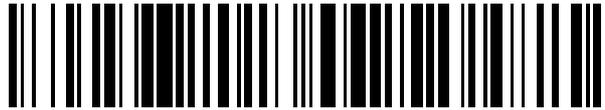


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 561 804**

51 Int. Cl.:

**F03D 1/06**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.07.2005 E 05758649 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.11.2015 EP 1915514**

54 Título: **Pala de turbina eólica**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**01.03.2016**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)  
Hedeager 42  
8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**GODSK, KRISTIAN BALSCHMIDT y  
NIELSEN, THOMAS S. BJERTRUP**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 561 804 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Pala de turbina eólica

**CAMPO TÉCNICO DE LA INVENCION**

5 La invención se refiere a una turbina eólica que comprende una pala de turbina eólica con un perfil aerodinámico y un diseño de la superficie sustentadora particulares. Más particularmente, la invención se refiere a una turbina eólica que comprende una pala de turbina eólica con un perfil aerodinámico, pala que se ha ajustado para reducir la sensibilidad a irregularidades superficiales de la pala tales como suciedad, arañazos y variaciones de fabricación.

**10 ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

Una sección transversal de una pala de turbina eólica se denomina típicamente como un perfil. La pala se conecta al buje que se sitúa en el centro del rotor. El perfil tiene una cuerda,  $c$ , y un grosor,  $t$ , como se muestra en la FIG. 1. La forma del perfil, por ejemplo los tamaños de la cuerda y el grosor así como el cociente entre grosor y cuerda, varía como función del radio,  $r$ , esto es, la distancia del centro del rotor a la sección trasversal de la pala.

15 Típicamente, la superficie sustentadora de una pala de turbina eólica se forma por interpolación entre una pluralidad de perfiles. La pala, y por tanto los perfiles individuales, giran con relación al plano del rotor durante el funcionamiento. El viento entrante es aproximadamente ortogonal al plano del rotor, pero debido a que la pala está en movimiento, el ángulo y la velocidad del viento entrante efectivos (esto es, correspondientes a una pala estacionaria) dependen de la velocidad de giro de la pala. El ángulo efectivo se denomina igualmente como el ángulo de ataque,  $\alpha$ , como se muestra en la FIG. 2. La velocidad efectiva del viento que experimenta el perfil se denomina igualmente como la velocidad relativa del viento,  $w$ , como se muestra en la FIG. 2.

25 Una pala de turbina eólica puede ser susceptible a irregularidades superficiales tanto permanentes como temporales durante su vida útil. Las irregularidades superficiales temporales pueden ser, por ejemplo, deposiciones de aves, insectos, partículas de polvo, lluvia, nieve, hielo, sal, etc. Las irregularidades permanentes se pueden originar, por ejemplo, de irregularidades superficiales temporales que no son eliminadas, o surgir durante su fabricación o manejo, por ejemplo por arañazos, imperfecciones del molde, defectos de la pintura, etc.

La presencia de irregularidades superficiales da como resultado típicamente uno o más de una sustentación reducida, un aumento de frenado aerodinámico y una emisión acústica aumentada, cambios todos ellos que son indeseables para la aplicación de palas para una turbina eólica moderna.

30 Un cierto número y tamaño de irregularidades superficiales son inevitables a lo largo de la vida útil de una pala de turbina eólica. Así pues, existe una demanda de una pala de turbina eólica y un perfil, para los cuales las propiedades aerodinámicas estén menos influidas por las irregularidades superficiales.

35 Los documentos EP 0331603 y EP 0675285 dan a conocer ambos una familia de secciones o perfiles de superficie sustentadora para una pala de turbina eólica con el objetivo de aumentar las propiedades aerodinámicas y disminuir la sensibilidad a efectos de rugosidad.

**OBJETO DE LA INVENCION**

El objeto de la invención es proporcionar un perfil aerodinámico mejorado y una pala de turbina eólica que comprende el perfil.

**DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION**

40 Esto se lleva a cabo mediante el perfil aerodinámico para una pala de turbina eólica, perfil que tiene un lado de succión y un lado de presión, lados que están conectados en el borde de ataque y en el borde de salida que comprende además las características de la reivindicación 1. En un modo de realización preferido, el grosor en 2%-cuerda es  $t_{2\%C} > 7,5\%$  de la cuerda y  $t_{2\%C} < 8,5\%$  de la cuerda.

45 En otro aspecto de la invención, un perfil aerodinámico de acuerdo con la invención y adecuado para una pala de turbina eólica tiene un lado de succión y un lado de presión, lados que se conectan en el borde de ataque y el borde de salida. Esto define una superficie externa continua del perfil. El perfil tiene además una curvatura, que se desvía de la línea de cuerda. El borde de ataque tiene una forma redondeada, y para al menos una posición entre 50%-cuerda y 80%-cuerda del perfil, la inclinación del lado de succión del perfil se encuentra entre una primera interpolación lineal entre -9% en 50%-cuerda y -16% en 80%-cuerda y una segunda interpolación lineal entre -4,5% en 50%-cuerda y -8% en 80%-cuerda. En un modo de realización preferido, una o más partes del intervalo de 50%-cuerda a 80%-cuerda de dicho perfil se

encuentra entre dicha primera interpolación lineal y dicha segunda interpolación lineal, tal como un cuarto del intervalo, la mitad del intervalo o lo más preferiblemente sustancialmente todo el intervalo.

Otro aspecto de la invención se refiere a una pala de turbina eólica que comprende al menos un perfil de acuerdo con otro aspecto de la invención.

- 5 Un aspecto adicional de la invención se refiere a una turbina eólica que comprende una pala de turbina eólica con al menos un perfil de acuerdo con otro aspecto de la invención.

#### BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La invención se explicará más completamente a continuación con referencia a modos de realización ejemplares así como a los dibujos, en los cuales

- 10 la FIG. 1 muestra un perfil de una pala de turbina eólica,  
la FIG. 2 muestra un perfil con viento entrante,  
la FIG. 3 muestra criterios de diseño para un borde de ataque de un perfil, la FIG. 4 muestra criterios de diseño para un lado de succión de un perfil, y  
la FIG. 5 muestra criterios de diseño para un borde de ataque de un perfil.
- 15 Todas las figuras son altamente esquemáticas y no están necesariamente a escala, y muestran tan solo las partes que son necesarias con el fin de elucidar la invención, omitiéndose o meramente sugiriéndose otras partes.

#### DESCRIPCIÓN DETALLADA

- Un perfil aerodinámico 6 como se muestra en la FIG. 1 tiene un lado de succión 8 y un lado de presión 10 definidos de acuerdo con el viento entrante (véase la FIG. 2) y la forma del perfil. La parte delantera del perfil se denomina borde de ataque 12 y el extremo del perfil alejado del borde de ataque se denomina borde de salida 14.

#### *Definiciones*

- Por %-radio se entiende en lo que sigue una fracción de la pala que corresponde al mismo porcentaje de la longitud longitudinal de la pala. La fracción no necesita ser una parte continua sino que puede estar constituida de varias partes del perfil. Por ejemplo, 50%-radio corresponde a 25 metros de una pala cuando el radio del rotor es 50 metros, y el 50%-radio puede estar constituido, por ejemplo, por 5 metros de la raíz de la pala en combinación con los 5 metros más externos de la punta de la pala y 15 metros alrededor del centro de la pala.

Por %-cuerda se entiende en lo que sigue una distancia desde el borde de ataque del perfil. Por ejemplo, la mitad o 50% del intervalo entre 50%-cuerda y 80%-cuerda corresponde al 15% de la longitud total de la cuerda, y el 50% del intervalo puede estar constituido por 50%-cuerda a 55%-cuerda en combinación con 65%-cuerda a 75%-cuerda.

