

Estudio experimental de cimentación prefabricada para torres eólicas desmontables para climas árticos

Experimental study of detachable precast foundations for wind towers in arctic climate

Miguel LÓPEZ LÓPEZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Universidade da Coruña
Investigador
miguel.lopez1@udc.es

Fernando VARELA PUGA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Universidade da Coruña
Investigador
f.varela.puga@udc.es

Manuel F. HERRADOR

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Universidade da Coruña
Profesor contratado doctor
manuel.herrador@udc.es

Juan Luis PÉREZ ORDÓÑEZ

Doctor Ingeniero Informático
Universidade da Coruña
Profesor contratado doctor
juan.luis.perez@udc.es

Arturo ANTÓN CASADO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
TEMHA, S.L./Universidade da Coruña
Ingeniero/Profesor asociado
anton@temha.com

J. Antonio GONZÁLEZ MEIJIDE

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
TEMHA, S.L./Universidade da Coruña
Ingeniero/Profesor asociado
meijide@temha.com

RESUMEN

En este trabajo se detalla la campaña experimental adoptada para verificar el correcto funcionamiento estructural de una cimentación prefabricada diseñada en varias partes conjugadas desmontables que serán montadas y pretensadas en obra. Para el estudio de la unión entre conjugados y el funcionamiento del conjunto montado en servicio se diseñan tres fases experimentales: análisis y selección de material para correcto reparto de cargas en contacto de partes conjugadas, comportamiento a fatiga de las llaves de cortante de la junta frente a esfuerzo de cizalla y validación del conjunto en estado límite último bajo carga combinada de flexión y cortante.

ABSTRACT

This work details the experimental campaign adopted to verify the correct structural behaviour of a precast foundations designed in several conjugated detachable parts that will be assembled and prestressed on site. Three experimental phases are designed to study the link between conjugated and the functioning of the assembly on service: material analysis and selection to ensure the correct load distribution in the conjugated parts contact, fatigue behaviour of joint shear keys under shear stresses and ultimate limit state assembly validation subjected to combined flexural and shear stresses.

PALABRAS CLAVE: torre eólica, cimentación desmontable, llaves de cortante, prefabricado, fatiga.

KEYWORDS: wind tower, detachable foundations, shear keys, precast, fatigue.

1. Introducción

La energía eólica constituye cada vez una fuente de energía más eficiente y competitiva; este tipo de producción supone más de un 20% del total en 80 países. El aumento de la capacidad de energía eólica instalada es de unos 500 MW anuales en países como Suecia o Finlandia.

Actualmente, las torres eólicas son proyectadas y ejecutadas para una vida útil de hasta 30 años y, a pesar de que se considera una energía limpia, tiene un importante impacto en el ecosistema terrestre y aéreo que ocupan durante y después de su vida útil.

En el proyecto ARTECH, desarrollado con las empresas TEMHA S. L, Norvento Enerxía y ELINSA, se plantea la implantación de torres eólicas desmontables para climas árticos. Esto se consigue mediante la prefabricación por partes de la estructura y su instalación en obra mediante conjugados y pretensado no adherente. Por un lado, se alcanza el objetivo de reducir la huella ecológica permitiendo la retirada de todos los elementos una vez cumplida su función durante todo el ciclo de vida. Por otro lado, se abaratan costes debido a la posibilidad de producción en serie en planta y a temperaturas más aptas para la fabricación que las que se obtienen en una obra en clima ártico.

2. Campaña experimental

La cimentación está diseñada en varias partes conjugadas, las cuales son un núcleo central denominado cáliz y 8 pétalos anclados al cáliz distribuidos de manera radial alícuota como vemos en la Ilustración 1. Las caras de contacto entre cáliz y pétalos cuentan con 4 llaves de cortante conjugadas.

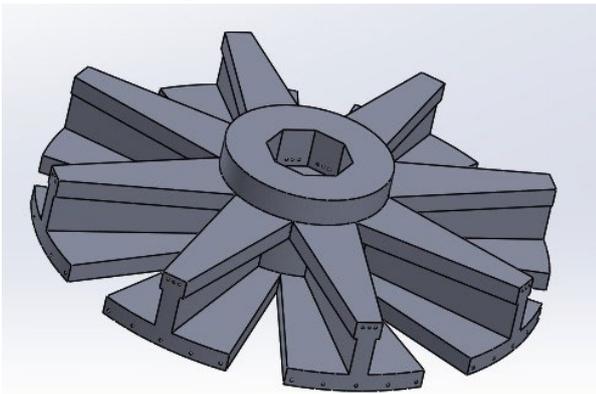


Ilustración 1: Modelo 3D de la cimentación

La campaña experimental se diseña teniendo en cuenta que los ensayos estarán íntimamente ligados al modelo numérico confeccionado y a la revisión bibliográfica afín al proyecto. De este pre-análisis se ha concluido que existen 3 parámetros que deben ser evaluados para el correcto estudio del conjunto:

