

Anclaje con virola de torres eólicas

Anchoring wind towers using an embedded steel section

Francisco Galán Soraluze. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Proyectos y Direcciones de obra de Parques Eólicos de Acciona Energía. fgalan@acciona.es

Resumen: Los anclajes de las torres eólicas de acero a las cimentaciones se pueden hacer con pernos, armados y postensados, o con virolas que se introducen en la cimentación. Esta solución, muy usada en los últimos años por diversos fabricantes de aerogeneradores, presenta a juicio del autor diversos inconvenientes que se comentan en el artículo. Se compara la solución con una experiencia de rotura de tubos de hormigón armado con camisa de chapa.

Palabras Clave: Cimentaciones de aerogeneradores con pernos y con virolas; Anclajes de torres eólicas; Conectores en chapas de acero; pernos postensados de anclaje de aerogeneradores

Abstract: The anchoring of steel wind towers to the foundations may be made by post-tensioned, reinforced bolts or by collar assemblies set in the foundation. While this solution has been widely employed over recent years by manufacturers of wind generators, the author considers that it poses a series of inconveniences that are described in this article. This solution is compared in the light of an experience of the failure of concrete cylinders reinforced with steel lining.

Keywords: Foundation to wind generators with bolts and collar assemblies; Anchorage of wind towers; Steel plate connectors; Post-tensioned anchor bolts for wind generators

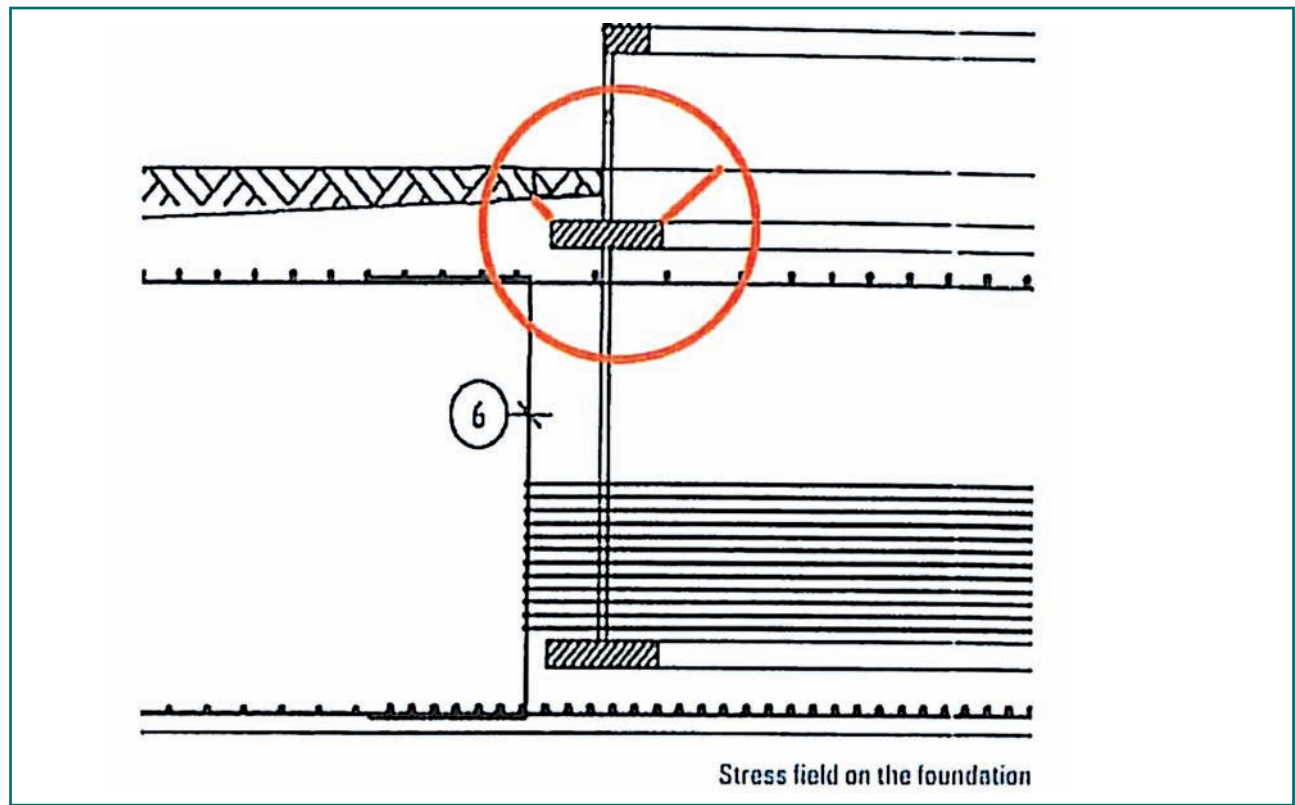
Justificación del artículo

En el número 1/2007 de la revista Beaufort 6, que publica mensualmente el Germanischer Lloyd, se incluye un artículo sobre fallos en cimentaciones de aerogeneradores anclados con virolas. Se indica en el artículo que han aparecido grietas circulares alrededor de la virola que se coloca dentro de la zapata y que se inician en la brida superior que forma parte del anclaje. Las grietas no afectan a la estructura de la cimentación pero pueden producir entrada de agua que provoque un ataque al acero de la virola. Además el movimiento de la virola, por el viento, puede producir una subida y bajada del agua que de lugar a erosiones. Se señala que se está estudiando el tema y que es importante asegurar una calidad de construcción que, a veces, no se alcanza, por la forma en que se contratan las obras. La figura 1 reproduce la publicada en el artículo citado.

Purpose of this article

Issue 1/2007 of Beaufort 6 –a magazine published monthly by Germanischer Lloyd– includes an article on faults in the foundations of wind turbines anchored with embedded steel sections. The article mentions the appearance of circular cracks around the embedded steel section which is placed in the centre of the pad. These cracks start at the upper flange, which is part of the anchoring system. The cracks do not affect the structure of the foundations but may result in water seeping in that could attack the steel of the embedded steel section. Furthermore, the movement of the embedded steel section caused by the wind may result in the water level raising and dropping, which could in turn lead to erosion. It is pointed out that the issue is under study and that it is important to assure the quality of the construction work –something that is not always achieved due to

Fig. 1. Sección de zapatas ancladas con virolas con agrietamiento en el hormigón/Cross view of pads anchored with embedded steel sections with cracks in the concrete.