- 30 Por cuerda se entiende en lo que sigue la línea recta entre el borde de ataque y el borde de salida. Así pues, la cuerda se puede situar por fuera del perfil aerodinámico en uno o más intervalos de %-cuerda. Esto se observa en la FIG. 1 para un ejemplo de un perfil 6 de turbina eólica esquemático, donde se indican la línea de cuerda 18 y la línea de curvatura 16.

- 35 Por línea de curvatura se entiende en lo que sigue una línea que se forma del borde de ataque al borde de salida siguiendo la coordenada principal del lado de succión y del lado de presión. Así pues, entre el borde de ataque y el borde de salida, la línea de curvatura siempre está situada dentro del perfil aerodinámico. Esto se observa igualmente en la FIG. 1 para un ejemplo de un perfil 6 de turbina eólica esquemático, donde se indican la línea de cuerda 18 y la línea de curvatura 16. Se debe observar que para turbinas eólicas de alto rendimiento, tal como una turbina eólica que tiene al menos una pala y que tiene un diámetro del rotor superior a 60 metros, y particularmente para una turbina eólica que tiene un diámetro de rotor superior a 80 metros, es particularmente ventajoso tener un perfil en el que la línea de cuerda se desvía de la curvatura. Esto se basa principalmente en el hecho de que un perfil simétrico (esto es, línea de curvatura = cuerda) no puede estar diseñado, incluso teóricamente, para tener un coeficiente de sustentación,  $c_L$ , muy alto y por tanto los perfiles utilizados para palas de turbina eólica más grandes tienen líneas de curvatura y cuerda que se desvían para conseguir una elevada sustentación, esto es, un elevado  $c_L$ .

- 45 Una de las principales causas de fallo de grandes palas de turbina eólica es la fatiga. La fatiga se controla en gran medida por el tamaño de la cuerda ya que cuanto más grande la cuerda más susceptible a fallo de fatiga es la pala de la turbina eólica. Así pues, es altamente deseable utilizar perfiles aerodinámicos con altos coeficientes de sustentación en combinación con cuerdas relativamente cortas, y perfiles simétricos no son por ello adecuados para grandes turbinas eólicas.

Se debe observar que por una curvatura del perfil, curvatura que se desvía de la línea de cuerda, se entiende en lo que sigue que la línea de curvatura y la línea de cuerda se desvían en al menos un 1,5% de la longitud de la cuerda en la dirección ortogonal a la línea de cuerda en al menos un punto entre el borde de ataque y el borde de salida. En un modo de realización preferido, la línea de curvatura se desvía en al menos un 1,5% de la longitud de la cuerda en la dirección ortogonal a la línea de cuerda en al menos un 10% del intervalo entre el borde de ataque y el borde de salida, más preferiblemente en al menos un 20% y lo más preferiblemente en al menos un 30% del intervalo. En otro modo de realización preferido, la línea de curvatura se desvía al menos en al menos un 3% de la longitud de la cuerda en la dirección perpendicular a la línea de cuerda en al menos un punto entre el borde de ataque y el borde de salida. En un modo de realización preferido adicional, la línea de curvatura se desvía en al menos un 3% de la longitud de la cuerda en la dirección ortogonal a la línea de cuerda en al menos un 10% del intervalo entre el borde de ataque y el borde de salida, más preferiblemente en al menos un 20% y lo más preferiblemente en al menos un 30% del intervalo. Perfiles con mayor desviación entre la línea de cuerda de la línea de curvatura así como perfiles en los que la desviación es un intervalo mayor proporcionan un perfil más asimétrico y por tanto permiten un perfil con un mayor coeficiente de sustentación. En la FIG. 1, la desviación entre la línea de curvatura y la línea de cuerda se indica mediante la flecha 20.

Por forma redondeada del borde de ataque se entiende en lo que sigue que la primera derivada de la distancia de la línea de cuerda al lado de succión así como la primera derivada de la distancia de la línea de cuerda al lado de presión como función del %-cuerda es continua en el intervalo de borde de ataque que incluye el mismo borde de ataque a alrededor de un 5%-cuerda.

*Borde de ataque romo*

Se encontró que una subida de presión en el borde de ataque podría controlarse mediante un borde de ataque romo cuidadosamente diseñado que garantice que el punto de transición natural del lado de succión, donde el flujo cambia de laminar a turbulento, se mueve hasta el mismo borde de ataque cuando el ángulo de ataque se aproxima al ángulo de ataque correspondiente a un coeficiente de sustentación máximo  $C_{Lmax}$ , este ángulo se denomina asimismo como  $\alpha_{max}$ . Una transición prematura provocada por irregularidades del borde de ataque quedará así eliminada por una posición muy adelantada del punto de transición natural.

Partiendo de estas consideraciones de diseño, se inventaron perfiles aerodinámicos, que son superiores a los perfiles anteriormente conocidos con respecto a la sensibilidad frente a irregularidades superficiales. Esto dio como resultado que un perfil aerodinámico de acuerdo con la invención tiene un lado de succión y un lado de presión, lados que están conectados en el borde de ataque y un borde de salida por lo que se forma una superficie exterior continua del perfil. Además, la curvatura del perfil se desvía de la línea de cuerda como se discutió anteriormente. La región del borde de ataque es redondeada de modo que las pendientes del lado de succión así como del lado de presión son continuas. Trabajos experimentales han mostrado que para tal perfil, es altamente ventajoso que el grosor del perfil en 2%-cuerda del borde de ataque, esto es, el grosor a una distancia de 0,02 cuerda respecto al mismo borde de ataque y denominado igualmente como  $t_{2\%C}$ , esté entre un 7% y un 9% de la longitud de la cuerda. Particularmente, se encontró que el grosor en 2%-cuerda que está en el intervalo del 7,5% de la cuerda  $< t_{2\%C} < 8,5\%$  de la cuerda, era ventajoso con una sensibilidad muy baja frente a irregularidades superficiales. Estos intervalos se indican en las FIGs. 3A y B. Se debe observar que el grosor ventajoso del perfil en 2%-cuerda no necesita ser simétrico alrededor de la línea de cuerda. En la FIG. 3, el intervalo de grosor se dibuja simétricamente, esto es, las distancias de la línea de cuerda a los intervalos reivindicados que corresponden al lado de presión y al lado de succión son las mismas. No obstante, se encontró, como se refleja en la reivindicación, que la característica importante en este aspecto de la invención era la distancia total entre el lado de presión y el lado de succión y no si la línea de cuerda está desplazada ligeramente hacia cualquiera de los lados.

El trabajo experimental reveló igualmente que un perfil altamente ventajoso puede ser definido alternativamente mediante un grosor del perfil en 3%-cuerda del borde de ataque en el intervalo de  $8\% < t_{3\%C} < 10\%$  de la cuerda. Particularmente, el intervalo de  $8,5\% < t_{3\%C} < 9,5\%$  de la cuerda era ventajoso con una sensibilidad muy baja frente a irregularidades superficiales. Un ejemplo de tales intervalos se indica en las FIGs. 3C y D.

Además, el trabajo experimental reveló igualmente que la región muy próxima al borde de ataque de un perfil altamente ventajoso se puede definir mediante un grosor del perfil en 1%-cuerda del borde de ataque en el intervalo de  $5\% < t_{1\%C} < 7\%$  de la cuerda. Particularmente, el intervalo de  $5,3\% < t_{1\%C} < 6,5\%$  de la cuerda era ventajoso con una sensibilidad muy baja frente a irregularidades superficiales. Un ejemplo de tales intervalos se indica en las FIGs. 3E y F.

