los planos principales de tensión y por tanto reducen la formación de bielas de compresión separadas por fisuras.

En el caso de llaves unidas mediante resina epoxy, la formación de la primera grieta es similar, aunque no solo se forma en la parte inferior de la pieza sino que también puede producirse en el centro del plano a cortante (ver figura 2.2.2.a). Además, ya no se produce al 70 % de la carga máxima sino muy próxima a esta carga de rotura, por tanto, después de producirse la fisura, resistirá poco más a cortante, siendo por ello una rotura más frágil que en el caso sin resina. Enseguida se forman otras fisuras diagonales a lo largo del plano a cortante que rápidamente se unen, llegando al colapso (ver figura 2.2.2.b y c). Además se observa que estas fisuras atraviesan la capa de resina y crecen a través del hormigón, mientras que en el caso sin resina nunca llegaban a atravesar la superficie de contacto.

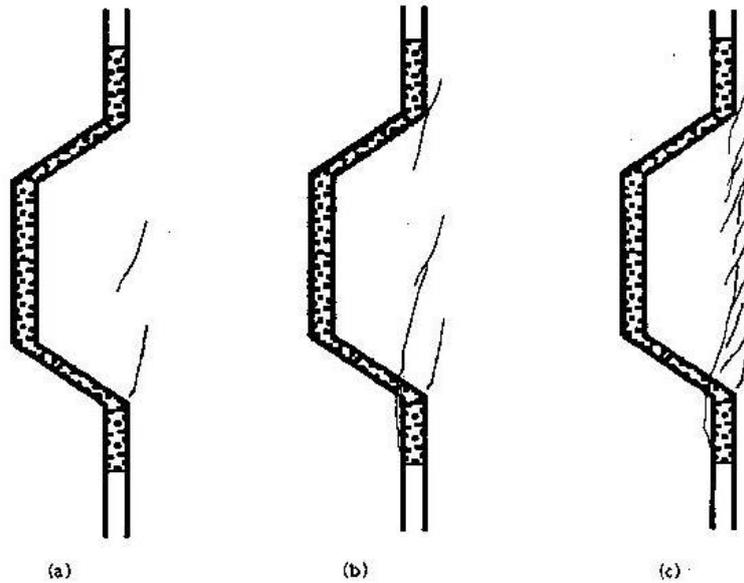


Figura 2.2.2. Secuencia de fisuras en junta con resina epoxy con una llave

También en este caso se observa que aumentado la tensión de compresión entre ambas superficies, aumenta la carga de rotura.

Comparando la resistencia a cortante de las llaves con o sin resina epoxy se observa que ésta es mucho mayor en el caso de juntas con epoxy. En el estudio de las juntas planas, ésta resulta ser entre 6 y 10 veces mayor para juntas con epoxy, mientras que en el caso de juntas con llaves conjugadas, la carga de rotura es del 25 % al 60 % mayor en juntas con resina con respecto a las juntas secas, siendo menor la diferencia cuanto mayor es la tensión de compresión a la que están sometidas. Esto demuestra que la resina aporta una parte considerable de la resistencia.

Además se observa que la fisuración en las juntas secas aparece mucho antes del fallo total por cortante, sobre todo con pequeñas tensiones de confinamiento. Sin embargo, en las juntas con resina, estas fisuras aparecen justo antes de la carga de rotura, resultando mucho más frágil. Después del colapso, en ambos casos, se produce un gran deslizamiento entre las superficies. Comparando además con una unión monolítica, la resistencia a cortante en las juntas con resina es mayor que en las de sección monolítica debido al efecto conjunto del apoyo entre las llaves, y la contribución a la resistencia de la resina.

Una de las principales aportaciones de estos estudios [6], es la descripción del mecanismo de fallo por deslizamiento de la junta debido a la rotura a cortante de las llaves, en contraposición al mecanismo de rotura a cortante del hormigón de la junta por fisuración. Buyukozturk, comparando las consideraciones del código AASHTO con la formulación por él propuesta, demuestra que este código en algunos casos no es conservativo en el cálculo de la resistencia a cortante. En la figura 2.2.3 se representa la resistencia a cortante calculada por ambos métodos en función de la tensión de confinamiento, y se observa que para tensiones menores de 300 psi aproximadamente se recomienda en uso de las fórmulas propuestas por Buyukozturk por resultar más conservativas. Esto es debido a que el código AASHTO no considera el mecanismo de fallo por deslizamiento.