Cuando, en 1996, se construyeron por Acciona Energía (entonces Energía Hidroeléctrica de Navarra EHN) las primeras cimentaciones con torres ancladas con virolas, pensamos que la solución no era adecuada, por lo que introdujimos algunas mejoras, que, a lo largo del tiempo, han ido siendo asumidas por Gamesa Eólica y que, consideramos, mejoran el proyecto del fabricante.

En el presente artículo comentamos los defectos que, a nuestro juicio, tiene la solución de virolas utilizadas, aludimos a estructuras similares que habíamos conocido que tenían los mismos defectos y detallamos la solución que propusimos.

Solución de anclaje con virolas

En el parque eólico de El Perdón, construido por EHN con máquinas que se anclaban a la cimentación con pernos atornillados a una brida inferior situada cerca de la parte inferior de la zapata. La solución de anclaje es correcta y la zapata trabaja claramente como una estructura de hormigón armado, en cuyo interior están los tornillos de anclaje, pero sin alterarla.

the way that work is subcontracted. Figure 1 was published in the abovementioned article.

When Acciona Energía -at the time Energía Hidroeléctrica de Navarra, EHN- built the first foundations with towers anchored with embedded steel sections in 1996, we already thought that the solution was not the best available. We therefore introduced some improvements which have been incorporated by Gamesa Eólica over time and which we consider an improvement on the manufacturer's project.

This article provides a summary of the defects which, in our opinion, are present in the embedded steel section solution used. We refer to similar structures that we knew about which had the same defects and we explain the solution that we proposed at the time.

Anchoring solution using embedded steel sections

At El Perdón wind farm (Navarra, Spain), built by EHN, the towers were anchored to the foundation with bolts attached to a lower flange located near the bottom of the pad. The anchoring solution is correct and the pad clearly functions as a reinforced concrete structure. The anchoring bolts are inside it but do not alter it.

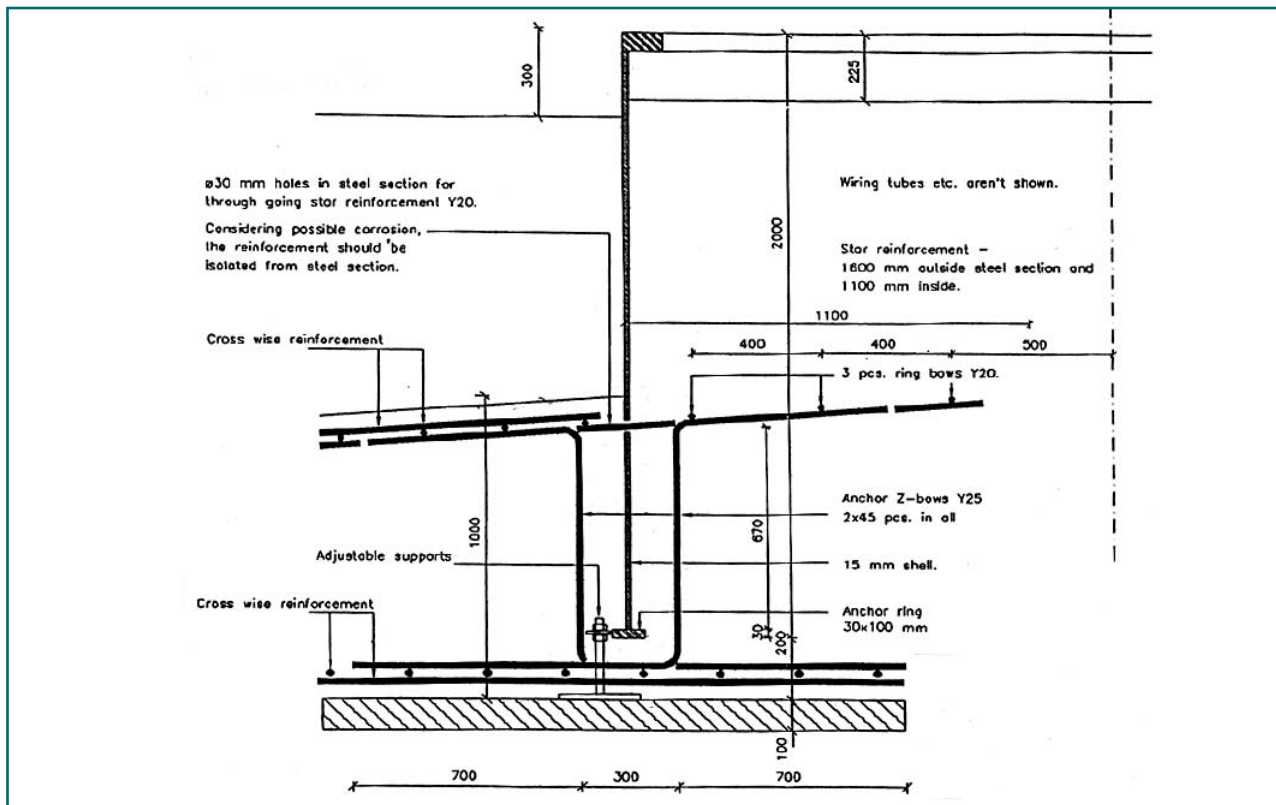


Fig. 2. Solución tipo de virola de anclaje de 1996/Solution anchoring solution used in 1996.

En la figura 2 se aprecia la sección transversal de la solución del anclaje con virola de los aerogeneradores que se colocaron en 1996. El anclaje se hace con una virola que se introduce en el hormigón de la zapata y contra cuya parte superior se hace el terraplénado. Esta solución presenta, a nuestro juicio, dos inconvenientes:

- La virola corta el hormigón de la zapata y lo divide en dos zonas claramente diferenciadas: la interior y la exterior a la virola y entendemos que ello es tan acusado que no puede considerarse que siga siendo una estructura como si no estuviese la chapa que lo divide en dos zonas, y con el agravante estructural de que la chapa está situada en la zona de mayores momentos y cortantes.
- Terminar el pedestal en la virola evita un encofrado, pero implica que el relleno se haga contra la virola, lo que puede facilitar su oxidación, aunque el entorno de la misma se haga con material seleccionado.

Este segundo inconveniente fue fácil de solucionar construyendo una franja de hormigón, ligeramente armado, de 0,30 m de anchura alrededor de la virola,

Figure 2 shows the cross-section of the solution of anchoring the wind turbines with an embedded steel section used in 1996. The anchoring is carried out with an embedded steel section that is inserted in the concrete of the pad and a sloping concrete embankment is formed against the top part. In our opinion, this solution has two disadvantages:

- The embedded steel section cuts the concrete of the pad and divides it into two clearly differentiated areas: the interior and the exterior of the embedded steel section. We understand this to be so significant that one cannot continue considering it as a single structure; as if the plate was not dividing it. This brings about an added structural problem, as the plate is located in the area with the highest levels of moment and shear.
- Ending the pedestal at the embedded steel section avoids casing but implies pouring against the embedded steel section, which can result in the latter rusting, even if selected material is used.

