



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
(ICAI)
GRADO EN INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA
ESPECIALIDAD MECÁNICA**

Anexo D y Autorización

Nombre del Autor: Santiago Álvarez Rubal

Director: Juan Antonio Talavera Martín

Madrid
Junio 2018

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título Diseño de los anclajes para aerogeneradores en áreas marinas, en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2017/2018 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Santiago Álvarez Rubal Fecha: 19/06/2018

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Juan Antonio Talavera Martín Fecha: 19/06/2018

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1ª. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Santiago Álvarez Rubal

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra:

Diseño de los anclajes para aerogeneradores en áreas marinas

que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2ª. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3ª. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar "marcas de agua" o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4ª. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5ª. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6°. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 21 de Junio de 2018

ACEPTA

Fdo.....



Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
(ICAI)**

**GRADO EN INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA
ESPECIALIDAD MECÁNICA**

**DISEÑO DE LOS ANCLAJES PARA
AEROGENERADORES EN ÁREAS MARINAS**

Nombre del Autor: Santiago Álvarez Rubal

Director: Juan Antonio Talavera Martín

Madrid
Junio 2018

DISEÑO DE ANCLAJES PARA UN AEROGENERADOR MARINO

Autor: Álvarez Rubal, Santiago

Director: Talavera Martín, Juan Antonio

Entidad colaboradora: ICAI- Universidad Pontificia Comillas

Resumen del proyecto

1. Introducción:

En la actualidad el mundo de los aerogeneradores supone un recurso de energía renovable con altos porcentajes de obtención de energía, y dentro de este mundo podemos destacar los parques eólicos offshore que están proliferando por el mundo, gracias a importantes ventajas frente a los aerogeneradores onshore, siendo la más importante la diferencia de generación de energía, siendo en los aerogeneradores onshore de 2 MW como mucho, y en offshore de hasta 10 MW registrados. Esto es debido a la gran capacidad de poder instalar turbinas de mayor altura y mayor envergadura, al haber un menor impacto en las zonas marinas que en las zonas terrestres. La energía eólica en la actualidad supone un 20% de la generación renovable del mundo, y se estima un crecimiento en la misma, debido a una mayor investigación e innovación en el sector. Este proyecto se centrará en la zona de cimentaciones y estructuras de sujeción de los aerogeneradores al fondo marino.

2. Metodología que seguir:

Primeramente, se hizo una lectura de los conceptos básicos de los aerogeneradores, junto con la normativa utilizada a lo largo de este proyecto, que es la normativa GL. En segundo lugar, se ha hecho el dimensionamiento de los cables, con una suposición inicial de fuerzas en la torre y posteriormente, incluyendo una tabla real con las fuerzas reales aplicadas en el aerogenerador, además de los factores de seguridad que nos da la normativa GL. Posteriormente se ha hecho un análisis de los distintos tipos de fondo marino, siendo estos la arena y la arcilla. El escogido fue la arena, debido a que la zona escogida tiene este tipo de fondo marino. Esto implica analizar desde el punto de vista de un Ingeniero de caminos, como se comporta este tipo de fondo y que fuerzas estarán aplicadas en el mismo. Una vez analizado este tipo de fondo marino, se procederá al análisis de los distintos tipos de anclas, como pueden ser de tipo Monopilote, de succión, VLA, SEPLA, anclas cuadradas de tipo placa. Para este proyecto se escogió las anclas de tipo placa, al ser las de menor coste para la realización de estas.

El primer dimensionamiento de estas se hizo para una carga de 1MN supuesta, y posteriormente con la fuerza que se obtiene mediante el método de matriz de rigidez. Primeramente, se hicieron cálculos teóricos de la tensión equivalente de Von Mises con el Excel y la herramienta de cálculo de tensiones de, y posteriormente, se hizo el análisis de elementos finitos, mediante el programa ANSYS, junto con los diseños 3D introducidos en el programa, mediante el Solid Works.

Primeramente, se hizo un ancla, sin enganche, como primera toma de contacto con el programa ANSYS y posteriormente, con el enganche correspondiente, y con una optimización tanto del enganche como de la propia ancla.

3. Resultados:

Los resultados obtenidos con el enganche si optimizar en absoluto, fue un ancla de 12000x6200x150 mm y dando el peso de esta de 98.9 toneladas. Se optimizaron el enganche y el propio anclaje, obteniendo unas dimensiones de 12000x6200x260 mm con un agujero de dimensiones 12000x6100x160 mm con insertos de metal de valor 12000x300x160 mm. Con estas dimensiones se ha obtenido un valor de 75.59 toneladas, suponiendo un ahorro de material de 23 toneladas. Los datos económicos que se han obtenido gracias a este ahorro de material se pueden resumir en la tabla que se muestra a continuación:

Coste total de la preparación del terreno	-	180.000 €
Total, proceso de fabricación	-	641.801,32 €
Coste de instalación	-	332.352 €
Gastos Generales (40 %)	-	132.940,8 €
Coste total	-	1.287.094 €
Beneficio (12%)	-	154.451,29 €
Coste total con beneficios	-	1.441.545,41 €

4. Conclusiones:

Podemos concluir que, en este caso gracias al vaciado realizado en el material, nos hemos ahorrado alrededor de 40000 euros. Se puede observar que al final se ha obtenido tensiones inferiores al límite elástico del material que se adjunta en los anexos, permitiendo que el diseño sea favorable. Este diseño ha sido basado en la normativa GL, tanto para el dimensionamiento de los cables como del propio anclaje con el coeficiente de seguridad correspondiente a cargas extremas que puede sufrir el aerogenerador en condiciones desfavorables, tanto de viento como de oleaje.

Design of anchoring system for offshore turbines

Author: Álvarez Rubal, Santiago

Director: Talavera Martín, Juan Antonio

Cooperating body: ICAI- Universidad Pontificia Comillas

Summary of the project

1. Introduction:

Nowadays, the wind turbines suppose one of the best renewable resources for obtaining energy, and in this kind of energy, we can emphasize the offshore wind farms, that the number of this kind of wind parks are increasing on the last years, because this park have more advantages than the onshore parks, like the energy power produce, that in the offshore parks, we can generate 10 MW and in the onshore parks we can only generate 2MW as maximum. This power difference is because the offshore parks have less impact to the environment and the onshore parks. The wind power supposes the 20% of the global production of renewable energies, and the use of this energy will increase in the next years, because many companies are investing money in this king of energy, like Iberdrola or Acciona in Spain. This project is focused in the foundations of the sea and in the support structures of the offshore wind turbines.

2. Methodology:

First, we read the basic concepts of the wind turbines, also with the regulation of this kind of wind turbines (GL regulation). Then I do the size of the cables, first I suppose a load of 1MN in the tower, and after that, the director of the project, give me the true loads apply on the tower. With this true load, I check the regulation for picking the security factor for the dimension of the cables. Then, I analyze the different kind of foundations that then sea floor has, that are sand and clay. The chosen one is the sand, because the study area has this kind of foundation. This foundation involves from the point of view of a civil engineer, the performance of this sea floor and the kind of loads that we have on there. The, when I finish the analyze of the foundation, I do a research of the different kind of anchors, like Monopilote, VLA, SEPLA, and square anchors. For this project, I choose the square anchor, because the cost is less than the other anchors.

For the calculation, we analyze the theoretical Von Mises tension, with the excel program, and the program to analyze the internal forces (FTool). The we do the finite elements method, with the program ANSYS, and the design of the 3D models, with Solid Works. The first size of the anchor, without the hook, for training doing the finite element method with ANSYS, and then we optimize the anchor and the hook.

3. Results:

The result of the analysis without the hook, the size of the anchor is 12000x6100x160 mm and the weight of the anchor is 98.9 tons. With the optimization of the anchor, and of the hook, I obtain this size of the anchor: 12000x62000x260 mm, with a hole with this dimension: 12000x6100x160 mm and with plates of steel with this dimension: 12000x300x160 mm. With this size, I obtain that the weight of the anchor is 75.59 tons, that suppose a 23 tons of steel saving. The economic results that I obtain with the saving of steel after the optimization are:

Cost for prepare the foundation	-	180.000 €
Total cost of the fabrication	-	641.801,32 €
Installation cost	-	332.352 €
Overhead costs (40 %)	-	132.940,8 €
Total cost	-	1.287.094 €
Benefit (12%)	-	154.451,29 €
Tota cost with benefits	-	1.441.545,41 €

4. Conclusiones:

I can conclude that, with the hole apply on the anchor we save approximately 40000 euros. I can observe that the tension that I obtain is less than the yield strength of the material (That can be read on the annexes of this project), allowing that the design is favorable. The design is based on the GL rules, with the security factor that this regulation has, that we use for the dimension of the mooring system and for the dimension of the anchor. The coefficient use is for extreme loads, not only for wind loads but also for the waves loads.

AGRADECIMIENTOS

En esta sección he de dar las gracias a todas aquellas personas que ha ayudado a que este proyecto haya salido adelante. Primeramente, mencionar a mi familia, que ha sido mi principal apoyo durante estos 4 años de carrera, permitiendo que haya podido estudiar en una de las mejores universidades de Madrid. Posteriormente, he de dar las gracias a mi director de proyecto, por permitirme conocer muy buena manera cómo funcionan los aerogeneradores, con intensas reuniones a altas horas de la tarde, además de todos mis compañeros de proyecto, que me han ayudado a comprender las diferentes partes que constituyen esta gran maquina creada por la humanidad. Cabe destacar la ayuda de mis compañeros de Icaí Formula Student, ayudándome a realizar los distintos ensayos de elementos finitos y además dándome ideas de cómo se podría optimizar el anclaje y diferentes ideas para poder relajar las tensiones obtenidas en ANSYS. Por último, dar gracias a todos mis compañeros de clase, en especial a mi grupo de amigos, que me aguantan y me soportan todos los días, además de darme su apoyo en los momentos difíciles que he pasado en los cuatro años y darme los momentos más felices de mi vida, junto con experiencias que servirán de anécdotas que poder contar en un futuro. Muchas gracias a todas estas personas porque habéis hecho posible que haya llegado a este punto de mi carrera y a realizar este trabajo.

Contenido

Parte I: Memoria del proyecto	16
1. Introducción y objetivos del proyecto	17
1.1. Introducción:	17
1.2. Objetivos y herramientas a utilizar:	17
2. Estado del arte:	17
1.3. Resumen:.....	17
1.4. Introducción:	18
1.5. Diferentes estructuras offshore:	20
1.6. Energía eólica offshore en la actualidad:	21
1.7. Parque London Array:	22
1.8. Parque Gemini Wind Farm:	23
1.9. Parque Gode Wind 1 y 2:	23
1.10. Tipo de estructuras en función de la profundidad:.....	24
1.10.1. Instalaciones de profundidad baja:	24
1.10.2. Instalaciones de profundidad media;.....	25
1.10.3. Instalaciones de alta profundidad:.....	26
1.11. Tipos de anclas existentes:.....	28
1.12. Sistemas de fondeo:	32
Parte II: Cálculos del proyecto.....	34
1. Cálculos	35
1.1. Caso con supuesto.....	35
1.1.1. Estudio del dimensionamiento de los cables de la estructura.....	35
1.1.2. Dimensionamiento teórico del ancla:	40
1.1.3. Análisis de elementos finitos con ANSYS sin enganche:	54
1.1.4. Diseño del enganche del ancla, con tensión de los cables de 1MN:.....	65
1.2. Calculo real.....	73
1.2.1. Estudio del dimensionamiento de los cables de la estructura (REAL):	73
1.2.2. Estudio del dimensionamiento del ancla (Real):.....	78
1.2.3. Análisis de elementos finitos en ANSYS, con los resultados obtenidos en el apartado anterior:	88
1.2.4. Diseño de anclaje con enganche, con tensión de los cables real:.....	98
1.3. Conclusiones:	104
Parte III: Pliego de condiciones	108

1.	Condiciones económicas y generales:.....	109
1.1.	Normativa GL (Germanischer Lloyd):.....	109
1.2.	Normativa UNE ISO 1461:	109
1.3.	Plazo de entrega del proyecto y lugar de entrega del mismo:	109
2.	Condiciones técnicas y particulares:	109
2.1.	Proceso de diseño del ancla:.....	109
2.2.	Proceso de taladrado del fondo marino:	109
2.3.	Proceso de fabricación del ancla, cableado y enganches:	110
2.4.	Proceso de transporte y instalación del anclaje:	110
	Parte IV: Presupuesto.....	111
1.	Preparación del terreno:	112
2.	Fabricación del anclaje (incluido precio cables):.....	112
	112
3.	Instalación del anclaje:.....	115
	Parte V: Planos	117
1.	Índice de planos:	118
1.1.	Plano de conjunto	118
1.2.	Plano del ancla	118
1.3.	Plano del enganche	118
1.4.	Plano de los insertos de acero	118
	Parte VI: Anejos.....	123
1.	Equipo utilizado para la realización de taladros en el fondo marino:.....	124
2.	Material a utilizar para la fabricación del ancla, cables y enganche:.....	125
	125

Índice de ilustraciones:

Ilustración 1: crecimiento de la energía eólica en los últimos 20 años	18
Ilustración 2: London Array situado en el estuario del río Támesis	19
Ilustración 3: Coste de la instalación en función de la profundidad	20
Ilustración 4: Energía generada en función de la profundidad de la estructura	20
Ilustración 5: Desglose de precios de los distintos tipos de aerogeneradores eólicos	21
Ilustración 6: Distribución de la energía offshore producida en todo el mundo	22
Ilustración 7: Parque eólico London Array situado en Reino Unido	22
Ilustración 8: Parque eólico de Gemini Wind Farm en Holanda	23
Ilustración 9: Parque eólico de Gode Wind situado en Alemania	23
Ilustración 10: Esquema de las partes de un monopilote	24
Ilustración 11: Esquema de las partes de una estructura por gravedad	25
Ilustración 12: Partes de la estructura tipo jacket	25
Ilustración 13: Partes de la estructura tipo trípode	26
Ilustración 14: Estructura tipo semisumergible	26
Ilustración 15: Estructura tipo TLP	27
Ilustración 16: Estructura tipo SPAR	27
Ilustración 17: Estructura tipo floater	28
Ilustración 18: Ancla cuadrada	29
Ilustración 19: Ancla de gravedad	29
Ilustración 20: Esquema de un anclaje de bomba de succión	30
Ilustración 21: Ilustración 21: Ancla tipo VLA	30
Ilustración 22: Proceso de instalación de un anclaje tipo SEA	31
Ilustración 23: Anclaje tipo SEPLA	31
Ilustración 24: Sistema de fondeo tipo catenaria	32
Ilustración 25: Sistema de fondeo tipo taut leg	32
Ilustración 26: Sistema de fondeo vertical	33
Ilustración 27: Disposición simplificada para el cálculo de los cables	35
Ilustración 28: Sistemas globales y locales del sistema de cables planteado	36
Ilustración 29: Fuerzas tendremos sobre el anclaje en posición vertical	40
Ilustración 30: Distribución de las presiones en el ancla	41
Ilustración 31: Fuerza de amarre según el ángulo de introducción del ancla	44
Ilustración 32: Esquema del ancla introducida con un cierto ángulo en el lecho marino	44
Ilustración 33: Sección del ancla a analizar	46
Ilustración 34: Momentos de área de una sección rectangular	46
Ilustración 35: Diagrama de fuerzas aplicadas sobre el ancla en el programa FTool	47
Ilustración 36: Diagrama de momentos flectores en el ancla	48
Ilustración 37: Análisis de esfuerzos cortantes de la estructura	48
Ilustración 38: Esquema del ancla hueca propuesta	51
Ilustración 39: Primera área a analizar	51
Ilustración 40: Segunda área a analizar	52
Ilustración 41: Dimensionamiento teórico del ancla. con hipótesis de tensión 1MN en el cableado	54

Ilustración 42: Dimensionamiento teórico del ancla con agujero, aplicando la hipótesis del cableado	54
Ilustración 43: Sistema de coordenadas del ancla	54
Ilustración 44: Esfuerzos para 10 mm	55
Ilustración 45: Esfuerzos equivalentes de Von Mises para un espesor de 30 mm	56
Ilustración 46: Esfuerzos equivalentes de Von Mises para un espesor de 10 cm.....	56
Ilustración 47: Deformación producida en el ancla de 10 cm.....	57
Ilustración 48: Esfuerzos equivalentes de Von Mises para el ancla de 16 cm	58
Ilustración 49: Deformación producida en el ancla de 16 cm.....	58
Ilustración 50: Resultados del análisis para el primer dimensionamiento	59
Ilustración 51: Deformación producida en el primer dimensionamiento	60
Ilustración 52: Tensión equivalente de Von Mises correspondiente al segundo dimensionamiento	60
Ilustración 53: Deformación correspondiente al segundo dimensionamiento	61
Ilustración 54: Tensión equivalente de Von Mises correspondiente al tercer dimensionamiento	61
Ilustración 55: Deformación correspondiente al tercer dimensionamiento	62
Ilustración 56: Tensión equivalente de Von Mises correspondiente al cuarto dimensionamiento	63
Ilustración 57: Deformación correspondiente al cuarto caso de dimensionamiento	63
Ilustración 58: Valor de la tensión de Von Mises equivalente del quinto dimensionamiento ...	64
Ilustración 59: Deformación total producida en el quinto dimensionamiento	64
Ilustración 60: Dimensiones del ancla maciza final con carga de 1 MN	65
Ilustración 61: Dimensiones del ancla con agujero final con carga de 1 MN	65
Ilustración 62: Diseño del enganche de los cables del aerogenerador.....	66
Ilustración 63: Resultados obtenidos de tensión equivalente de Von Mises ¡Error! Marcador no definido.	
Ilustración 64: Deformación producida al aplicar las fuerzas determinadas en apartados anteriores	67
Ilustración 65: Tensión equivalente obtenida tras el primer caso.....	67
Ilustración 66: Deformación total obtenida tras el primer caso.....	68
Ilustración 67: Tensión total obtenida tras el segundo caso	68
Ilustración 68: Esquema del trozo de metal sin mecanizar.....	69
Ilustración 69: Esquema del ancla con el trozo de metal sin mecanizar.....	69
Ilustración 70: Tensión total obtenida tras el primer caso	70
Ilustración 71: Deformación total obtenida tras el primer caso.....	70
Ilustración 72: Tensión total obtenida tras el segundo caso	71
Ilustración 73: Propuesta dimensiones del ancla con carga de 1 MN	71
Ilustración 74: Tensión total obtenida tras el primer caso	72
Ilustración 75: Tensión equivalente de Von Mises obtenida tras el segundo caso	73
Ilustración 76: Factor de seguridad con comportamiento a fatiga según la norma GL.....	77
Ilustración 77: Factores de seguridad a cargas extremas según la normativa GL	78
Ilustración 78: Diagrama de momentos flectores con las cargas reales aplicadas.....	80
Ilustración 79: Esquema del valor de las fuerzas cortantes.....	81
Ilustración 80: Ancla propuesta para reducir el peso de esta.....	83
Ilustración 81: Primera área a analizar.....	83

Ilustración 82: Segunda área a analizar.....	83
Ilustración 83: Dimensionamiento teórico del ancla, con los valores reales de la tensión de cableado	87
Ilustración 84: Dimensiones teórico del ancla, con los valores reales de la tensión del cableado	88
Ilustración 85: Resultados obtenidos con el espesor de 80 mm.....	89
Ilustración 86: Resultados obtenidos con el espesor de 120 mm.....	89
Ilustración 87: Deformación obtenida para el ancla de 120 mm de espesor	90
Ilustración 88: Resultado de la tensión equivalente para un espesor de 150 mm.....	91
Ilustración 89: Resultados obtenidos para el ancla con agujero, espesor 120 mm y h 20 mm..	92
Ilustración 90: Deformación total obtenida para el primer dimensionamiento.....	92
Ilustración 91: Resultados obtenidos para el ancla con agujero, espesor 150 mm y h 30 mm..	93
Ilustración 92: Deformación total obtenida para el segundo dimensionamiento.....	94
Ilustración 93: Resultados obtenidos para el ancla con agujero, espesor 170 mm y h 40 mm..	94
Ilustración 94: Deformación total obtenida para el tercer dimensionamiento.....	95
Ilustración 95: Resultados obtenidos para el ancla con agujero, espesor 190 mm y h 48 mm..	95
Ilustración 96: Deformación total obtenida para el cuarto dimensionamiento	96
Ilustración 97: resultados obtenidos para el ancla con agujero, espesor 280 mm y h 60 mm...	97
Ilustración 98: Dimensionamiento final del ancla sin agujero	97
Ilustración 99: Dimensionamiento final del ancla con agujero.....	98
Ilustración 100: Tensión equivalente obtenida.....	98
Ilustración 101: Deformación total obtenida.....	99
Ilustración 102: Tensión total obtenida tras el primer caso	100
Ilustración 103: Deformación total obtenida tras el primer caso	100
Ilustración 104: Tensión total obtenida tras el segundo caso	101
Ilustración 105: Deformación total obtenida tras el segundo caso	101
Ilustración 106: Propuesta dimensiones del ancla con cargas reales.....	102
Ilustración 107: Tensión total obtenida tras el primer caso	102
Ilustración 108: Tensión total obtenida tras el primer caso	103

Índice de tablas:

Tabla 1: Fuerzas que sufre el aerogenerador.....	73
Tabla 2: Presupuestos del proyecto	115

Parte I: Memoria del proyecto

1. Introducción y objetivos del proyecto

1.1. Introducción:

El proyecto que se expone a continuación está siendo realizado por un grupo de alumnos, en el cuál, cada uno de ellos diseñara una parte de una turbina offshore. Este proyecto se centrará en el desarrollo de el anclaje que tendrán estas estructuras offshore, desde el análisis teórico, mediante la teoría vista en la universidad de resistencia de materiales, como el análisis de elementos finitos del anclaje, con un previo diseño en 3D. Se ofrecerá una visión de la energía eólica, como una de las energías en la que más se invierten en la actualidad.

1.2. Objetivos y herramientas a utilizar:

Podemos definir los siguientes objetivos del proyecto:

- **Diseño del sistema de cables:** Se diseñará primero teóricamente para poder saber la magnitud de la fuerza que tienen que soportar los cables. El método de análisis teórico será el método de matriz de rigidez, visto en el último curso de grado en la asignatura de análisis de estructuras. Para ello se necesitará la fuerza que el viento realiza sobre la propia torre del aerogenerador, así como los coeficientes de seguridad, dados por la normativa GL.
- **Diseño del ancla seleccionada:** Se dimensionará el ancla una vez conocidas las fuerzas de los cables, conociendo el ángulo de inclinación del ancla y la profundidad que deberíamos introducir la ancla. Además, se analizará el tipo de fondo marino, con el fin de poder analizar las fuerzas anteriormente mencionadas.
- **Análisis de elementos finitos del ancla diseñada:** Se hará un análisis de fuerzas del ancla anteriormente diseñada, con el programa de elementos finitos de ANSYS, comparando las fuerzas obtenidas en el apartado anterior con las obtenidas en este programa, haciendo la respectiva comparación entre ambas.

Como herramientas a utilizar, tendremos primeramente el programa Ftool, para el cálculo de momentos flectores, cortantes y axiles, necesarios para el cálculo teórico de la tensión equivalente de Von Mises. Posteriormente se diseñará en 3D el ancla mediante el programa Solid Works, y se exportará en formato. step al programa de análisis de elementos finitos ANSYS.

2. Estado del arte:

1.3. Resumen:

El objetivo de esta sección del proyecto es la descripción de la industria eólica actúa, junto con los tipos de estructuras más utilizadas para el anclaje de los aerogeneradores marinos. También se analizará los posibles tipos de ancla que podemos tener, junto con los distintos tipos de sistemas de cableado que existen en la actualidad.