- Elección del material a utilizar en la interfase entre los pétalos y el cáliz.
- Comportamiento de las llaves a cortante a fatiga.
- Interacción pétalo-interfase-cáliz bajo solicitaciones de flexión y cortante.

3. ENSAYO A: Elección del material para la interfase

Los objetivos son los siguientes:

- Búsqueda bibliográfica de materiales similares a los empleados en situaciones análogas y que mantengan su desempeño a bajas temperaturas.
- Identificación de otros materiales comerciales que puedan cumplir con los mismos criterios.
- Ensayos rápidos sobre los materiales que permitan conocer su funcionamiento básico en conjunción con las formas de las llaves de cortante.
- Selección de uno o más materiales para los ensayos a mayor escala.

3.1. Selección de material

La puesta en obra de la junta se puede llevar a cabo de dos maneras: con la técnica de junta seca o mejorando el contacto con una resina epoxi [1], además, se ha comprobado experimentalmente que la presencia de la resina mejora sustancialmente el desempeño de la junta [2]. Sin embargo, las resinas epoxi presentan dos complicaciones importantes: la aplicación y fraguado a -10° y cumplir el objetivo de cimentación desmontable; por ello, se han seleccionado materiales desmontables además de los de tipo adhesivo para esta campaña experimental.

Los materiales seleccionados en una primera fase son:

- Lámina de corcho de 2 mm de espesor
- Tela asfáltica

- Adhesivo tixotrópico BASF Master Brace ADH 1460
- Adhesivo tixotrópico SIKADUR 31 EF

En esta primera fase se evalúa el comportamiento mecánico del material.

En una segunda fase, se conoce el mal comportamiento de las resinas epoxi a bajas temperaturas [3], [4] y [5]; se propone, por tanto, la utilización de un adhesivo de metacrilato formulado con acelerante de fraguado para baja temperatura.

3.2. Procedimiento de ensayo

Se diseña un procedimiento de ensayo que consiste en la fabricación de varias probetas de hormigón a escala 1:2 de una llave de cortante con sus dos piezas conjugadas como vemos en la Ilustración 1.



Ilustración 2: Fabricación de llaves de cortante conjugadas

Dentro de cada material seleccionado se comparan los resultados de un ensayo a compresión a rotura de las probetas, como vemos en la Ilustración 2, con material colocado en la junta a baja temperatura (-10°) o bien a temperatura ambiente (20°). Se compara el comportamiento del material por su aplicación a baja temperatura, el comportamiento de los diferentes materiales durante el proceso de carga y la influencia en la carga última del conjunto.

3.3. Resultados

En primer lugar, los materiales como el corcho y la tela asfáltica tienen la ventaja de ser fácilmente

desmontables, de sencilla aplicación y económicos; sin embargo, en la tela asfáltica observamos una rigidez alta y fracturas tempranas y en el corcho a pesar de su baja rigidez no alcanza las resistencias mecánicas esperadas como vemos en la Ilustración 3.

