

Resurgimiento de las rótulas de hormigón. Modelo y aplicación en proyectos recientes.

Renaissance of concrete hinges in bridges. Modeling and application in recent projects.

Michael Müller ^a, Antonio Carnerero Ruiz ^b, Belén Ortiz de la Torre Collantes ^c

^a Dipl.-Ing. Civil Engineer, Leonhardt, Andrä und Partner, Executive Board Member. michael.mueller@lap-consult.com

^b PhD Ingeniero de Caminos, Leonhardt, Andrä und Partner, Director Sucursal Madrid, antonio.carnerero@lap-consult.com

^c Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos, Leonhardt, Andrä und Partner, Jefa de Proyectos, belen.ortiz@lap-consult.com

RESUMEN

Las rótulas de hormigón constituyen un elemento que puede soportar cargas muy altas, admitiendo rotaciones elevadas y transmitiendo momentos prácticamente nulos. Este concepto clásico está experimentando actualmente un renacimiento, sobre todo por su rentabilidad y durabilidad. En estructuras integrales, incluso en el caso de puentes largos, se pueden utilizar rótulas de hormigón para evitar el uso de apoyos mecánicos aún con grandes desplazamientos del tablero. En el presente artículo se repasan los conceptos esenciales vinculados al diseño de las rótulas de hormigón y se muestran tres aplicaciones de Leonhardt, Andrä und Partner en puentes construidos recientemente.

ABSTRACT

Concrete hinges are an element that can withstand very high loads, admitting high rotations and transmitting practically zero moments. This classic concept is currently experiencing a renaissance, especially because of its cost-effectiveness and durability. In integral structures, even in the case of long bridges, concrete hinges can be used to avoid the use of mechanical bearings even with large displacements of the deck. This article reviews the essential concepts related to the design of concrete hinges and shows three applications of Leonhardt, Andrä und Partner in recently built bridges.

PALABRAS CLAVE: articulaciones de hormigón, diseño de puentes, apoyos, articulación Freyssinet.

KEYWORDS: concrete hinges, bridge design, bearings, Freyssinet hinge.

1. Introducción

Las rótulas de hormigón se comenzaron a usar a finales del siglo XIX, poco después de la invención del hormigón armado y de su extensa y rápida difusión. Se buscaba materializar de forma simple un punto en la estructura donde el momento flector fuese nulo, lo cual, en unos tiempos donde las posibilidades de resolución numérica eran limitadas, resultaba básico para definir estructuras isostáticas. Un uso muy frecuente de estas rótulas lo encontramos en

multitud de arcos triarticulados que se construyeron en aquella época.

Fueron distintas las variantes empleadas y en todos los casos sin unas reglas definidas que permitiesen un dimensionamiento estandarizado y seguro. No fue hasta la década de los 60 del pasado siglo cuando por primera vez, y gracias a los ensayos realizados por Fritz Leonhardt [1] en Stuttgart, se establecieron los criterios de diseño

que han servido hasta nuestros días para poder emplear estas rótulas en nuestras estructuras.

No obstante, y aunque se han usado exitosamente, su aplicación es limitada, posiblemente por las incertidumbres e inseguridades que genera en el proyectista el hecho de reducir drásticamente la sección transversal en un elemento solicitado por fuertes compresiones. Sin embargo, las rótulas de hormigón pueden llegar a soportar cargas muy elevadas con suficiente capacidad de rotación en la mayoría de los casos.

Este concepto clásico está experimentando actualmente un renacimiento, sobre todo por su rentabilidad, durabilidad y prácticamente nulo mantenimiento. Son cada vez más numerosas las administraciones que están imponiendo el diseño de puentes integrales en nuevas estructuras, precisamente para reducir los costes durante la vida de éstas, eliminando las siempre complicadas operaciones de sustitución de apoyos mecánicos que casi con seguridad serán necesarias a lo largo del periodo de servicio de la obra. Incluso en puentes de gran longitud con grandes desplazamientos del tablero se han empleado rótulas de hormigón en lugar de los tradicionales apoyos.