1.4. Introducción:

La energía eólica es la energía obtenida a través del viento, mediante el movimiento de las aspas de las estructuras denominadas aerogeneradores. Este tipo de energía viene siendo una de las más utilizadas en los últimos años, constituyendo actualmente el 3% del consumo mundial de la energía siendo los países pioneros en este tipo de energías, China y EE. UU. a nivel mundial, mientras que, en Europa, tendríamos a Alemania y a España como principales consumidores de este tipo de energía. En la siguiente gráfica podemos observar el crecimiento de consumo de este tipo de energía hasta 2016 (ver ilustración 1):

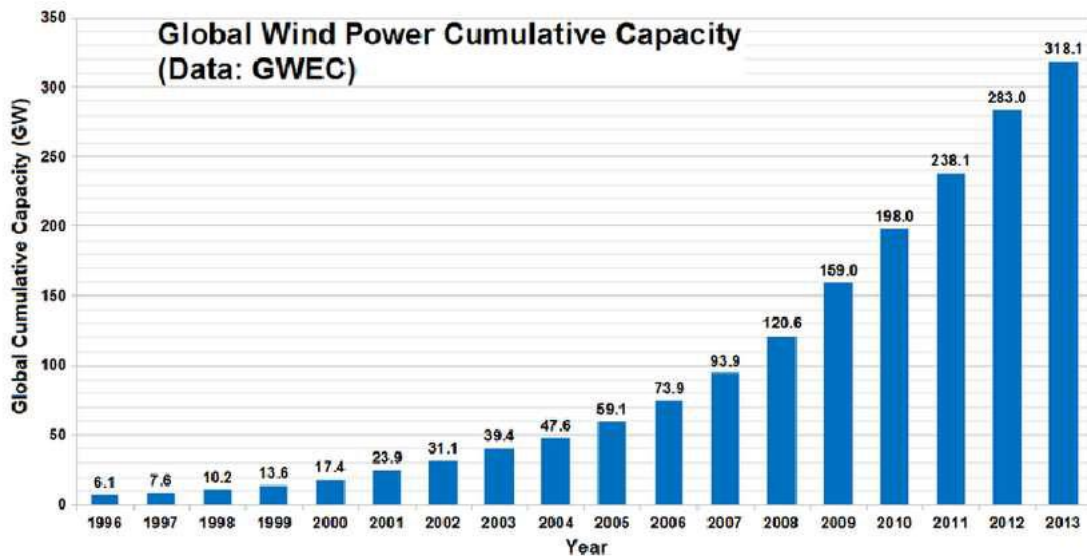


Ilustración 1: crecimiento de la energía eólica en los últimos 20 años

Fuente: (Arefin, 2014)

Los beneficios que reporta este tipo de energía son múltiples, y los podemos clasificar en:

1. Energía que se renueva constantemente.
2. Reduce el consumo de combustibles fósiles, es decir de energías no renovables.
3. Contribuye al desarrollo sostenible, reduciendo así el cambio climático y las emisiones de gases contaminantes.
4. Reduce las importaciones energéticas entre países.

En este tipo de energía podemos destacar dos grandes instalaciones, que son la terrestres y la offshore. La terrestre como su propio nombre indica son instalaciones creadas en zonas en el interior, mientras que las offshore, son estructuras creadas en la zona marítima. Este proyecto desarrollara la tecnología de turbinas offshore, al ser la tecnología en auge de este sector. La ventajas y desventajas que presenta este tipo de estructuras frente a las terrestres son:

- **Ventajas:**
 - ✓ La primera ventaja sería, que en el mar existe un régimen del viento más laminar que en la superficie terrestre y además más constante, lo que permite el mayor aprovechamiento de este tipo de energía.
 - ✓ Otra de las ventajas fundamentales es el problema de espacio que tenemos en las superficies terrestres, siendo este problema solventado con la implementación de estos aerogeneradores en las zonas marinas.
 - ✓ Menor impacto visual de este tipo de estructuras, además del menor impacto acústico.
 - ✓ Por último, cabe destacar que podremos hacer turbinas con una mayor potencia, al tener mayor espacio disponible en este tipo de zonas.

- **Desventajas:**
 - ✓ Primeramente, cabe destacar el gran coste de este tipo de instalaciones frente a las terrestres (se puede estimar que el coste es casi el doble que una terrestre) debido a que la instalación de este tipo de estructuras en el fondo marino resulta más compleja que en el terrestre, además de más caro el coste de transporte de los diferentes componentes.
 - ✓ Los costes que este tipo de estructuras tienen en mantenimiento es muy superior a los terrestres debido a las condiciones particulares que ofrece el fondo marino.
 - ✓ La menor investigación en este tipo de estructuras influye en que no se invierta tanto dinero en la misma.
 - ✓ Problemas de accesibilidad debido a que pueden darse malas condiciones climatológicas.

Actualmente podemos decir que el 90% de este tipo de instalaciones se encuentra instaladas en Europa, siendo los más destacados, Reino Unido con los tres parques offshore más grandes del mundo, seguido de Dinamarca y de Bélgica. Podemos ver la mayor instalación de parque offshore (llamada London Array y situado en el Támesis) en la siguiente ilustración (ver ilustración 2):



Ilustración 2: London Array situado en el estuario del río Támesis

Fuente: (Engineering, Power, 2016)

1.5. Diferentes estructuras offshore:

Uno de los aspectos fundamentales de este tipo de estructuras es el anclaje al fondo marino. Esto depende no solo de la profundidad a instalar el aerogenerador, sino también de las condiciones del fondo marino que se analizarán con posterioridad. Dependiendo de la profundidad, tendremos un mayor o menor coste de la instalación de los aerogeneradores, como podemos ver en la siguiente imagen (ver ilustración 3):

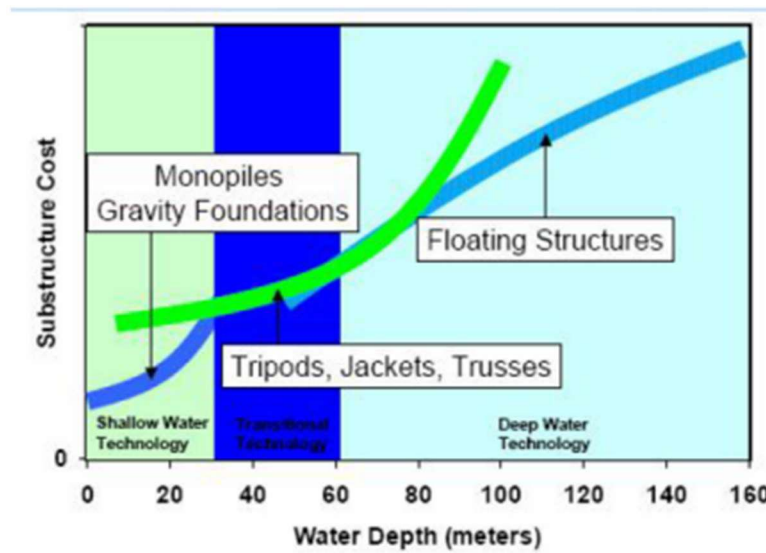


Ilustración 3: Coste de la instalación en función de la profundidad

Fuente: (Asenjo, 2016)

Podemos observar, que la estructura más barata de instalación es el monopilote y la estructura más cara son los denominados floaters. Otro de los factores del que depende es el mejor o peor funcionamiento de estas dependiendo de la profundidad a la que encuentren. Podemos observar en la siguiente imagen (ver ilustración 4), como dependiendo de la profundidad podremos obtener mayor o menor energía del viento:

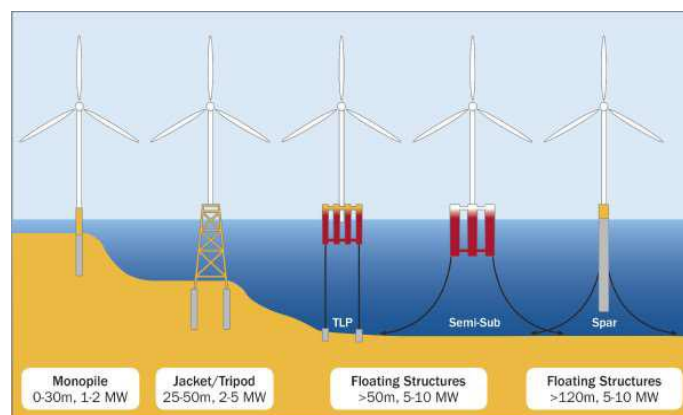


Ilustración 4: Energía generada en función de la profundidad de la estructura

Fuente: (Paul M. Thompson, 2014)

En este proyecto se desarrollará las estructuras tipo floater, que actualmente no son las más populares debido a su gran coste de instalación, pero podemos destacar el buen funcionamiento de estas a partir de una profundidad del mar de más de 100 metros y además pudiendo ser más económica que el resto a esta profundidad. Actualmente podemos destacar que las estructuras que más se llevan a cabo son las de tipo monopilote, ya que son las más económicas, aunque únicamente nos sirvan para bajas profundidades.

Estas estructuras comentadas anteriormente, suelen conllevar un aumento en el precio de instalación frente a las estructuras terrestres, y por tanto suele ser uno de los factores que hacen que no se invierta tanto en este tipo de estructuras. La gran razón para poder invertir en este tipo de aerogeneradores es la potencia que podemos generar con ellos, siendo casi el doble que la generada por los terrestres. En el siguiente gráfico podemos ver una comparativa de precios entre un aerogenerador offshore y un aerogenerador terrestre (ver ilustración 5):

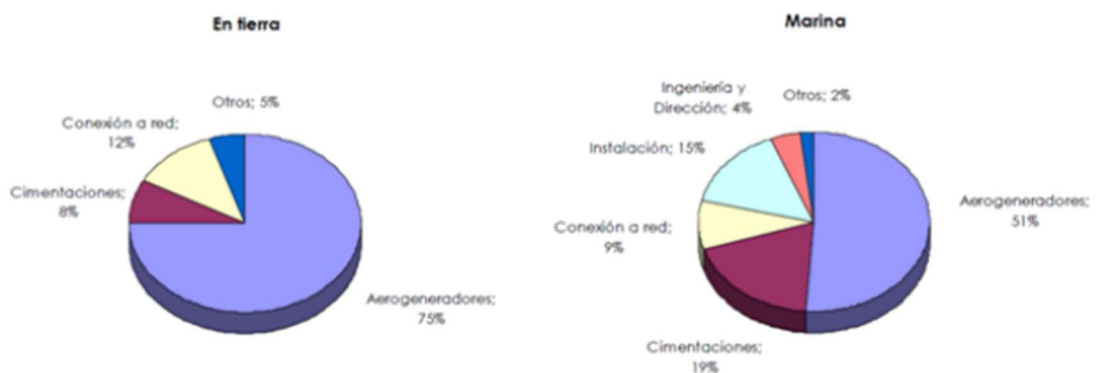


Ilustración 5: Desglose de precios de los distintos tipos de aerogeneradores eólicos

Fuente: (Asenjo, 2016)

1.6. Energía eólica offshore en la actualidad:

Europa es el continente líder en la fabricación e instalación de estas estructuras offshore, siendo en 2014 la capacidad de instalación de este tipo de estructuras de 8771 Megavatios. La Asociación Europea de la Energía Eólica, estima que para finales de 2020 tendremos un total de energía de 150 GW, llegando a cubrir estas cifras con entre el 3% y el 7% de la demanda de la Unión Europea. En la actualidad, podemos decir que la capacidad total en todo el mundo es de 212GW repartidos entre 651 eólicos a lo largo del mundo. La segunda potencia tras Europa es China seguida de Japón. En la siguiente tabla podemos ver la distribución de los 212 GW mencionados anteriormente (ver ilustración 6):

Lista de los países incluidos

	Capacidad en la base (MW) Propuestos y aprobados	Capacidad en la base (MW) En construcción y en funcionamiento
Alemania	7 752.3	6 577.3
Australia	2 000.0	0.0
Azerbaiyán	200.0	0.0
Bangladés	400.0	0.0
Bélgica	1 087.9	1 171.7
Brasil	11 200.0	0.0
Canadá	5 049.0	0.0
China	33 218.6	4 590.3
Corea del Sur	10 673.5	110.5
Dinamarca	1 950.0	2 300.8
España	433.0	9.5
Estados Unidos	23 017.7	30.1
Estonia	4 326.0	0.0
Finlandia	2 071.0	87.7
Francia	4 034.8	10.0
Grecia	5 444.3	0.0
India	3 410.0	0.0
Irlanda	5 598.8	25.2
Italia	206.8	0.0
Japón	8 558.3	79.7
Lituania	1 625.0	0.0
Nicaragua	100.0	0.0
Noruega	52.6	2.3
Países Bajos	3 990.0	1 117.8
Polonia	11 010.5	0.0
Portugal	152.0	0.0
Reino Unido	26 877.3	9 604.6
Rusia	50.0	0.0
Suecia	5 835.0	201.7
Taiwán	3 339.0	8.0
Vietnam	2 143.3	247.2

Ilustración 6: Distribución de la energía offshore producida en todo el mundo

Fuente: (Power, The Wind, s.f.)

Podemos destacar tres parques eólicos, que corresponden con los más grandes del mundo en la actualidad: parque London Array en Reino Unido, Parque Gemini Wind Farm situado en Holanda y por último el Parque Gode Wind 1 y 2, situado en Alemania. Las principales características de estos aerogeneradores offshore son:

1.7. Parque London Array:

- Potencia instalada de 630MW.
- Número de aerogeneradores de la instalación: 175.
- Instalación realizada por la empresa alemana Siemens.
- Estructura tipo pilote con una profundidad comprendida entre los 5 y 25 metros.
- Altura de los aerogeneradores de 147 metros, con un diámetro de rotor de 90 metros y longitud de las palas de 58.5 metros.

A continuación, se muestra una imagen de este parque (ver ilustración 7):



Ilustración 7: Parque eólico London Array situado en Reino Unido

Fuente: (NOTE, THE, 2015)

1.8. Parque Gemini Wind Farm:

- Potencia instalada de 600 MW.
- Número de aerogeneradores de la instalación: 150.
- Capaz de dar energía a 785000 hogares.

A continuación, se muestra una imagen de este parque (ver ilustración 8):



Ilustración 8: Parque eólico de Gemini Wind Farm en Holanda

Fuente: (Sector, Dutch Water, 2014)

1.9. Parque Gode Wind 1 y 2:

- Dividido en dos parques cuya potencia instalada será: Gode Wind 1 de 332Mw mientras que Gode Wind 2 de 252MW siendo su capacidad total de 584MW.
- Número de aerogeneradores de la instalación: 154.
- Estructura situada a una profundidad de entre 28 y 34 metros.
- Altura de la turbina de 188m, con un diámetro de rotor de 154 m.

A continuación, se muestra una imagen de este parque (ver ilustración 9):



Ilustración 9: Parque eólico de Gode Wind situado en Alemania

Fuente: (Renewable energy Hamburg, 2016)

1.10. Tipo de estructuras en función de la profundidad:

En función de la profundidad los podemos clasificar en:

1.10.1. Instalaciones de profundidad baja:

- **Estaturas tipo monopilote:** este tipo de estructura se puede implementar hasta una profundidad de aproximadamente 30 metros en el lecho marino, siendo la estructura más barata y la más utilizada en el sector offshore. Esto es debido a la sencillez en la instalación de esta consistente en un pilar hueco que se clava en el lecho marino mediante martillos hidráulicos. Suele ser utilizado cuando el fondo marino es arenoso o arcilloso, siendo no muy aconsejable cuando este lecho marino tiene contenido de bloques minerales. Suele conectarse este tubo hueco con la estructura mediante una zona de transición, uniendo ambas partes mediante una mezcla de agua y cemento. Los condicionantes de este tipo de estructuras son las cargas laterales (oleaje) y también las cargas axiales, que son provocadas por el peso de la propia estatura. A continuación, se muestra una ilustración de las distintas partes de este (ver ilustración 10):

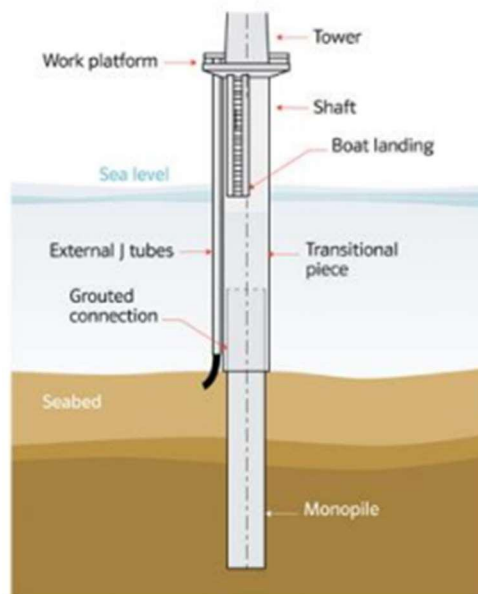


Ilustración 10: Esquema de las partes de un monopilote

Fuente: (4COffshore, 2013)

- **Estructura por gravedad:** este tipo de estructuras están construidas con hormigón armado en su mayoría, aunque también se puede encontrar estructuras con acero. El hormigón se utiliza con más normalidad que el acero, ya que la corrosión del mar afecta a la estructura de acero. Como su propio nombre indica, utiliza la fuerza de la gravedad para poder contrarrestar las fuerzas que ejercen el oleaje y el viento sobre la estructura. Tenemos que este tipo de estructuras podemos utilizarlas hasta con 100 metros de profundidad. Una de las desventajas es que, para su instalación, requieren de una preparación previa del terreno, haciendo más costosa su

instalación. A continuación, se muestra una imagen con las partes más representativas de este tipo de estructuras (ver ilustración 11):

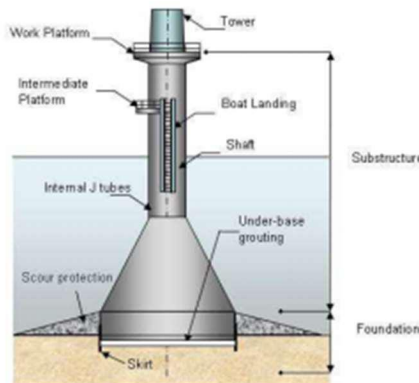


Ilustración 11: Esquema de las partes de una estructura por gravedad

Fuente: (Wind Energy, 2015)

1.10.2. Instalaciones de profundidad media;

- **Estructura jacket:** estructura que consiste en 4 patas ancladas al fondo marino, siendo esta estructura muy utilizada en la industria petrolífera. Este tipo de estructuras permiten la instalación de estas a profundidad entre los 40 y 50 metros, además de poder adaptarse a cualquier tipo de lecho marino, a excepción del fondo rocoso. Las patas tienen que ser capaces de soportar los esfuerzos provocados por momentos, mientras que los cables deben soportar los esfuerzos cortantes a los que está sometida la estructura. Estas estructuras suelen tener un alto coste de instalación. A continuación, podemos ver una imagen con las distintas partes de este tipo de anclaje (ver ilustración 1):

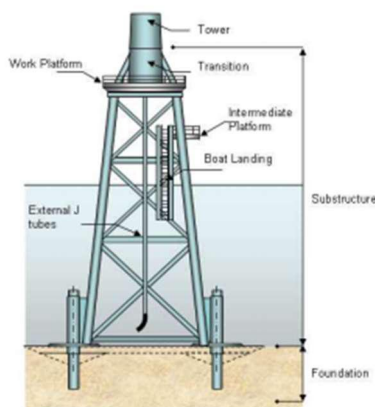


Ilustración 12: Partes de la estructura tipo jacket

Fuente: (Wind Energy, 2015)

- **Estructuras del tipo trípode:** Estructura consistente en 3 patas que permiten la sujeción de la torre al lecho marino. Los esfuerzos que tiene sufren la torre son transmitidos a los tres pilares de igual manera, permitiendo una buena distribución de las tensiones. Este tipo de estructuras al igual que en el caso anterior no es conveniente instalarlas en lechos marinos rocosos. El diámetro de los pilotes suele

ser de poco diámetro, siendo la media entre 0,9 y 1 m de diámetro del pilote. A continuación, podemos ver una imagen con las distintas partes de este tipo de anclaje (ver ilustración 13):

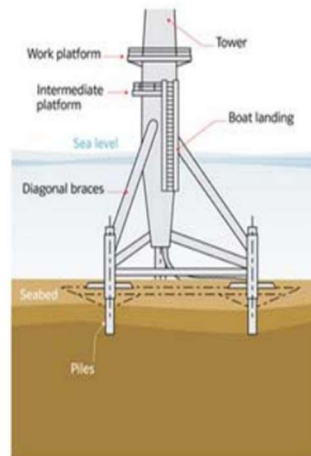


Ilustración 13: Partes de la estructura tipo trípode

Fuente: (4COffshore, 2013)

1.10.3. Instalaciones de alta profundidad:

- **Estructuras semisumergibles:** en este tipo de estructuras tenemos una parte sumergida y una parte por encima de la superficie marina. Al tener la mayor parte de los elementos sumergidos, permite que la carga debido al oleaje y el viento sea menor. Este tipo de plataformas se basan en el principio de Arquímedes, permitiendo cuando la plataforma se hunde, el volumen de las columnas sumergidas consigue un mayor empuje que la fuerza ejercida hacia en fondo marino, consiguiendo que retorne a su posición original. Una de las ventajas fundamentales es que puede ser transportada con facilidad, ya que se arrastra toda la estructura desde la costa hasta la zona donde va a ser instalada la misma. A continuación, se muestra una imagen de este tipo de estructuras (ver ilustración 14):



Ilustración 14: Estructura tipo semisumergible

Fuente: (CNN, 2012)

- **Estructuras TLP (Tension Leg Platform):** denominada así debido a los cables que la sustentan al fondo marino. Estos cables permiten un cierto movimiento vertical de la estructura, además de mantener la estabilidad vertical ante cualquier tipo de oleaje. El punto fundamental de análisis de este tipo de estaturas es el sistema de cables que tiene, ya que habrá que dimensionarlos para que puedan soportar a tensión cualquier fuerza que pueda ocasionar el fondo marino. A continuación, se muestra una imagen de este tipo de estructuras (ver ilustración 15):

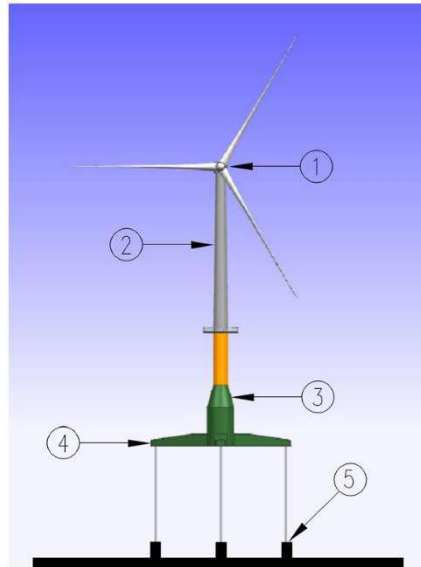


Ilustración 15: Estructura tipo TLP

Fuente: (Zhao, 2012)

- **Estructuras tipo SPAR:** Estructura en forma de cilindro sumergida totalmente con un contrapeso en su parte inferior, para poder lograr la estabilidad del aerogenerador. Este tipo de estructuras tiene un coste más reducido que las anteriores, además de tener un sistema de cableado como en el caso anterior. Es el contrapeso el que le confiere la estabilidad vertical, mientras que los cables permiten el ajuste en horizontal de la estructura, en función de la tensión que tenga cada uno de ellos. A continuación, se muestra una imagen de este tipo de estructuras (ver ilustración 16):

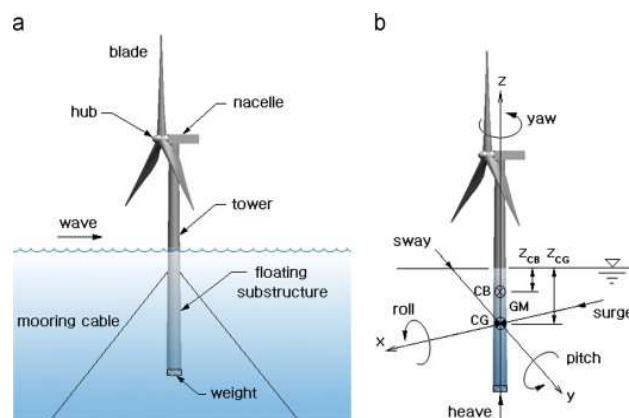


Ilustración 16: Estructura tipo SPAR

Fuente: (Asenjo, 2016)

- **Estructura tipo floater**: estructura consistente en una plataforma que se sitúa sobre la superficie marina, anclada al fondo marino mediante una serie de cables. Este tipo de estructura es la más barata que la de los casos anteriores, con el inconveniente de que no es recomendable su uso en aguas con fuerte oleaje. Esta es la estructura que se escogerá para la elaboración del proyecto, estando amarrada con 3 cables a 45 grados con respecto a la vertical. A continuación, se muestra una imagen de este tipo de estructuras (ver ilustración 17):

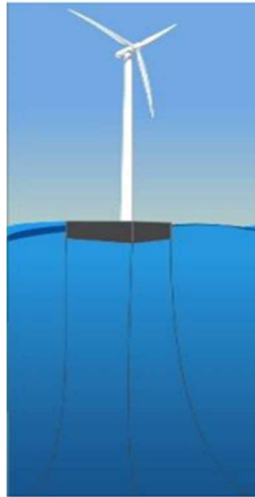


Ilustración 17: Estructura tipo floater

Fuente: (Alternative Energy in New York, s.f.)