Alternativamente, las formas relevantes del borde de ataque se pueden definir como dentro de un área entre dos semicírculos donde el perfil se debe disponer mientras se toma en consideración que el perfil debe tener un borde de ataque redondeado. El trabajo experimental ha mostrado que la sensibilidad frente a irregularidades superficiales es baja cuando el perfil entre cerca del borde de ataque y 2%-cuerda del perfil está dentro de un intervalo entre el radio de curvatura del 4% de la cuerda y un radio de curvatura del 10% de la cuerda. Dado que los radios de curvatura se fusionan sustancialmente en el mismo borde de ataque, se ha introducido la expresión "cerca del borde de ataque". Por "cerca del

borde de ataque” se entiende en este caso alrededor de 0,25%-cuerda. Estos intervalos se indican en la FIG. 3G. Se debe observar que el perfil no necesita corresponder a un radio de curvatura sino meramente estar dentro del intervalo entre los límites de radio de curvatura del intervalo. No obstante, la exigencia de que el perfil debe ser redondeado (véase lo anterior) se aplica igualmente como es obvio. Se encontró que es particularmente ventajoso cuando el borde de ataque que corresponde a 0,25%-cuerda a 2%-cuerda del perfil está dentro de un radio de curvatura del 4,5% de la cuerda y un radio de curvatura del 9% de la cuerda, ya que esto conduce a una sensibilidad particularmente baja frente a irregularidades superficiales. Estos intervalos se indican en la FIG. 3H.

Además, el trabajo experimental reveló igualmente que la región muy próxima al borde de ataque de un perfil altamente ventajoso se puede definir por un perfil entre cerca del borde de ataque y 1%-cuerda del perfil dentro de un radio de curvatura del 3,5% de la cuerda y un radio de curvatura del 9% de la cuerda. Dado que los radios de curvatura se fusionan sustancialmente en el mismo borde de ataque, se ha introducido la expresión “cerca del borde de ataque”. Por “cerca del borde de ataque” se entiende alrededor del 0,25%-cuerda. Esto permite un perfil con una sensibilidad muy baja frente a irregularidades superficiales. En un modo de realización particularmente ventajoso, el perfil entre 0,25%-cuerda y 1%-cuerda del perfil está dentro de un radio de curvatura del 4% de la cuerda y un radio de curvatura del 8% de la cuerda. Estas áreas se indican en las FIGs. 3I y J.

#### *“Trasera” plana del lado de succión*

Se encontró igualmente que otro factor de diseño importante es conformar cuidadosamente el lado de succión de la superficie de sustentación tras el punto más grueso de modo que la región de recuperación de la presión no se separe prematuramente debido a un aumento del grosor de la capa límite provocado por la rugosidad que reduciría el  $C_{Lmax}$ .

El trabajo experimental mostró sorprendentemente que ni el grosor total ni el grosor del lado de succión, esto es, la distancia desde la línea de cuerda al lado de succión, sino la pendiente del lado de succión es el parámetro principal en lo que se refiere a la reducción de la sensibilidad del  $C_{Lmax}$ , particularmente frente a irregularidades superficiales del perfil. El trabajo se refería a un perfil aerodinámico de acuerdo con la invención, teniendo el perfil un lado de succión y un lado de presión, lados que están conectados en un borde de ataque y un borde de salida por lo que se forma una superficie externa continua del perfil. Además, la curvatura del perfil se desviaba de la línea de cuerda como se discutió anteriormente. La región del borde de ataque es redondeada de modo que las pendientes del lado de succión así como del lado de presión sean continuas. Particularmente, se encontró que en al menos una posición entre 50%-cuerda y 80%-cuerda de dicho perfil, la pendiente del lado de succión del perfil se dispone dentro de un área definida por dos interpolaciones lineales; la primera interpolación lineal se define por una pendiente del -9% en 50%-cuerda y una pendiente del -16% en 80%-cuerda y una segunda interpolación lineal se define por una pendiente del -4,5% en 50%-cuerda y una pendiente del -8% en 80%-cuerda. En la FIG. 4A se indican la primera y la segunda de las interpolaciones lineales para ilustrar el área en la que se deben disponer uno o más de los perfiles. Se encontró asimismo que cuando una gran fracción de las pendientes de lado de presión se encuentra dentro del intervalo definido por las interpolaciones primera y segunda entre 50%-cuerda y 80%-cuerda, entonces la tendencia a una separación prematura se reduce considerablemente. Por ejemplo, al menos un cuarto del intervalo entre 50%-cuerda y 80%-cuerda puede estar entre la primera y la segunda interpolación, pero teniendo una mayor parte del lado de succión dentro del intervalo, tal como la mitad del intervalo, al menos un 90% del intervalo, o, lo más ventajoso, sustancialmente todo el intervalo relevante del lado de succión se encuentra entre la interpolación lineal primera y segunda. Los mayores porcentajes del intervalo impiden sustancialmente una separación prematura incluso para niveles relativamente elevados de irregularidades superficiales y por tanto son altamente ventajosos.

El trabajo experimental reveló asimismo que para un modo de realización particularmente preferido de acuerdo con la invención, la primera interpolación lineal se redefine como una pendiente del -8% en 50%-cuerda y una pendiente del -14% en 80%-cuerda y una segunda interpolación lineal se redefine por una pendiente del -5% en 50%-cuerda y una pendiente del -8,5% en 80%-cuerda. En la FIG. 4B las interpolaciones lineales primera y segunda redefinidas se indican para ilustrar el área en donde se deben disponer uno o más de los perfiles. En este modo de realización, las consideraciones relativas a tener una mayor fracción de las pendientes de lado de presión dentro del intervalo definido por las interpolaciones redefinidas primera y segunda entre 50%-cuerda y 80%-cuerda son igualmente altamente ventajosas, ya que la tendencia a la separación prematura se reduce todavía más.

#### *Combinación de un borde de ataque romo y una “trasera” plana del lado de succión*

Como se discutió anteriormente, ambas consideraciones relativas a la forma del mismo borde de ataque, esto es, la falta de filo del borde de ataque, y las consideraciones relativas a la forma del lado de succión, esto es, la planaridad de la “trasera” del perfil, son individualmente relevantes para considerar cuándo diseñar un perfil que tenga una baja sensibilidad con relación a irregularidades superficiales. Sin embargo, sorprendentemente se encontró que combinando los criterios de diseño del mismo borde de ataque con aquellos del lado de succión, la sensibilidad con relación a irregularidades superficiales disminuyó más allá de lo que se puede conseguir mediante estos criterios de diseño

individualmente.

Un perfil combinado se puede definir, por ejemplo, como:

Un perfil aerodinámico para una pala de turbina eólica, teniendo dicho perfil un lado de succión y un lado de presión, lados que están conectados en un borde de ataque y un borde de salida, formando así una superficie externa continua del perfil, en el que

- 5                   – la curvatura del perfil se desvía de una línea de cuerda,
- el borde de ataque tiene una forma redondeada,
- el grosor en 2%-cuerda del borde de ataque es  $t_{2\%C} > 7\%$  de la cuerda y  $t_{2\%C} < 9\%$  de la cuerda; preferiblemente  $t_{2\%C} > 7,5\%$  de la cuerda y  $t_{2\%C} < 8,5\%$  de la cuerda, y
- 10               – para al menos una posición entre 50%-cuerda y 80%-cuerda de dicho perfil la pendiente de lado de succión del perfil se encuentra entre una primera interpolación lineal entre -9% en 50%-cuerda y -16% en 80%-cuerda y una segunda interpolación lineal entre -4,5% en 50%-cuerda y -8% en 80%-cuerda,
- preferiblemente al menos un cuarto del intervalo 50%-cuerda a 80%-cuerda de dicho perfil se encuentra entre dicha primera interpolación lineal y dicha segunda interpolación lineal,
- 15               más preferiblemente al menos la mitad del intervalo 50%-cuerda a 80%-cuerda de dicho perfil se encuentra entre dicha primera interpolación lineal y dicha segunda interpolación lineal,
- todavía más preferiblemente al menos un 90% del intervalo 50%-cuerda a 80%-cuerda de dicho perfil se encuentra entre dicha primera interpolación lineal y dicha segunda interpolación lineal, y
- 20               lo más preferiblemente, sustancialmente todo el intervalo 50%-cuerda a 80%-cuerda de dicho perfil se encuentra entre dicha primera interpolación lineal y dicha segunda interpolación lineal.