Tomando como punto de partida los criterios de diseño desarrollados por Leonhardt junto con sus adaptaciones a los métodos de cálculo recogidos en la normativa actual y las nuevas investigaciones realizadas en las últimas décadas, se dispone de una sólida base para la realización de diseños de puentes con articulaciones de hormigón. Además, la experiencia adquirida en los últimos años con muchos puentes construidos, en particular con el uso de hormigón autocompactante, la mejora de los procedimientos de control y medición, así como la construcción de prototipos a escala real permiten hoy en día realizar puentes con una alta calidad de ejecución y un aspecto visual sobresaliente.

En este artículo se describirá el uso de las rótulas de hormigón diseñadas por Leonhardt,

Andrä und Partner para una serie de estructuras integrales.

En primer lugar, se explicará su empleo en el puente del Elba en Mühlberg, puente mixto de gran longitud con una pila central en forma de V donde se dispusieron dos rótulas enfrentadas en la misma cimentación. A continuación, se explicará el puente arco del cañón de Tamina en Suiza, donde se adquirió una valiosa experiencia en el uso del hormigón autocompactante y su implementación en las zonas adyacentes a la rótula donde la densidad de armadura es muy importante. Finalmente, se abordará el proceso constructivo seguido en el proyecto más reciente del puente sobre el estrecho de Hessund en Finlandia, primer puente construido en Finlandia con rótulas de hormigón.

2. Breve reseña histórica

Fue en 1880 cuando Claus Köpcke [2] empleó por primera vez una articulación en una estructura de hormigón al enfrentar una superficie circular cóncava contra otra convexa sometidas a compresión. Se trataba de una rótula difícil de materializar al exigir una ejecución perfecta de esas dos superficies para lograr un contacto preciso. Desde ese momento, se empezaron a desarrollar distintas variantes tratando de mejorar la primera solución (Marx and Schacht, [3]) y entre las que finalmente sobresalieron dos, con apariencia similar, pero con un fundamento resistente totalmente opuesto. La primera de ellas fue desarrollada por Mesnager [4] en el 1908. Su idea partía de reducir la sección para permitir exclusivamente el paso de las armaduras de acero por el centro de la misma. Dispuestas con forma de X, anulaban de ésta forma la posibilidad de resistir cualquier momento flector al no existir distancia de separación entre las barras. Estas eran las encargadas de la transmisión de la totalidad del esfuerzo axial. El hormigón dispuesto a su alrededor era empleado exclusivamente como material protector de las armaduras y evitaba,

además, el pandeo de estas, pero sin conferirle ninguna misión resistente.

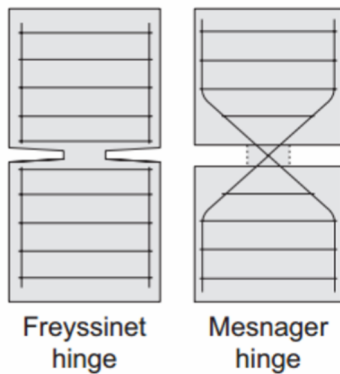


Figura 1. Rótulas Freyssinet y Mesnager.

La segunda solución fue la desarrollada por Freyssinet [5] en 1910. Freyssinet eliminó completamente el paso de las armaduras por la garganta de la sección reducida, y dejó que fuese el hormigón completamente confinado, al estar sometido a un estado tridimensional de tensiones, el que se encargase de transmitir la fuerza de compresión.

A su vez, este estado tensional permitía rotaciones importantes en la articulación así creada.

Fue esta última solución la que se impuso y se ha desarrollado posteriormente puesto que aprovechaba todas las ventajas del hormigón confinado, en cuanto a capacidad resistente y facilidad de ejecución, y evitaba los problemas de pandeo de la armadura que podía presentar la solución de Mesnager si no se diseñaba correctamente.

En 1965, Leonhardt [1] llevó a cabo una serie de experimentos de los que se obtuvieron las primeras reglas de diseño para la definición de las rótulas de hormigón, reglas que posteriormente fueron adaptadas por Mönnig and Netzel [6] para facilitar su uso en la práctica.