1.11. Tipos de anclas existentes:

Podemos clasificar los distintos tipos de ancla en:

- **Ancla de placa cuadrada**: en este tipo de anclaje la fijación con el suelo se consigue por el propio peso del anclaje y por el rozamiento del ancla con el fondo. Hoy en día se suelen fabricar de hormigón o de acero, siendo una de las principales ventajas de su utilización, la gran facilidad de fabricación, y su coste reducido y siendo su principal inconveniente el no poder soportar cargas verticales. Otra de las desventajas es su mala manipulación en el fondo marino debido a su peso, y que no se pueden instalar en zonas con gran inclinación del terreno debido a lo anterior. A continuación, se muestra una imagen de este tipo de anclaje (ver ilustración 18):



Ilustración 18: Ancla cuadrada

Fuente: (Net Zero Tools, s.f.)

- **Ancla por gravedad:** Consistente en un pilote que se clava en el fondo marino mediante un sistema percutor, que les permite llegar al fondo. Este tipo de sistema nos ofrece puede compensar las fuerzas verticales que el anclaje anterior no podamos compensar, siendo su principal inconveniente el alto coste de instalación de esta, además de un gran impacto ambiental. A continuación, se muestra una imagen de este tipo de anclaje (ver ilustración 19):

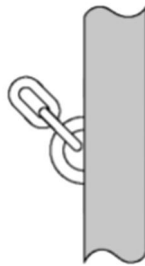


Ilustración 19: Ancla de gravedad

Fuente: (Jose Luis Almazán)

- **Anclas de succión:** sistema consistente en un pilote hueco que se hinca de la misma manera que el sistema anterior, y que una vez alcanzada una cierta profundidad, entran en acción la bomba de succión que se encuentra en su interior, dando lugar a una depresión que introduce el ancla hasta la profundidad deseada. Al igual que en el sistema anterior, el agarre se consigue con el rozamiento existente entre la pared y el propio pilote. A continuación, se muestra una imagen de este tipo de anclaje (ver ilustración 20):

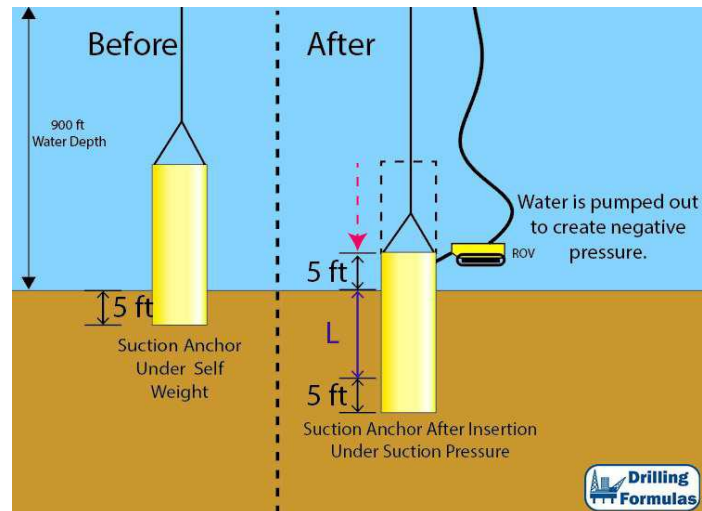


Ilustración 20: Esquema de un anclaje de bomba de succión

Fuente: (Drilling Formulas, 2016)

- **Anclas tipo VLA:** son un tipo de anclaje tipo arrastres como en los casos anteriores, pero debido a su mayor capacidad de carga, pueden penetrar en mayor medida que en los casos anteriores. Tiene dos modos de instalación, siendo estos:
 - Modo de carga vertical: permite soportar tanto cargas verticales como horizontales.
 - Modo de instalación.

Una de las principales ventajas de este tipo de anclajes es que son ligeras y permiten un mayor amarre al fondo marino, siendo imposible su instalación en zonas arcillosas, ya que pierden su agarre con facilidad. A continuación, se muestra una imagen de este tipo de anclaje (ver ilustración 21):

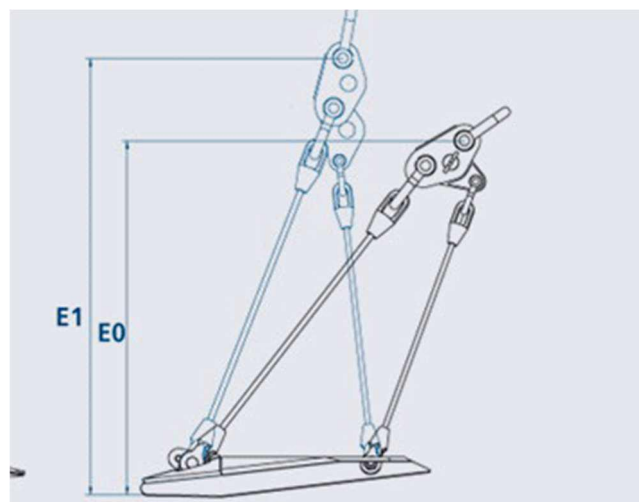


Ilustración 21: Ilustración 21: Ancla tipo VLA

Fuente: (VRYHOF ANCHORS, s.f.)

- **Anclaje tipo SEA:** Consiste en un sistema de succión como el en caso del anclaje de succión, pero una vez introducido el conducto en el fondo marino a la profundidad requerida, se implementa un ancla tipo SEA que se va abriendo poco a poco. Podemos destacar estas ventajas:
 - Ahorro en los costes de instalación al ser de dimensiones reducidas comparado con los sistemas anteriores.
 - Se adapta a cualquier tipo de suelo.
 - La capacidad de agarre del ancla no cambia con la inclinación del terreno.
 - Tenemos una relación de sujeción frente a peso elevada (llegando a ser de más de 100 a 1).

A continuación, se muestra una imagen de este tipo de anclaje (ver ilustración 22):

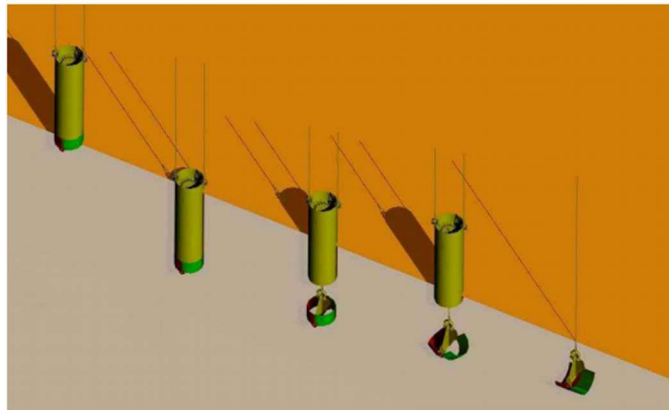


Ilustración 22: Proceso de instalación de un anclaje tipo SEA

Fuente: (Asenjo, 2016)

- **Anclajes tipo SEPLA:** Este sistema de anclaje se instala de la misma manera que en el caso anterior, siendo la principal diferencia entre ambos, la instalación de un ancla tipo VLA, vista anteriormente, con el objetivo de conseguir un mayor amarre al fondo marino. A continuación, se muestra una imagen de este tipo de anclaje (ver ilustración 23):

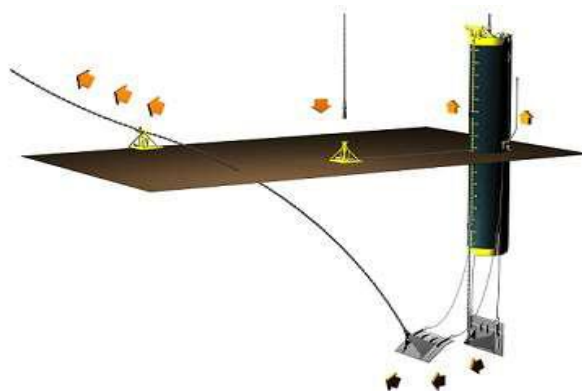


Ilustración 23: Anclaje tipo SEPLA

Fuente: (INTERMOOR, s.f.)

1.12. Sistemas de fondeo:

Para los sistemas de fondeo podemos hablar de tres grupos fundamentales: sistemas tipo catenaria, sistemas taut-leg y por último sistemas de tipo vertical.

- ✓ **Sistemas tipo catenaria:** este tipo de sistema es el más utilizado para cuando tenemos aguas poco profundas. Una de las principales causas de que sea más barato es que en el fondo marino, la línea de amarre queda en horizontal, y como consecuencia tendremos una mayor longitud de los cables, provocando que para altas profundidades se dispare el precio. Uno de los principales problemas de este tipo de sistema de fondeo, es que la tensión vertical aplicada, no es lo suficientemente alta para poder asegurar que el aerogenerador no vuelque, por lo que se opta por la instalación de un mayor número de líneas o líneas de mayor longitud. A continuación, se muestra una imagen de este tipo de fondeo (ver ilustración 24):



Ilustración 24: Sistema de fondeo tipo catenaria

Fuente: (Engeering, Dred, 2006)

- ✓ **Sistemas de fondeo tipo taut leg:** sistema más rentable que en el caso anterior cuando la profundidad cada vez es mayor, ya que necesitamos un menor número de líneas. En este proyecto se desarrollará este tipo de fondeo, siendo el ángulo de fondeo de 45 grados. Este tipo de sistema tiene la desventaja de que debe soportar no solo las fuerzas verticales, sino también las fuerzas horizontales. A continuación, se muestra una imagen de este tipo de fondeo (ver ilustración 25):

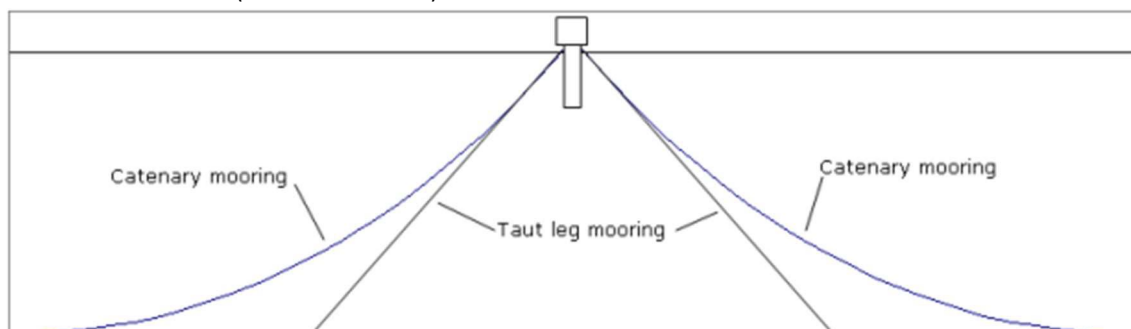


Ilustración 25: Sistema de fondeo tipo taut leg

Fuente: (Wikipedia, s.f.)

- ✓ **Sistema de fondeo tipo vertical:** una de las principales ventajas que presenta este tipo de estructuras es que permiten tener la plataforma de sujeción de la torre sumergida, lo que

nos ofrece una gran ventaja frente a las cargas provocadas fundamentalmente por el oleaje y el viento. La principal desventaja es que tiene que ser capaz de soportar mayores fuerzas verticales, lo que hace que el sistema de anclaje al tipo de fondo marino sea más complejo, lo que hace que por tanto se a más caro la instalación de este tipo de sistema de fondeo. A continuación, se muestra una imagen de este tipo de fondeo (ver ilustración 26):

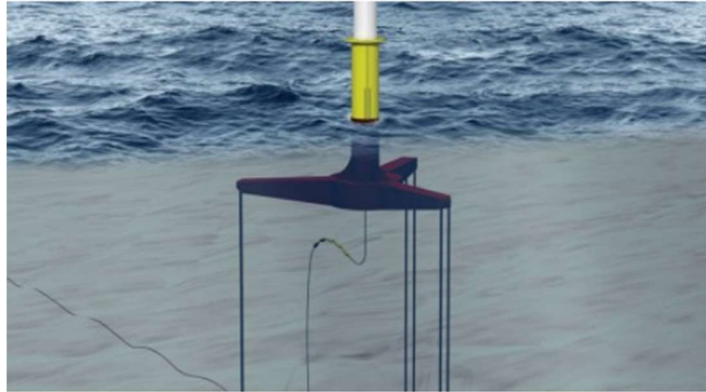


Ilustración 26: Sistema de fondeo vertical

Fuente: (Asenjo, 2016)

Parte II: Cálculos del proyecto

1. Cálculos

1.1. Caso con supuesto

1.1.1. Estudio del dimensionamiento de los cables de la estructura

Para el dimensionamiento de cables, se tomará que la estructura estará amarrada con tres cables al fondo marino, con una distribución el triángulo de los cables (formando entre ellos 120 grados y con la horizontal un ángulo de 45º grados). Se ha escogido esta distribución con el objetivo de que el aerogenerador sea capaz de soportar cualquier tipo de momento o fuerza sin provocar que este vuelque. Para poder dimensionarlos de manera eficaz, se tomará las proyecciones de los cables como podemos ver en la siguiente figura (ver ilustración 27):

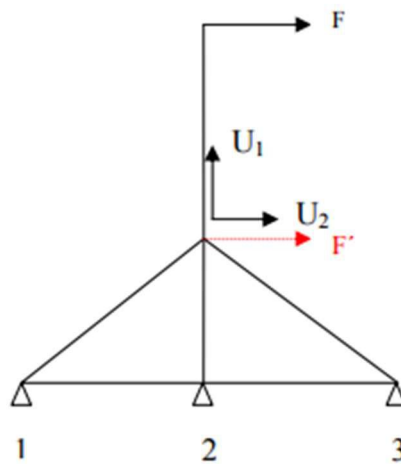


Ilustración 27: Disposición simplificada para el cálculo de los cables

Fuente: (Asenjo, 2016)

Los cables deberán estar tensos en todo momento, descartando por tanto la disposición de catenaria de estos. Para el cálculo de esta estatura deberemos saber la profundidad del fondo marino hasta el floater, para poder conocer el tamaño de los cables a dimensionar. Esta distancia está definida en 55 m y por tanto primeramente haremos un cálculo de distancias:

$$L_1 = L_3 = \frac{40}{\text{sen}(45)} = 56.56 \text{ m}$$

$$L_2 = 40 \text{ m}$$

Para poder hacer el cálculo de la tensión que sufrirá cualquiera de los cables, nos acogeremos al método de la matriz de rigidez, en el cual se expone:

$$K * U = F_n + F_a.$$

Siendo estos términos:

- K: Matriz de rigidez en ejes globales. Vendrá dada de la siguiente manera, ya que un cable por teoría de resistencia de materiales no puede tener momentos¹:

$$[K]_G = [R]^T [K]_L [R] = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} \cos^2 \theta & \frac{AE}{L} \cos \theta \sin \theta & -\frac{AE}{L} \cos^2 \theta & -\frac{AE}{L} \cos \theta \sin \theta \\ \frac{AE}{L} \cos \theta \sin \theta & \frac{AE}{L} \sin^2 \theta & -\frac{AE}{L} \cos \theta \sin \theta & -\frac{AE}{L} \sin^2 \theta \\ -\frac{AE}{L} \cos^2 \theta & -\frac{AE}{L} \cos \theta \sin \theta & \frac{AE}{L} \cos^2 \theta & \frac{AE}{L} \cos \theta \sin \theta \\ -\frac{AE}{L} \cos \theta \sin \theta & -\frac{AE}{L} \sin^2 \theta & \frac{AE}{L} \cos \theta \sin \theta & \frac{AE}{L} \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

En esta matriz cabe destacar que el ángulo dependerá de la orientación de los ejes locales y de los ejes globales que se expondrán más tarde.

- U: matriz de desplazamientos en ejes globales. Es la que se obtendrá de la anteriormente expuesta.
- F_n : matriz de fuerzas aplicadas en los nodos.
- F_a : matriz de las fuerzas aplicadas a lo largo de la barra.

A continuación, se expondrá la distribución de las barras, exponiendo en color rojo los ejes globales y en color azul los ejes locales (ver ilustración 28):

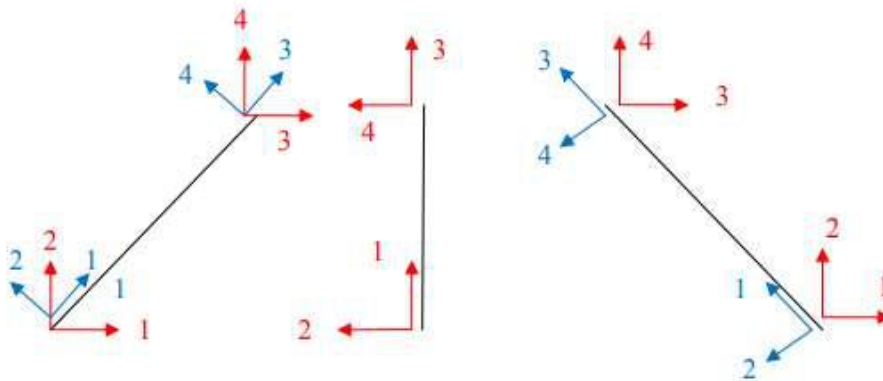


Ilustración 28: Sistemas globales y locales del sistema de cables planteado.

Fuente: (Asenjo, 2016)

Primeramente, se calculará los ángulos de rotación de la matriz, con el fin de poder calcular los distintos elementos de la matriz de rigidez. Este ángulo se tomará siempre del eje global al eje local del cable, siendo en el primer caso un ángulo de 45°, en el segundo podemos asignar los ejes globales y los locales al mismo (con el fin de evitarnos la rotación de la matriz) y por último el tercer cable formará 135°. Para el cálculo de las rigideces se tomará que el valor del módulo de Young es $E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ y la tensión máxima admisible será, $\sigma_{max,ad} = 275 \text{ N/mm}^2$

Calculamos los distintos elementos de la matriz de rigidez:

$$\begin{aligned} K_{11} &= K_{44}^1 + K_{33}^2 + K_{44}^3 = \frac{AE}{L_1} * \text{sen}(45)^2 + \frac{AE}{L_2} + \frac{AE}{L_3} * \text{sen}(135)^2 \\ &= 8962310601.24 * A \text{ N/m} \end{aligned}$$

¹ Teoría de Matriz de rigidez expuesta en los apuntes de la asignatura análisis de estructuras

$$K_{22} = K^1_{33} + K^2_{44} + K^3_{33} = \frac{AE}{L_1} * \cos(45)^2 + 0 + \frac{AE}{L_3} * \cos(135)^2$$

$$= 3712310601.24 * A \text{ N/m}$$

$$K_{12} = K^1_{43} + K^2_{34} + K^3_{43} = \frac{AE}{L_1} * \text{sen}(45) * \cos(45) + 0 + \frac{AE}{L_3} * \text{sen}(135) * \cos(135)$$

$$= 0 \text{ N/m}$$

Poniendo todo junto en la matriz de rigidez K/A:

$$\begin{bmatrix} 8962310601.24 & 0 \\ 0 & 3712310601.24 \end{bmatrix}$$

Una vez realizada la matriz, definiremos una fuerza orientativa para poder seguir calculando. La fuerza que suponemos en la parte donde calculamos los desplazamientos será de 1MN. Por lo tanto, podemos definir la matriz F_n :

$$0 \quad \begin{bmatrix} \\ \\ 1000000 \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, planteando la ecuación expuesta al principio podemos sacar los desplazamientos:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \\ 2.693 * 10^{-4} \end{bmatrix}$$

Estando los desplazamientos en m. El siguiente paso que debemos seguir será el cálculo de las fuerzas que sufrirán cada una de las barras y eso lo haremos mediante:

$$S = k * u + F_n$$

Siendo:

- K: matriz de rigidez en ejes locales.
- u: matriz de desplazamiento en ejes locales.
- F_n : matriz de fuerzas aplicada en la barra

Por lo que primeramente definiremos para cada cable la matriz de rotación, la matriz de rigidez global y la matriz de deslizamiento:

i. Cable 1:

- Matriz de rotación (45°):

0,70710678	0,70710678	0	0
-0,70710678	0,70710678	0	0
0	0	0,70710678	0,70710678
0	0	-0,70710678	0,70710678

- Matriz de desplazamientos Globales/A:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.693 \cdot 10^{-4} \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Matriz de desplazamientos locales:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.90 \cdot 10^{-4} \\ -1.90 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

- Reacciones en el nodo (KN):

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -706.912 \\ 0 \\ 706.912 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Con este cálculo, podemos observar que el cable estará trabajando a tracción, por lo que podemos decir que el cálculo es válido.

ii. Cable 2:

- Matriz de rotación (0°):

0	1	0	0
-1	0	0	0
0	0	0	1

0	0	-1	0
---	---	----	---

- Matriz de desplazamientos Globales/A:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2.693 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

- Matriz de desplazamientos locales:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.693 \cdot 10^{-4} \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Reacciones en el nodo (KN):

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

iii. **Cable 3:**

- Matriz de rotación (135°):

-0,70710678	0,70710678	0	0
-0,70710678	0,70710678	0	0
0	0	-0,70710678	0,70710678
0	0	-0,70710678	0,70710678

- Matriz de desplazamientos Globales/A:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.693 \cdot 10^{-4} \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Matriz de desplazamientos locales:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1.90 \cdot 10^{-4} \\ -1.90 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

- Reacciones en el nodo (KN):

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 706.912 \\ 0 \\ -706.912 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Con esto podemos observar que este cable está a compresión, cosa que es imposible desde el punto de vista de la física, por lo que la decisión que se tomará será la de pretensar los cables, con el objetivo de que el cable nunca llegue a trabajar a compresión, por lo que tendremos que la tensión que soportara el cable será:

$$F_{cable} = 2 * F_{tension} = 2 * 706.912 = 1413.83 \text{ KN}$$

Una vez calculada esta fuerza, con el módulo de Young y con el máximo de tensión admisible, podemos calcular el área del cable a utilizar:

$$\sigma_{max,admisible} = \frac{F_{cable}}{A} \rightarrow A = \frac{F_{cable}}{\sigma_{max,admisible}} = \frac{1413.83 * 10^3}{275 * 10^6} = 51.41 \text{ cm}^2$$

Con esta área calculamos el diámetro del cable a utilizar:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} \rightarrow d = 8.09 \text{ cm}$$

Por lo tanto, los cables necesarios para poder soportar la estructura serán de 8 cm.