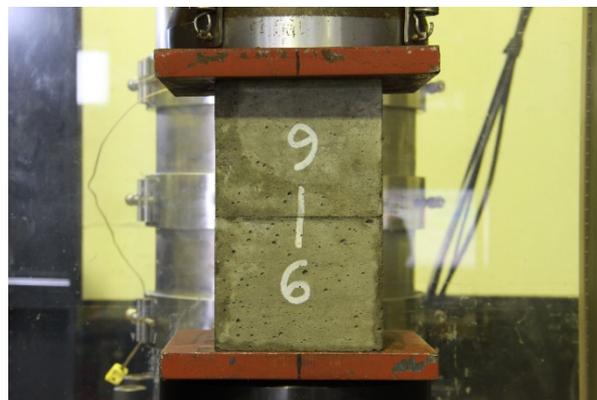


Ilustración 3: Ensayo a compresión de junta en llaves de cortante

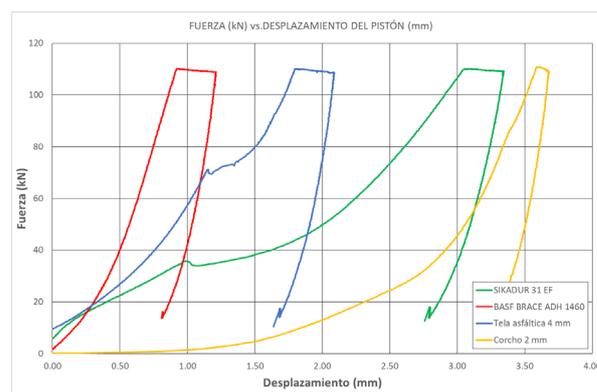


Ilustración 4: Gráficas de ensayo a compresión de izquierda a derecha: BASF, lámina de asfalto, SIKADUR y corcho

En lo que se refiere a resinas y adhesivos de tipo epoxi o metacrilato. Las características de resistencia mecánica son satisfactorias, la resina epoxi SIKADUR y los adhesivos de metacrilato LARBOND 3001F y 3001M realizan una muy buena distribución de tensiones aumentando la resistencia del conjunto hasta un 50% como vemos en la Tabla 1. En lo referente al comportamiento a baja temperatura, una formulación con acelerado de reacción para adhesivo de metacrilato resulta ser la adecuada entre las diferentes resinas y adhesivos epoxi y de metacrilato estudiados.

Tipo de adhesivo	T ^a adhesivo (°C)	T ^a mezcla (°C)	T ^a curado (°C)	Carga media (kN)	Resistencia (MPa)
Rápido	-10	-10	-10	542.3	28.24
Rápido	20	20	-10	514.1	26.78
Rápido	20	-10	-10	425.9	22.18
Medio	20	20	20	565.6	29.46
Sin resina			-10	371.3	19.34

Tabla 1: Resultados ensayos a compresión con parámetros de temperatura en adhesivo de metacrilato LARBOND

4. ENSAYO B: Fatiga en las llaves de cortante

Una vez seleccionado el adhesivo de metacrilato LARBOND 3001, utilizaremos el producto de fraguado medio para los ensayos a mayor escala en temperatura ambiente, vemos que el comportamiento es similar al producto de fraguado rápido en -10° en Tabla 1.

El objetivo de esta fase es conocer el funcionamiento del contacto de las caras conjugadas pretensadas; más concretamente de las caras pretensadas bajo esfuerzos de cortante a fatiga.

4.1. Fabricación del espécimen

Los elementos a ensayar son 2 caras conjugadas a escala 1:1 centradas en un contacto cáliz-pétalo, simplificando el contacto con caras planas en vez de la curvatura que se aplica en la cimentación a estudiar como vemos en la Ilustración 5. Del mismo modo, se fabrican con las llaves de cortante, armadura y vainas para pretensado como se ejecuta el modelo real. Los encofrados se diseñan para la fabricación de las partes en conjugado.

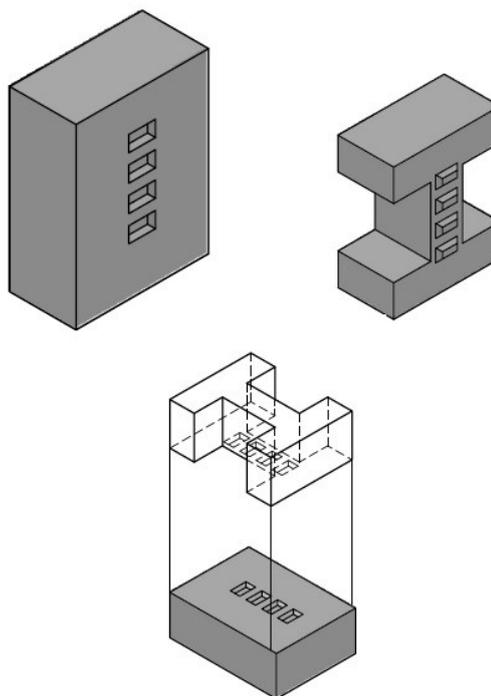


Ilustración 5: Especimen de ensayo para evaluar fatiga en las llaves de cortante.

Una vez fabricados los especímenes, se procede a la ejecución de la junta mediante la aplicación de adhesivo de metacrilato como vemos en la Ilustración 6 y la aplicación de un pretensado de 0.3 Mpa [6], durante 24 horas para el curado del material. Una vez fraguado se aplica el pretensado mediante apriete de las barras de $\phi 30$ con extremos roscados en M30 con una atornilladora mecánica hidráulica hasta aplicar una carga de pretensado de 500 kN por barra.