Hoy en día, tanto la nomenclatura empleada como los criterios geométricos y mecánicos deducidos en estos estudios siguen estando plenamente vigentes. Se resumen en el siguiente cuadro extraído de [3].

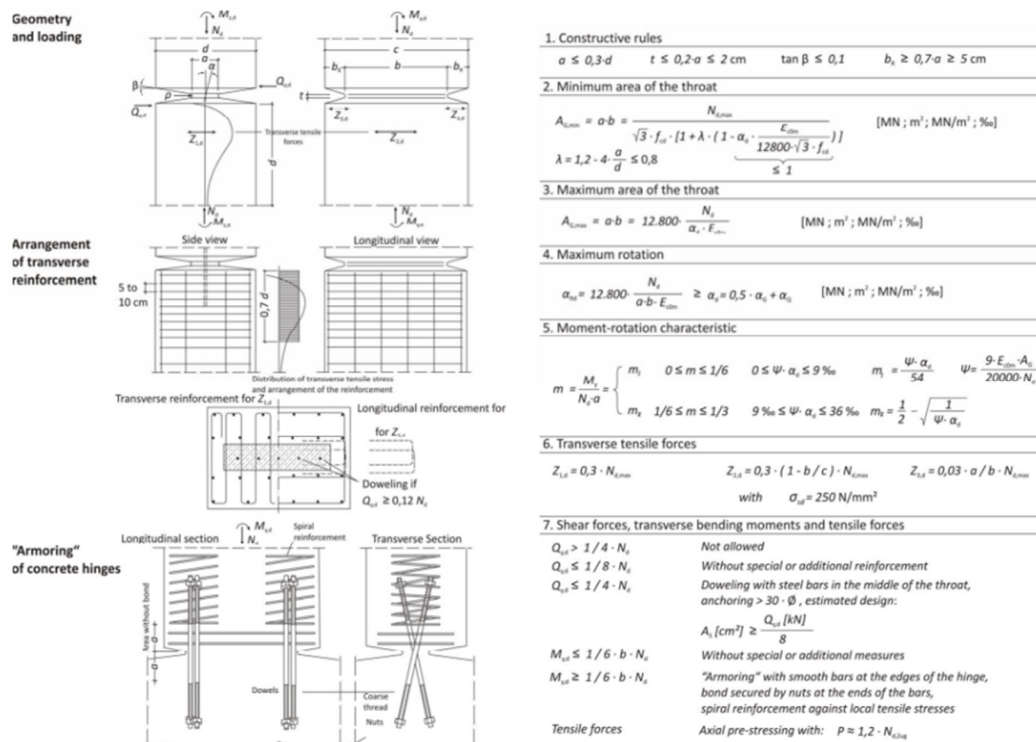


Figura 2. Resumen de los criterios de diseño de la rótula Freyssinet.

3. Últimos estudios e investigaciones

El resurgir del empleo de las rótulas de hormigón ha conducido en los últimos años también, en paralelo, a la realización de nuevos ensayos e investigaciones orientados a cubrir las carencias existentes en los estudios del siglo pasado.

En concreto, el trabajo de Marx and Schacht [8] se ha centrado en la adaptación de la formulación alemana, generada con un criterio de tensiones admisibles, a los criterios de cálculo semi-probabilístico de los Eurocódigos.

En los estudios de Schlappal [9] [10] se han desarrollado nuevas fórmulas analíticas empleando la hipótesis de Bernoulli-Euler y de la ley de Hooke. A diferencia de la formulación de Leonhardt, en esta nueva formulación se tiene en cuenta explícitamente la armadura pasante por la rótula, tanto en los cálculos en servicio como en los cálculos en estado límite último. Si en la primera se limitaba la zona traccionada de la garganta hasta la mitad de la anchura de esta, en esta nueva formulación se anula este límite al considerar directamente el estado deformacional de la armadura pasante y aplicar los criterios generales recogidos en Eurocódigo [11]. De esta manera, se consigue ampliar la rotación admisible de la articulación ya que la fisuración por flexo-compresión más allá de la mitad de la sección transversal se acepta al considerar el equilibrio de fuerzas entre la armadura y el hormigón de la sección.