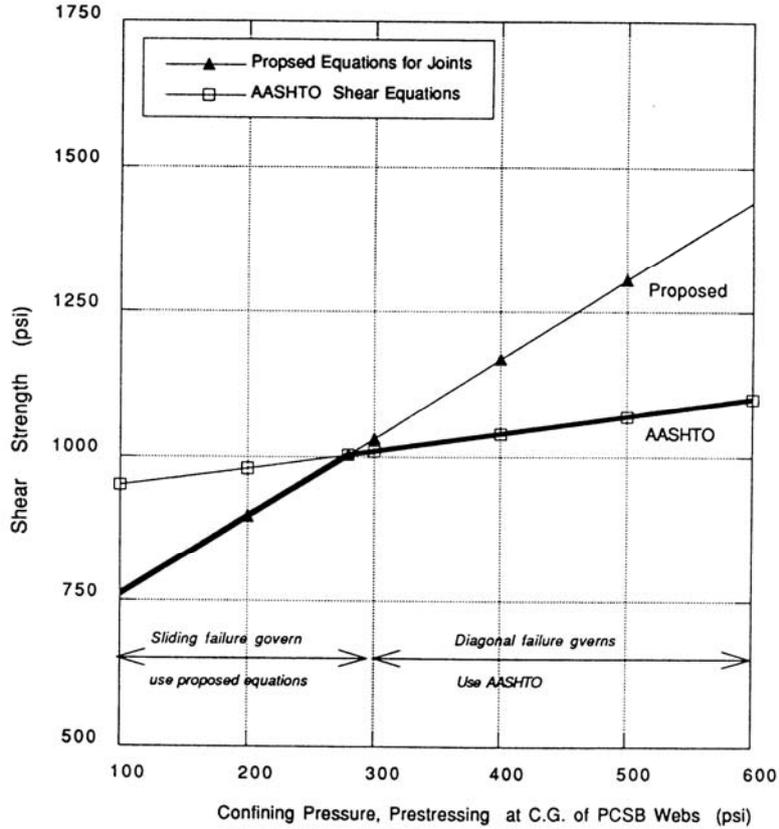


Figura 2.2.3. Comparación entre las recomendaciones del AASHTO y la formulación propuesta por Buyukozturk

UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN

Roberts [15] propone un método para evaluar la capacidad última de las juntas, si bien advierte que la rotura de la junta sólo se produce para valores tan bajos de la relación entre la luz a cortante (a) y el canto de la viga (d) como $a/d \leq 0.5$.

Roberts y Breen realizan un estudio teórico y proponen una fórmula válida para evaluar la resistencia a cortante de las juntas conjugadas de hormigones de resistencias comprendidas entre 28 MPa y 55 MPa sometidos a compresiones entre 0.7 MPa y 7 MPa, según la cual el cortante vendría dado por la expresión:

$$V_u = A_k \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot (0.2048 \cdot \sigma_n + 0.9961) + 0.6 \cdot A_{sm} \cdot \sigma_n$$

Donde las tensiones están expresadas en MPa y además:

A_{sm} Área de contacto entre superficies lisas en el plano de rotura (figura 2.2.5)

A_k Área de todas las llaves en el plano en el plano de rotura, que se calcula como:

$$A_k = n \cdot (H - h) \cdot b_w$$

Siendo

n número de llaves

H ver figura 2.2.4
 h ver figura 2.2.4
 b_w altura del alma de la sección

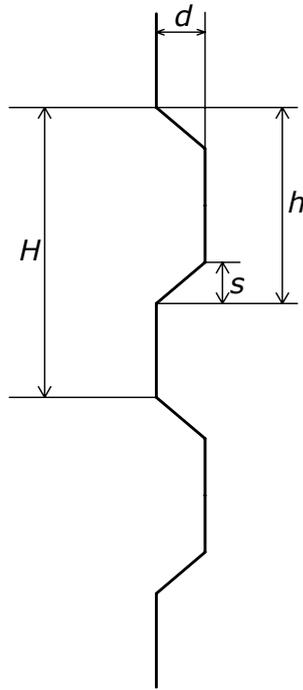


Figura 2.2.4. Parámetros que definen geoméricamente una llave

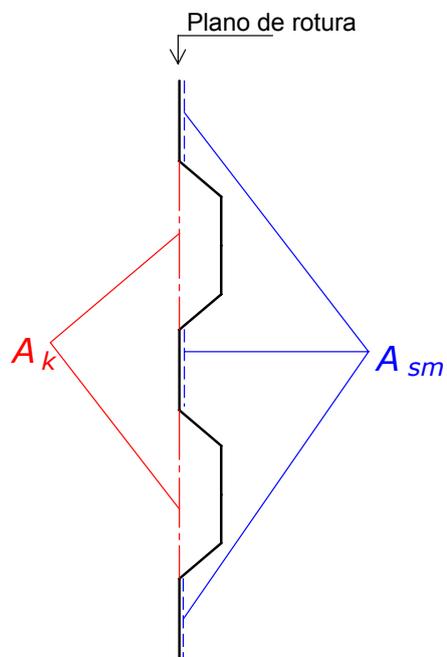


Figura 2.2.5. A_{sm} y A_k en junta conjugada para la fórmula de Roberts

SERVICE D'ÉTUDE DES STRUCTURES, CEBTP

Para Fouré [10] la capacidad de transmisión de cortante que tiene la junta abierta de un puente de dovelas tiene tres componentes: la fuerza de rozamiento en el forjado comprimido (A_f), la resistencia de las llaves conjugadas por encima de la fibra neutra (A_{kc}) y la resistencia de las llaves conjugadas que se encuentran en contacto físico por debajo de la línea neutra (A_{kt}). Fouré propone la siguiente ecuación para evaluar la capacidad de las juntas:

$$V_u = A_f \cdot \sigma_n \cdot \mu_1 + A_{kc} \cdot (\mu_2 \cdot \sigma_n + c) + A_{kt} \cdot c$$

Donde:

- μ_1 Coeficiente de rozamiento
- μ_2 Rozamiento interno
- c Cohesión
- σ_n Tensión de compresión que actúa en las superficies

Para el rango de tensiones $\sigma_n \leq 0.1 \cdot f_{ck}$:

$$\mu_2 = 0.5 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}} \quad c = 0.5 \cdot f_{ct}$$

f_{ct} Resistencia del hormigón a la tracción

En la tabla 2.2.2 se presenta un cuadro resumen para comparar los distintos coeficientes usados por los distintos autores en el cálculo de la resistencia a cortante de juntas secas con llaves conjugadas. Nótese que en realidad los coeficientes no son directamente comparables, ya que en el caso de Buyukozturk el coeficiente μ_2 se aplica a todo el alma comprimida y según Breen y Fouré dicho coeficiente sólo se aplica al área de llaves.

AUTOR	μ_1	μ_2	c
Buyukozturk	*	1.36	$0.647 \cdot \sqrt{f_{ck}}$
Breen	0.6	$0.2048 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	$0.9961 \cdot \sqrt{f_{ck}}$
Fouré	*	$0.5 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}}$	$0.5 \cdot f_{ct}$

Tabla 2.2.2. Comparación de las distintas formulaciones para junta seca conjugada

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

Turmo [17] realiza una tesis en la que estudia el comportamiento de los puentes de dovelas de hormigón con pretensado exterior y junta seca, haciendo especial hincapié en su capacidad resistente a cortante. Después de una investigación bibliográfica y de la realización de una serie de ensayos de cortante sobre paneles y vigas de hormigón para evaluar la capacidad resistente de las juntas secas, presenta un modelo de junta

basado en el Método de los Elementos Finitos para estudiar la transmisión de cortante en juntas conjugadas.