This second disadvantage was easy to solve by building a 0.30 metre wide, slightly reinforced concrete strip around the embedded steel section,

que la protegía de oxidación mucho mejor que cualquier pintura.

El primer inconveniente tiene mayor entidad y aconseja una modificación del anclaje que comentamos a continuación. Para su solución tomamos como referencia una experiencia que habíamos tenido en otras estructuras en que se daba una situación, en cierto modo, similar.

Tubos de hormigón armado con camisa de chapa

Rotura de un tubo con las armaduras usadas normalmente

Los tubos de hormigón armado con camisa de chapa se usan en abastecimientos de agua desde hace muchos años y con un excelente resultado. Constan, como puede verse en la figura nº 3 de una camisa de chapa, normalmente de 2 o 3 mm de espesor, una capa de mortero interior, de unos 20/50 mm de espesor en la que se coloca una ligera armadura soldada a la camisa y una capa de hormigón exterior, de unos 60/100 mm que tiene una armadura en su parte más externa. El conjunto, en una sección transversal, es una estructura circular, con dos armaduras. La interior, que es la camisa de chapa, resiste las tracciones que la ovalización produce en la clave y en la base y la exterior la producida en los riñones. En muchas normas de cálculo se determinan las tracciones que uno y otro esfuerzo producen considerando el conjunto como una estructura de hormigón armado. Con la cuantía necesaria para las tracciones de los riñones se determina la armadura exterior y con la necesaria para los esfuerzos en clave y en la base se determina la cuantía de la armadura interior que se sustituye por el espesor equivalente de la camisa de acero.

Con este sistema de cálculo, vigente en muchas instrucciones, se han proyectado muchísimos kilómetros de tuberías, que han dado un resultado muy satisfactorio.

En 1985 tuvimos ocasión de hacer un ensayo de rotura de flexión de un tubo de hormigón armado con camisa de chapa, proyectado para un tramo de la red de colectores de Pamplona, de las siguientes características:

Diámetro interior 2.000 mm
Espesor total 160 mm
Espesor de la camisa 3 mm

which provides much better rust protection than any kind of paint.

The first disadvantage is more serious and the modification of the anchoring system that we explain below is a better choice. To solve the problem we referred to our experience with other situations that were somewhat similar.

Reinforced concrete tubes with a steel jacket

Breaking a tube with the usual frameworks

Reinforced concrete tubes with a steel jacket have been used in water piping for many years with excellent results. As shown in figure 3, these consist of a steel jacket, normally 2 to 3 mm thick, an internal layer of mortar (about 20/50 mm thick) in which a light framework is welded to the jacket and the tube is surrounded with an outer concrete layer of about 60/100 mm. A cross section of the assembly shows a circular structure with two frameworks. The interior (i.e. the steel jacket) resists the tension produced by eccentric loads on the crown and the base and the exterior on the haunches. In many standards, the tension loads produced by each force are calculated by considering the assembly as a reinforced concrete structure. The figure for the tension needed for the haunches is used to determine the external framework while the tension needed for the forces on the crown and the base is used to determine the required internal framework, which is replaced by the equivalent thickness of the steel jacket.

This calculation system, which appears in numerous specifications, has been used in many kilometres of piping and has yielded very satisfactory results.

In 1985, we had the opportunity of carrying out a flexural break test on a reinforced concrete tube with a steel jacket planned for a network of collectors in Navarra, Spain that had the following characteristics:

Internal diameter 2.000 mm
Total thickness 160 mm
Jacket thickness 3 mm
Inner coating 45 mm
External circular framework 37 ϕ 8 mm/m



Foto N° 1. Tubo de Ø2000 preparado para el ensayo / Picture 1. Ø2000 tube prepared for the test.

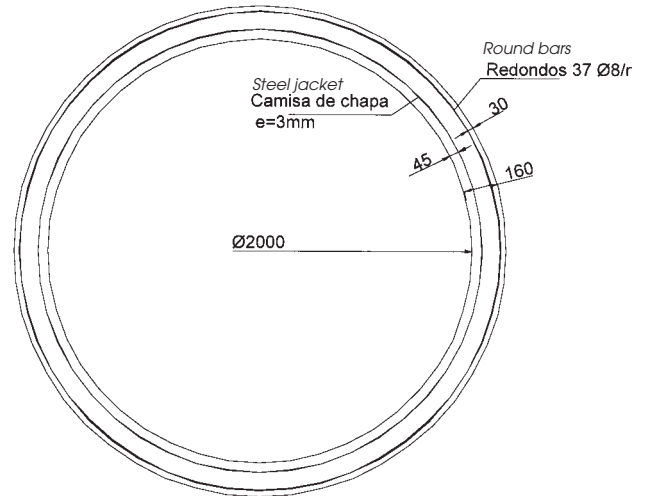


Fig. 3. Sección transversal del tubo / Tube cross section.

Revestimiento interior 45 mm
 Armadura exterior circular 37 ϕ 8 mm/m

El cálculo de ambas armaduras se había hecho siguiendo lo establecido en Instrucción del Instituto Eduardo Torroja para tubos de hormigón armado y pretensado.

En la foto 1 puede verse el tubo preparado para el ensayo denominado de tres aristas, que consiste en apoyar el tubo en dos aristas próximas y cargarlo en la superior. En la foto 2 como empieza el despegue del hormigón exterior con una carga de 12 ton/m y la foto 3 se ve la rotura con el hormigón exterior separado del resto. Se aprecia que el tubo no trabaja como una estructura de hormigón armado sino como un conjunto de tres capas que se comportan de modo independiente.

Calculations for both frameworks had followed the specification of the Instituto Eduardo Torroja for reinforced prestressed concrete tubes.

Picture 1 shows a tube prepared for a three edge test, which consists of placing the tube on two edges that are close to each other and loading the tube at the top. Picture 2 shows how the outer concrete layer begins to detach with a load of 12 t/m and picture 3 shows the breaking point with the outer concrete layer separated from the rest. It is clear that the tube does not behave like a reinforced concrete structure but rather like an assembly with three layers that behave independently.

The concrete inside the jacket cracks with loads of only 4 t/m. This is because it is insufficiently reinforced and does not move simultaneously with the rest.