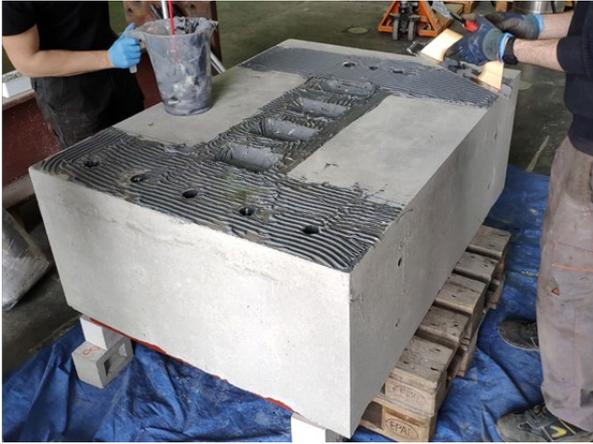


Ilustración 6: Aplicación de adhesivo de metacrilato

4.2. Ensayo

Se dispone un actuador servohidráulico dinámico Servosis de 250 kN de capacidad de carga y 250 mm de recorrido con sensor de desplazamiento y célula de carga anclado a un pórtico con mesa ranurada, como podemos observar en la Ilustración 7.

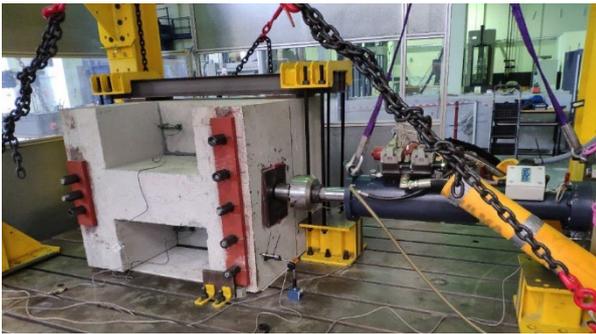


Ilustración 7: Set-up de ensayo de llaves de cortante a fatiga

Del análisis numérico se extraen las cargas de fatiga a aplicar en las llaves de cortante:

Esfuerzo máximo en ELU Rotura:

- $M_d = 1468 \text{ kNm}$
- $V_d = 732 \text{ kN}$

Rango de Esfuerzos fatiga:

- $M_d = 135-34 = 101 \text{ kNm}$
- $V_d = 86-29 = 57 \text{ kN para } 10^8 \text{ ciclos y } m=10$

Suponiendo que el cortante sea directamente proporcional a la tensión de cizallamiento, se obtiene un rango de fatiga para 2×10^6 ciclos, asegurando un ensayo adaptado a las

capacidades de los materiales y los plazos del proyecto. La expresión de la curva S-N (en nuestro caso, ΔV -N) es:

$$N = C \times \Delta V^{-m}$$

Para $N=2e+6$:

$$\Delta V = 84.31 \text{ kN}$$

Usando como punto medio el mismo que el anterior, 57.5 kN, el rango de fatiga sería:

15.3 kN – 99.7 kN para 2×10^6 ciclos

Por lo tanto, se realiza un ensayo de 2×10^6 ciclos aplicando una carga de 15.3 kN a 99.7 kN, carga objetivo de 57.5 kN y amplitud de 42.2 kN, a una frecuencia de 3 Hz.

4.3. Monitorización y resultados

Se instrumenta el ensayo con sensores durante los 2×10^6 ciclos:

- Sensor inductivo de desplazamiento del gato hidráulico.
- Célula de carga para controlar la carga.
- 2 sensores resistivos de desplazamiento para controlar el movimiento relativo entre las dos piezas.

Y con 3 sensores de desplazamiento más que se colocan durante los primeros 2×10^5 ciclos, durante los 10^5 ciclos intermedios y los 2×10^5 ciclos finales que se colocan midiendo el movimiento:

- Relativo entre cáliz-mesa ranurada.
- Relativo entre pétalo-mesa ranurada.
- Del actuador en su punto de anclaje.

El análisis de datos ha tenido por objeto mostrar las diferencias en el comportamiento del espécimen antes y después de la carga de fatiga a la que se ha visto sometido. En este sentido se muestra un gráfico de las cargas frente al desplazamiento del actuador Ilustración 8, en el que se aprecia un ciclo de histéresis de recuperación de posición que apenas varía una décima de milímetro aún después de los 2 millones de ciclos de fatiga.