En los ensayos realizados sobre paneles, para el estudio del comportamiento de las juntas secas, se observa que después de estar todas las llaves fisuradas, la junta sigue transmitiendo carga. Turmo concluye que el elevado grado de fisuración que afecta simultáneamente a todas las llaves de una junta en los estadios previos a la rotura indica una distribución de esfuerzos últimos en la junta proporcional a las resistencias de cada llave, que a su vez dependen del nivel de compresiones al que se ven sometidas.

De los ensayos sobre vigas, realizados para el estudio del comportamiento de éstas en su conjunto, es decir, de la estructura por dovelas con junta seca y no sólo de la junta en sí, se extraen las siguientes conclusiones. Aunque la estructura no rompe estrictamente por la junta, ésta representa un punto de debilidad de la estructura, ya que a partir de la junta surge una fisuración que termina por agotar la estructura. La rotura por cortante de las vigas no es seccional, como en flexión, sino espacial. Las fisuras en torno a la junta parecen estar muy influidas por el número de llaves en contacto y por la profundidad de la fibra neutra. Observando el mapa de fisuras, Turmo concluye que la armadura de suspensión no es necesaria. La forma de rotura del forjado, con fisuras que lo atraviesan de lado a lado, parece apoyar la teoría de un forjado colaborante en la transmisión de tensiones tangenciales en todo su ancho.

Comparando los resultados de los ensayos con la formulación existente, Turmo concluye que la ecuación de la AASHTO para evaluar la resistencia a cortante es la que mejor se ajusta a los ensayos, tanto en media como en varianza. La fórmula, a la que se recomienda aplicar un coeficiente de seguridad de 0.75, es la del profesor Breen, ya citada anteriormente:

$$V_u = A_k \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot (0.2048 \cdot \sigma_n + 0.9961) + 0.6 \cdot A_{sm} \cdot \sigma_n$$

Además, conceptualmente, Turmo [17] también la encuentra muy acertada. En primer lugar, separa el cortante que es capaz de transmitir por las llaves A_k y el cortante que es capaz de transmitirse por la superficie lisa entre llaves A_{sm} . Además, la cohesión c y el rozamiento interno μ_2 dependen de la resistencia a tracción del hormigón, imponiendo que cuando las tensiones tangenciales en el seno de la llave hacen que se alcance la tensión principal de tracción, las llaves rompen. Sin embargo, no considera que la rotura pueda deberse a sollicitaciones de flexión local en la llave, lo que puede llevar en algunos casos a supervalorar la resistencia a cortante.

Turmo [17] realiza un modelo de análisis numérico que reproduce los resultados obtenidos en sus ensayos sobre vigas de dovelas de hormigón con junta seca y pretensado exterior. Diseña además un modelo de junta plana para el análisis de puentes completos, sin necesidad de modelizar las juntas con su geometría, con la ventaja que conlleva un modelo sencillo.

Los análisis efectuados confirman que el mecanismo resistente es espacial y no seccional. Ante una carga creciente la estructura responde con un mecanismo tipo arco. Un arco se configura naciendo de los apoyos de las vigas y otro surge de los desviadores, que actúan como apoyos intermedios.

Es posible dibujar en el seno del hormigón un modelos de bielas comprimidas capaz de resistir las cargas actuantes en Estado Límite Último sin necesidad de barras pasivas traccionadas, siendo los tirantes del modelo los cables de pretensados. Por

tanto, en las vigas se forma un mecanismo resistente que permite un esquema resistente a flexión y cortante sin necesidad de armadura convencional. La transmisión de tensiones tangenciales se asocia a la existencia de tensiones de compresión, de modo que todo el forjado es susceptible de transmitir cortante. Los cercos han de colocarse para controlar la fisuración, pero su presencia no implica sustanciales incrementos de la resistencia a cortante.

En los modelos realizados para la aplicación a puentes de dovelas con junta seca, se observa que en las dovelas con junta cerrada el cortante se transmite por las almas, en toda su altura, mientras que en el seno de dovelas con juntas abiertas, la transmisión del cortante se limita a la zona comprimida, debido al efecto arco. En estructuras isostáticas, cuando la altura de la fibra neutra alcanza el forjado superior, se forma un gran arco comprimido que nace en los anclajes del pretensado. En estructuras hiperestáticas, con las juntas de las dovelas de apoyo y de centro de luz abiertas al máximo, se forma para cada vano un gran arco comprimido que nace en los apoyos.