Foto N° 2. Empieza a separarse el hormigón exterior de la chapa / Picture 2. The outer concrete layer begins to detach itself from the steel plate.

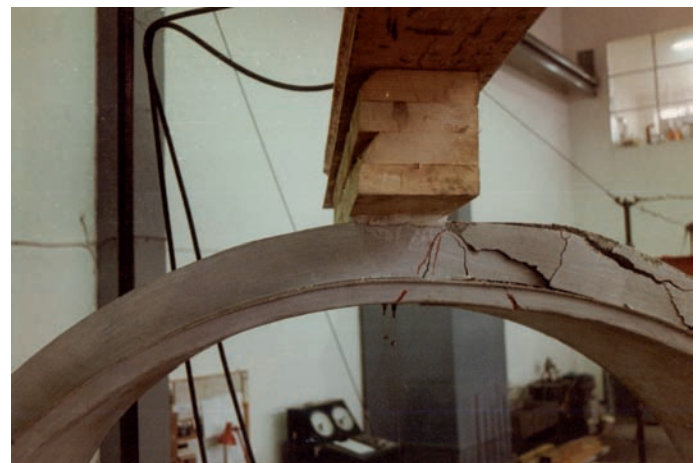


Foto N° 3. Rotura del tubo / Picture 3. Tube breaking.

El hormigón interior a la camisa se agrieta con cargas de sólo 4 ton/m, a causa de que está muy poco armado y de que no es solidario con el resto.

La camisa de chapa se deforma de modo independiente del hormigón exterior, desprendiéndose de éste en la clave y en la base.

Con una carga de 17 ton/m el hormigón exterior se empieza a romper en la clave y en la base, a causa de que su armadura está en su parte exterior.

El resultado del ensayo puso de manifiesto que el cálculo de los tubos de hormigón no puede hacerse como si fuesen una estructura homogénea de hormigón sino que debe hacerse con un método más empírico que tenga en cuenta la realidad de la distorsión que la camisa de chapa introduce en la estructura.

La diferencia entre las condiciones del ensayo y las que normalmente trabajan los tubos de hormigón armado con camisa de chapa consiste en que estos se apoyan de modo continuo, en un ángulo de unos 120°, en vez del puntual del ensayo, que produce una concentración de esfuerzos cortantes, que es la causa del resultado obtenido y que no ocurre normalmente en los tubos.

Sin embargo, y aunque el ensayo difiera de las condiciones en que los tubos trabajan habitualmente, puso de manifiesto que, cuando hay concentración de esfuerzos cortantes, no hay una estructura única sino un conjunto de tres capas, cada una de las cuales se deforma y rompe de modo independiente.

Posteriormente tuvimos ocasión de extraer un trozo de tubo de hormigón armado con camisa de chapa de 600 mm de diámetro, que llevaba en servicio satisfactorio más de 50 años, y al que corresponde la foto 4 en la que puede verse el trozo del tubo, apreciándose la camisa de chapa, el hormigón interior y el exterior con su armadura. Cuando se hizo el corte del trozo de tubo la camisa de chapa y la armadura estaban en perfectas condiciones, como chorreadas con arena y sin embargo pudimos apreciar que la camisa de chapa se desprendía del hormigón exterior, como puede verse en las foto 5 y 6, sin que hubiese ninguna trabazón entre ambos elementos, a pesar del tiempo que el tubo llevaba en servicio. El hormigón interior no se desprende de la camisa porque tenía una pequeña armadura, soldada a la camisa, que evita el desprendimiento, aunque no asegura su trabajo solidario.

The steel jacket deforms independently of the concrete exterior, and detaches from it at the crown and at the base.

With a load of 17 t/m the concrete exterior begins to break at the crown and at the base because its framework is on the outside.

Test results showed that the calculations for concrete tubes cannot be made as if they were a homogeneous concrete structure. They require a more empirical method that takes into account the real distortion on the steel structure by the steel jacket.

The difference between test conditions and normal conditions of reinforced concrete tubes with a steel jacket lies in the fact that the latter rest continuously at an angle of about 120°, rather than the test's isolated resting points, which result in a concentration of shearing forces that lead to the results obtained in the test, which normally do not occur in tubes.

However, although test conditions differ from the tubes' normal working conditions, the test did show that, when there is a concentration of shearing forces, there is no single structure but rather an assembly consisting of three layers, each of which deforms and breaks independently of the others.

Later, we had the opportunity of removing a piece of reinforced concrete tube with a steel jacket measuring 600 mm in diameter which had been in service satisfactorily for over 50 years. This piece is shown in picture 4. The picture shows the piece of tube, with the steel jacket, the concrete interior and the exterior with its framework. When the piece of tube was cut, the steel jacket and the framework were in perfect condition, as if they had been sandblasted. However, we observed that the steel jacket came off the concrete exterior, as shown in pictures 5 and 6. However, there was no interlocking between both parts, despite the amount of time that the tube had been in service. The concrete interior did not come off the jacket because it had a small framework welded to the jacket that prevented it from detaching; although this does not mean that they will work as a single unit.

Breakage of a tube with connectors

In a major network of collectors in Pamplona which could be subject to concentrated shearing forces that would alter the way the three-layer assembly would work, we considered that it was necessary for the layers to work together. We took the question to Javier Rui



Foto N° 4. Trozo de tubo/Picture 4. Piece of tube.

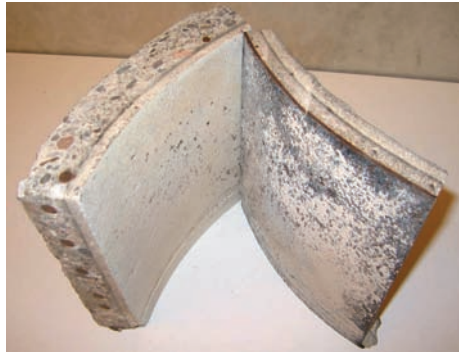


Foto N° 5. Falta de adherencia entre la chapa y el hormigón/Picture 5. Lack of adherence between the steel plate and the concrete.



Foto N° 6. Tubo con una carga e 15,5 tn/m/ Picture 6. Tube with a load of 15.5 t/m.

Rotura de un tubo con conectores

En una instalación importante de la red de colectores de Pamplona, en la que podían darse concentraciones de cortantes que alterasen la forma de trabajar del conjunto de las tres capas, consideramos necesario asegurar que trabajasen conjuntamente. Planteamos el caso a Javier Rui Wamba de la empresa de Ingeniería Esteyco, con la que veníamos trabajando cuando teníamos problemas que superaban nuestros conocimientos estructurales y nos dio la solución de colocar unos conectores en el lado exterior de la camisa de chapa que la trabasen al hormigón y la hiciesen funcionar conjuntamente. Se trata de una solución similar a la usada en las estructuras mixtas de hormigón y acero en la que colocan conectores que transmiten los esfuerzos cortantes de una a otra zona de la estructura.