Basándose en este ejemplo, el experto en la técnica puede derivar otras combinaciones de reivindicaciones de acuerdo con la invención.

Además, se encontró que debido a la sensibilidad disminuida frente a irregularidades superficiales que surge por la combinación, los criterios de diseño pueden ser ligeramente menos exigentes a la vez que se mantiene una baja sensibilidad frente a irregularidades superficiales. Un modo de realización preferido de este aspecto de la invención se refiere a un perfil aerodinámico para una pala de turbina eólica, donde el perfil tiene un lado de succión y un lado de presión, lados que están conectados en un borde de ataque y un borde de salida, formando así una superficie externa continua del perfil. El perfil tiene además una línea de curvatura del perfil que se desvía de la línea de cuerda, y el borde de ataque tiene una forma redondeada. Con relación al borde de ataque, el perfil entre cerca del borde de ataque y 2%-cuerda del perfil está dentro de un intervalo entre un radio de curvatura del 2% de la cuerda y un radio de curvatura del 8% de la cuerda. Dado que los radios de curvatura se fusionan sustancialmente en el mismo borde de ataque, se ha introducido la expresión “cerca del borde de ataque”. Por “cerca del borde de ataque” se entiende en este caso alrededor de un 0,25%-cuerda. Con relación a la pendiente del lado de succión del perfil, en al menos una posición entre 50%-cuerda y 80%-cuerda de dicho perfil, dicha pendiente se encuentra entre una primera interpolación lineal entre -11% en 50%-cuerda hasta -18% en 80%-cuerda y una segunda interpolación lineal entre -4,5% en 50%-cuerda y -8% en 80%-cuerda. En un modo de realización preferido, al menos un cuarto del intervalo 50%-cuerda a 80%-cuerda de dicho perfil se encuentra entre dicha primera interpolación lineal y dicha segunda interpolación lineal. En otro modo de realización preferido, al menos la mitad del intervalo 50%-cuerda a 80%-cuerda de dicho perfil se encuentra entre dicha primera interpolación lineal y dicha segunda interpolación lineal, y más preferiblemente al menos un 90% del intervalo 50%-cuerda a 80%-cuerda de dicho perfil se encuentra entre dicha primera interpolación lineal y dicha segunda interpolación lineal. Para el modo de realización más preferido, sustancialmente todo el intervalo 50%-cuerda a 80%-cuerda de dicho perfil se encuentra entre dicha primera interpolación lineal y dicha segunda interpolación lineal.

En un modo de realización alternativo basado en los criterios de diseño que son ligeramente menos exigentes mientras se mantiene una baja sensibilidad frente a irregularidades superficiales para la combinación de un borde de ataque romo con un lado de succión plano se refiere a un perfil aerodinámico para una pala de turbina eólica, en el que el perfil tiene un lado de succión y un lado de presión, lados que están conectados en un borde de ataque y un borde de salida, formando así una superficie externa continua del perfil. El perfil tiene además una línea de curvatura del perfil que se desvía de la línea de cuerda, y el borde de ataque tiene una forma redondeada. Con relación al borde de ataque, el perfil entre la proximidad del borde de ataque y 2%-cuerda del perfil se encuentra dentro de un intervalo entre un radio de curvatura del 4% de la cuerda y un radio de curvatura del 10% de la cuerda. Dado que los radios de curvatura se fusionan sustancialmente en el mismo borde de ataque, se ha introducido la expresión “cerca del borde de ataque”. Por “cerca del

borde de ataque” se entiende en este caso alrededor de 0,25%-cuerda. Con relación a la pendiente de lado de succión del perfil, en al menos una posición entre 50%-cuerda y 80%-cuerda de dicho perfil, esta pendiente se encuentra entre una primera interpolación lineal entre -14% en 50%-cuerda y -20% en 80%-cuerda y una segunda interpolación lineal entre -6% en 50%-cuerda y -10% en 80%-cuerda. En un modo de realización preferido, al menos un cuarto del intervalo 50%-cuerda a 80%-cuerda de dicho perfil se encuentra entre dicha primera interpolación lineal y dicha segunda interpolación lineal. En otro modo de realización preferido, al menos la mitad del intervalo 50%-cuerda a 80%-cuerda de dicho perfil se encuentra entre dicha primera interpolación lineal y dicha segunda interpolación lineal, y más preferiblemente al menos un 90% del intervalo 50%-cuerda a 80%-cuerda de dicho perfil se encuentra entre dicha primera interpolación lineal y dicha segunda interpolación lineal. Para el modo de realización más preferido, sustancialmente todo el intervalo 50%-cuerda a 80%-cuerda de dicho perfil se encuentra entre dicha primera interpolación lineal y dicha segunda interpolación lineal. Este diseño permite un perfil con un mayor grosor, lo que permite una pala estructuralmente más aceptable al tener más espacio para refuerzo.

Además, se encontró que cuando un borde de ataque romo se combina con una “trasera” plana del lado de succión, el grosor del intervalo de cuerda donde las consideraciones de diseño son altamente ventajosas aumenta hasta cualquier grosor del perfil por debajo del 24% de la cuerda. Particularmente, se encontró que para grosores de perfil por encima del 13% de la cuerda e inferiores al 24% de la cuerda, la combinación proporciona perfiles superiores. Dado que la sensibilidad frente irregularidades superficiales es particularmente importante para las partes externas de una pala de turbina eólica correspondientes a un grosor de perfil bajo, este perfil es particularmente ventajoso para grosores de perfil entre el 30% de la cuerda al 18% de la cuerda.

#### 20 *Otros aspectos*

Los perfiles de acuerdo con la invención son particularmente adecuados para las partes más exteriores de la pala, ya que las partes más exteriores son las más relevantes para una reducción de la sensibilidad frente irregularidades superficiales. En primer lugar, las partes externas de la pala generan la mayoría de la energía y por lo tanto una disminución en  $c_{L,max}$  en esta parte de la pala reducirá enormemente la producción de energía de la turbina eólica. En segundo lugar, la parte externa de la pala es más susceptible a la formación de irregularidades superficiales durante su vida útil. Esto es debido principalmente a la elevada velocidad del borde de ataque para las partes externas de la pala durante su funcionamiento. Finalmente, la emisión de ruido es altamente dependiente de la sensibilidad de las palas frente a irregularidades superficiales. Típicamente, las palas de una turbina eólica de alta potencia se diseñan para funcionar cerca del límite de emisión de ruido y por tanto un aumento en la emisión de ruido no es aceptable.

30 Los perfiles de acuerdo con la invención tienen así ventajosamente un grosor de perfil,  $t$ , que corresponde a menos del 18% de la cuerda. En un perfil particularmente ventajoso, el grosor del perfil es inferior al 17% de la cuerda y más preferiblemente, el grosor del perfil se encuentra entre el 13% de la cuerda y el 16% de la cuerda.

35 La disposición ventajosa del perfil de acuerdo con la invención cerca de la parte más externa de la pala es igualmente particularmente adecuada bajo los mismos argumentos que se discutieron anteriormente. En un modo de realización altamente ventajoso de la invención, el perfil se dispone en el 25%-radio más externo de la pala. En otro modo de realización de la invención, un perfil de acuerdo con la invención se dispone para al menos el 20%-radio de la pala. Al menos el 20%-radio de la pala puede disponerse ventajosamente en el 50% más externo de la pala.

40 En un modo de realización particularmente ventajoso de una pala de turbina eólica, la pala comprende un perfil de acuerdo con la invención para al menos un 40%-radio de la pala. Debido a la relevancia particular de los perfiles de acuerdo con la invención para aplicaciones en palas de turbina eólica lejos de la sección de raíz de la pala, es ventajoso que el al menos un 40%-radio que tiene el presente perfil se utilice entre radios de pala  $r = 30-90\%$  del radio del rotor,  $R$ .