1.1.2. Dimensionamiento teórico del ancla:

Primeramente, diseñaremos el ancla en posición vertical, con el fin de calcular las fuerzas que intervienen en ella, y la fuerza que sería necesaria para poder extraerla del suelo. Podes observar la representación con todas las fuerzas que intervienen en el anclaje en posición vertical (ver Ilustración 29) :

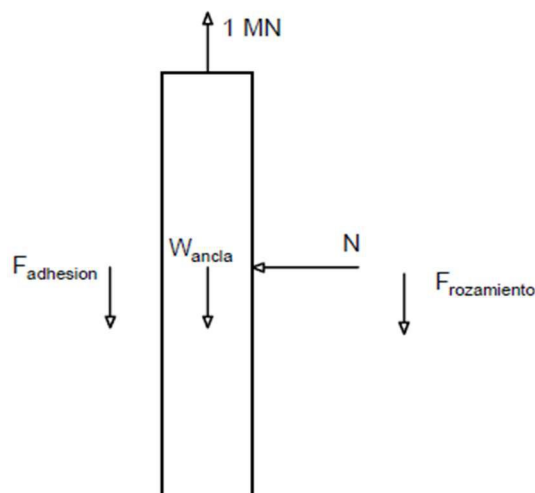


Ilustración 29: Fuerzas tendremos sobre el anclaje en posición vertical

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

Primeramente, diremos que la fuerza normal es debido a:

$$N = F_{arena+agu} + F_{cohesion}$$

Según la teoría de cimentaciones podemos decir que en suelos granulares, las fuerzas de cohesión son nulas y además podemos afirmar que al ser arena, tendemos que las fuerzas de adhesión serán nulas al mismo tiempo, por lo que nuestro cálculo se verá afectado en su mayor por la fuerza de presiones, y además adicionalmente por una fuerza de rozamiento. Para el cálculo de la fuerza de rozamiento, primeramente, se calculará la fuerza normal al ancla, y para ello tendremos que calcular primeramente la componente vertical debido a presiones mediante el siguiente esquema (ver ilustración 30):

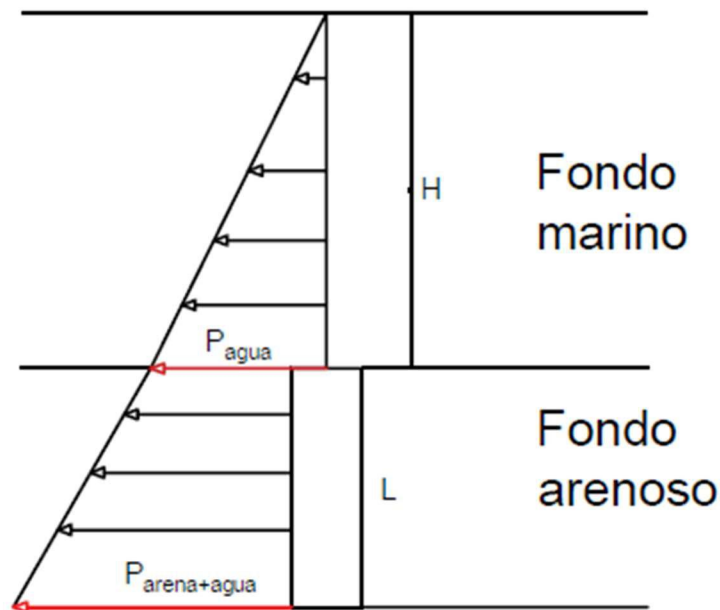


Ilustración 30: Distribución de las presiones en el ancla

Fuente: *Elaboración propia en AutoCAD*

Ahora sacaremos la P_{agua} mediante los metros de columna de agua que tenemos:

$$P_{agua} = \rho_{agua} * g * H = 1000 * 9.81 * 40 = 392400 Pa$$

Posteriormente para poder sacar el conjunto de arena más agua, también tendremos en cuenta el principio de Arquímedes para calcularla. Por lo que:

$$\begin{aligned} P_{agua+arena} &= \rho_{agua} * g * H + (\rho_{arena} - \rho_{agua}) * g * L \\ &= 1000 * 9.81 * 40 + (1500 - 1000) * 9.81 * L = 392400 + 4905 * L Pa \end{aligned}$$

Una vez tenemos esta presión, podremos calcular la fuerza horizontal mediante la siguiente formulación:

$$\sigma_h = K_0 * \sigma_v$$

De donde podemos deducir que el valor que nos falta por saber es el valor de K_0 que es el coeficiente de empuje en reposo que tendremos. Para ello se propone la formulación de Jaky que nos dice:

$$K_0 = 1 - \text{sen}(\phi)$$

Donde ϕ representa el valor del rozamiento del pavimento contra el ancla. Este ángulo estará comprendido entre los 30 y 36 grados para el caso de suelos arenosos. Para nuestro caso supondremos un valor de 32°.

Cuando en vez de un empuje en reposo tenemos un empuje pasivo o activo, tendremos otras dos teorías según los libros de cimentaciones² que son las siguientes:

- **Ley de Rankine:** esta ley lo que nos dice es que este coeficiente de empuje se puede aproximar por la siguiente formula:

$$K_a = \frac{1 - \text{sen}(\phi)}{1 + \text{sen}(\phi)}$$

Siendo el valor de K_a equivalente al valor de K_0 en la formula anteriormente expuesta. Esta formulación es valida para cuando tenemos el ancla en posición horizontal o en posición vertical con respecto al pavimento.

- **Ley de coulomb:** esta ley lo que nos dice es que este coeficiente de empuje se puede aproximar por la siguiente formula:

$$K_{ah} = \frac{\cos^2(\phi - \alpha)}{\cos^2\left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi - \delta) * \text{sen}(\phi - \beta)}{\cos(\alpha + \delta) * \cos(\beta - \alpha)}}\right]}$$

De esta formulación podemos decir que los parámetros serán:

- ✓ ϕ : Angulo de la reacción del terreno contra el ancla.
- ✓ α : Angulo del ancla con respecto a la horizontal.
- ✓ β : Inclinación del terreno.
- ✓ δ : Angulo de reacción del ancla contra el terreno.

Este método se utiliza fundamentalmente cuando tenemos tanto el ancla inclinada como el terreno que la rodea. Para el primer caso de estudio se escogerá la teoría de Rankine para el cálculo de estas fuerzas horizontales que actúan sobre el ancla. Por lo que el valor de K_a será para este caso:

$$K_a = \frac{1 - \text{sen}(32)}{1 + \text{sen}(32)} = 0.307$$

Por lo que podremos decir que el valor de las presiones verticales será:

² Libro de cimentaciones elaborado durante un curso

$$\sigma_h = 120568.54 + 1505.835 * L$$

Una vez sacada esta presión calcularemos la fuerza normal dividiendo entre el área de la cara

$$N = \frac{120568.54 + 1505.835 * L}{L * b}$$

Una vez tenemos el valor de la normal, podremos sacar el valor de la fuerza de rozamiento necesaria para los cálculos. Podremos decir que, al estar moviéndose, la fuerza de rozamiento del ancla será el coeficiente de fricción por la normal que nosotros tengamos:

$$F_r = \mu * N = tg(32) * \frac{120568.54 + 1505.835 * L}{L * b} = \frac{74752.31 + 933.61 * L}{L * b}$$

Por lo que posteriormente planteamos el equilibrio de fuerzas en posición vertical para poder determinar de manera aproximada las dimensiones del anclaje que tendríamos:

$$1MN \leq W_{ancla} + F_{rozamiento} + P_v + P_h$$

Podemos decir que el valor de la fuerza definida como P_h tendrá el mismo módulo, pero diferente sentido que la P_v por lo que la ecuación se nos quedaría de la siguiente manera:

$$1MN \leq W_{ancla} + F_{rozamiento}$$

Calculamos ahora la W_{ancla} :

$$W_{ancla} = \rho_{ancla} * g * V_{ancla} = 77008,5 * L * b * e [N]$$

Una vez tenemos el equilibrio determinado, sumaremos todas las fuerzas y supondremos dos valores para las dimensiones con el fin de sacar el tercero:

$$1MN \leq 77008,5 * L * b * e + \frac{74752.31 + 933.61 * L}{b * L}$$

Suponemos unos valores de las dimensiones del anclaje de:

- L=10m
- E=30 cm.

Con estos valores podemos obtener que el espesor del ancla es de 4.32, por lo que debe ser: $b \leq 4.32$ m.

Tendremos entonces que la mejor posible solución, será cuando b sea menor o igual que 2.482 m.

Para el caso que nosotros tenemos, se meterá el ancla con ángulo que dependerá del siguiente gráfico (ver Ilustración 31):

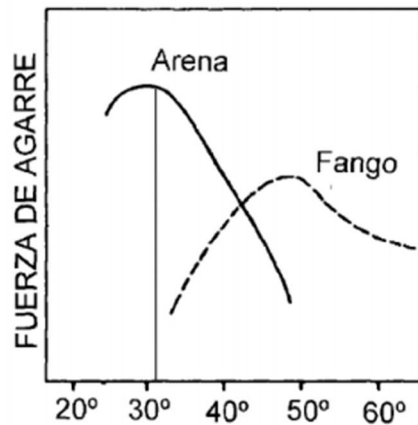


Ilustración 31: Fuerza de amarre según el ángulo de introducción del ancla

Fuente: (Asenjo, 2016)

Como podemos ver en el gráfico, el ángulo ideal para poder introducir el ancla en un fondo marino arenoso como en nuestro caso, sería de entre 30-35 grados, consiguiendo con este ángulo la fuerza de amarre máxima. Para este proyecto se tomará un ángulo de 31 grados.

Otras condiciones de contorno para el diseño del ancla será la aplicación de una fuerza de 1MN equivalente a la que tendríamos que aplicar en los cables que tiran del ancla. Esta fuerza irá con un ángulo de 45 grados con respecto a la vertical. Las fuerzas debido a la arena estarán aplicadas a 1/3 de la posición más baja de la placa como se puede observar en la imagen. En el siguiente esquema podemos ver las fuerzas aplicadas al anclaje (ver Ilustración 32):

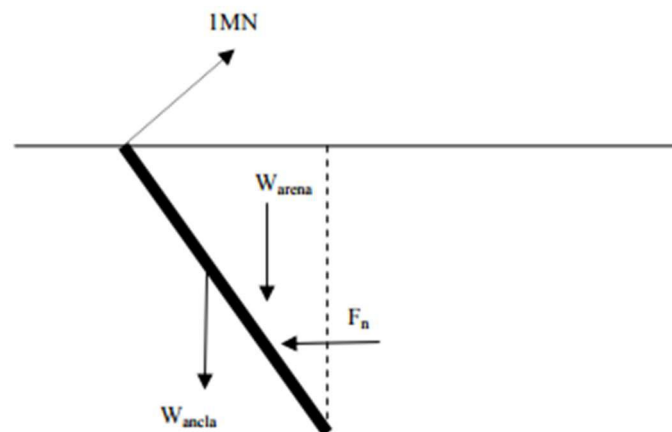


Ilustración 32: Esquema del ancla introducida con un cierto ángulo en el lecho marino

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

En este esquema podemos destacar las siguientes fuerzas:

- ✓ F : Corresponde con la fuerza mencionada anteriormente (fuerza aplicada a los cables con el fin de evitar que el aerogenerador vuelque)

- ✓ W_{arena} : Corresponde con el peso de arena situado encima del ancla. Podemos definir este peso mediante:

$$W_{arena} = (\rho_{arena} - \rho_{agua}) * g * V_{arena}$$

Podemos decir que:

- $\rho_{arena} = 1500 - 2000 \frac{Kg}{m^3}$
- $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$
- $V_{arena} = \frac{L * \cos(32) * L * \sin(32)}{2} * b m^3$

Podemos entonces decir:

$$W_{arena} = (\rho_{arena} - \rho_{agua}) * g * V_{arena} = 1102,14 * b * L^2 [N]$$

Se ha escogido una densidad de 1500, siendo este el caso límite para aguantar la fuerza con la que tiran los cables.

- ✓ W_{ancla} : peso equivalente del ancla. Se supondrá que el espesor es de 10 mm:

Podemos decir que:

- $\rho_{ancla} = 7850 \frac{Kg}{m^3}$
- $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$
- $V_{ancla} = L * b * e m^3$.

$$W_{ancla} = (\rho_{ancla} - \rho_{agua}) * g * V_{ancla} = 67198.5 * L * b * e [N]$$

A continuación, se realizará el equilibrio de fuerzas necesario para que el ancla se mantengan estática:

- ✓ Equilibrio de fuerzas en el eje x:

$$F_n - 1MN * \cos(45) = 0 \rightarrow F_n = 707106.78 N$$

- ✓ Equilibrio de fuerzas en el eje z:

$$W_{arena} + W_{ancla} - 1MN * \sin(45) = 0$$

$$1102,14 * b * L^2 + 67198.5 * L * b * e - 1MN * \sin(45) = 0$$

Para poder realizar los cálculos vamos a hacer dos suposiciones:

- ✓ Un espesor muy pequeño. Para este caso se supondrá de 10 mm
- ✓ Una longitud de placa. Para este caso se supone de 10 m

Con estas suposiciones sacamos el ancho de la placa $b = 6.04$ m.

- **Calculo de los momentos de inercia y fuerzas de von mises teóricas:**

Primeramente, definiremos las dimensiones del ancla que utilizaremos para el dimensionamiento inicial del ancla:

- ✓ Longitud del ancla: 10 m
- ✓ Ancho del ancla: 6.04 m
- ✓ Espesor del ancla: 10 mm.

Además, definiremos el tipo de acero del cual se hará nuestra ancla, junto con sus parámetros característicos. Se ha escogido el acero F1120, ya que es el más común en la fabricación de anclas. Tiene las siguientes características:

- ✓ Módulo de Elasticidad: $2.1 * 10^{11} Pa$.
- ✓ Resistencia del material: 490-630 MPa como R_m y resistencia elástica de 250 MPa.

Una vez definidos estos valores, procederemos a calcular primeramente los momentos de área de esta sección (ver ilustración 33):

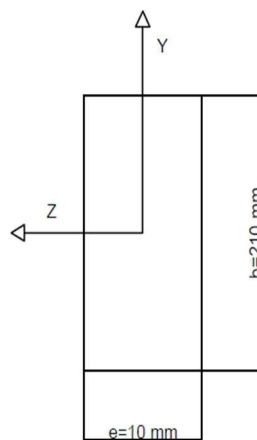


Ilustración 33: Sección del ancla a analizar.

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

Una vez definida la sección, procedemos a calcular los momentos de área de esta mediante la siguiente formulación (ver ilustración 34):

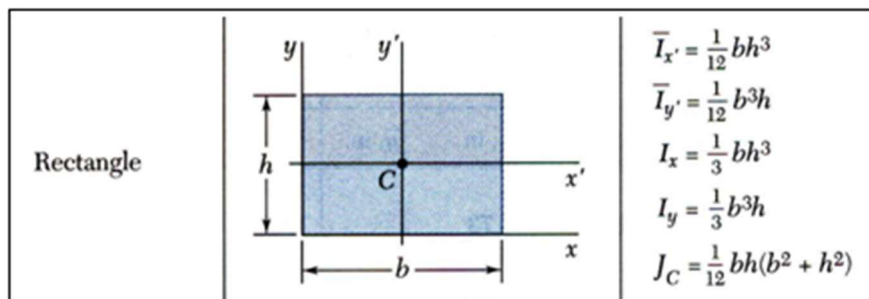


Ilustración 34: Momentos de área de una sección rectangular

Fuente: (Universidad de la republica de Uruguay, s.f.)

Para nosotros la x corresponderá con la z que hemos representado anteriormente, siendo entonces estos momentos:

$$\checkmark I_z = \frac{1}{12} * 6.04 * 0.01^3 = 0,0000005033 \text{ m}^4.$$

$$\checkmark I_y = \frac{1}{12} * 0.01 * 6.04^3 = 0,183624053 \text{ m}^4.$$

Aplicando la formulación de cálculo de tensiones para una sección:

$$\sigma = \frac{M}{I} * l$$

Siendo:

- ✓ σ : tensión de la sección a analizar.
- ✓ M: momento de la sección a analizar.
- ✓ L: longitud desde el centro de masas hasta el extremo de la figura.

Para poder calcular el momento se ha cogido un programa de realización de diagramas de esfuerzos en una estructura (llamado FTool) y podemos definir el siguiente esquema en el programa con el fin de saber cuál son los diagramas (ver ilustración 35):

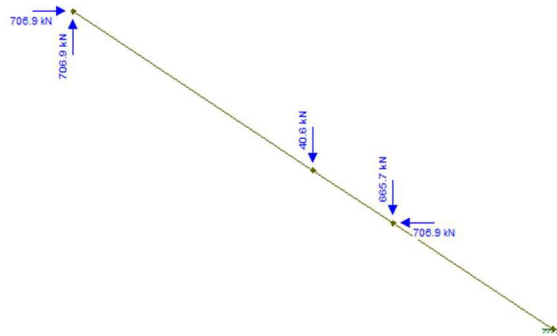


Ilustración 35: Diagrama de fuerzas aplicadas sobre el ancla en el programa FTool

Fuente: Elaboración propia en el programa FTool

La primera suposición será que el fondo del ancla se encuentre empotrado, y que el extremo superior del ancla se encuentra libre. Por lo tanto, la sección más desfavorable para esta ancla será la zona del empotramiento, ya que como vimos en la asignatura de resistencia de materiales, es la zona donde se concentrará la mayor parte de las tensiones, siendo la predominante el momento flector. Por lo que, resolviendo el sistema de fuerzas anterior, obtenemos los siguientes resultados (ver ilustración 36):

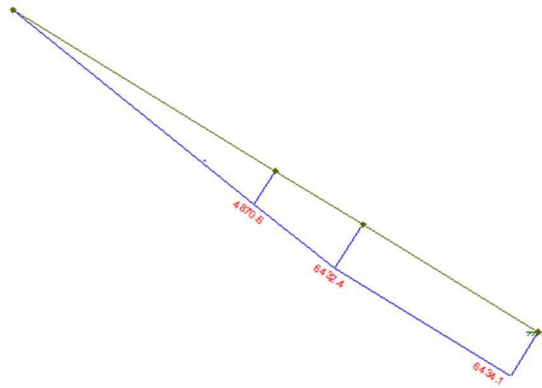


Ilustración 36: Diagrama de momentos flectores en el ancla

Fuente: Elaboración propia en el programa FTool

Se puede observar, que el punto más crítico es el empotramiento, como dijimos anteriormente, siendo el valor del momento en este de 6477.3 KNm. Una vez tenemos este valor calculamos las tensiones en el eje z e y:

$$\sigma_z = \frac{6434.1 * 10^3 Nm * 5 * 10^{-3} m}{2 * 5.03 * 10^{-7} m^4} = 6.38 * 10^{10} \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma_y = \frac{6431.1 * 10^3 Nm * 2.1 m}{2 * 0.18 m^4} = 1.06 * 10^8 \frac{N}{m^2}$$

Una vez tenemos los valores de las tensiones, analizaremos el diagrama de cortantes para poder calcular Von Mises (ver ilustración 37):

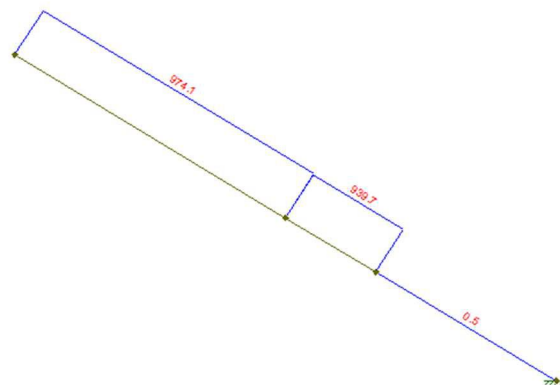


Ilustración 37: Análisis de esfuerzos cortantes de la estructura

Fuente: Elaboración propia en el programa FTool

Podemos observar que el esfuerzo cortante en la sección será nulo por lo que no lo tendremos en cuenta en las siguientes operaciones. Plateamos la ecuación de Von Mises para el caso de la sección de una placa rectangular:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

Siendo en este caso el esfuerzo cortante 0. De aquí sacamos la tensión equivalente de Von Mises:

$$\sigma_{von,mises} = \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_y^2 - \sigma_y * \sigma_z} = \sqrt{(6.38 * 10^{10})^2 + (1.06 * 10^8)^2 - 6.38 * 10^{10} * 1.06 * 10^8} = 6.34 * 10^{10} Pa$$

De aquí podemos deducir que el valor de las tensiones sería demasiado elevado para el acero propuesto, por lo que no nos valdría este modelo. Con el fin de mejorarlo, lo que se hará es aumentar el momento de inercia de las secciones con el fin de reducir esa tensión equivalente de von mises. Para ello aumentamos la sección que queremos analizar, siendo los nuevos datos:

- ✓ Longitud del ancla: 10 m
- ✓ Ancho del ancla: 6.04 m
- ✓ Espesor del ancla: 30 mm.

Volvemos a sacar los momentos de inercia de la sección:

- ✓ $I_z = \frac{1}{12} * 6.04 * 0.03^3 = 1.36 * 10^{-5} m^4.$
- ✓ $I_y = \frac{1}{12} * 0.03 * 6.04^3 = 5.5 * 10^{-1} m^4.$

Calculamos ahora de nuevo las tensiones en ambos ejes (En este caso el máximo momento flector no se encuentra en el empotramiento, sino en el punto de aplicación de las fuerzas de la arena sobre el ancla, por lo que también tendremos un valor de cortante de: 870.9):

$$\sigma_z = \frac{6318,1 * 10^3 Nm * 30 * 10^{-3} m}{2 * 1.36 * 10^{-5} m^4} = 7 * 10^9 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma_y = \frac{6318,1 * 10^3 Nm * 6.04 m}{2 * 5.5 * 10^{-1} m^4} = 3.46 * 10^7 \frac{N}{m^2}$$

Calculamos de nuevo la tensión equivalente de Von Mises:

$$\begin{aligned} \sigma_{von,mises} &= \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_y^2 - \sigma_y * \sigma_z} \\ &= \sqrt{(7 * 10^9)^2 + (3.46 * 10^7)^2 - 3.46 * 10^7 * 7 * 10^9 + 3 * \left(\frac{870.9 * 10^3 * 3}{2 * 6.04 * 0.03}\right)^2} \\ &= 6.96 * 10^9 Pa \end{aligned}$$

Se puede observar que todavía no hemos alcanzado el objetivo de los 250 Mpa, por lo que nos tocara aumentar de nuevo el espesor de la plancha, con el objetivo de conseguir esta tensión. Se proponen los siguientes valores de nuevo:

- ✓ Longitud del ancla: 10 m
- ✓ Ancho del ancla: 6.04 m

- ✓ Espesor del ancla: 10 cm.