Foto N° 7. Tubo con una carga de 15,5 tn/m/Picture 7. Tube with a load of 15.5 t/m.



Wamba of Esteyco, (an engineering firm) with whom we had already worked before on problems that were beyond our knowledge of structures. His solution was to mount connectors on the outside of the steel jacket that would interlock with the concrete so both would work as a single structure. This is a similar solution to that used in mixed concrete and steel structures, in which connectors are installed to transfer shearing forces from one area to another within the structure.

Javier Rui Wamba calculated the connectors that would be required and manufactured a 1600 mm tube that was subjected to the same test as the other tube. The result was significantly different. The connectors hold the steel jacket to the outer concrete and although the assembly did not behave as a single unit, its resistance was notably higher. Picture 7 shows the tube with a load of 15.5 t/m, picture 8 with a load of 16.8 t/m and picture 9 shows the tube breaking at a pressure of 24.4 t/m. The outer concrete layer has barely become detached from the steel jacket when it breaks, so the assembly works much more like a single structure than in the previous case.

Modification of foundations anchored with embedded steel sections

Our experience with the breaking point tests on tubes with steel jackets made us a little suspicious of the solution of foundations with an embedded steel section. The steel plate cuts the pad in two, so it can hardly be considered as a single structure; with the added structural problem that the plate is located in the area with the highest levels of moment and shear. To consider the pad as if the plate were not there in our calculations is, in our opinion, a mistaken assumption,

Javier Rui Wamba calculó los conectores necesarios y con ellos se fabricó un tubo de f 1600 mm que se rompió en el mismo ensayo que el anterior. El resultado fue notablemente diferente, los conectores sujetan la camisa de chapa al hormigón exterior y aunque el conjunto no trabaja de una manera totalmente solidaria su resistencia fue apreciablemente superior a la del caso anterior. En la foto 7 se ve el tubo con una carga de 15,5 ton/m, en la 08 con una carga de 16,8 ton/m y en la foto 9 la rotura con 24,4 ton/m. En la rotura el hormigón exterior apenas se ha separado de la camisa de chapa, apreciándose unas condiciones de trabajo mucho más conjuntas que en el caso anterior.

Modificación de las cimentaciones de virolas de anclaje

La experiencia que habíamos tenido en los ensayos de rotura de tubos con camisa de chapa nos hacía recelar de la solución de cimentaciones con virola. La chapa corta la zapata en dos de modo que difícilmente puede considerarse como una estructura única y ello con el agravante de que la chapa se encuentra próxima a las secciones de mayores momentos y cortantes. Calcular la zapata como si no estuviese la chapa es, en nuestra opinión, una suposición equivocada, similar a lo expuesto de los tubos de hormigón con camisa de chapa.

En los planos de la figura 2 se aprecia que hay unas armaduras en estrella que enlazan con la armadura superior, situada en la parte externa la virola. La armadura inferior, que es continua por debajo de la virola, se calcula como si la zapata fuese una estructura única de hormigón, ignorando la distorsión que produce la virola.

El esfuerzo de compresión producido por el momento del viento se traslada por la virola a la brida inferior que, lo reparte en el hormigón y con las barras en Z se traslada a toda la zapata. Este planteamiento parece correcto, aunque complicado, ya que sería mejor que la fuerza de compresión cargase directamente sobre la parte superior del pedestal, como pasa en las cimentaciones de pernos. El esfuerzo de tracción, que también llega a la virola inferior, se resiste con la resistencia al arranque del hormigón, reforzado con todas las armaduras que se han dispuesto.



Foto Nº 8. Tubo con carga de 16,8 tn/m/Picture 8. Tube with a load of 16.8 t/m.



Foto Nº 9. Rotura del tubo/Picture 9. Tube at breaking point.