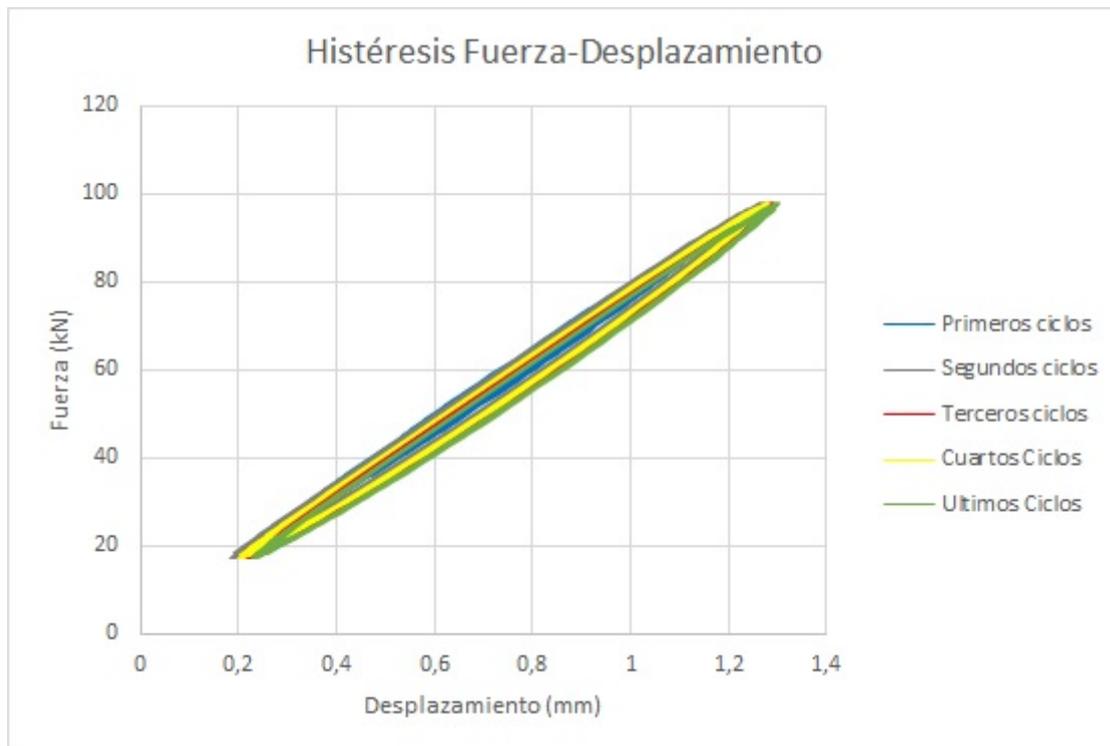


Ilustración 8: Gráfico Fuerza-Desplazamiento de ensayo de llaves de cortante a fatiga

5. ENSAYO C: Interacción del conjunto

En esta última fase, se tiene por objetivo la verificación del comportamiento del sistema estructural y observar si existe algún comportamiento que no se haya podido analizar en las fases anteriores. Para ello se realizará un ensayo estático a flexo-cortante a las cargas de servicio de la cimentación. Es necesario para ello la fabricación de especímenes a escala 1:3 de un pétalo, una parte del cáliz y la interfase.

5.1. Parámetros de escalado.

Ha de tenerse en cuenta que, al ser un modelo escalado, deben mantenerse similares los siguientes parámetros:

5.1.1. Tensiones de pretensado

Los parámetros mecánicos básicos de las secciones brutas original y escalada son los que se recogen en la Tabla 2.

Tensiones de referencia

Se considera como referencia la siguiente disposición de pretensado en la sección original:

- 3 barras a 0.09 m de la fibra superior, pretensadas a 500 kN cada una.
- 5 barras a 0.10 m de la fibra inferior, pretensadas a 500 kN cada una.