Volvemos a sacar los momentos de inercia de la sección:

$$✓ I_z = \frac{1}{12} * 6.04 * 0.1^3 = 5.03 * 10^{-4} m^4.$$

$$✓ I_y = \frac{1}{12} * 0.1 * 6.04^3 = 1,84 m^4.$$

Calculamos ahora de nuevo las tensiones en ambos ejes (En este caso el máximo momento flector no se encuentra en el empotramiento, sino en el punto de aplicación de las fuerzas de la arena sobre el ancla, por lo que también tendremos un valor de cortante de: 629.9):

$$\sigma_z = \frac{5919.3 * 10^3 Nm * 10 * 10^{-2} m}{2 * 5.03 * 10^{-4} m^4} = 5.88 * 10^8 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma_y = \frac{5919.3 * 10^3 Nm * 6.04 m}{2 * 1,84 m^4} = 9.73 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Calculamos de nuevo la tensión equivalente de Von Mises:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{von,mises}} &= \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_y^2 - \sigma_y * \sigma_z} \\ &= \sqrt{(5.88 * 10^8)^2 + (9.73 * 10^6)^2 - 5.88 * 10^8 * 9.73 * 10^6 + \left(\frac{629.9 * 10^3 * 3}{2 * 6.04 * 0.03}\right)^2} \\ &= 583.2 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Podemos observar que estamos entre los límites de rotura del material, por lo que aumentaremos de nuevo el espesor, con el fin de conseguir estar por debajo del límite elástico. Para ello se propone los siguientes parámetros:

- ✓ Longitud del ancla: 10 m
- ✓ Ancho del ancla: 6.04 m
- ✓ Espesor del ancla: 16 cm.

Volvemos a sacar los momentos de inercia de la sección:

$$✓ I_z = \frac{1}{12} * 6.04 * 0.16^3 = 2.06 * 10^{-3} m^4.$$

$$✓ I_y = \frac{1}{12} * 0.16 * 6.04^3 = 2.94 m^4.$$

Calculamos ahora de nuevo las tensiones en ambos ejes (En este caso el máximo momento flector no se encuentra en el empotramiento, sino en el punto de aplicación de las fuerzas de la arena sobre el ancla, por lo que también tendremos un valor de cortante de: 424.4 KN):

$$\sigma_z = \frac{5574.3 * 10^3 Nm * 16 * 10^{-2} m}{2 * 2.06 * 10^{-3} m^4} = 2.16 * 10^8 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma_y = \frac{5574.3 * 10^3 \text{ Nm} * 6.04 \text{ m}}{2 * 2.94 \text{ m}^4} = 5.73 * 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Calculamos de nuevo la tensión equivalente de Von Mises:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{von,mises}} &= \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_y^2 - \sigma_y * \sigma_z} \\ &= \sqrt{(2.16 * 10^8)^2 + (5.73 * 10^6)^2 - 2.16 * 10^8 * 5.73 * 10^6 + \left(\frac{424.4 * 10^3 * 3}{2 * 6.04 * 0.03}\right)^2} \\ &= 213 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Como podemos observar, ya nos encontramos por debajo del límite elástico, garantizando que no tendremos deformación plástica en el ancla.

Para el valor obtenido anteriormente tendremos que el peso del ancla será:

$$P_{\text{Ancla}} = \rho * V = 7850 * 10 * 6.04 * 16 * 10^{-2} = 75.8 \text{ toneladas}$$

Por lo que se propondrá un modelo de ancla con un agujero en su interior, con el fin de poder reducir el peso de esta.

Para el análisis del ancla hueca, se propone el siguiente esquema de ancla (ver ilustración 38):

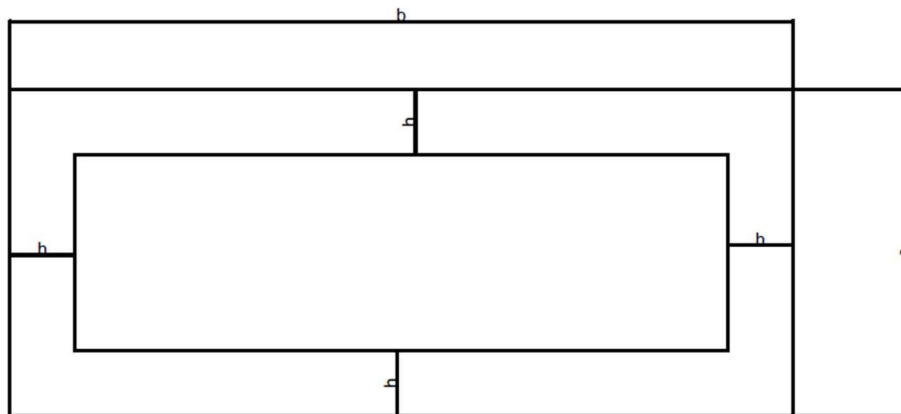


Ilustración 38: Esquema del ancla hueca propuesta

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

Para el cálculo del momento de área se utilizarán las siguientes dos secciones (ver ilustración 39):

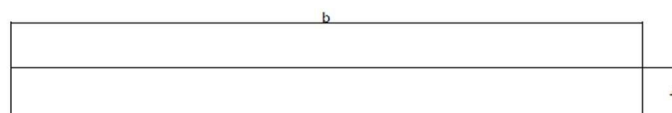


Ilustración 39: Primera área a analizar

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

Para esta primera área, tendremos que los momentos principales con respecto al centro del ancla serán (suponiendo una h inicial de 2 mm, y el espesor el mismo que hemos obtenido en el apartado anterior):

$$\checkmark I_z = \frac{1}{12} * 6.04 * 0.02^3 = 4.0266 * 10^{-6} m^4.$$

$$\checkmark I_y = \frac{1}{12} * 0.02 * 6.04^3 = 0.367248107 m^4.$$

Al tener un agujero, se aplicará el término de Steiner, para poder calcular el momento de área con respecto al centro de la sección:

$$\checkmark I_{z, total\ sección\ 1} = 4.0266 * 10^{-6} + 6.04 * 0.02 * \left(\frac{0.1}{2} - \frac{0.02}{2}\right)^2 = 0.000197307 m^4.$$

$$\checkmark I_{y, total\ sección\ 1} = 0.367248107 m^4.$$

Podemos observar que en la sección y el momento de área no cambiara, ya que la distancia al centro es 0. Al tener dos secciones iguales, tenemos entonces que el momento total de esta sección será:

$$\checkmark I_{z, total} = 0.000197307 * 2 = 0.00039 m^4.$$

$$\checkmark I_{y, total} = 0.367248107 * 2 = 0.73 m^4.$$

A continuación, tendremos que calcular el momento de área de las secciones restantes. Para ello las dividimos en cuadrados con el siguiente esquema (ver ilustración 40):

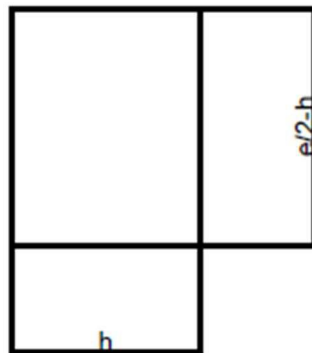


Ilustración 40: Segunda área a analizar.

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

Para esta segunda área, tendremos que los momentos principales con respecto al centro del ancla serán (suponiendo una h inicial de 2 mm, y el espesor el mismo que hemos obtenido en el apartado anterior):

$$\checkmark I_z = \frac{1}{12} * 0.02 * 0.03^3 = 0.000000045 m^4.$$

$$\checkmark I_y = \frac{1}{12} * 0.03 * 0.02^3 = 0.00000002 m^4.$$

Al tener un agujero, se aplicará el término de Steiner, para poder calcular el momento de área con respecto al centro de la sección:

$$\begin{aligned} \checkmark \quad I_{z, \text{ total sección } 1} &= 0.000000045 + 0.03 * 0.02 * \left(\frac{0.02}{2}\right)^2 = 0.00000018 \text{ m}^4. \\ \checkmark \quad I_{y, \text{ total sección } 1} &= 0.00000002 + 0.03 * 0.02 * \left(\frac{6.04}{2} - \frac{0.02}{2}\right)^2 = 0.00543608 \text{ m}^4. \end{aligned}$$

Al ser cuatro secciones iguales multiplicamos la contribución de una de ellas por 4 que tenemos para poder calcular el momento de área total:

$$\begin{aligned} \checkmark \quad I_{z, \text{ total}} &= 0.00000018 * 4 = 0.00000072 \text{ m}^4. \\ \checkmark \quad I_{y, \text{ total}} &= 0.00543608 * 4 = 0.02174432 \text{ m}^4. \end{aligned}$$

Juntando los dos momentos de área de ambas secciones, tendremos que el momento de área total será:

$$\begin{aligned} \checkmark \quad I_{z, \text{ definitivo}} &= 0.00000072 + 0.00039 = 0.000395333 \text{ m}^4 \\ \checkmark \quad I_{y, \text{ definitivo}} &= 0.02174432 + 0.73 = 0.756240533 \text{ m}^4. \end{aligned}$$

Con estos dos momentos de inercia calcularemos de la misma manera la tensión equivalente de Von Mises, siendo esta para este caso:

$$\sigma_{\text{von,mises}} = 779,53 \text{ MPa}$$

Como este valor de tensión equivalente supera al máximo del acero escogido, propondremos un aumento del espesor de la placa, y también del valor de h.

Suponemos un espesor de 110 mm y una h de 3 mm, obteniendo para estos dos valores que la tensión equivalente de Von Mises tendrá un valor de (siguiendo el mismo procedimiento realizado para el dimensionamiento anterior):

$$\sigma_{\text{von,mises}} = 548,16 \text{ MPa}$$

Este valor de tensión equivalente de Von Mises estará en la zona de deformación plástica, por lo que tendremos que evaluar otro dimensionamiento del ancla. Se propone aumentar el espesor a 160 mm y la h a 45 mm, obteniendo la siguiente tensión equivalente de Von Mises:

$$\sigma_{\text{von,mises}} = 241 \text{ MPa}$$

Siendo este valor correcto para nuestro valor admisible del acero F1120. Por lo que las dimensiones finales del ancla serán:

- ✓ Longitud del ancla: 10 m
- ✓ Ancho del ancla: 6.04 m
- ✓ Espesor del ancla: 17 cm.
- ✓ Valor de h: 45 mm

Calculamos el peso del ancla de nuevo:

$$\begin{aligned} P_{\text{Ancla}} &= \rho * V = 7850 * 10 * (6.04 * 0.16 - ((6.04 - 0.045 * 2) * (0.16 - 0.045 * 2))) \\ &= 43.17 \text{ toneladas} \end{aligned}$$

Este valor de peso es mucho más aceptable que el conseguido en el apartado anterior. Por lo que tendremos que los dos modelos de anclas serán (ver ilustración 41 e ilustración 42):

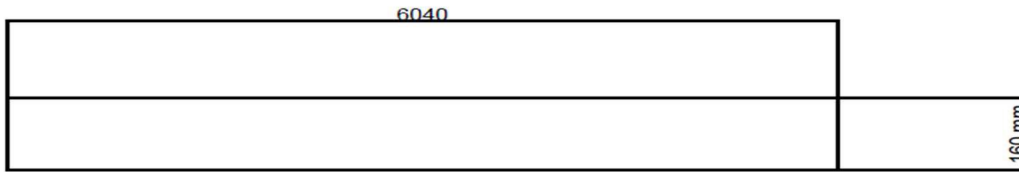


Ilustración 41: Dimensionamiento teórico del ancla. con hipótesis de tensión 1MN en el cableado

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

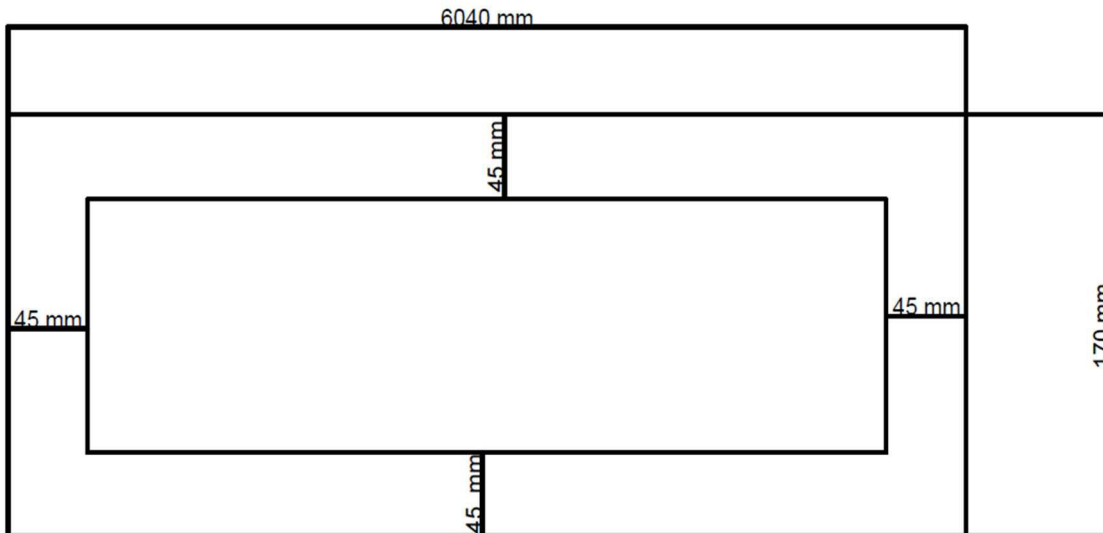


Ilustración 42: Dimensionamiento teórico del ancla con agujero, aplicando la hipótesis del cableado

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

1.1.3. Análisis de elementos finitos con ANSYS sin enganche:

Para el primer caso que hemos calculado teóricamente se ha pasado a un modelo 3D realizado en la aplicación Solid Works, y posteriormente se ha pasado al programa de análisis de elementos finitos (ANSYS). Primeramente, definimos las cargas que va a soportar la estructura, siendo la única carga variable la correspondiente a el peso del ancla. Para pasar los cálculos a ANSYS haremos la proyección de las fuerzas sobre la placa, con el fin de poder introducir las en el programa. Antes definiremos un sistema de coordenadas para el ancla, siendo este el que se puede ver en la siguiente ilustración (ver ilustración 43):

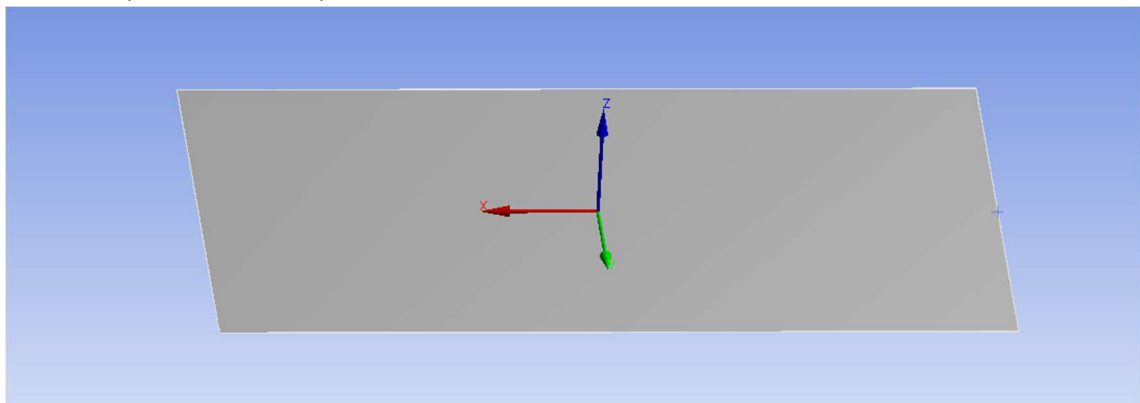


Ilustración 43: Sistema de coordenadas del ancla

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Una vez sabemos el sistema de coordenadas calcularemos las fuerzas anteriormente descrita:

- ✓ Cargas debidas al cableado:
 - $F_{cableado, eje x} = 706.912 * \cos(32) - 706.912 * \text{sen}(32) = -224.88 \text{ KN}$
 - $F_{cableado, eje z} = 706.912 * \cos(32) + 706.912 * \text{sen}(32) = 974.1 \text{ KN}$
- ✓ Peso propio del ancla:
 - $W_{ancla, eje x} = -4058789,4 * e * \text{sen}(32) \text{ KN}$
 - $W_{ancla, eje z} = -4058789,4 * e * \cos(32) \text{ KN}$
- ✓ Peso de la arena:
 - $W_{arena, eje x} = -665,608 * \text{sen}(32) = -352,718 \text{ KN}$
 - $W_{arena, eje z} = -665,608 * \cos(32) = -564.46 \text{ KN}$
- ✓ Fuerza Lateral del pavimento:
 - $F_{pavimento, eje x} = 706.12 * \cos(32) = 599.49 \text{ KN}$
 - $F_{pavimento, eje z} = -706.12 * \text{sen}(32) = -374,18 \text{ KN}$

Por lo que, para los distintos espesores, iremos evaluando los resultados obtenidos. Empezamos por el primer caso que obtuvimos teóricamente:

- ✓ **Espesor= 10 mm:** Tendremos entonces que las fuerzas debido al peso del ancla serán:
 - $W_{ancla, eje x} = -21,51 \text{ KN}$
 - $W_{ancla, eje z} = -34,420 \text{ KN}$

Para este espesor obtenemos la siguiente solución del ensayo (ver ilustración 44):

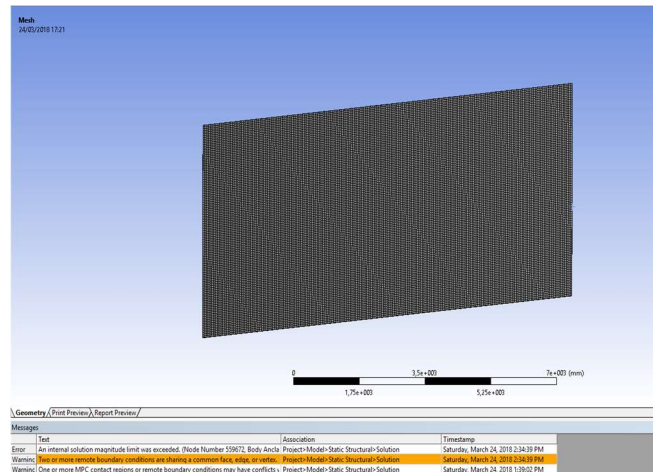


Ilustración 44: Esfuerzos para 10 mm.

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Para este caso, obtenemos un mensaje de error al ser excesivo la resistencia de Von Mises equivalente, por lo que desechamos la posibilidad de este espesor, al no poder compararlo con el caso teórico.

- ✓ **Espesor de 30 mm:** Tendremos entonces que las fuerzas debido al peso del ancla serán:
 - $W_{ancla, eje x} = -64,52 \text{ KN}$
 - $W_{ancla, eje z} = -103.26 \text{ KN}$

Para este espesor obtenemos la siguiente solución del ensayo (ver ilustración 45):

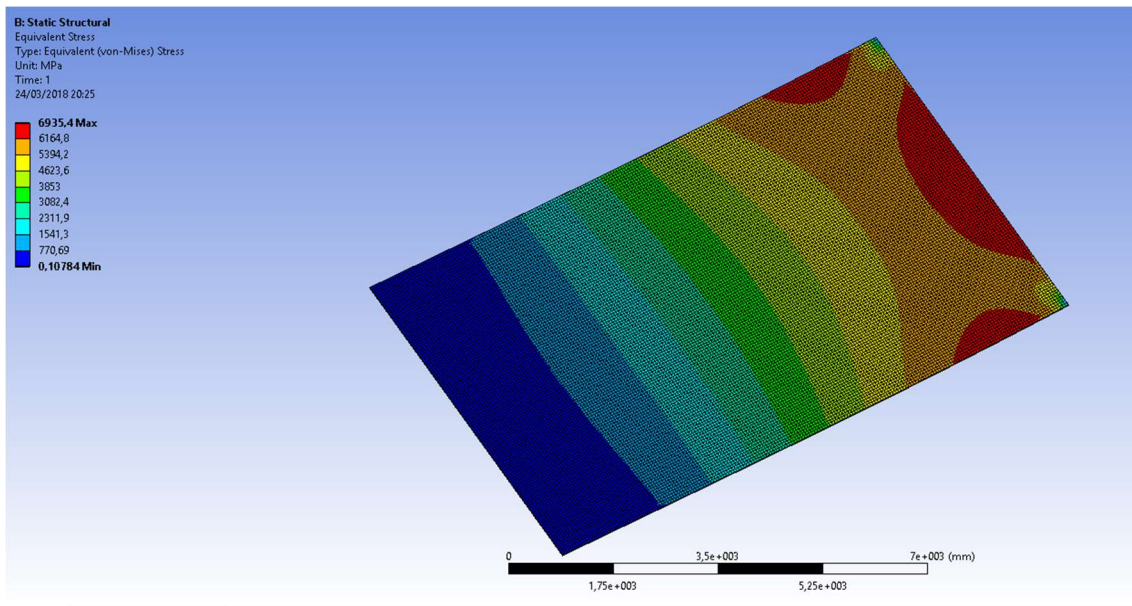


Ilustración 45: Esfuerzos equivalentes de Von Mises para un espesor de 30 mm

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Como podemos observar en la imagen, tendremos que la tensión máxima de Von mises es de 6935 MPa, siendo similar a lo obtenido en los cálculos teóricos que se han realizado anteriormente. Podemos decir que este resultado está muy lejos del óptimo por lo que se propone otro modelo de ancla con distinto espesor.