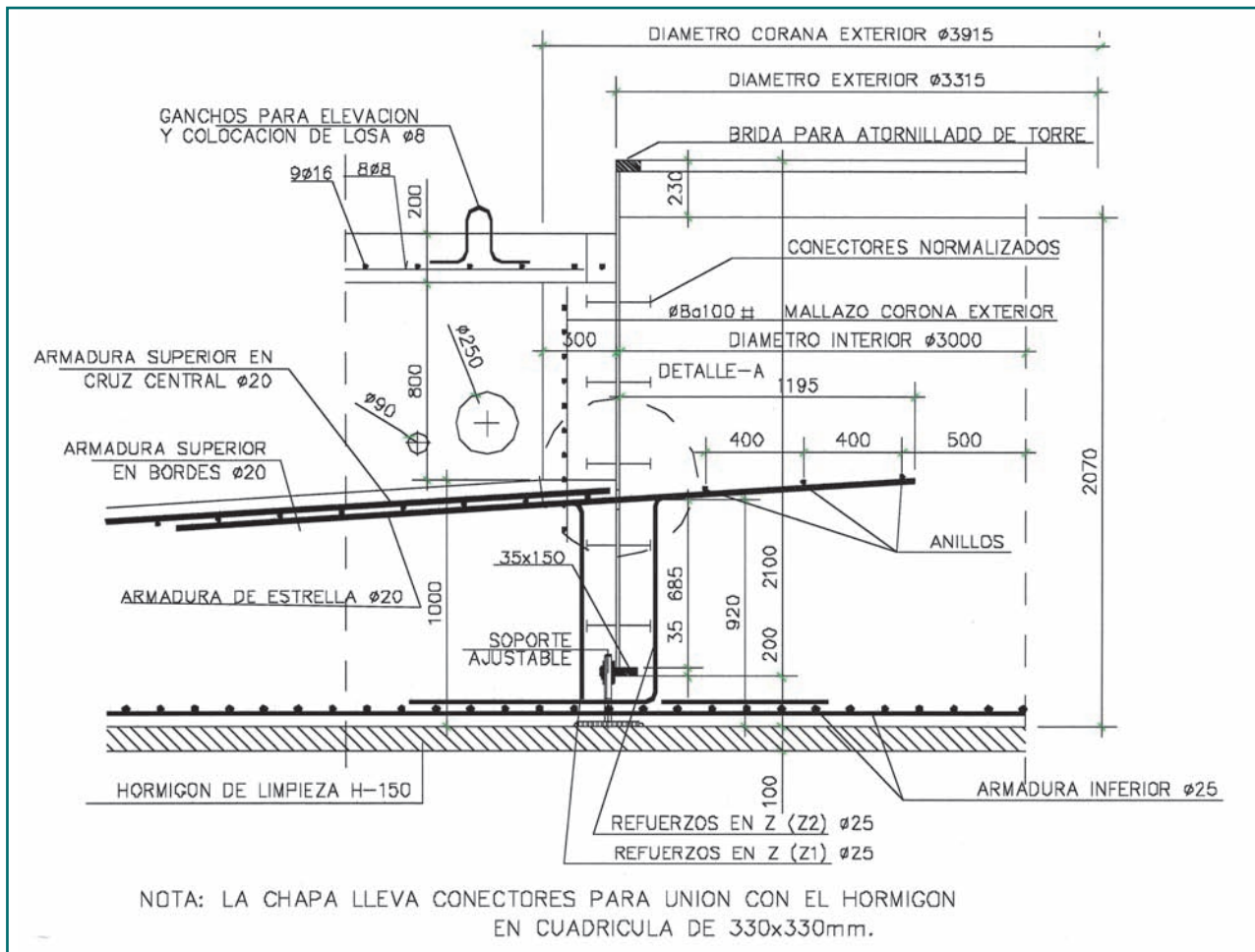


Fig. 4. Solución de virola con conectores/Solution of embedded steel section with connectors.

El hecho de que la virola transmita la fuerza de tracción y de compresión a la brida inferior implica movimientos respecto al hormigón, con el que no tiene adherencia, como pasaba en los tubos de hormigón que hemos comentado, y en consecuencia se produce una situación tensional inadecuada.

Para mejorar la situación repetimos la solución que habíamos dado a los tubos de hormigón. Proyectamos, también con ayuda de Esteyco, unos conectores, del modelo normalizado en estructuras mixtas, soldados a ambos lados de la virola que pudiesen trasladar al hormigón toda la fuerza de tracción y de compresión que llegaba a la virola. De este modo mejorábamos, sin mucho costo, la trabazón de los dos hormigones. En la figura 4 se aprecia la solución adoptada.

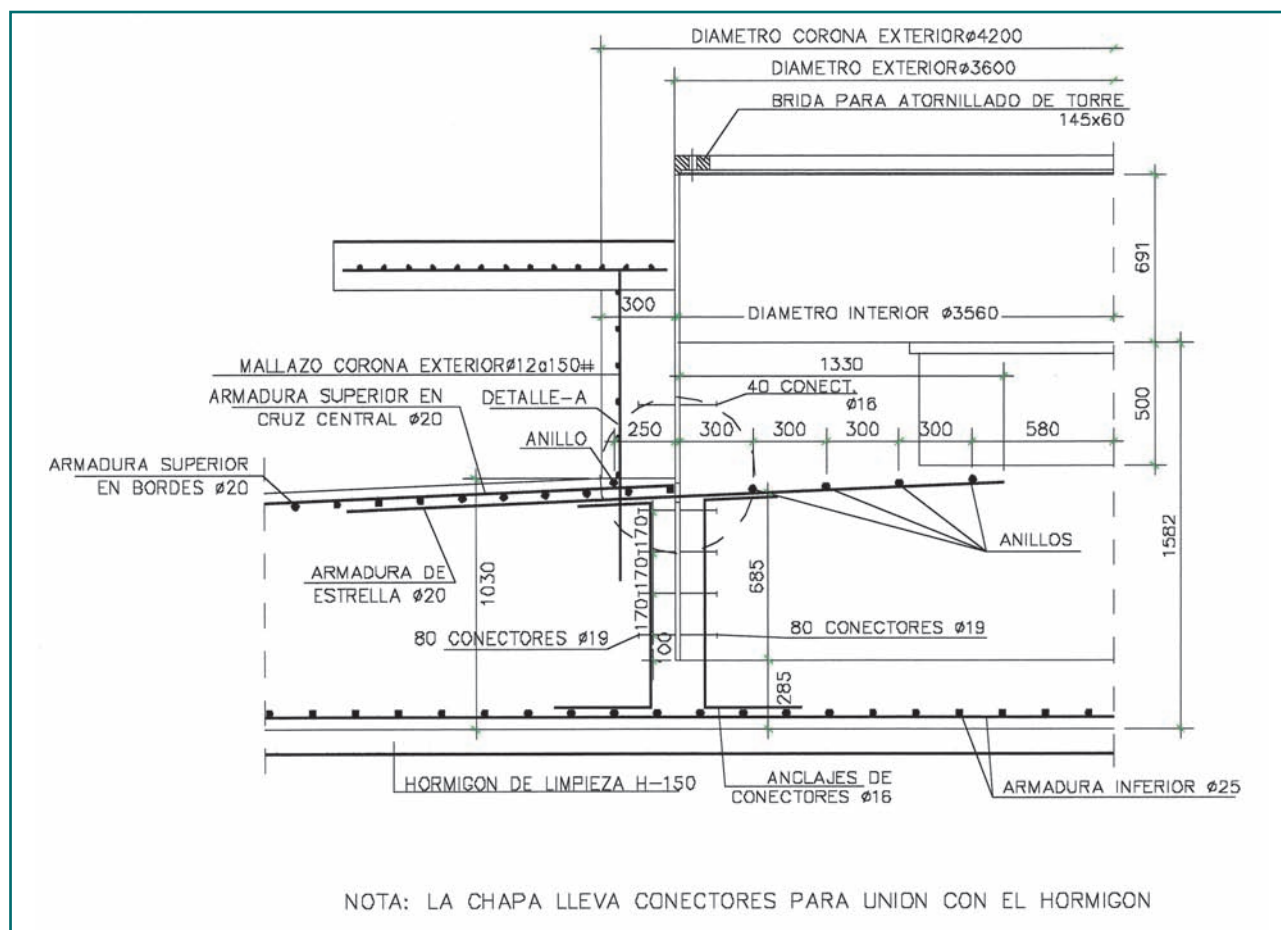
En estas condiciones podría hasta suprimirse la virola inferior y las fuerzas de tracción y compresión se irían trasladando al hormigón a lo largo de la virola. En 2001 se construyó por Acciona Energía un parque con este criterio, que puede verse en la figura 5 y la

similar to what has been described above regarding the concrete tubes with steel jackets.

Figure 2 shows star-shaped frameworks that link to the upper framework, located on the outside of the embedded steel section. The lower framework, which is continuous under the embedded steel section, is calculated as if the pad were a single concrete structure, ignoring the distortion produced by the embedded steel section.