Con esta disposición se obtienen unos valores de $P = 4000$ kN y $e_p = -0.1275$ m. De este modo, las tensiones resultantes de referencia son (compresión positiva):

- Tensión fibra superior:

$$\sigma_v = P/A + Pe_p(h/2)/I = 2.86 \text{ MPa}$$

- Tensión fibra inferior:

$$\sigma_{v_i} = P/A + Pe_p(-h/2)/I = 7.20 \text{ MPa}$$

- Tensión media:

$$\sigma_m = P/A = 5.03 \text{ MPa}$$

	ORIGINAL	ESCALADA
Espesor alas (m)	0.300	0.098
Ancho alas (m)	1.000	0.327
Espesor alma (m)	0.300	0.098
Canto alma (m)	0.650	0.213
Canto total (m)	1.250	0.409
Área bruta (m ²)	0.7950	0.0853
Inercia bruta (m ⁴)	0.1476	0.0017

Tabla 2: Escalado de medidas y parámetros mecánicos básicos

Valores propuestos

Se propone para la sección escalada la siguiente disposición de pretensado:

- 3 barras a 0.030 m de la fibra superior, pretensadas a 53.5 kN cada una
- 5 barras a 0.033 m de la fibra inferior, pretensadas a 53.5 kN cada una

Con esta disposición se obtienen unos valores de $P=428 \text{ kN}$ y $e_p=-0.0418 \text{ m}$. De este modo, las tensiones resultantes de referencia son (compresión positiva):

- Tensión fibra superior:

$$\sigma_V = P/A + Pe_p(h/2)/I = 2.86 \text{ MPa}$$

- Tensión fibra inferior:

$$\sigma_{V'} = P/A + Pe_p(-h/2)/I = 7.21 \text{ MPa}$$

- Tensión media:

$$\sigma_m = P/A = 5.03 \text{ MPa}$$

5.1.2. Estado deformacional de las barras

En el diseño original, las barras cuentan con métrica M30 y están roscadas en los extremos, es decir, sección nominal de 561 mm² en la rosca y 707 mm² en la barra. Por lo tanto, trabajan a unos valores de tensión y deformación de:

- Sección rosca

$$\sigma_{p0} = 500 \text{ kN}/561\text{mm}^2 = 891.3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{p0} = 891.3 \text{ MPa}/190000 \text{ MPa} = 4.7\%$$

- Sección barra

$$\sigma_{p0} = 500 \text{ kN}/707\text{mm}^2 = 707.4 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{p0} = 707.4 \text{ MPa}/190000 \text{ MPa} = 3.7\%$$

Se propone para la sección escalada, constituida por una barra lisa y roscada en sus extremos. La sección nominal ha de cumplir el valor:

$$A_{p1} = 53.5\text{kN}/707400\text{kPa} = 0.756\text{cm}^2$$

La sección más próxima (por exceso) para los extremos roscados dentro de la serie DIN 13 es la M12, con sección nominal de 84.33 mm².

Así como la sección más próxima (por exceso) para la barra es de 10 mm, con una sección nominal de 78.54 mm².

Se propone por lo tanto **pretensar con barras de diámetro 10 mm y extremos roscados con M12**, sometidas a las tensiones y deformaciones siguientes:

- Sección rosca:

$$\sigma_{p0} = 53.5 \text{ kN}/84.3\text{mm}^2 = 634.4 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{p0} = 634.4 \text{ MPa}/190000 \text{ MPa} = 3.3\%$$

- Sección barra

$$\sigma_{p0} = 53.5 \text{ kN}/78.54\text{mm}^2 = 681.18 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{p0} = 681.18 \text{ MPa}/190000 \text{ MPa} = 3.6\%$$

5.1.3. Tensiones de cortante y llaves

En la hipótesis de sección fisurada, la tensión de cortante en la rotura de la sección original sería:

$$\tau_d = V_d/b_0d = \frac{0.732 \text{ MN}}{0.3 \text{ m} \times 1.15 \text{ m}} = 2.12 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, en la sección escalada, se prevé alcanzar un valor de esfuerzo cortante igual a:

$$V_d = \tau_d b_0 d = 78.3 \text{ kN}$$

Puesto que la relación entre cortantes es proporcional al cuadrado del escalado, se propone que las llaves del modelo reducido tengan dimensiones reducidas en la misma medida:

- Ancho exterior de llave de cortante:

$$b = 200 \text{ mm}/3.056 = 65.4 \text{ mm}$$

- Altura exterior de llave de cortante:

$$h = 120 \text{ mm}/3.056 = 39.3 \text{ mm}$$

Se propone también que la geometría de resalto mantenga las proporciones, por lo que el bisel tendría un ancho de 9.8 mm \approx 10 mm en vez de los 30 mm originales.