45 Cuando se considera el diseño del perfil de acuerdo con la invención, es ventajoso asimismo esforzarse por conseguir perfiles con una solidez específica baja. Una solidez específica de radio baja conduce a una reducción de la fatiga y las cargas extremas. Además, perfiles de baja solidez específica requieren un  $c_{L,max}$  muy alto para conseguir una eficiencia energética suficientemente alta. Así pues, perfiles con baja solidez específica son particularmente sensibles frente a una reducción en  $c_{L,max}$ , que surgirá por la presencia inevitable de irregularidades superficiales durante su vida útil. Así pues, es altamente ventajoso combinar un perfil con solidez específica baja con un borde de ataque romo y/o una “trasera” plana del lado de succión.

50 Dado que los perfiles de acuerdo con la invención restringen la forma del perfil y por tanto aumentan las exigencias del refuerzo con relación a la resistencia y la posible disposición con relación a la línea central de la pala, es altamente ventajoso reforzar la pala de acuerdo con la invención al menos parcialmente con fibras de carbono, ya que estas fibras son muy resistentes en comparación con el tamaño y peso y por tanto permiten un elevado nivel de flexibilidad estructural. La pala puede comprender asimismo otros tipos de refuerzos, tales como fibras de vidrio, fibras naturales, por ejemplo, cáñamo, etc. No obstante, se prefiere que la principal fibra de refuerzo en al menos una sección de la pala de turbina eólica sean fibras de carbono. Tales fibras de carbono se disponen preferiblemente como elementos curados

conformados por pultrusión o prensado por correa, ya que esto permite un proceso de fabricación más sencillo y fibras altamente alineadas.

5 Un aspecto adicional de la invención se refiere a una turbina eólica que comprende una pala de turbina eólica de acuerdo con la invención. Tal turbina eólica es ventajosa al tener un rendimiento más estable durante su vida útil y requerir menos mantenimiento de las palas. La sensibilidad reducida frente a irregularidades superficiales significa que la sustentación es más estable a lo largo del tiempo y se evita sustancialmente o al menos se reduce considerablemente la degradación del rendimiento.

10 El perfil es particularmente adecuado para una turbina eólica accionable por regulación de paso, velocidad variable del rotor y un diámetro del rotor de al menos 60 metros, preferiblemente al menos 80 metros, aunque el perfil se puede utilizar igualmente, por ejemplo, para turbinas eólicas reguladas por pérdida.

*Condiciones cerca de la raíz de la pala*

15 La superficie sustentadora en la sección de raíz de la pala está dictada principalmente por consideraciones estructurales. Esto es aceptable ya que esta sección solo abarca una parte menor de la producción de potencia en su conjunto. Esta invención está dirigida por lo tanto principalmente hacia el 40-98%-radio externo de la pala y particularmente al 50-95%-radio externo de la pala, mientras las consideraciones se pueden aplicar similarmente en algunos casos a la sección de raíz.

Tabla de identificación

6	perfil de la turbina eólica
8	lado de succión
20	10 lado de presión
12	borde de ataque
14	borde de salida
16	línea de curvatura
18	línea de cuerda
25	20 desviación entre la línea de curvatura y la línea de cuerda
22	viento entrante
$\alpha$	ángulo de ataque

**REIVINDICACIONES**

1. Un perfil aerodinámico (6) de pala de turbina eólica, teniendo dicho perfil un lado de succión y un lado de presión, lados que están conectados en un borde de ataque (12) y un borde de salida (14), formando así una superficie externa continua del perfil, en el que:
- 5     – una línea de curvatura (16) del perfil se desvía de una línea de cuerda
- el borde de ataque (12) tiene una forma redondeada,
- estando caracterizado el perfil porque
- el grosor en 2%-cuerda del borde de ataque es  $t_{2\%C} > 7\%$  de la cuerda, y  $t_{2\%C} < 9\%$  de la cuerda; y
- el grosor en 3%-cuerda del borde de ataque es  $t_{3\%C} > 8\%$  de la cuerda y  $t_{3\%C} < 10\%$  de la cuerda.
- 10    2. El perfil aerodinámico de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el grosor en 1%-cuerda del borde de ataque,  $t_{1\%C} > 5\%$  de la cuerda y  $t_{1\%C} < 7\%$  de la cuerda.
3. El perfil aerodinámico de pala de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el perfil entre 0,25%-cuerda y 2%-cuerda del perfil está dentro de un intervalo entre una curvatura de radio del 4% de la cuerda y una curvatura de radio del 10% de la cuerda.
- 15    4. El perfil aerodinámico de pala de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el perfil entre 0,25%-cuerda y 1%-cuerda del perfil está dentro de un intervalo entre una curvatura de radio del 3,5% de la cuerda y una curvatura de radio del 9% de la cuerda.
5. El perfil aerodinámico de pala de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 1, en el que para al menos una posición entre 50%-cuerda y 80%-cuerda de dicho perfil la pendiente del lado de succión del perfil se encuentra
- 20    entre una primera interpolación lineal entre -9% en 50%-cuerda y -16% en 80%-cuerda y una segunda interpolación lineal entre -4,5% en 50%-cuerda y -8% en 80%-cuerda.
6. El perfil aerodinámico de pala de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 1, en el que para al menos una posición entre 50%-cuerda y 80%-cuerda de dicho perfil la pendiente del lado de succión del perfil se encuentra
- 25    entre una primera interpolación lineal entre -8% en 50%-cuerda y -14% en 80%-cuerda y una segunda interpolación lineal entre -5% en 50%-cuerda y -8,5% en 80%-cuerda.
7. El perfil aerodinámico de pala de turbina eólica de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que el grosor del perfil es inferior al 18% de la cuerda.
8. El perfil aerodinámico de pala de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 1, en el que:
- 30    – el perfil entre 0,25%-cuerda y 2%-cuerda del perfil está dentro de un intervalo entre una curvatura de radio del 2% de la cuerda y una curvatura de radio del 8% de la cuerda, y
- para al menos una posición entre 50%-cuerda y 80%-cuerda de dicho perfil la pendiente del lado de succión del perfil se encuentra entre una primera interpolación lineal entre -11% en 50%-cuerda y -18% en 80%-cuerda y una segunda interpolación lineal entre -4,5% en 50%-cuerda y -8% en 80%-cuerda.
9. El perfil aerodinámico de pala de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 1, en el que:
- 35    – el perfil entre 0,25%-cuerda y 2%-cuerda del perfil está dentro de un intervalo entre una curvatura de radio del 4% de la cuerda y una curvatura de radio del 10% de la cuerda, y
- para al menos una posición entre 50%-cuerda y 80%-cuerda de dicho perfil la pendiente del lado de succión del perfil se encuentra entre una primera interpolación lineal entre -14% en 50%-cuerda y -20% en 80%-cuerda y una segunda interpolación lineal entre -6% en 50%-cuerda y -10% en 80%-cuerda.
- 40    10. El perfil aerodinámico de pala de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 8 o 9, en el que el grosor del perfil es inferior al 24% de la cuerda.
11. Una pala de turbina eólica que comprende un perfil de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, preferiblemente el perfil está dispuesto en el 25%-radio externo de la pala.
- 45    12. Una pala de turbina eólica que comprende un perfil de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10 para al menos el 20%-radio de la pala.

13. Una pala de turbina eólica que comprende un perfil de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10 para al menos el 40%-radio de la pala.
14. Pala de turbina eólica de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 12 a 13, en la que dicha pala de turbina eólica comprende fibras de carbono.
- 5 15. Pala de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 14, en la que las fibras de carbono son las principales fibras de refuerzo en al menos una sección de la pala de turbina eólica.
16. Pala de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 14 o 15, en la que las fibras de carbono están provistas como elementos curados conformados por pultrusión o prensado por correa.
- 10 17. Turbina eólica que comprende una pala de turbina eólica de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 12 a 16.
18. Uso de un perfil aerodinámico de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10 para una turbina eólica accionable por regulación de paso, velocidad variable del rotor y que tiene un diámetro del rotor de al menos 60 metros.