✓ **Espesor 10 cm:**

- $W_{ancla, eje x} = -215,083 \text{ KN}$
- $W_{ancla, eje z} = -344,204 \text{ KN}$

Para este espesor obtenemos la siguiente solución del ensayo (ver ilustración 46):

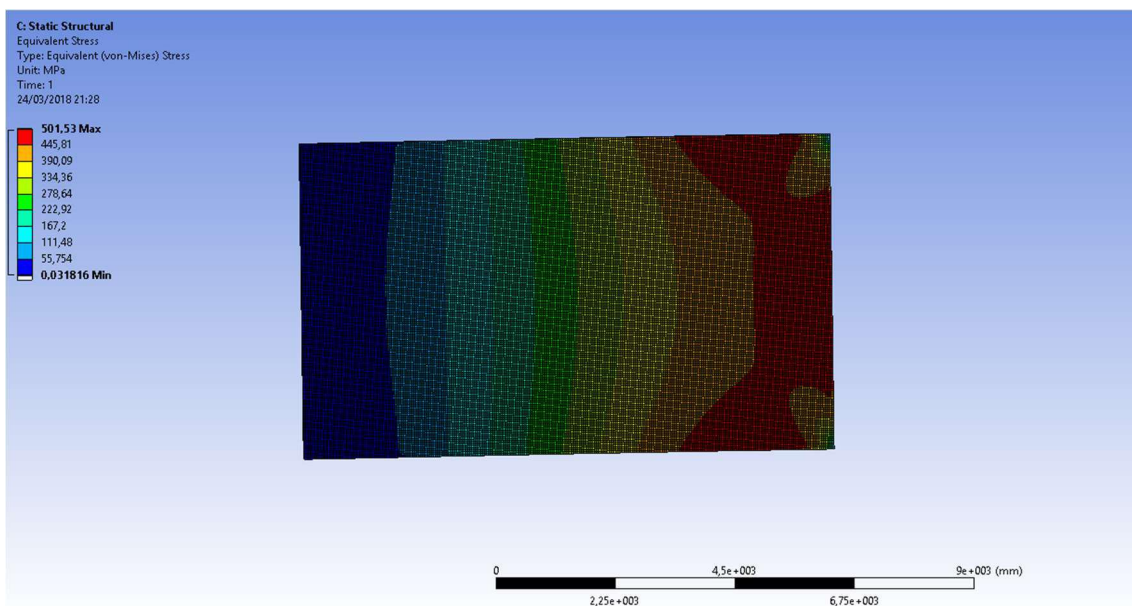


Ilustración 46: Esfuerzos equivalentes de Von Mises para un espesor de 10 cm

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Se puede observar que la tensión equivalente de Von Mises se encuentra entre los valores que son admisibles para el acero elegido, por lo que podríamos considerar como válida esta ancla. Difiere en 80 MPa con los cálculos teóricos que se calcularon previamente. Esta zona está dentro de los límites de rotura del material, y según la siguiente imagen (ver ilustración 47), podemos observar que la deformación en ese punto es muy baja, por lo que tendremos que analizar los puntos de mayor deformación:

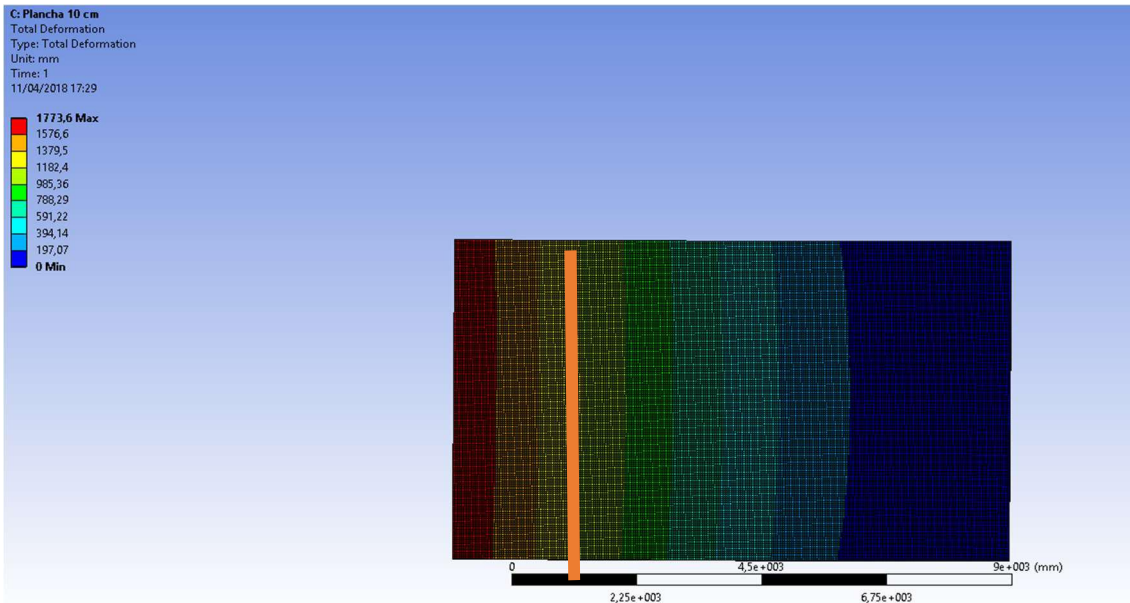


Ilustración 47: Deformación producida en el ancla de 10 cm

Fuente: *Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS*

Se puede observar en la imagen, que la zona de máxima deformación se encuentra en la zona de contacto con los cables, siendo en esa zona la concentración de tensiones mínima. Por lo que se estudiará una zona intermedia de la placa. Se puede observar en la ilustración, la zona a observar, obteniendo para esta zona una tensión en el intervalo de 253-285 MPa y una deformación de entre 0.7-0.9 m, siendo este valor muy alto para una deformación plástica. Por lo que se propone otro modelo con un espesor de ancla de 16 cm:

- ✓ **Espesor 16 cm:**
 - $W_{ancla, eje x} = -344.2 \text{ KN}$
 - $W_{ancla, eje z} = -550.73 \text{ KN}$

Para este espesor obtenemos la siguiente solución del ensayo (ver ilustración 48):

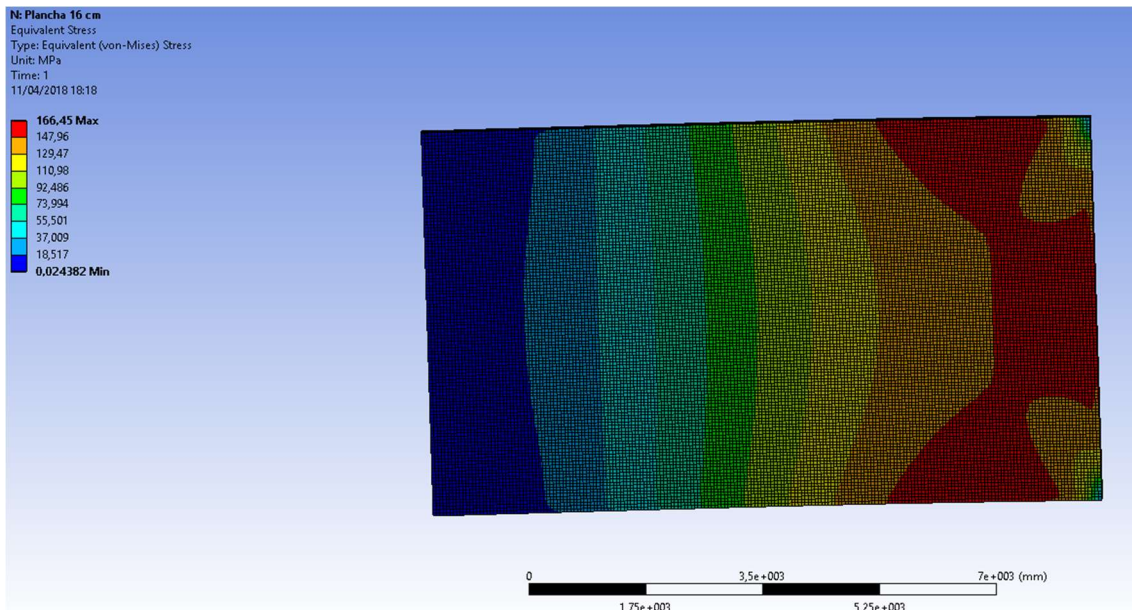


Ilustración 48: Esfuerzos equivalentes de Von Mises para el ancla de 16 cm

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que el límite equivalente es de 166 MPa como máximo y además en la zona de máxima concentración de deformaciones (ver ilustración 49), tendremos deformaciones muy pequeñas. Cabe destacar la zona intermedia, en la cual ya no superaremos el límite elástico del material, por lo tanto, no deformará plásticamente:

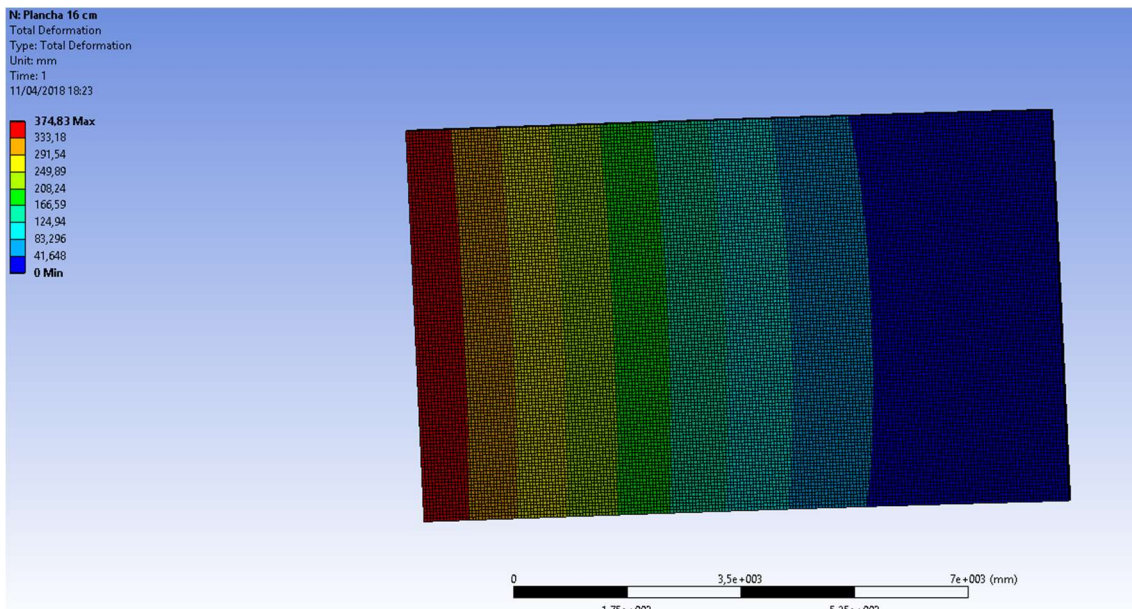


Ilustración 49: Deformación producida en el ancla de 16 cm

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Por lo que se puede comprobar, la dimensión teórica y la obtenida por análisis de elementos finitos coinciden, siendo este modelo de placa el idóneo. Como se calculó con anterioridad en los

cálculos teóricos, tenemos que reducir el peso del ancla, realizando un agujero. Se realizarán los ensayos de elementos finitos de los siguientes casos de ancla con agujero:

- ✓ **Primer caso teórico:** Con las siguientes dimensiones del ancla:
 - Longitud del ancla: 10 m
 - Ancho del ancla: 6.04 m
 - Espesor del ancla: 10 cm.
 - Valor de h: 20 mm

Se puede observar en la siguiente imagen, la tensión equivalente de Von Mises (ver ilustración 50):

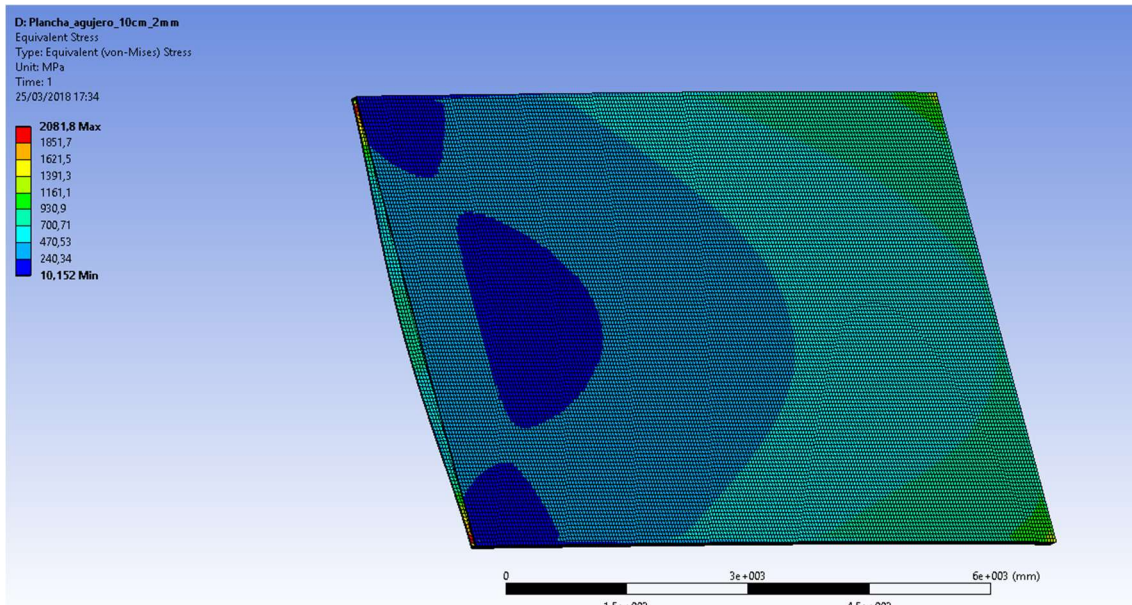


Ilustración 50: Resultados del análisis para el primer dimensionamiento

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que la tensión equivalente de Von Mises es de 2081,1 MPa, en la zona de las esquinas del ancla, por lo que se verá la deformación en estos puntos para evaluar si es excesiva, además de mirar en el punto de mayor momento flector, que teóricamente está situado a un tercio del empotramiento. Para ello sacamos la deformación que se muestra a continuación (ver ilustración 51):

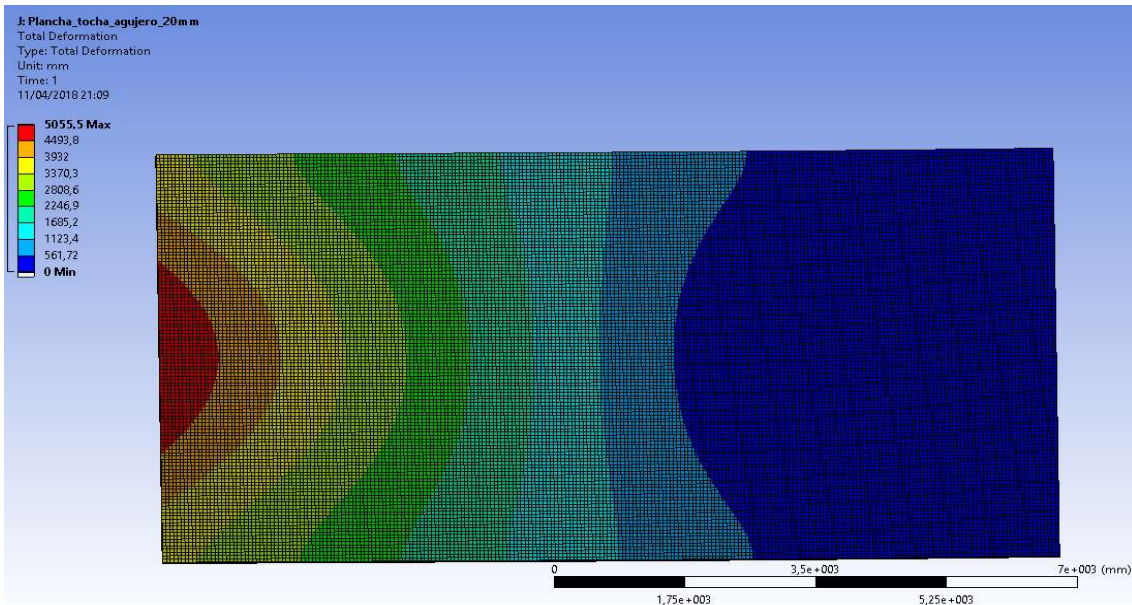


Ilustración 51: Deformación producida en el primer dimensionamiento

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos ver que la máxima deformación se produce en la zona de anclaje de los cables al ancla, siendo la deformación 3.3 metros, valor muy alto para una deformación. Por lo que se propone el siguiente dimensionamiento:

- ✓ **Segundo caso teórico: Con las siguientes dimensiones del ancla:**
 - Longitud del ancla: 10 m
 - Ancho del ancla: 6.04 m
 - Espesor del ancla: 11 cm.
 - Valor de h: 30 mm

Se tendrá que el valor de la tensión equivalente de Von Mises será (ver ilustración 52):

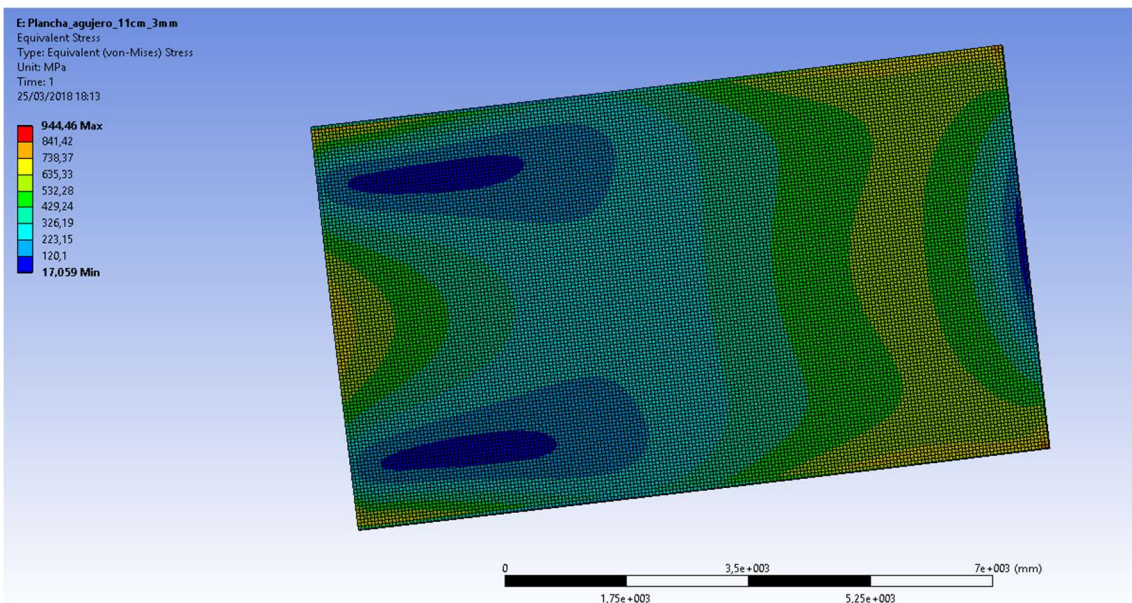


Ilustración 52: Tensión equivalente de Von Mises correspondiente al segundo dimensionamiento

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Se puede observar que la tensión equivalente obtenida es todavía superior a la que podemos admitir para el acero F1120, y además como podemos observar en la siguiente imagen (ver ilustración 53), la deformación para este punto con deformación plástica es de 2,2 metros:

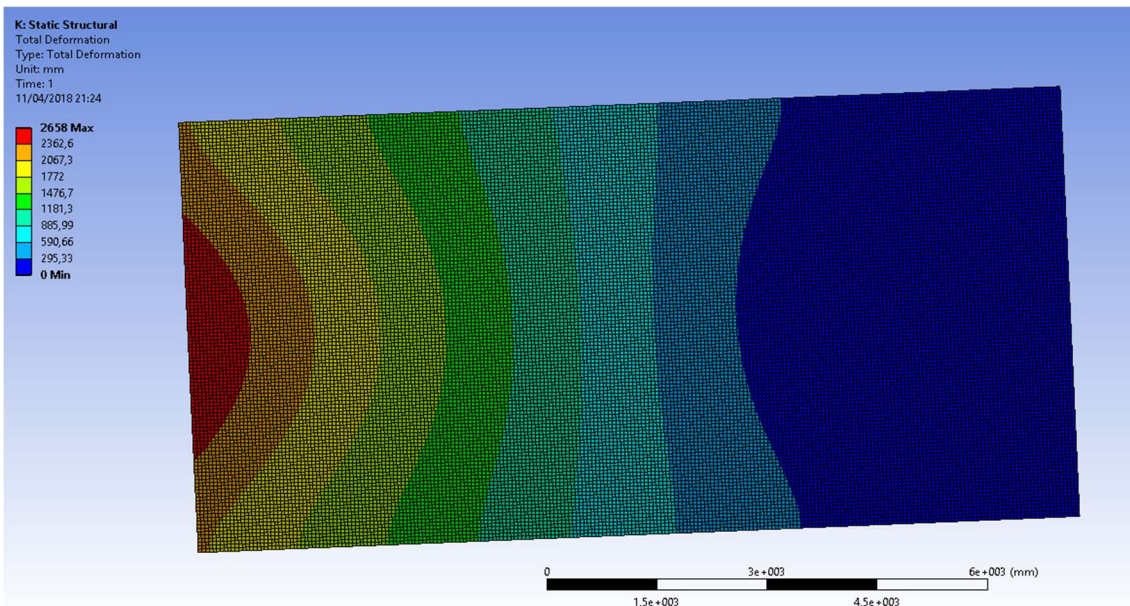


Ilustración 53: Deformación correspondiente al segundo dimensionamiento

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Por lo que se propone un tercer dimensionamiento del ancla, con el objetivo de que se ajuste a los valores de la tensión admisible anteriormente descritos:

- ✓ **Tercer caso:** Con las siguientes dimensiones del ancla:
 - Longitud del ancla: 10 m
 - Ancho del ancla: 6.04 m
 - Espesor del ancla: 13 cm.
 - Valor de h: 35 mm

Se tendrá que el valor de la tensión equivalente de Von Mises será (ver Ilustración 54):

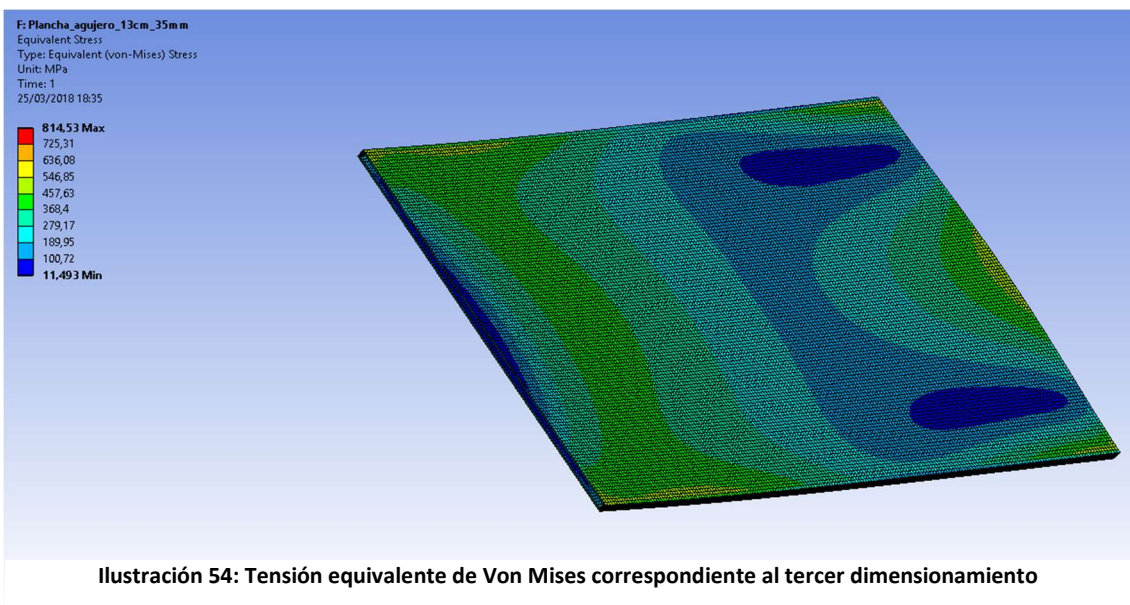


Ilustración 54: Tensión equivalente de Von Mises correspondiente al tercer dimensionamiento

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Se observa que la tensión es todavía muy alta y con un valor de 814 MPa y además como podemos observar en la siguiente imagen (ver ilustración 55), la deformación que se produce en la zona de los 814 MPa no es apreciable, pero debemos analizar la zona de máxima deformación que corresponde con la zona de unión con los cables de la estructura. Para esa zona tendremos una acumulación de tensiones entre 457 – 546 MPa, por lo que tendremos deformación plástica, y mirando en la imagen siguiente, podemos deducir:

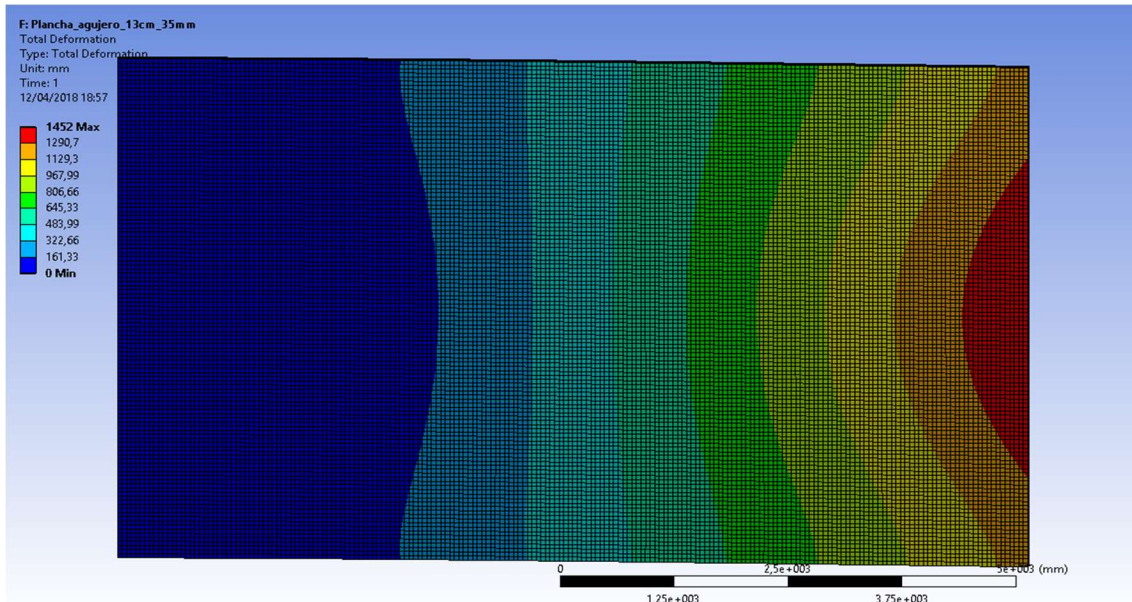


Ilustración 55: Deformación correspondiente al tercer dimensionamiento

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que la deformación en estas zonas es de 1.4 m por lo que no es admisible tal deformación que podría provocar que los cables de la estructura se destensaran. Por lo que se propone otro dimensionamiento, con el fin de poder reducir las tensiones en estos puntos, junto con la deformación asociada a los mismos.