Las juntas abiertas entre dovelas permiten transmitir sin problemas los cortantes de sollicitación. Para las juntas de centro de luz donde la apertura es mayor, los cortantes son débiles, mientras que para las zonas donde los cortantes son mayores, es decir en los apoyos, las juntas permanecen cerradas.

Se demuestra que la existencia de tensiones tangenciales en la estructura está asociada a la existencia de compresiones en el hormigón, siendo el efecto arco el responsable de la transmisión del cortante. Así, por un lado, habrá que disponer la armadura transversal necesaria para asegurar que la flexión transversal producida por las tensiones tangenciales que cruzan la junta de forjado no comprometa la capacidad de la estructura y, por otro lado, Turmo concluye que no es necesario el dimensionamiento de la armadura transversal del alma con la intención de suspender el cortante que atraviesa la junta abierta. También parece razonable disponer un mínimo de armadura para absorber las tensiones tangenciales de rasante entre el forjado y el alma en las dovelas centrales cuando la fibra neutra se sitúa en el forjado superior, ya que se desarrollan unas altas tensiones de rasante necesarias para compatibilizar las deformaciones entre un forjado comprimido y el resto de la dovela, que no está sollicitado longitudinalmente.

HONG KONG UNIVERSITY

Recientemente, en el año 2005, Zhou [20] realizó una serie de ensayos en los que estudiaba el comportamiento de las juntas secas y con resina epoxy para los casos de junta plana, con una llave y con tres llaves. Sus conclusiones corroboran las de Buyukozturk [6]:

- la resistencia última a cortante aumenta con la presión de confinamiento
- las juntas con epoxy son considerablemente más resistentes que las juntas secas (entre un 20 y un 40 % más) pero más frágiles
- la aparición y evolución de las fisuras ocurre de la misma manera que la ya descrita en el apartado (el de Buyukozturk)

Sin embargo, este estudio presenta la novedad del ensayo de juntas con múltiples llaves, resultando que la resistencia media a cortante de cada llave en el caso de

juntas con llaves múltiples es menor que en el caso de junta con una sola llave, debido a las imperfecciones de las superficies de contacto que impiden el acoplamiento perfecto de las llaves. Este efecto negativo aumenta conforme crece el número de llaves en la junta, disminuyendo la capacidad de desarrollar totalmente la resistencia individual a cortante de cada llave. Por el contrario, en el caso de juntas con epoxy, podría considerarse que la resistencia unitaria de la llave en el caso de única llave y de llaves múltiples es prácticamente igual. Esto se explica porque la resina permite conseguir una perfecta unión entre ambas superficies y permite que el cortante se distribuya uniformemente por todas las llaves.

Además, comparando con la formulación propuesta por la AASHTO, se prueba que ésta sobrestima la capacidad a cortante de las juntas secas con llaves múltiples, sobre todo para pequeños valores de la tensión de confinamiento. Para una fuerza de compresión de 0.5 MPa la resistencia a cortante estimada es un 62 % mayor que el resultado experimental. Esto es debido a que las fórmulas propuestas son una extrapolación de estudios realizados con una sola llave, y por tanto no tienen en cuenta que en el caso de llaves múltiples no todas las llaves llegan a desarrollar plenamente su resistencia. El autor propone la introducción de coeficientes correctores en la formulación de la AASHTO para el caso de juntas secas con múltiples llaves conjugadas.

Es interesante considerar cómo se ha realizado el ensayo. La configuración de éste, mostrada en la figura 2.2.6, permite aplicar a las piezas un cortante en ausencia de momento. La tensión de confinamiento, que simula el efecto del pretensado en los puentes de dovelas, se aplica mediante una bomba hidráulica.