Fig. 1

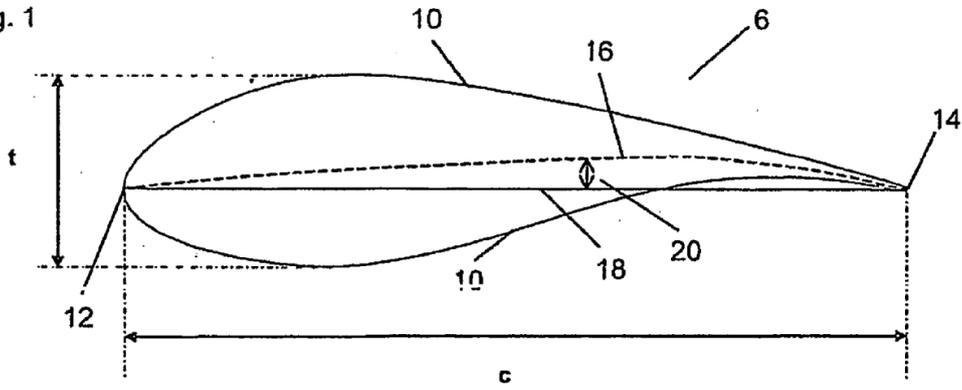


Fig. 2

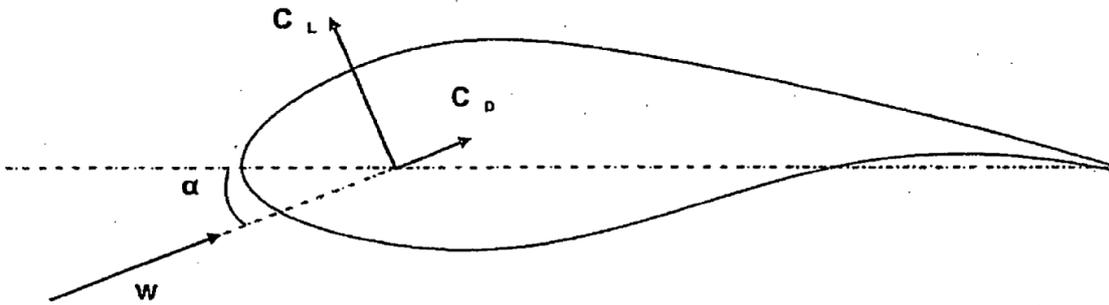
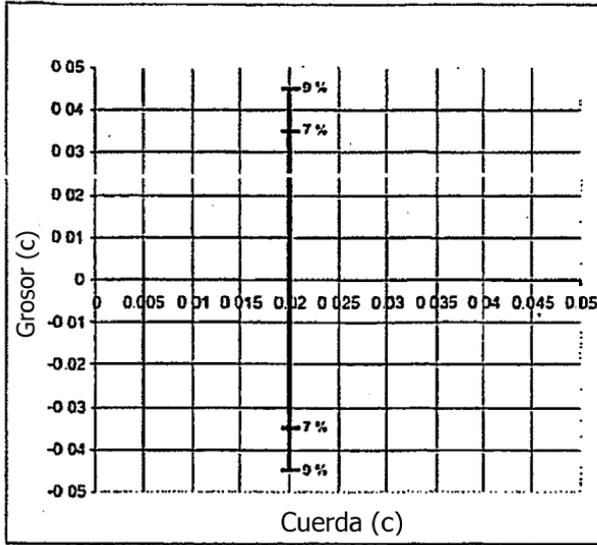
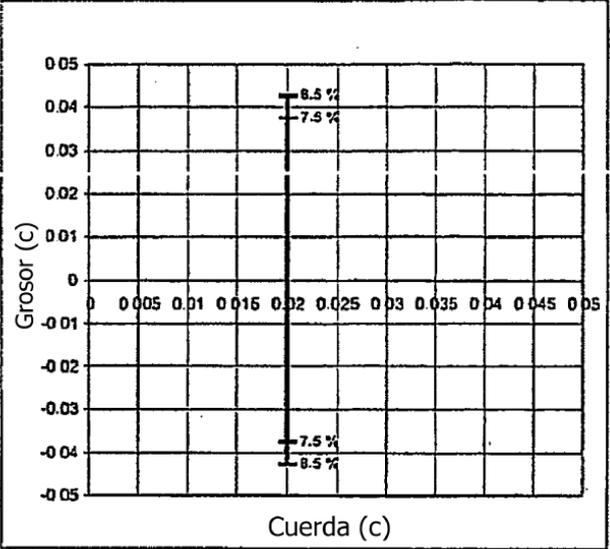


Fig.3

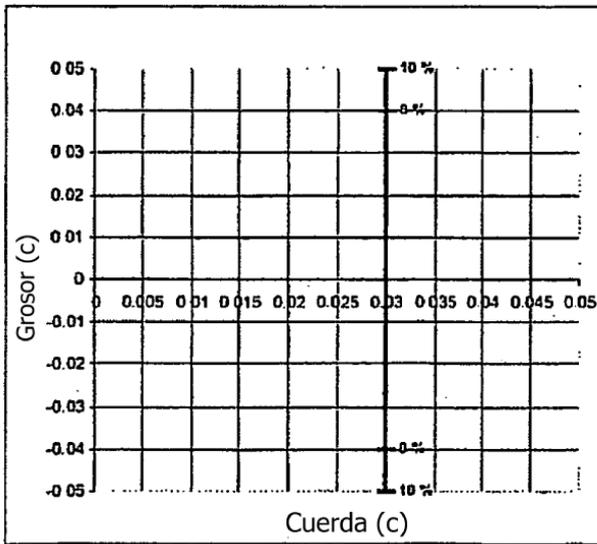
A)



B)



C)



D)

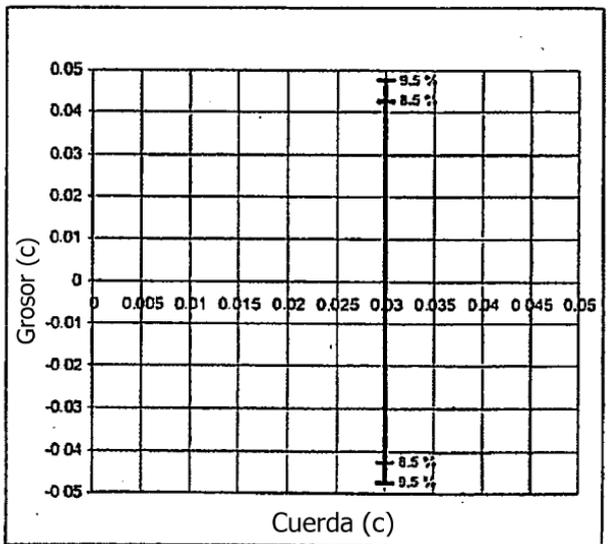
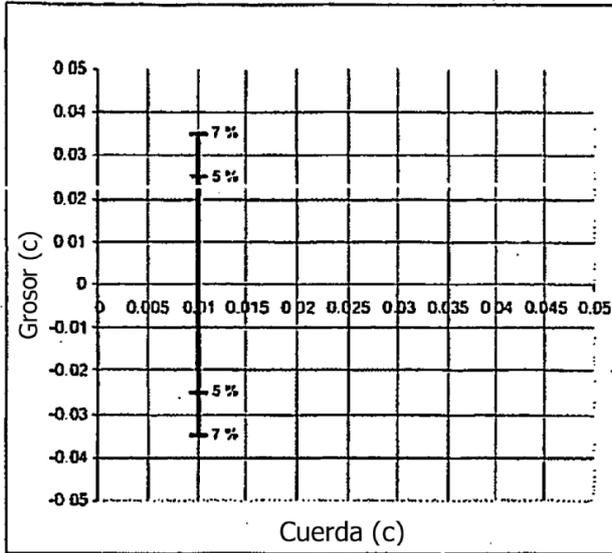