En esta misma línea se han dirigido los estudios de Markic y Kaufmann [12] adoptando para el comportamiento del hormigón una ley que considera el incremento de resistencia de éste en la garganta y que permite seguir un procedimiento similar al aplicado en el dimensionamiento de cualquier otra sección de hormigón armado. Asimismo, abordan los controles a realizar cuando existen momentos de

eje perpendicular al de giro de la rótula. Especial mención merece la formulación propuesta para el tratamiento de la resistencia frente a esfuerzos cortantes, similar a la empleada para comprobar el rasante en juntas entre hormigones y su aplicación añadida para el control de esfuerzos torsores. Finalmente, propone fórmulas de interacción entre esfuerzos y comprueba sus propuestas mediante ensayos de laboratorio.

Es interesante comprobar como en estos ensayos tanto la formulación propuesta por los autores como la de Leonhardt conduce a resultados muy similares, si bien, la primera permite ampliar el rango de aplicabilidad de la segunda.

Existen países que han establecido sus propias reglas para el control de las rótulas de hormigón. En líneas generales, se fundamentan en las expresiones ya conocidas, introduciendo modificaciones particulares como puede ser el de la máxima relación cortante / axil o la máxima rotación admisible. Es el caso de Francia con el código BAEL 91 [13] o Países Bajos con el documento NEN 6723 [14].

En Gran Bretaña existe el documento CS468 [15] de reciente elaboración, donde se adopta un enfoque mucho más conservador, limitando el empleo de las rótulas a las estructuras ya construidas y no permitiendo en ningún caso las tracciones en la sección de la garganta de la rótula.

4. Aplicación a puentes recientes de Leonhardt, Andrä und Partner

A lo largo de la historia de la empresa son múltiples los proyectos realizados en los que se ha recurrido a la disposición de rótulas. Esta larga trayectoria ha permitido adquirir una sólida experiencia, tanto en el diseño de estos elementos, como en su posterior control durante la ejecución. Y sin duda, este último aspecto, requiere de una especial consideración. La fuerte

concentración de armaduras en las zonas cercanas a la garganta, necesarias para evitar la rotura por plastificación de la armadura de difusión de la carga concentrada, junto con el limitado espacio de la garganta obligan a controlar especialmente la dosificación del hormigón y su puesta en obra. De hecho, en los ejemplos de puentes que se mostrarán a continuación se realizaron prototipos de la rótula antes de la ejecución final que sirvieron como elementos de ensayo y control y fueron básicos para asegurar el resultado buscado.

Por otra parte, se ha tratado de evitar siempre la concentración elevada de armadura atravesando la articulación puesto que complican enormemente la ejecución, impiden la libre retracción y fluencia del hormigón, son motivo de posibles grietas en la garganta y aumenta la resistencia frente a momentos flectores. No obstante, una mínima cuantía,

permite asegurar un comportamiento plástico frente a esfuerzos cortantes.

4.1 Puente sobre el río Elba en Mühlberg (Alemania), 2008

Se trata de un puente de carretera de 690 m de longitud y una anchura de 13 m que permite albergar 2 carriles de circulación. Está formado por 8 vanos de acceso de 35 m de luz de hormigón pretensado y 4 vanos principales de $84.5 + 144.0 + 120.0 + 62.0$ m en tablero mixto. Este tramo principal que salva el río Elba está formado por una sección transversal en sección cajón de anchura inferior 6.9 m y canto variable. Sobre ella se dispone una losa de hormigón de 0.35 m de espesor en su zona central y voladizos de 3.73 m. Este puente fue galardonado con el German Bridge Award (Deutscher Brückenbaupreis) en 2010. [16]



Figura 3. Alzado del puente sobre el río Elba en Mühlberg.

El elemento más singular del puente es la pila en la orilla oriental del río con su distintiva forma en V. Los dos brazos de la pila se han diseñado mixtos, con relleno de hormigón

autocompactante en su interior y conexión mediante rótulas de hormigón a la cimentación.