The compression stress produced by the moment of the wind is transferred by the embedded steel section to the lower flange, which spreads it throughout the concrete and to the whole pad via the Z-bars. This approach appears correct, although complicated, as it would be better for the compression load to be applied directly to the upper part of the pedestal, such as in bolt foundations. The tensile force, which also reaches the lower embedded steel section, is counteracted by the concrete's pull-out resistance, reinforced by all the frameworks.

Fig. 5. Solución de virola con conectores y sin brida inferior/Solution of embedded steel section with connectors without the lower flange.



solución funciona correctamente. La supresión de la virola se planteó porque al fabricante de estas máquinas le preocupaba que el cambio de tensiones, de tracción a compresión, provocase fatiga en la soldadura entre la virola y la brida inferior. Podrían incluso suprimirse las armaduras en Z, ya que el esfuerzo apenas llegará a la parte inferior y por tanto no son necesarias.

Si en una virola con conectores se mantiene la brida inferior es difícil saber que proporción de esfuerzo se transmite al hormigón por aquellos y por ésta, ya que al ser la virola más rígida cargará una parte considerable del total. En cualquier caso, y como pasaba con los tubos de hormigón, tendremos una trabazón entre los hormigones de los dos lados de la virola, que nos permiten suponer, con mucha mayor seguridad que se trata sino de una estructura única si de dos que trabajan más conjuntamente.

Con esta solución de conectores hemos construido desde 1996 todos los parques de Acciona Energía equipados con máquinas ancladas con virolas. Inicial-

The fact that the embedded steel section transfers the tensile and compression forces to the lower flange implies that there is a movement with respect to the concrete –to which it is not adhered– as in the case of the concrete tubes mentioned above. Therefore an unsuitable tensile situation arises.

To improve this situation, we applied the solution we had used with the concrete tubes. Again with the help of Esteyco, we planned connectors –the standard model used in mixed structures– welded to both sides of the embedded steel section so they could transfer all the tensile and compression forces acting upon the embedded steel section to the concrete. This way we achieved a low-cost improvement by interlocking both concrete parts. Figure 4 shows the solution we adopted.

Under these conditions we could even do without the lower embedded steel section and the tensile and compression forces would transfer to the concrete throughout the embedded steel section. In 2001, Acciona Energía built a wind farm with these criteria, shown in figure 5, that works correctly. The elimination of



Foto Nº 10. Virola con conectores utilizado en 1996/Picture 10. Embedded steel section with connectors used in 1996.



Foto Nº 11. Virola colocada para hormigona/Picture 11. Embedded steel section ready for pouring.

mente éramos los únicos en usar esta solución que sin embargo se ha ido generalizando y ahora, constituye su solución normalizada.

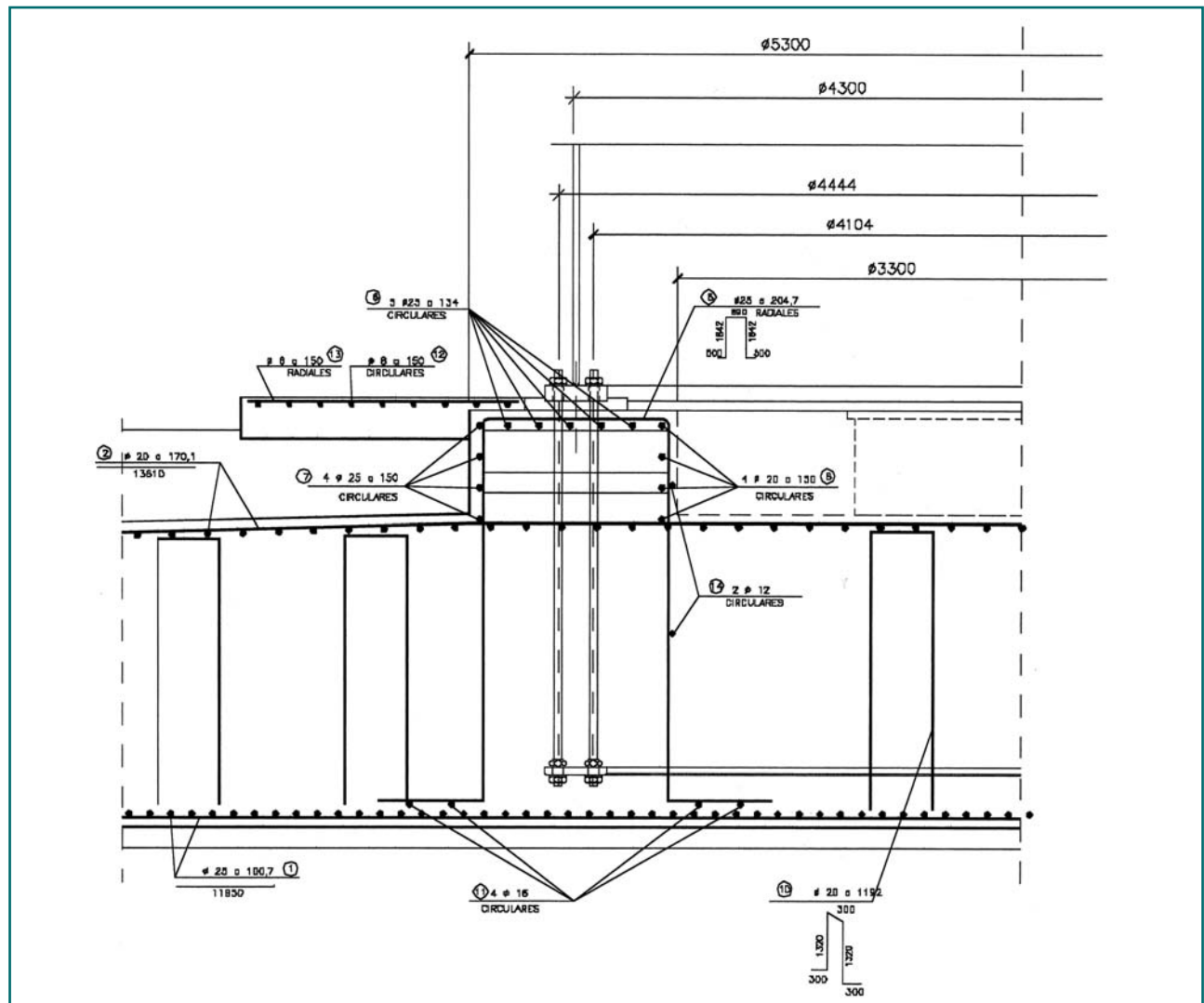
En la foto 10 puede verse una virola con conectores, en la foto 11 se ve la virola preparada para hormigonar y en la 12 la preparación de la franja exterior de hormigón que, como ya hemos indicado, evitar que el terraplén pueda oxidar la virola. Esta franja nos

the embedded steel section was considered because the turbine manufacturer was concerned that the changes in tensile and compression forces would result in the fatigue of the weld between the embedded steel section and the lower flange. We could even do without the Z-bars as well, as the force would practically not reach the lower part, making them unnecessary.