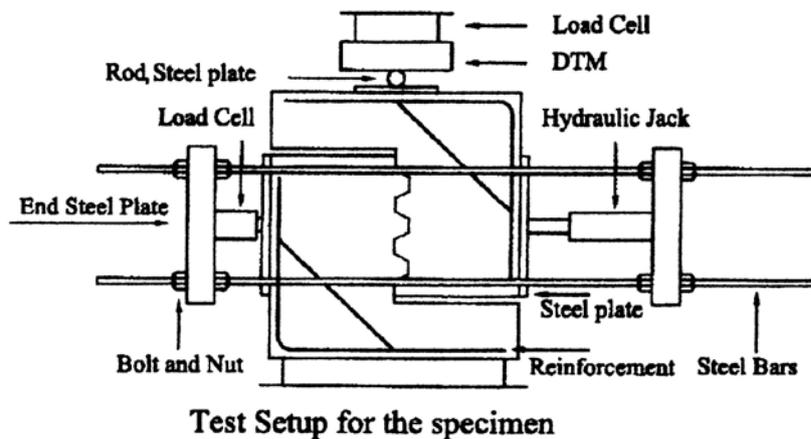


Figura 2.2.6. Ensayo a cortante para juntas con llaves múltiples

De los ensayos con junta plana, se deduce la fórmula para calcular la resistencia a cortante:

Junta plana seca:
$$V_d = 0.72 \cdot A_j \cdot \sigma_n$$

Junta plana con epoxy
$$V_e = A_j \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot (0.17 \cdot \sigma_n + 0.53)$$

Donde:

A_j área de la superficie de contacto de la junta

σ_n tensión de confinamiento
 f_{ck} resistencia característica del hormigón

Algunos autores proponen fórmulas independientes de la resistencia del hormigón, que tendrían sentido en los casos en los que el fallo se produzca por separación de la resina epoxy del hormigón, pero cuando, como en el caso que nos ocupa, el fallo ocurre por agrietamiento del hormigón y no por el fallo de la resina, es lógico que la resistencia a cortante dependa de la resistencia del hormigón en la fórmula.

El agrietamiento de cada llave en el caso de llaves múltiples es igual que en el de llaves individuales, pero es importante señalar que para juntas secas las grietas aparecen de forma secuencial, empezando por la llave inferior, después se producen en la intermedia, y finalmente en la superior. Esto indica que existe concentración de tensiones y que el cortante no está distribuido uniformemente, implicando una resistencia total de las llaves menor que la esperada calculada como la suma de las resistencias individuales que tendrían cada llave (ver figura 2.2.7).

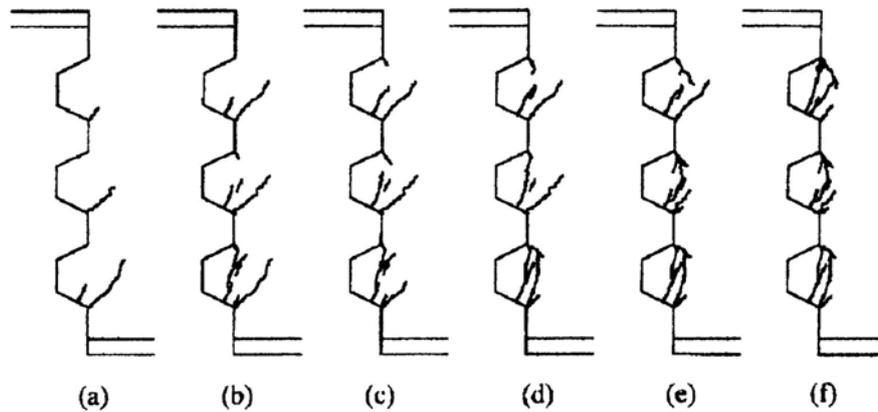


Figura 2.2.7. Secuencia de la fisuración para juntas secas con llaves múltiples

Sin embargo, en el caso de juntas con múltiples llaves con resina, la aparición de grietas en las llaves no es sucesiva sino simultánea, debido al mejor contacto entre superficies y acoplamiento entre llaves gracias a la resina. Esto implica una distribución uniforme del cortante entre las distintas llaves evitando concentración de tensiones. Como resultado se obtiene un mayor aprovechamiento de la resistencia de las llaves y una mayor resistencia de la junta cortante (ver figura 2.2.8).