Por lo que se propondrá un o dimensionamiento en el que se aumentará el espesor del ancla, con el fin de conseguir una tensión admisible adecuada:

- ✓ **Cuarto caso:** Con las siguientes dimensiones del ancla:
 - Longitud del ancla: 10 m
 - Ancho del ancla: 6.04 m
 - Espesor del ancla: 16 cm.
 - Valor de h: 35 m.

Se tendrá que el valor de la tensión equivalente de Von Mises será (ver ilustración 56):

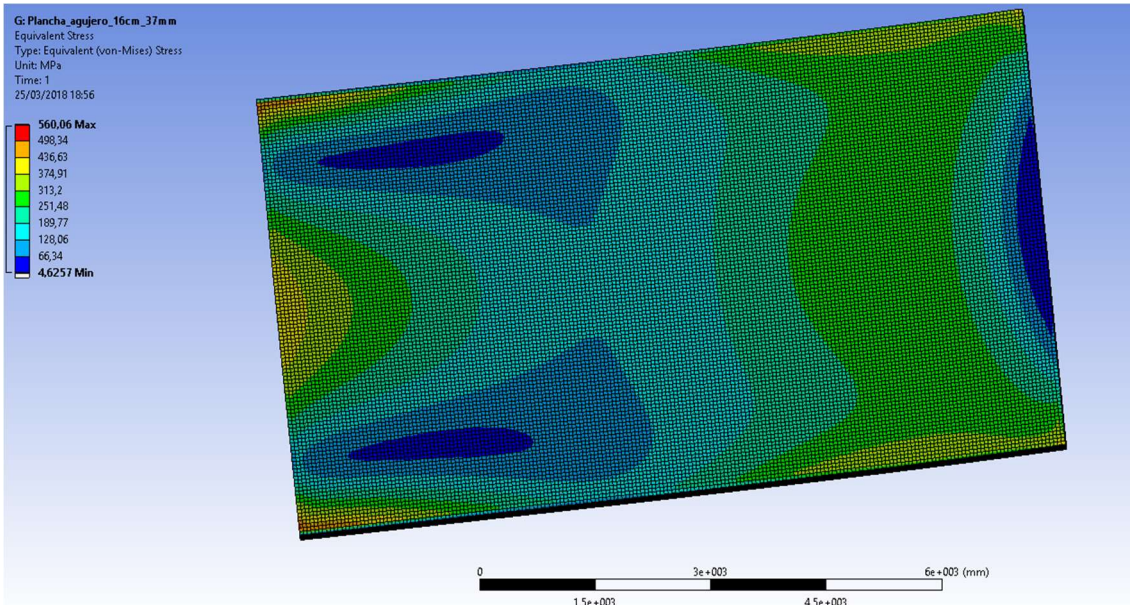


Ilustración 56: Tensión equivalente de Von Mises correspondiente al cuarto dimensionamiento

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que la máxima tensión se produce nuevamente en las esquinas, correspondiendo a una deformación que podemos ver en la siguiente imagen (ver ilustración 57), la deformación en estos puntos es de 0.5 metros, siendo todavía no admisible para nuestro caso de estudio. Por lo que se propone el último dimensionamiento:

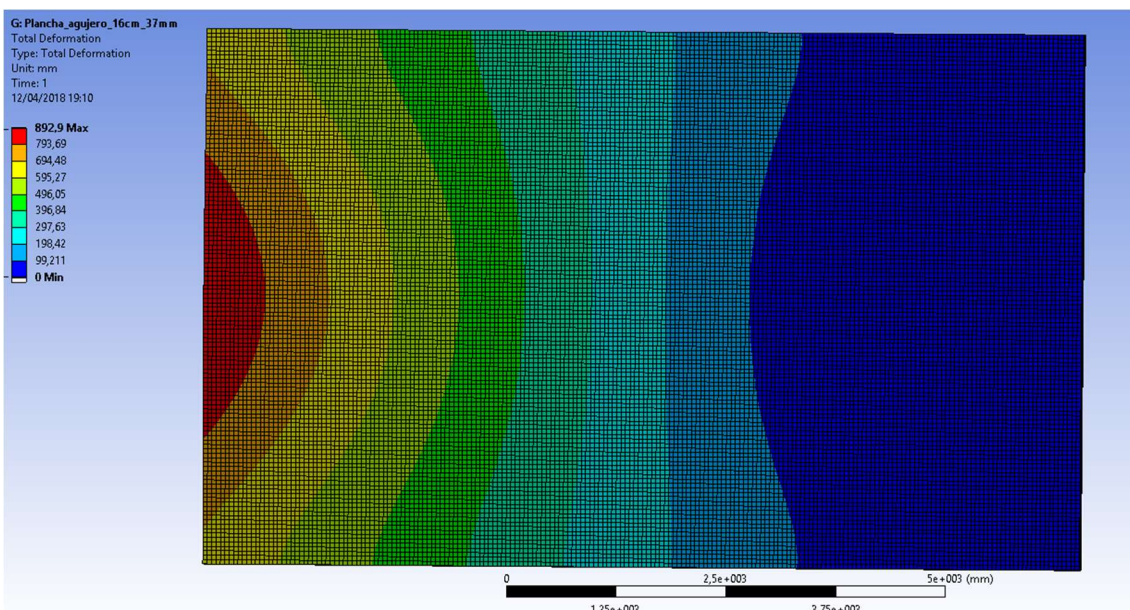


Ilustración 57: Deformación correspondiente al cuarto caso de dimensionamiento

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Por lo que se propondrá otro modelo de placa, correspondiente al último caso distinto al teórico, con el fin de obtener el ancla final:

- ✓ **Quinto caso teórico:** Con las siguientes dimensiones del ancla:
 - Longitud del ancla: 10 m

- Ancho del ancla: 6.04 m
- Espesor del ancla: 21 cm.
- Valor de h: 51 mm

Se tendrá que el valor de la tensión equivalente de Von Mises será (ver ilustración 58):

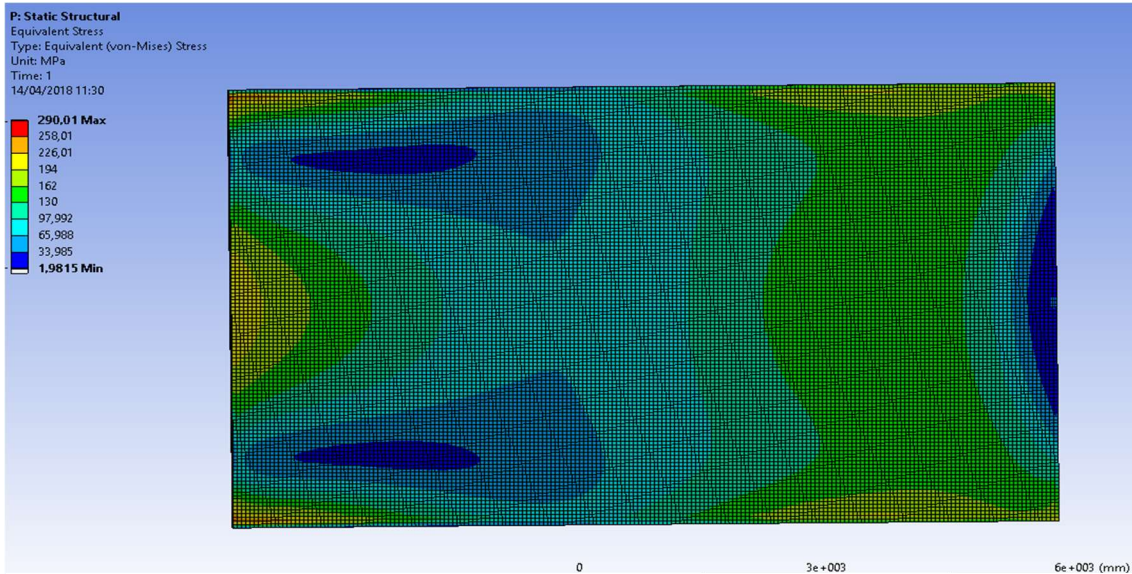


Ilustración 58: Valor de la tensión de Von Mises equivalente del quinto dimensionamiento

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que la máxima concentración de tensiones se produce en las esquinas, siendo su valor de 290 MPa, produciéndose una deformación plástica, que podemos observar en la siguiente imagen (ver ilustración 59), siendo el valor de esta para estos puntos de 0.23 metros, siendo este valor aceptable para esta deformación. También analizando la zona de anclaje de los cables, se puede observar que estaremos dentro de la zona elástica, por lo que no habrá problemas con la tensión del cableado de sujeción de la torre.

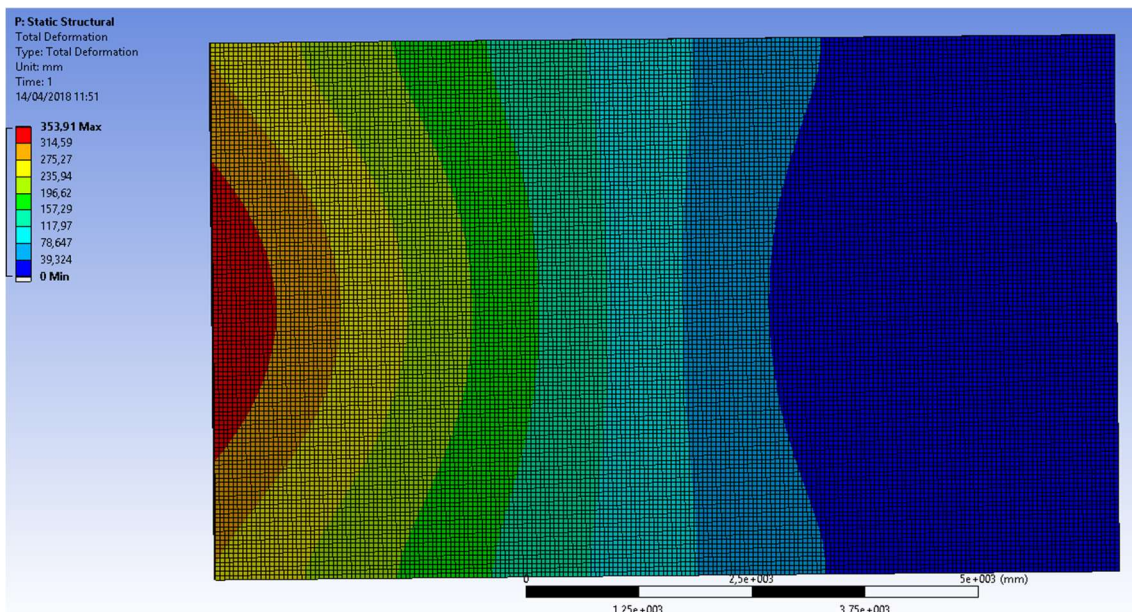


Ilustración 59: Deformación total producida en el quinto dimensionamiento

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Calculamos de nuevo el peso de ancla con los parámetros obtenidos en el cuarto caso:

$$P_{Ancla} = \rho * V = 7850 * 10 * (6.04 * 0.21 - ((6.04 - 0.051 * 2) * (0.21 - 0.051 * 2))) \\ = 49.22 \text{ toneladas}$$

Finalmente se exponen las dos anclas con las dimensiones adecuadas para soportar las fuerzas con y sin el agujero aplicado al ancla (ver ilustración 60 e ilustración 61):

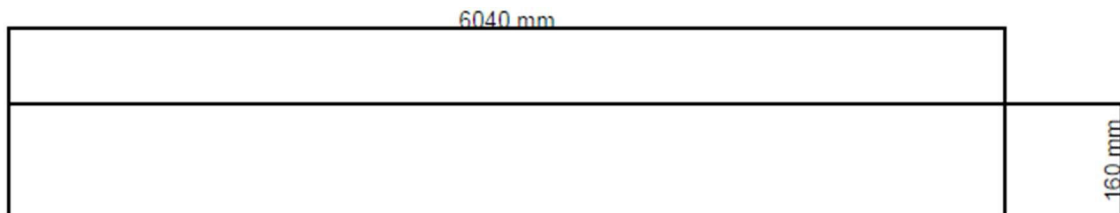


Ilustración 60: Dimensiones del ancla maciza final con carga de 1 MN

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

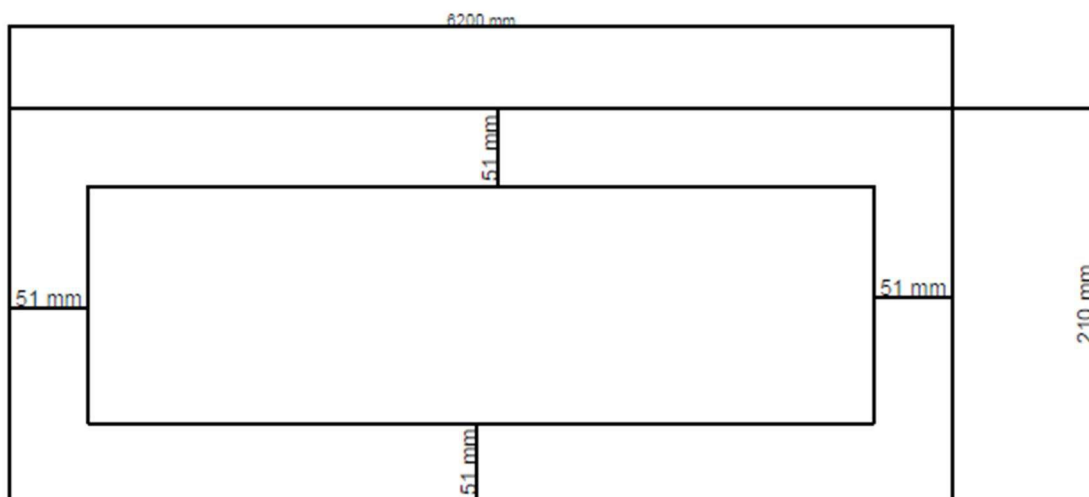


Ilustración 61: Dimensiones del ancla con agujero final con carga de 1 MN

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

1.1.4. Diseño del enganche del ancla, con tensión de los cables de 1MN:

Se ha hecho un modelo en SolidWorks (ver ilustración 62), con un diseño del posible enganche que tendría el ancla con la zona del cableado de la torre. Para ello se ha tomado el ancla dimensionada en el apartado anterior, y se ha metido en ANSYS, con el mismo valor de fuerzas. Una vez realizado los ensayos en ANSYS, se ha obtenido los resultados de tensión equivalente como podemos ver en la siguiente imagen (ver ilustración 63), para los datos que se muestran a continuación:

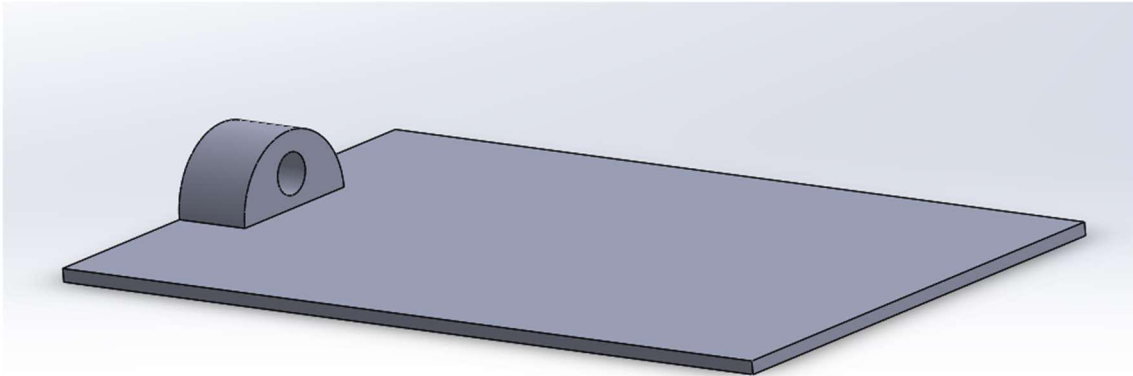


Ilustración 62: Diseño del enganche de los cables del aerogenerador

Fuente: Elaboración propia en SolidWorks

- ✓ **Primer caso:** tendremos las siguientes dimensiones del ancla
- Longitud del ancla: 10 m
 - Ancho del ancla: 6.04 m
 - Espesor del ancla: 16 cm.

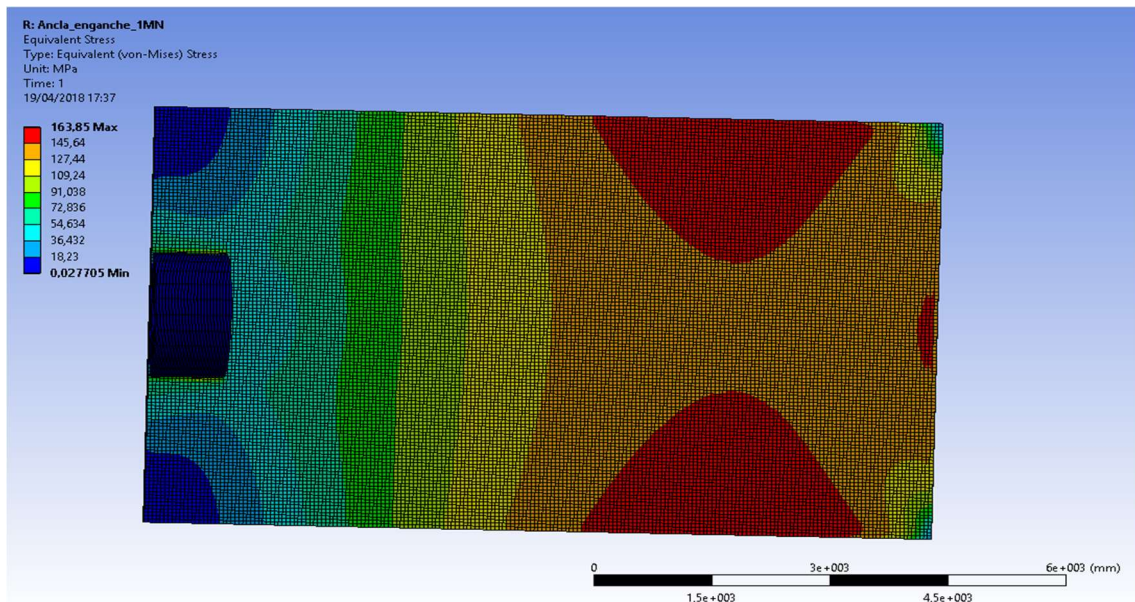


Ilustración 63: Tensión equivalente de Von Mises para el ancla maciza con enganche

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que en ningún caso superamos el límite plástico del material, que como se definió anteriormente era de 250 MPa, por lo que tendremos que ante el diagrama de deformaciones de la siguiente imagen (ver ilustración 64), todo lo deformado por las fuerzas aplicadas será plástico, por lo que volverá a su estado original tras aplicar la carga.

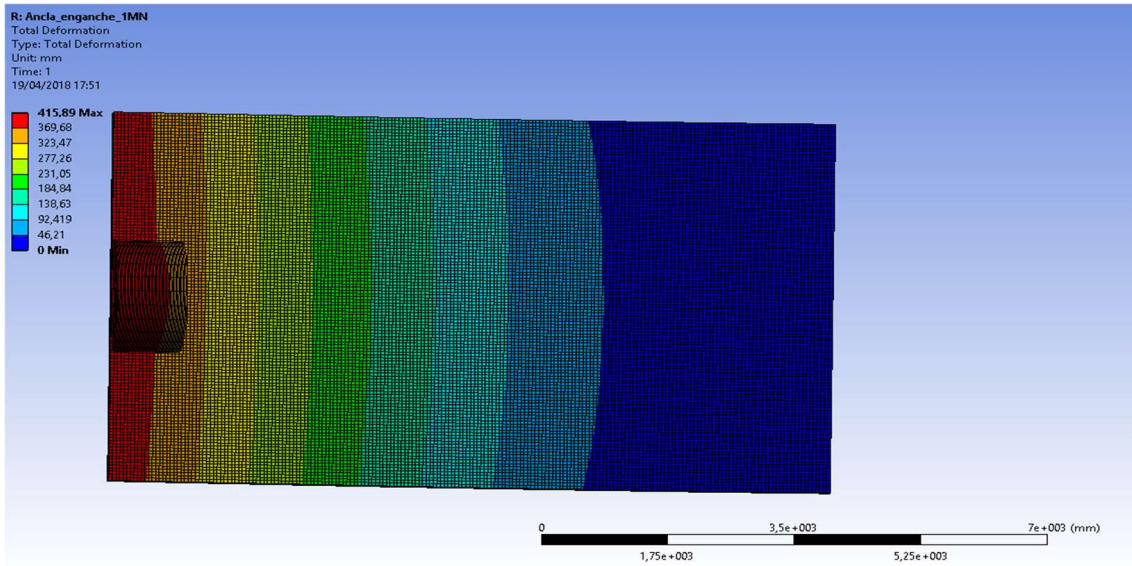


Ilustración 63: Deformación producida al aplicar las fuerzas determinadas en apartados anteriores

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Calculamos el peso del ancla con el enganche incluido:

$$P_{Ancla} = \rho * (V + V_{enganch}) = 7850 * (7,224 + 1.44) = 68.012 \text{ toneladas}$$

Una vez determinado el enganche para la placa primera sin optimizar, se diseñará un enganche para el ancla optimizada. Tendremos entonces:

- ✓ **Primer caso:** tendremos las siguientes dimensiones del ancla
 - Longitud del ancla: 10 m
 - Ancho del ancla: 6.04 m
 - Espesor del ancla: 21 cm.
 - Valor de h: 51 mm

Para estas dimensiones del ancla se ha obtenido que la tensión equivalente del ancla es la que podemos observar en la siguiente imagen (ver ilustración 65):

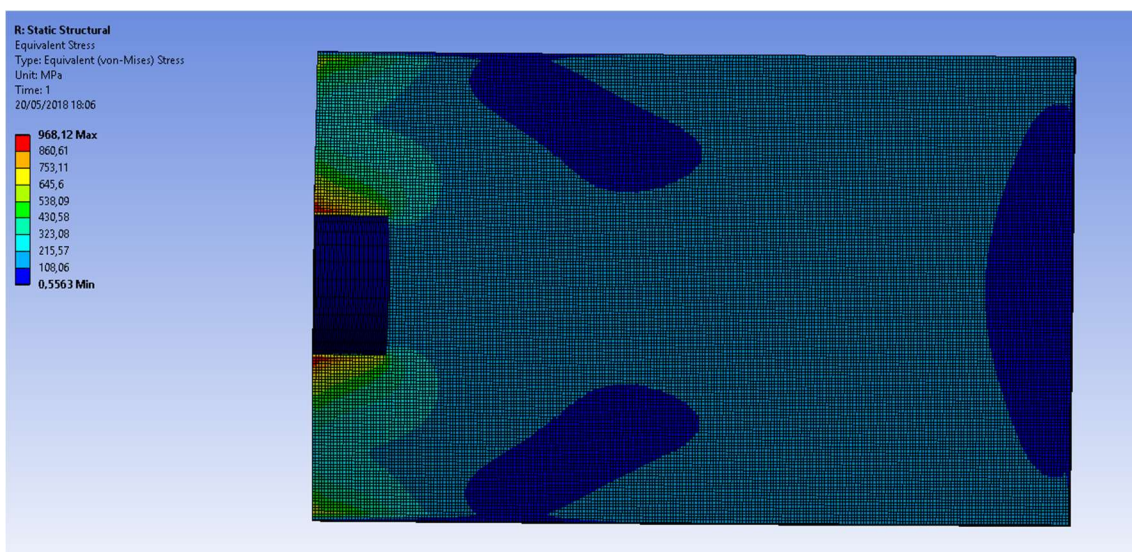


Ilustración 64: Tensión equivalente obtenida tras el primer caso

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que la tensión equivalente de Von Mises, nos da muy superior a los 250 del límite elástico, mostrando que el ancla rompería por los extremos de color rojo. También tendremos que en esos puntos obtendremos una deformación muy alta, como podemos observar en la siguiente imagen (ver ilustración 66):