Foto Nº 12. Preparación de la franja de hormigón exterior/Picture 12. Preparing the outer concrete strip.

Fig. 6. Solución de anclajes con pernos postensados/
Anchoring solutions with post-tensioned bolts



permite, además, colocar conectores en casi toda la altura de la virola.

Comentarios a las grietas de las zapatas del artículo del germanischer

Como en las virolas de anclaje el esfuerzo tanto de tracción como de compresión se transmite a la brida inferior es evidente que la virola debe tener movimientos hacia arriba y hacia abajo. En la sección transversal, que figura en el artículo que estamos comentando, se aprecia que se ha colocado una brida superior, que deberá seguir los movimientos de la virola y cuyas subidas y bajadas producirán el agrietamiento de la capa de hormigón situado por encima de ella.

If the lower flange is maintained in the embedded steel section with connectors it is difficult to ascertain what portion of the force is transferred to the concrete by each, as the embedded steel section is more rigid and will therefore bear a considerable part of the total load. In any case, as with the concrete tubes, we will have an interlink between the two concrete pieces on either side of the embedded steel section and this will allow us to safely assume that, although we are not dealing with a single structure, we do have two structures that are working together better.

This connector-based solution has been used in all wind farms built by Acciona Energía that use turbines anchored with embedded steel sections since 1996. Initially we were the only ones to apply this solution but it has gradually spread and eventually become standard industry practice.



Foto N° 13. Conjunto de pernos/Picture 13. Bolt assembly.



Foto N° 14. Colocando la armadura superior/Picture 14. Placing of upper framework .

La solución, en nuestra opinión, es colocar los conectores que nosotros venimos usando desde 1996 y, posiblemente, suprimir la brida inferior adecuando las armaduras a la forma en que los esfuerzos se transmiten de la virola al hormigón a lo largo de toda su altura. Con esta solución se evitará el agrietamiento y se conseguirá una mejor trabazón entre los hormigones situados a los dos lados de la virola.

Anclaje con pernos postensados

Acciona WindPower y otros fabricantes de aerogeneradores proyectan el anclaje de las torres a las zapatas con pernos postensados. Esta solución tiene la ventaja de que los pernos no "cortan" el hormigón de la zapata sino que son barras que quedan en su interior, de modo similar a las armaduras pasivas, y el cálculo corresponde totalmente a la estructura. En la figura 6 se aprecia el detalle de esta solución.

El esfuerzo de tracción se traslada a la brida inferior que queda anclada por la resistencia al arranque de la zapata y la compresión se ejerce sobre la parte superior del pedestal, de modo mucho más lógico que con las virolas, en la que debe subirse con las armaduras en Z desde la parte inferior de la brida. Además al estar los pernos postensados siempre trabajan a tracción con una variación reducida de su esfuerzo, con lo están en buenas condiciones ante la fatiga. Los valores de los esfuerzos permiten

Picture 10 shows an embedded steel section with connectors, picture 11 the embedded steel section ready for pouring and picture 12 the preparation of the outer concrete strip which, as we have mentioned before, prevents the embankment from rusting the embedded steel section. This strip also allows us to place connectors almost at the height of the embedded steel section.

Comments on the pad cracks mentioned in the germanischer article

Since the tensile and compression forces in the embedded steel anchoring sections are transferred to the lower flange it is obvious that the embedded steel section will move up and down. In the cross section view shown in the article in question, there is an upper flange that should follow the movement of the embedded steel section. The flange will rise and fall causing cracks in the concrete layer immediately above it.

The solution, in our opinion, is to place the sort of connectors we have been using since 1996 and, possibly, remove the lower flange, adapting the frameworks to the way in which forces are transmitted from the embedded steel section to the concrete along its height. This solution would prevent cracking while achieving a better interlock between the two concrete pieces located on either side of the embedded steel section.



Foto 15. Pernos y armadura sobre el pedestal/
Picture 15. Bolts and framework on the pedestal.

recoger las tracciones del anclaje con un número razonable de pernos.

En la foto 13 se ve el conjunto de pernos colocado en una zapata, en la foto 14 la terminación del armado de la zapata y en la foto 15 la parte que sobresale de la zapata. Corresponde a un aerogenerador de 1.500 kW y 80 m de altura.

Por todo ello parece más razonable el anclaje con pernos que con virola, que, en caso de usarse, debería tener las mejoras indicadas en los puntos anteriores. ♦

Anchoring with post-tensioned bolts

Acciona WindPower and other wind turbine manufacturers anchor the towers to the pads using post-tensioned bolts. This solution has the advantage that the bolts do not "cut into" the concrete of the pad but rather behave as bars that stay inside the concrete, similar to a passive framework, and calculations therefore completely correspond to the structure. Figure 6 shows a detail of this solution.

The tensile force is transferred to the lower flange which remains anchored thanks to the pull-out resistance of the pad. The compression load acts on the upper part of the pedestal, in a much more logical fashion than with the embedded steel sections, where it has to be raised with the Z-bars from the lower part of the flange. Furthermore, since the bolts are post-tensioned, they always work with tension, with low force variations, and hence offer greater resistance to fatigue. The force values allow for the desired anchoring tension with a reasonable number of bolts.

Picture 13 shows the bolt assembly on a pad, picture 14 the finished framework of the pad and picture 15 the part that stands out of the pad. These foundations are for a 1500 kW, 80 m high wind turbine.

The above discussion implies that anchoring with bolts is more reasonable than with an embedded steel section, which, if used, should include the improvements indicated above. ♦

Referencias:

- Instrucción Hormigón armado (EHE).
- Instrucción de tuberías de hormigón armado y pretensado del IET.
- Proyectos de cimentaciones de diversos fabricantes de aeroge-

neradores (Vestas, Gamesa, Lagerwey, General Electric, Enercon, Acciona Windpower etc).

- Internacional Standard (IEC): Wind turbine generator systems.
- Germanischer Lloyd: Rules and regulations Wind energy (Tower and foundation). DNV/Riso: Guidelines for Desing of Wind Turbines.