La sección en la zona de apoyo tiene unas dimensiones de 1.6 m x 5.5 m mientras que la garganta es de 0.4 m x 5.0 m.

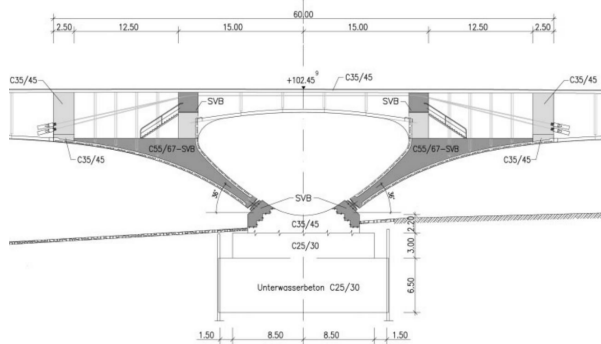


Figura 4. Alzado general de la pila.

Debido a la importante concentración de armadura y los altos niveles tensionales en esta zona se recurrió al empleo de hormigón autocompactante de calidad C55/67.

La rótula se diseñó con los criterios generales establecidos y definidos en la figura 2. No obstante, fue necesario adoptar disposiciones adicionales para hacer frente a los esfuerzos torsores y cortantes.

En el caso del esfuerzo torsor generado por la curvatura en planta del puente, se simplificó en la zona de la garganta como una pareja de fuerzas como se muestra en la figura 5. Esta pareja de fuerzas se aplicó exclusivamente en la zona comprimida por el axil concomitante con el torsor máximo. El efecto de estas fuerzas es un aumento en el cortante equivalente a considerar en el dimensionamiento de esta zona. Además, la transmisión del torsor se diseñó para hacerse directamente entre la zona de la junta y el cajón metálico mediante bielas comprimidas y evitar el incremento de armadura de refuerzo que sería necesario en caso de transferirse a las zonas adyacentes de hormigón.

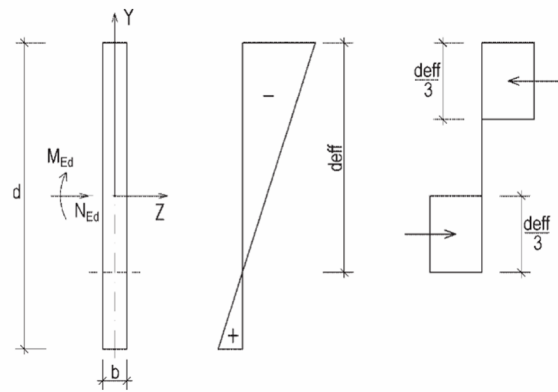


Figura 5. Distribución del momento como un par de fuerzas sobre la garganta de la rótula.

En relación al cortante, se consideró admisible una relación $V/N < 0.4$ teniendo en cuenta, por una parte, que numerosos ensayos habían alcanzado relaciones $V/N=1$ sin mostrar deterioros y, por otra, que el origen de la limitación $V/N \leq 0.25$ se basaba en adoptar un coeficiente de rozamiento de 0.6 con un coeficiente de seguridad de 2.5. Dado que un coeficiente de rozamiento de 1 está admitido por la DIN 1045-1 [17], se consideró que el límite $V/N=1/2.5=0.4$ era razonable. Con este valor, no resultaba necesario disponer armadura de cortante atravesando la rótula. No obstante, para evitar una rotura frágil, se decidió disponer 2 barras de $\Phi 32$ cada 0.2 m tal y como se muestra en las siguientes figuras:

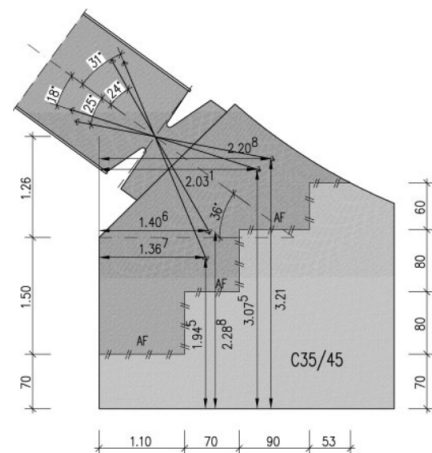


Figura 6. Definición de la armadura atravesando la rótula.