5.2. Validación del modelo

Para validar el modelo de cálculo con las dimensiones propuestas se propone realizar los siguientes cálculos:

- Cálculo seccional para obtener el momento flector último (M_u) de la sección escalada. Este cálculo debería realizarse según los mismos criterios que el original, puesto que este es el modelo que se está validando.
- Obtención del punto de aplicación de la carga: $x = M_u / V_d$.
- Realización del cálculo con el modelo de elementos finitos representativo del ensayo escalado, para seguimiento de las tensiones y análisis de la capacidad de predicción.

De esta manera, en el cálculo para el modelo original, se obtienen los valores de esfuerzos concomitantes de $M_d = 1468$ kNm y $V_d = 732$ kN, que equivale a una sollicitación de 732 kN aplicada a 2 metros de la sección de contacto.

Para el modelo escalado, el momento último con ($\gamma_c=1.50$; $\gamma_p=1.15$) es 93.41 kNm y con ($\gamma_c=1.00$; $\gamma_p=1.00$) es 97.33 kNm.

Por lo tanto, el punto de aplicación de la carga equivalente (x) es $2/3.056 = 0.654$ m, y el valor de la carga a aplicar (V_d) es $97.33/0.654 = 148.72$ kN.

5.3. Fabricación de especímenes

Como se mencionó en la introducción del ensayo, los especímenes necesarios para este ensayo tendrán las dimensiones de la cimentación a escala 1:3.056. Se diseña la armadura manteniendo la cuantía seccional.

El análisis se realiza en una única conexión, constando el conjunto de un pétalo completo, interfase y un segmento de un cuarto de cáliz.

Se diseña el encofrado del pétalo de tal manera que se pueda realizar el hormigonado conjugado una vez ha fraguado el cáliz como se puede observar en la Ilustración 9.



Ilustración 9: Encofrado conjugado de pétalo a cáliz fraguado.

Se ejecuta la junta con adhesivo de metacrilato de la misma manera que en el ensayo B, aplicando una precarga durante 24 hora una vez extendido el producto para el fraguado y finalmente pretensando los miembros hasta las cargas de 53.5 kN por barra como se detalla en el apartado 5.1.1.

5.4. Procedimiento de ensayo

El ensayo se realiza con un actuador hidráulico servocontrolado de 500 kN de capacidad de carga, que estará vinculado a un pórtico autoportante de ensayos con mesa ranurada a la que anclaremos el espécimen. El procedimiento de ensayo consistirá en la aplicación de una carga cuasiestática en control por desplazamiento con el actuador hidráulico, a una velocidad de 6 mm/min hasta llegar a las cargas de flexión y cortante de diseño. El punto de aplicación de carga se sitúa en el pétalo a 0.654 metros de la cara de contacto entre cáliz y pétalo, permitiendo el giro en el eje perpendicular al plano de simetría del espécimen. El arriostramiento del espécimen se realiza con tubos rectangulares huecos anclados a la mesa en la zona del cáliz, y escuadras de anclaje a contacto con el cáliz que impiden el giro de la pieza por el momento asociado como vemos en la Ilustración 10.

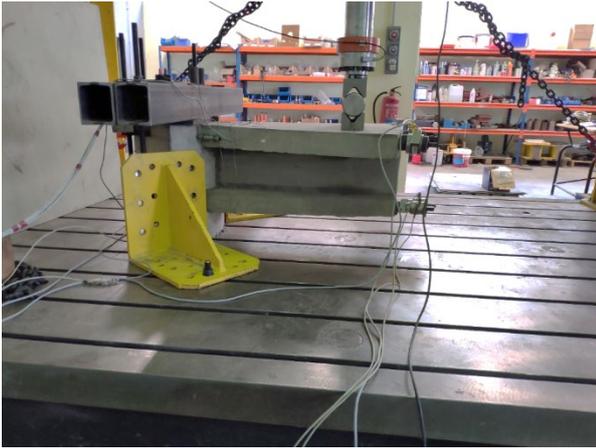


Ilustración 10: Set-up de ensayo de modelo escalado

5.5. Monitorización y resultados

Además de la lectura asociada al actuador; se disponen:

- 5 células de carga en las barras de pretensado (3 en la zona a tracción y 2 en la de compresión).
- 2 LDS para medir desplazamiento relativo entre piezas en la zona de tracción.
- 4 galgas extensométricas en el pétalo (2 en la zona de tracción y otras 2 en la zona de compresión) como vemos en la Ilustración 11.



Ilustración 11: Galgas extensométricas en cara de compresión.

Analizando la Ilustración 12 de carga-desplazamiento de los sensores asociados al gato hidráulico. Se observa que una vez se alcanzan los 145 kN hay una pérdida de rigidez, permitiendo únicamente alcanzar los 151.69 kN como carga máxima y a partir de ahí la pendiente es descendente y se da por finalizado el ensayo.