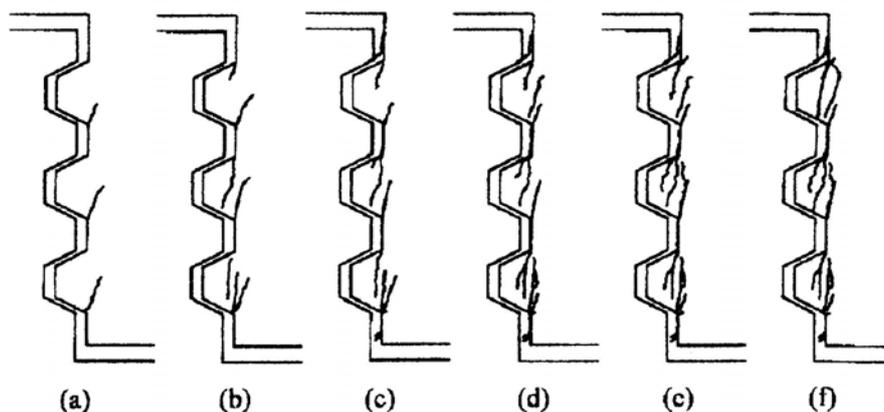


Figura 2.2.8. Secuencia de la fisuración para junta con epoxy y llaves múltiples

La resistencia a cortante de las juntas de llaves conjugadas puede considerarse como la suma de la contribución a la resistencia de las partes planas en contacto más la resistencia aportada por las llaves. Por tanto, después de los ensayos realizados, la resistencia de las llaves podría calcularse como la resistencia de la junta (resultado experimental) menos la resistencia de la parte plana (calculada con la fórmula de deducida anteriormente). El valor resultante dividido por el número de llaves da la resistencia media de una llave. Los resultados demuestran cómo una llave en el caso de junta seca con varias llaves tiene una resistencia menor que la misma llave en la junta equivalente con una llave, mientras que en el caso con resina la resistencia media de cada llave coincide para el caso de llaves múltiples y para el de llave individual. Esto indica que la resina reduce el efecto de las imperfecciones en la superficie de contacto, aumenta la rigidez de la junta y permite una redistribución del cortante más uniforme entre las llaves, permitiendo que todas las llaves puedan desarrollar completamente su resistencia.

2.3 NORMATIVA Y OTRAS RECOMENDACIONES

ATEP: PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN DE PUENTES Y ESTRUCTURAS CON PRETENSADO EXTERIOR

El documento que guía en España la concepción de este tipo de puentes es el manual de recomendaciones de la ATEP [4] sobre pretensado exterior. Allí se recoge el método para la verificación a cortante de juntas críticas de vigas de dovelas con pretensado exterior. El procedimiento sería el siguiente:

- cálculo de la profundidad de la fibra neutra para momento, axil y cortante de cálculo concomitantes.
- el área eficaz de las almas para transmitir esfuerzo cortante será el producto de la suma de sus anchos por la altura del canto que esté comprimido. Sólo la parte del forjado comprimido próxima a las almas se considera capaz de transmitir tensiones tangenciales. La tensión tangencial última que puede desarrollarse en esta área, para la parte de área eficaz donde no existan llaves de cortante múltiples, será:

$$\tau_u = 0.6 \cdot \sigma_{nm}$$

Y para la parte de área eficaz donde sí haya llaves de cortante:

$$\tau_u = 1.14 \cdot \sigma_{nm} + 0.569 \cdot \sqrt{f_{cd}}$$

Donde:

σ_{nm} Tensión de compresión (MPa)

f_{cd} Resistencia a compresión del hormigón minorada (MPa)

Para la aplicación de estas fórmulas habrá que tener en cuenta que llevan ya incluidos los coeficientes de seguridad y que las llaves que se encuentran por debajo de la fibra neutra no intervienen en el cálculo de la resistencia.

Por lo demás, para la verificación del hormigón y dimensionamiento de la armadura a cortante de las secciones situadas entre juntas de dovelas se seguirán las prescripciones de la EHE [9]. Además, en todas aquellas juntas en las que la flexión concomitante produzca su apertura, se suspenderá el esfuerzo cortante existente en la junta mediante la oportuna armadura de cuelgue.