Figura 7. Armado de la rótula.

Además, antes de la realización del hormigonado final de la rótula se realizó una muestra a escala real, pero de menor anchura, para comprobar que tanto la dosificación del hormigón como con la puesta en obra eran las adecuadas.

4.2 Puente sobre el cañón de Tamina (Suiza), 2014

El puente sobre el cañón de Tamina con una longitud total de 417 m está formado por un puente arco de hormigón de tablero superior totalmente integral salvo en los apoyos sobre los estribos. Está formado por un tablero en sección cajón constante de 2.75 m de canto en su zona central y ligeramente variable sobre las pilas exteriores del arco. La anchura del tablero de hormigón pretensado es de 10.5 m. Se conecta monolíticamente al arco por pilas inclinadas en distancias variables entre 44 y 64 m. El arco de hormigón C45/55 se extiende 260 metros a través del desfiladero de Tamina y tiene una flecha de 40 m. En el área de la clave del arco, la superestructura y el arco se combinan en un solo elemento en una longitud de 57 metros.



Figura 8. Alzado del puente sobre el cañón de Tamina

En este puente se dispusieron rótulas de hormigón en los dos extremos de las pilas que unen el arco con el tablero actuando estos

elementos como meros puntales solicitados exclusivamente a compresión. (figuras 9 y 10)



Figura 9. Detalle de unión de pilar con tablero.



Figura 10. Armadura inferior de rótula

Antes de la ejecución de las rótulas se realizó un ensayo a escala real que permitió verificar el correcto procedimiento de armado y hormigonado previsto (figura 11).



Figura 11. Prototipo de la rótula.

4.3 Puente del Estrecho de Hessund (Finlandia), 2023-2024

El puente sobre el estrecho de Hessund es de tipología pórtico de hormigón pretensado, con tres vanos, una longitud total de 200 m y una luz central de 119 m.

La sección transversal del tablero es una viga biacena con un ancho de 17m, formado por dos vigas longitudinales de canto variable sobre las que se sitúa la losa de hormigón.

El tablero se apoya en 2 pilas inclinadas en alzado, con forma en “V” en sentido transversal.

De esta forma resultan luces del tablero de 45,4 - 92,0 - 45 m.

Las pilas inclinadas tienen canto variable y convergen hacia el eje central hasta conectarse en un bloque común donde se sitúa una rótula de hormigón.

El puente es semi-integral y sólo cuenta con apoyos en los estribos. Durante la fase de planificación preliminar, el reto consistía en generar más flexibilidad en la estructura para poder absorber las deformaciones resultantes de retracción, fluencia y temperatura.

En consecuencia, surgió la idea de disponer rotulas de hormigón en el extremo inferior de los pilares para generar una construcción más flexible y eliminar momentos flectores hiperestáticos. Este principio permitió diseñar unos pilares inclinados más esbeltos y elegantes, además de crear una estructura integral, robusta y de bajo mantenimiento.



Figura 12. Alzado del puente sobre el estrecho de Hessund

Las juntas de hormigón están orientadas en torno al eje transversal. Sin embargo, como el puente es curvo en planta, hubo que prestar especial atención a la alineación de las juntas de hormigón transversales al eje del puente, ya que los momentos transversales y los esfuerzos cortantes en la junta tienen una importancia decisiva para su posterior diseño.



Figura 13. Modelo de la pila inclinada.

Además, como ya se ha descrito, el diseño de las articulaciones de hormigón viene determinado principalmente por la relación entre estas fuerzas cortantes y los axiles concomitantes. Especialmente durante el proceso de construcción, se dieron condiciones en las que la rotación de las articulaciones tuvo que limitarse ya que los axiles eran todavía muy bajos por la falta del peso de hormigón de la superestructura.