Ilustración 12: Gráfico Carga-Desplazamiento de ensayo de modelo escalado

Los datos de carga obtenidos son satisfactorios puesto que validan el modelo numérico sobrepasando los 148.82 kN de valor último para cortante y momento en sección.

Se registra una separación máxima de 1.8 mm entre las piezas en la zona de tracción de la sección de contacto, que se corresponde con la zona inferior de la cimentación en servicio.

Por otro lado, el registro de fuerza en las barras de pretensado nos aporta información desde antes de la realización del ensayo. En primer lugar, la carga alcanzada en cada barra con el par de apriete calibrado es entre 42 y 45 kN, advirtiendo una pérdida de carga una vez aplicada en torno al 0.5 %. Por motivos de seguridad, se decide no seguir aumentando el apriete hasta una lectura de 53.5 kN por si esta pérdida de carga es debida a la plastificación de las barras o la zona roscada. Las barras a compresión durante ensayo mantienen su carga intacta, como era de esperar; sin embargo, las barras a tracción sí que registran un incremento en la carga apareciendo 1 kN en las 3 barras a tracción en los 114.82 kN de fuerza aplicada y que irá aumentando hasta los 9.89 kN en el momento de rotura de 151.69 kN.



Ilustración 13: Gráfico del estado tensional de áreas de contacto

Por último, la deformación del hormigón es lineal hasta el valor último analizado que se sitúan 115.9 kN como vemos en la Ilustración 13.

6. Conclusiones

Este trabajo valida una cimentación prefabricada diseñada en partes conjugadas desmontables para unir y pretensadas en obra (proyecto ARTECH). Los objetivos alcanzados han sido:

- Identificar un material, el adhesivo a base de metacrilato, que permita incrementar la capacidad resistente de la junta en un 50% incluso a temperaturas de -10°C , descartando las resinas epoxi, que no tienen el comportamiento deseado a bajas temperaturas.
- Verificar el funcionamiento dentro del conjunto estructural de esa junta, durante todo el ciclo de vida, ejecutada con el adhesivo de metacrilato, las llaves de cortante y el pretensado. La gráfica de histéresis nos muestra un comportamiento muy bueno frente a la fatiga a cizallamiento.
- Validar los cálculos teóricos y el modelo de elemento finitos con un ensayo del conjunto escalado hasta rotura por flexión-cortante. Obteniendo resultados muy similares a los que se obtienen del modelo teórico, y resistiendo las cargas esperadas en ELU.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto ARTECH, *Tecnologías para la adaptación de sistemas de generación renovable a climas árticos*, (financiado con fondos FEDER de la convocatoria INNTERCONECTA 2016 del Centro de Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) del Ministerio de Industria, Economía y Competitividad. En este proyecto participa un consorcio de empresas formado por TEMHA S. L., Norvento Enerxía y ELINSA.

8. Bibliografía

- [1] A. Yuan, C. Yang, J. Wang, L. Chen, R. Lu, Shear Behavior of Epoxy Resin Joints in Precast Concrete Segmental Bridges, *Journal of Bridge Engineering*. 24 (2019). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001362](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001362).
- [2] O. Buyukozturk, M.M. Bakhoun, S.M. Beattie, Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges, *Journal of Structural Engineering (United States)*. 116 (1990) 3380–3401. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:12\(3380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:12(3380)).
- [3] C. Czaderski, E. Martinelli, J. Michels, M. Motavalli, Effect of curing conditions on strength development in an epoxy resin for structural strengthening, *Composites Part B: Engineering*. 43 (2012) 398–410. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.07.006>.
- [4] V.M. Karbhari, Durability of composites for civil structural applications, 2007. <https://doi.org/10.1533/9781845693565>.
- [5] B.C. Ray, Effects of crosshead velocity and sub-zero temperature on mechanical behaviour of hygrothermally conditioned glass fibre reinforced epoxy composites, *Materials Science and Engineering A*. (2004). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.11.031>.
- [6] ACHE; GT 1;GT 2;GT 3; GT 4;GT 5; GT 6;GT 7;GT 8;GT 9;GT 10;GGT 1, RECOMENDACIONES PARA EL PROYECTO, EJECUCIÓN Y MONTAJE DE ELEMENTOS PREFABRICADOS, 2004. http://e-ache.com/modules/oledrion/category.php?cat_cid=1.