Fig.3

E)



F)

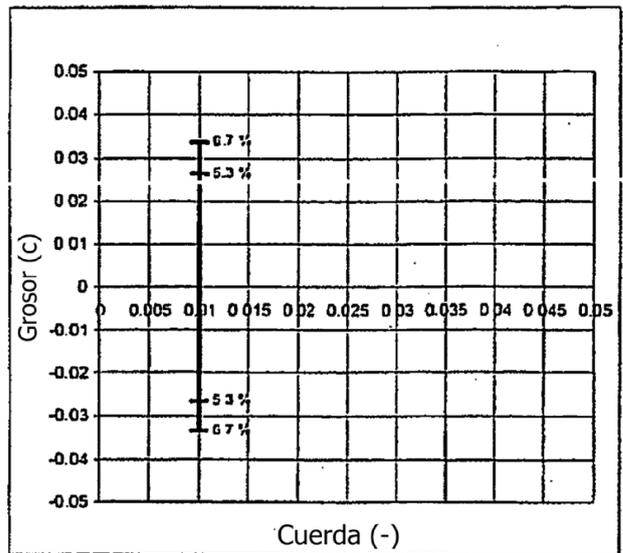
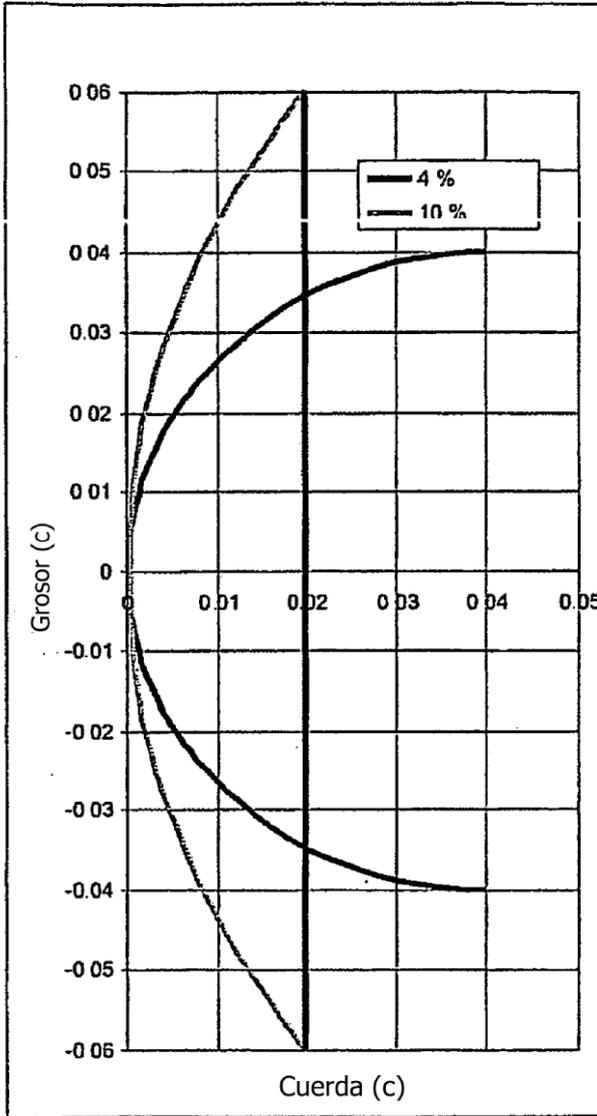


Fig. 3

G)



H)

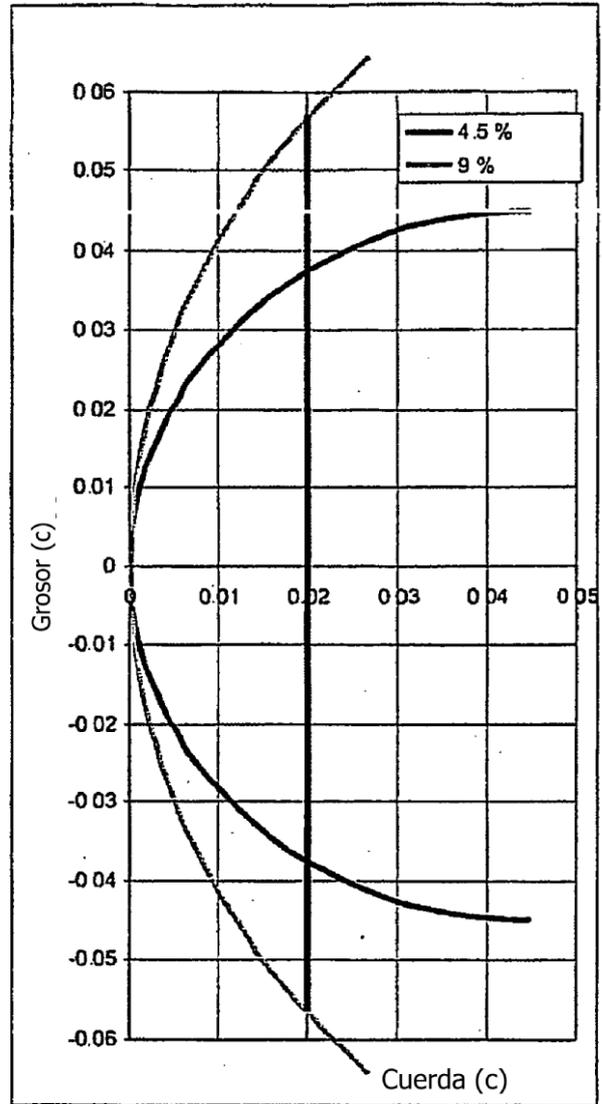
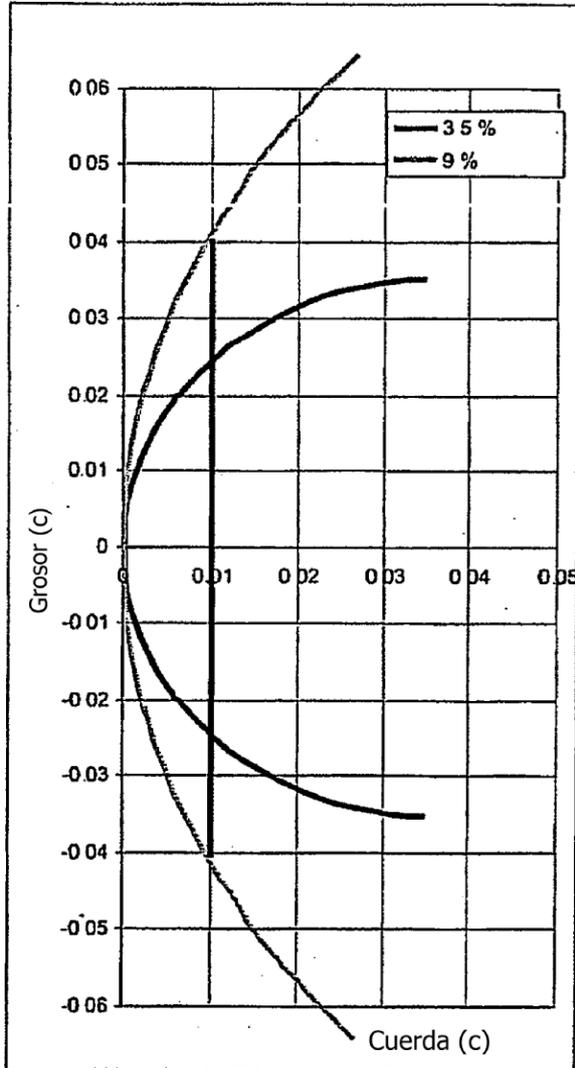


Fig. 3

I)



J)