EUROCÓDIGO EC-2

En la parte 1.5 del Eurocódigo 2 [8], titulado “*Reglas generales. Estructuras con tendones de pretensado exterior o no adherentes*”, se recogen diferentes consideraciones sobre el dimensionamiento a cortante para el proyecto de dovelas con juntas no armadas.

En primer lugar, se dice que para el proyecto de dovelas con las juntas no armadas son aplicables las reglas dadas para el hormigón armado, considerando los esfuerzos en las juntas como fuerzas externas actuando sobre la dovela de hormigón.

Además dice que la transmisión de esfuerzos se supondrá que actúa solamente en el área de la junta comprimida. La transmisión del cortante a través de las juntas sin armado se tendrá en cuenta como fuerzas externas actuando en la dovela de hormigón.

Se advierte también sobre la rápida disminución de la profundidad de la zona comprimida si se incrementa el momento flector. Considerando la acción más desfavorable y en ausencia de justificación por experiencias anteriores, las secciones de las juntas sin armar deben estar comprimidas en al menos dos tercios de su canto total.

Sin embargo, no orienta sobre el cálculo de la resistencia de la junta abierta.

AASHTO

En AASHTO se obliga al uso de las llaves conjugadas múltiples en puentes de dovelas, que deberán extenderse a lo largo de toda la altura del alma. También son

obligatorias las llaves en el forjado superior e inferior, pero se puede disponer una sola llave de mayores dimensiones.

Con respecto a las dimensiones de las llaves, la norma impone que

$$d \geq 3cm \quad ; \quad d \geq 2 \cdot \phi \quad ; \quad \frac{d}{h-s} \approx 0,5$$

Siendo

ϕ tamaño máximo el árido
 d, h, s ver figura 2.2.4.

Para el cálculo de la resistencia a cortante se emplea la fórmula del profesor Breen con un coeficiente de seguridad de 0.75, en la que todas las partes comprimidas de la sección transversal son susceptibles de transmitir cortante. La fórmula queda de la siguiente manera:

$$V_u = A_k \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot (0.2048 \cdot \sigma_n + 0.9961) + 0.6 \cdot A_{sm} \cdot \sigma_n$$

OTRAS RECOMENDACIONES

Para las juntas con llaves conjugadas, la Universidad de Austin en Texas da una serie de recomendaciones para la geometría de las llaves [15]. Los estudios demuestran que las llaves sinusoidales o triangulares tienen una resistencia menor que las trapecoidales. Además, la relación de dimensiones de la llave es importante a la hora de determinar su resistencia, recomendando valores para la relación d/h mayores de 0.125 (ver figura 2.2.4). Si se cumple esta condición la rotura de las llaves es total (shear off), mientras que llaves con h muy grandes rompen localmente por una esquina sin romper globalmente.

Otra de las conclusiones de estos estudios [15] es que la presencia de muchas llaves pequeñas en una junta resulta mucho más eficaz que la existencia de pocas llaves grandes.

Huang [12] estudió el comportamiento de puentes de dovelas con junta seca isostáticos e hiperestáticos, investigando su comportamiento en flexión, cortante y torsión mediante el programa de elementos finitos Abaqus. Las juntas fueron modelizadas mediante elementos de contacto especiales que permitían transmitir compresiones y tensiones tangenciales cuando los elementos estaban en contacto, pero sin modelizar geoméricamente las llaves. Como resultado se obtuvieron unos flujos de tensiones muy diferentes en ELS y ELU, debido a la apertura de las juntas.

Sin embargo, a pesar de la apertura de las juntas, el autor asegura que no hay problemas con la transmisión de cortante en la zona del centro de la luz debido a las pequeñas tensiones tangenciales que han de transmitirse. En las zonas de los apoyos, por el contrario, las fuertes compresiones se suman a las altas tensiones tangenciales, por lo que la junta de apoyo se convierte en una zona crítica. Se recomienda, por tanto, que en todo momento las juntas del centro del vano permanezcan comprimidas en al menos un tercio de su altura y las juntas sometidas a momentos negativos en dos tercios de su canto.