En primer lugar, se construyeron las pilas sobre un encofrado inclinado, que se apoyaba en gatos hidráulicos. A continuación, se construyó la superestructura sobre una cimbra continua de madera, se realizó el pretensado y se bajó el encofrado. Esto provocó, por un lado, un aumento gradual de las cargas axiles en los pilares y, por otro, deformaciones y rotaciones retardadas en el tiempo en la articulación de hormigón debido a las deformaciones por retracción y fluencia del vano central.

Para compensar estas rotaciones en la articulación, se aplicó un contragiro utilizando

los gatos de la cimbra, garantizando así que la pila se situase en el eje central una vez terminado el puente.

Para controlar estas deformaciones aplicadas y obtener información adicional sobre el comportamiento a largo plazo de la fluencia y retracción, se decidió implantar un sistema de monitorización que registró las rotaciones en la articulación durante todo el proceso de construcción y proporcionó así conclusiones sobre el comportamiento de las deformaciones, posibles fisuraciones y evolución de fuerzas.

De este modo se garantizó que la pila con la articulación de hormigón cumpliera todas las restricciones de deformación pertinentes en su estado final.

Referencias

- [1] F. Leonhardt and H. Reimann, (1965) *Betongelenke Versuchsbericht, Vorschläge zur Bemessung und konstruktiven Ausbildung*. Berlin: Ernst.
- [2] Köpcke, (1888) “Über die Verwendung von drei Gelenken in Steingewölben“, *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur Vereins zu Hannover*, S. 374-380.
- [3] Marx S, Schacht G. (2010) Concrete hinges—historical development and contemporary use. 3rd International fib Congress and Exhibition. Precast Prestressed Concrete Institute.
- [4] Mesnager, (1907) “Experiences sur une semi-articulation pour routes en Béton armé“, *Annales de Ponts de Chaussees*.
- [5] Eugène Freyssinet, (1993) “Un amour sans limite“, *Éditions du Linteau*, Paris.
- [6] E. Mönning and D. Netzel, (1969) ‘Zur Bemessung von Betongelenken’, *Der Bauingenieur*, vol. 44, no. 12, pp. 433–439.
- [7] F. Leonhardt and E. Mönning, (1986) *Vorlesungen über Massivbau - Teil 2: Sonderfälle der Bemessung im Stahlbetonbau*, Dritte Auflage. Springer Berlin Heidelberg.
- [8] S. Marx and G. Schacht, (2010), ‘Betongelenke im Brückenbau: Bericht zum DBV-Forschungsvorhaben 279’, *Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.*, Berlin, Technical Report Nr. 18.
- [9] T. Schlappal et al., (2020) ‘Serviceability limits of reinforced concrete hinges’, *Engineering Structures*, vol. 208, p. 109861.
- [10] T. Schlappal, J. Kalliauer, M. Vill, H. A. Mang, J. Eberhardsteiner, and B. L. A. Pichler, (2020) ‘Ultimate limits of reinforced concrete hinges’, *Engineering Structures*, vol. 224, p. 110889.
- [11] EN 1992-1-1, (2004) ‘Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings’, Brussels.
- [12] T. Markić and W. Kaufmann, (2023) ‘Modeling and design of concrete hinges under general loading’, *Structural Concrete*, doi: 10.1002/suco.202201110.
- [13] Règles BAEL 91 modifiées 99; (1999) *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états-limites*; Editions Eyrolles.
- [14] NEN 6723 (1995) *Vorschriften beton*. Bruggen (VBB 1995) - *Constructieve eisen en rekenmethoden*.
- [15] Highways England, ‘CS 468 (2020)- Assessment of Freyssinet concrete hinges in highway structures’.
- [16] Nguyen Viet and holger Jankowiak, (2009) “Betongelenke aus selbstverdichtendem und hoch-festem Beton bei der neuen Elbebrücke“ *Mühlberg* doi: 10.1002/bate.200910064, *Bautechnik* 86 (2009), Heft 10.
- [17] DIN 1045-1: (2001) *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion*.