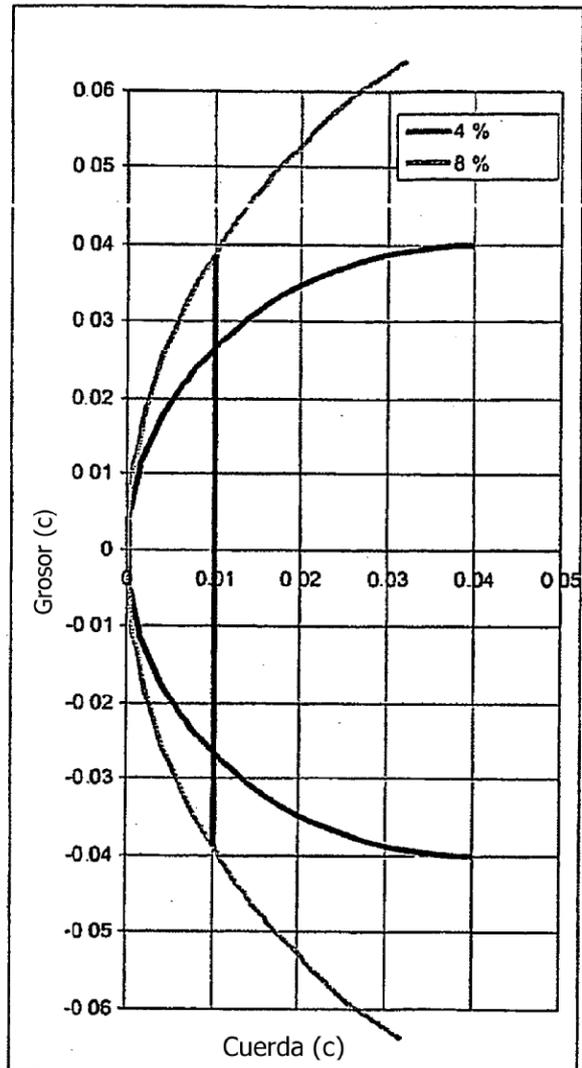
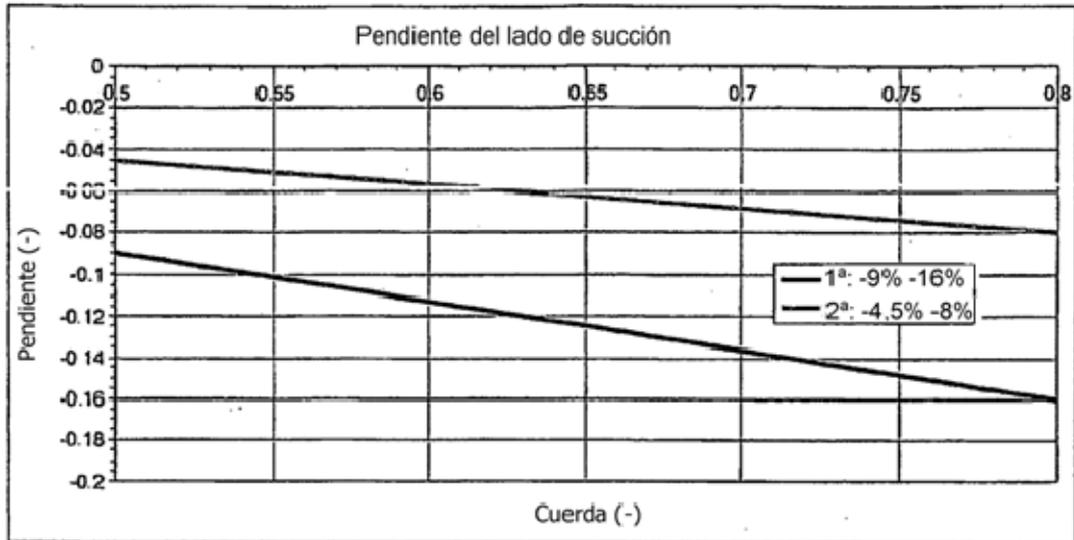


Fig. 4

A)



B)

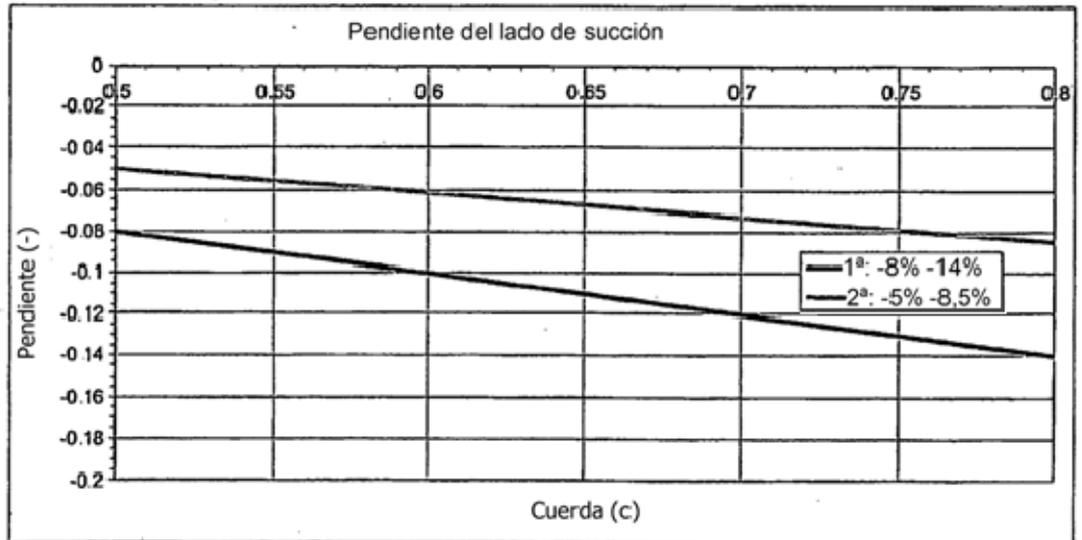
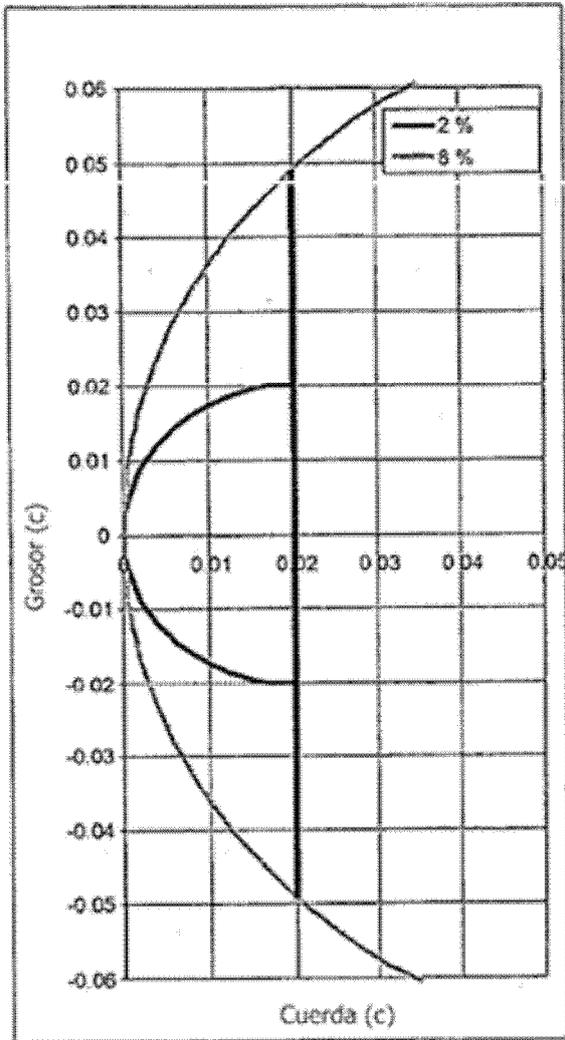


Fig. 5

A)



B)