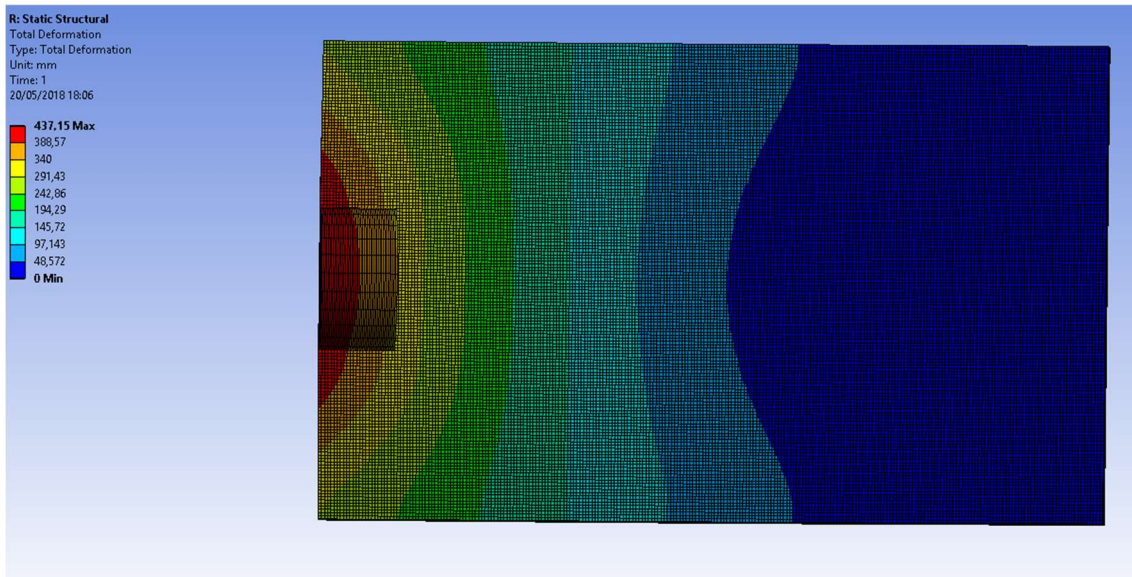


Ilustración 65: Deformación total obtenida tras el primer caso

Fuente: *Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS*

Tras ver los resultados obtenidos en el ensayo, se propondrá otro caso, aumentando el ancho y el valor de h del ancla:

- ✓ **Segundo Caso:** tendremos las siguientes dimensiones del ancla
 - Longitud del ancla: 10 m
 - Ancho del ancla: 6.04 m
 - Espesor del ancla: 25 cm.
 - Valor de h: 61 mm

Para estas dimensiones del ancla se ha obtenido que la tensión equivalente del ancla es la que podemos observar en la siguiente imagen (ver ilustración 67):

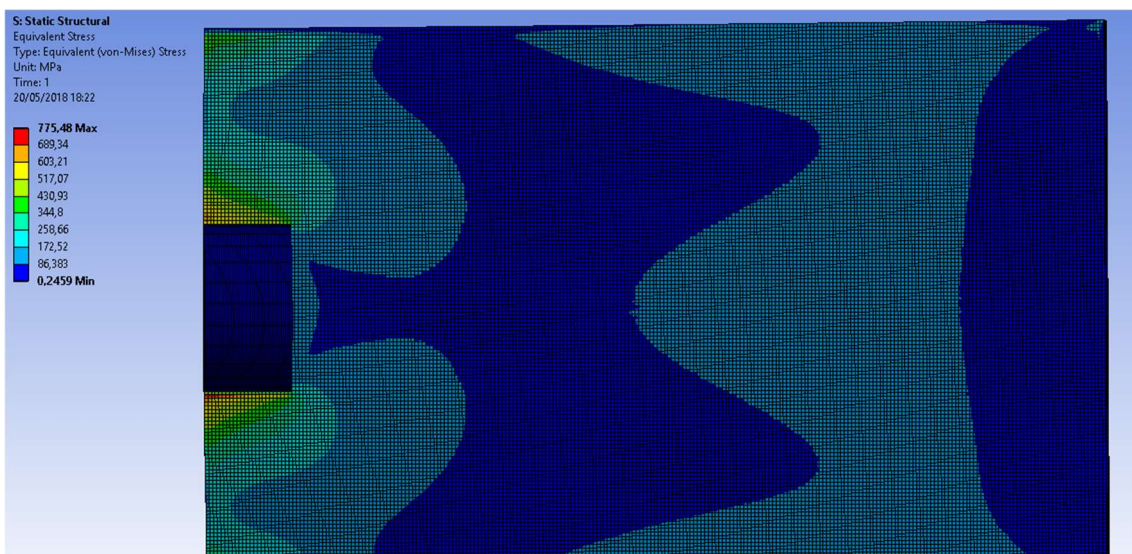


Ilustración 66: Tensión total obtenida tras el segundo caso

Fuente: *Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS*

Podemos observar que la tensión equivalente sigue siendo muy alta, rompiendo el ancla por la zona de unión. Por lo que tendremos que proponer otro ensayo, en el cual se incluirá un mecanizado en el cual, tendremos que, en la zona del anclaje, se dejara sin mecanizar, permitiendo así reducir las tensiones equivalentes obtenidas. Se muestra en la siguiente imagen un esquema del modelo propuesto (ver ilustración 68 e ilustración 69):

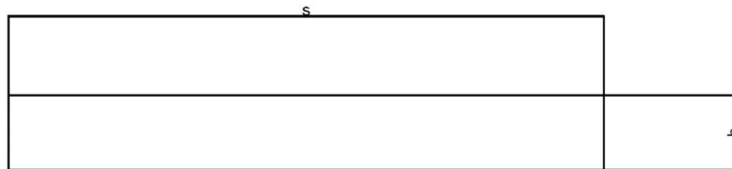


Ilustración 67: Esquema del trozo de metal sin mecanizar

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSY

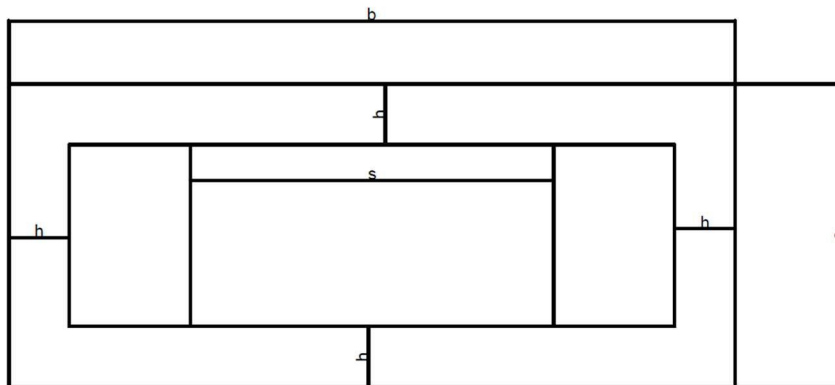


Ilustración 68: Esquema del ancla con el trozo de metal sin mecanizar

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Siendo:

- ✓ h: Mismo valor que el especificado en el ancla.
- ✓ s: valor del largo.
- ✓ p: profundidad del trozo de metal.

Para todos los casos se analizará el ancla con los siguientes valores constantes, siendo el único valor variable el valor de h:

- ✓ s: 1800 mm.
- ✓ p: 950 mm.

Una vez propuesto este modelo, tendremos los siguientes casos:

- ✓ **Primer Caso:** tendremos las siguientes dimensiones del ancla
 - Longitud del ancla: 10 m
 - Ancho del ancla: 6.04 m
 - Espesor del ancla: 25 cm.
 - Valor de h: 60 mm

Para estas dimensiones del ancla se ha obtenido que la tensión equivalente del ancla es la que podemos observar en la siguiente imagen (ver ilustración 70):

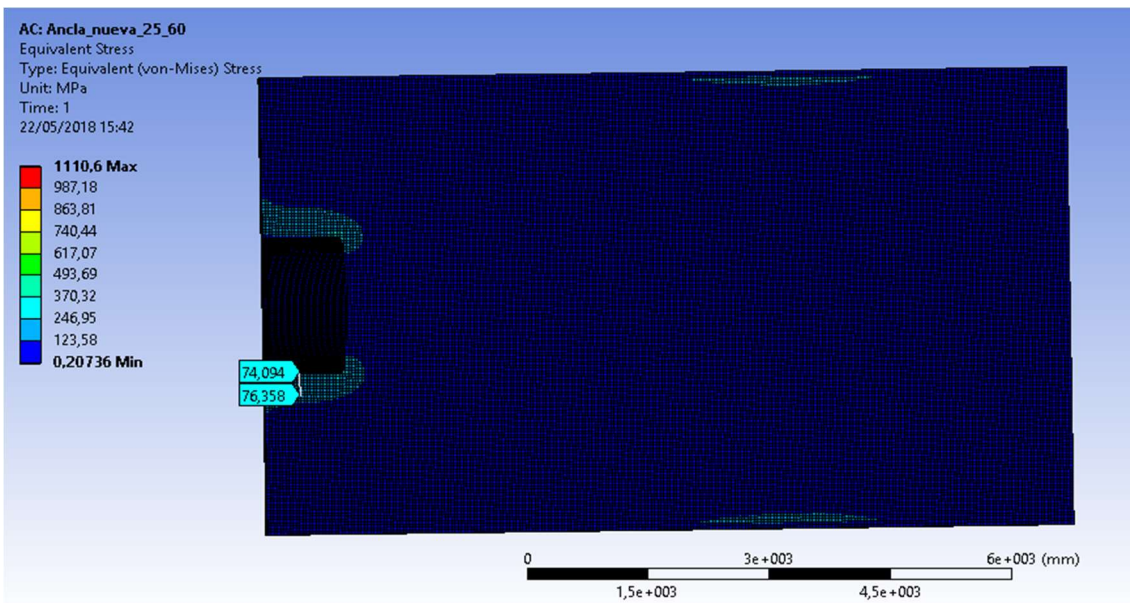


Ilustración 69: Tensión total obtenida tras el primer caso

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que la tensión equivalente de Von Mises estará dentro de los parámetros en las zonas de mayor deformación que podemos ver en la siguiente imagen (ver ilustración 71), pero tendremos una acumulación de tensiones con rotura en las esquinas de la unión del enganche, por lo que se ha propuesto un segundo caso para poder reducir esta tensión a límites elásticos:

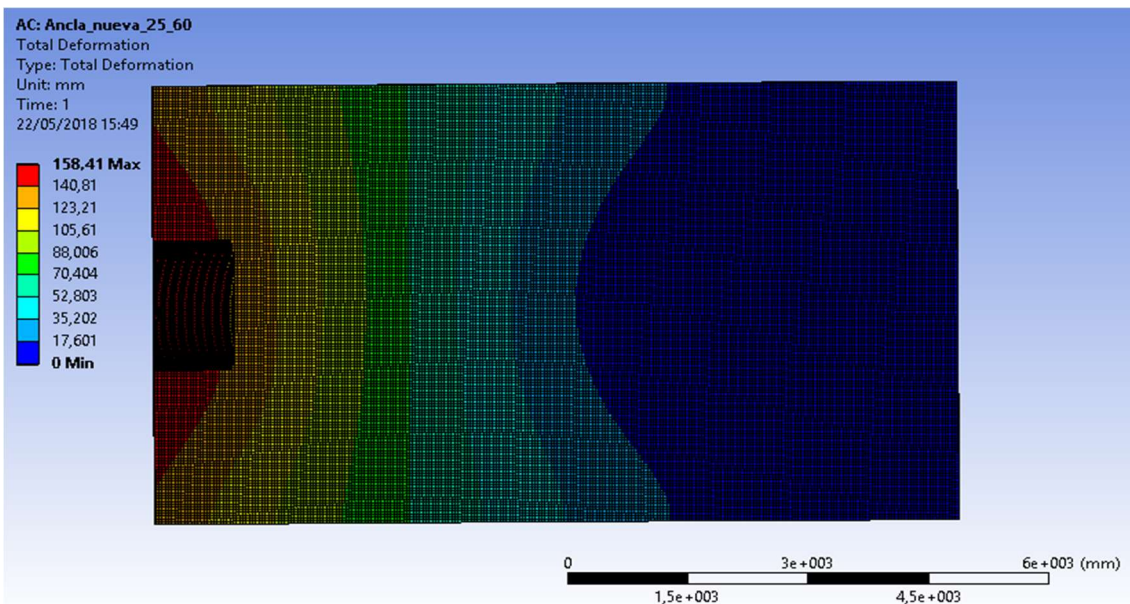


Ilustración 70: Deformación total obtenida tras el primer caso

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

- ✓ **Segundo caso:** tendremos las siguientes dimensiones del ancla
 - Longitud del ancla: 10 m
 - Ancho del ancla: 6.04 m
 - Espesor del ancla: 27 cm.
 - Valor de h: 60 mm

Para estas dimensiones del ancla se ha obtenido que la tensión equivalente del ancla es la que podemos observar en la siguiente imagen (ver ilustración 72):

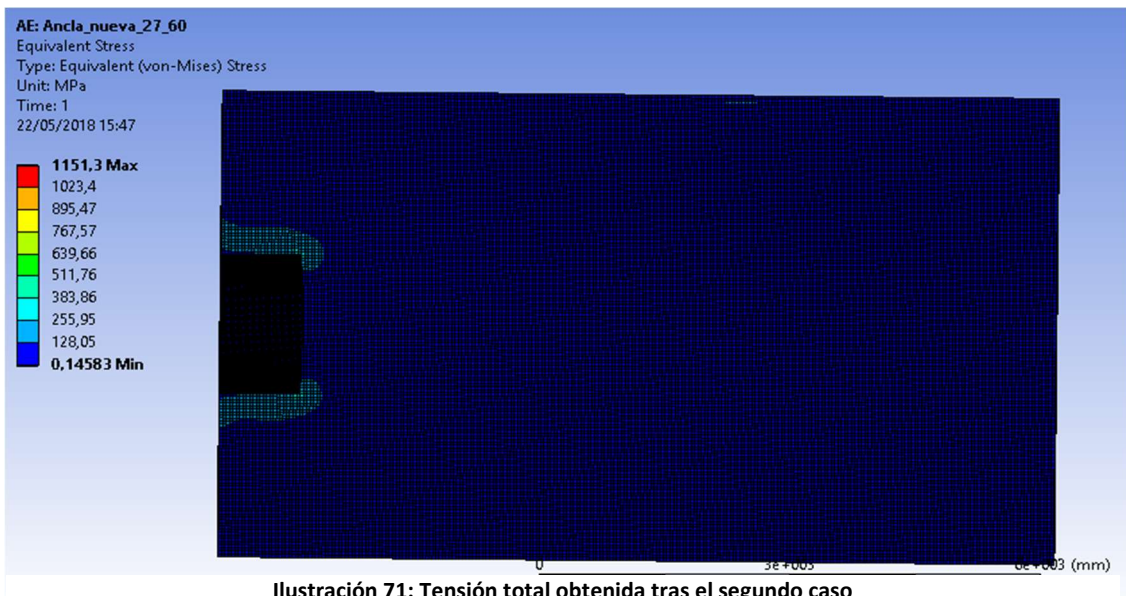


Ilustración 71: Tensión total obtenida tras el segundo caso

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que, al aumentar el ancho, no mejoramos la situación en los puntos de tensión, por lo que se propondrá el siguiente dimensionamiento (ver ilustración 73):

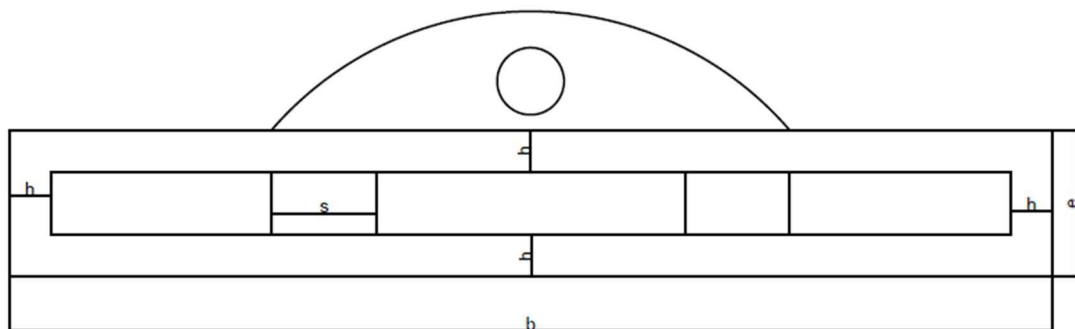


Ilustración 72: Propuesta dimensiones del ancla con carga de 1 MN

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

Tenemos que los siguientes valores para el primer caso:

- ✓ **Primer caso:** tendremos las siguientes dimensiones del ancla
 - Longitud del ancla: 10 m
 - Ancho del ancla: 6.04 m

- Espesor del ancla: 20 cm.
- Valor de h: 55 mm
- Valor de s: 300 mm

Para estas dimensiones se ha obtenido los siguientes valores de tensión equivalente de Von Mises (ver ilustración 74):

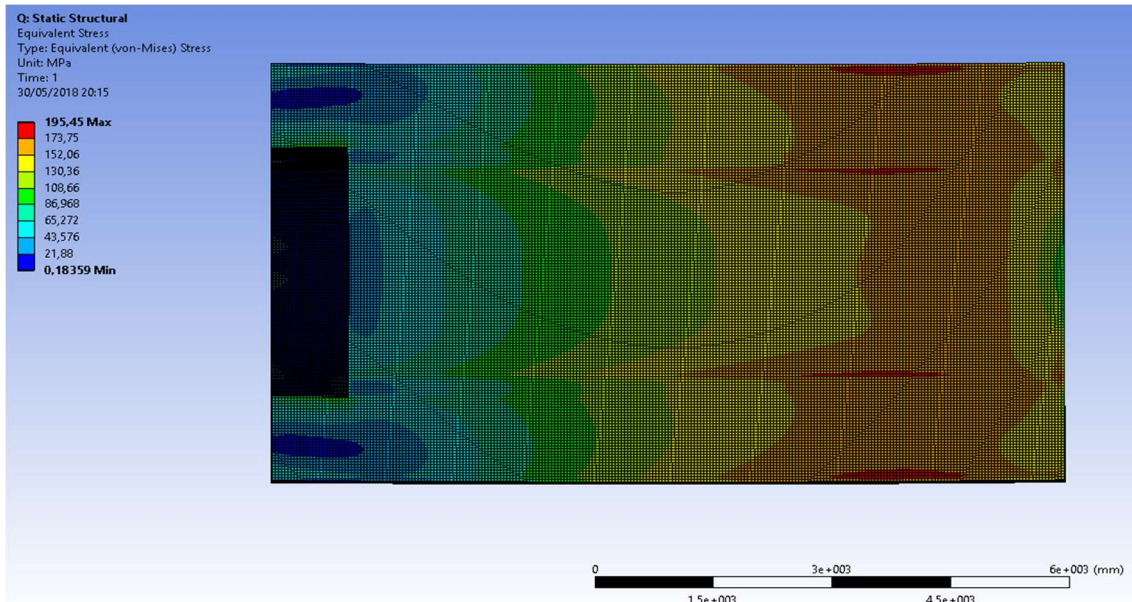


Ilustración 73: Tensión total obtenida tras el primer caso

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar en la imagen anterior, que la tensión de Von Mises equivalente está en los límites de la tensión elástica de 250 MPa, por lo que tendremos que este ensayo es válido. Con el fin de optimizar el peso todavía más, se propone un nuevo caso, con el fin de obtener un peso del ancla todavía menor:

- ✓ **Segundo caso:** tendremos las siguientes dimensiones del ancla
 - Longitud del ancla: 10 m
 - Ancho del ancla: 6.04 m
 - Espesor del ancla: 18 cm.
 - Valor de h: 40 mm
 - Valor de s: 300 mm

Con estas dimensiones, se ha obtenido la tensión equivalente de Von Mises, que podemos ver en la siguiente imagen: (ver ilustración 75):

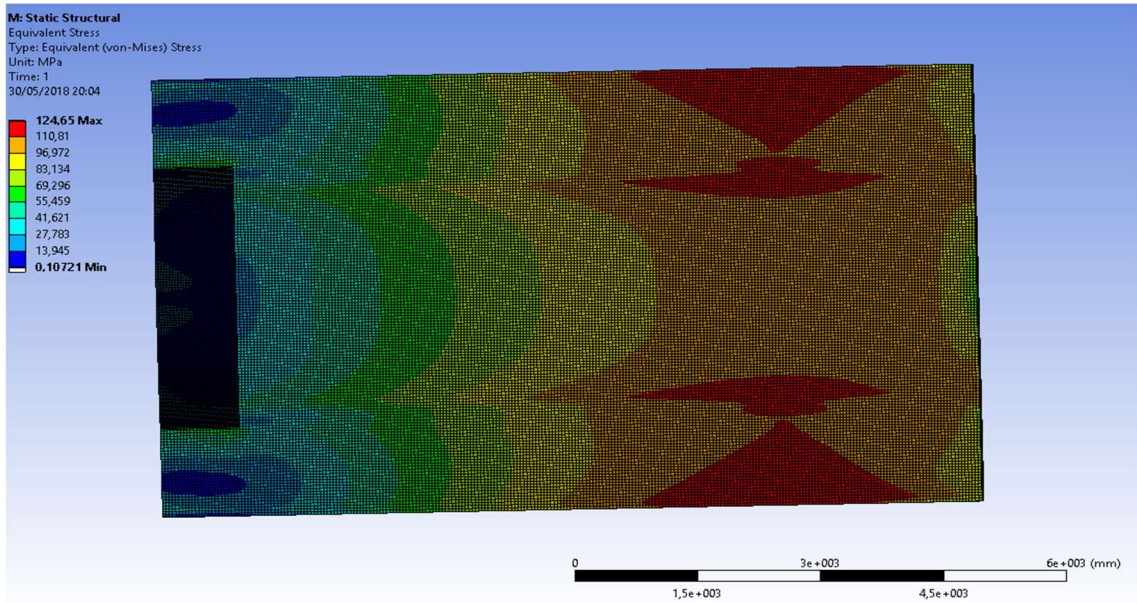


Ilustración 74: Tensión equivalente de Von Mises obtenida tras el segundo caso

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que, a pesar de reducir las dimensiones del ancla, tendremos que la tensión sigue siendo admisible. Por último, calculamos el peso del ancla total:

$$P_{Ancla} = \rho * (V + V_{enganche} + V_{añadidos} = 7850 * (4.92 + 1.44 + 0.3 * 2) = 54.63 \text{ toneladas}$$

1.2. Calculo real

1.2.1. Estudio del dimensionamiento de los cables de la estructura (REAL):

En el primer apartado se ha analizado las cargas que tendríamos en el caso de suponer que la carga es de 1MN, y en esta sección se analizará las fuerzas que soportaran los cables en un caso real, y que podemos ver reflejado en la siguiente tabla obtenida de ensayos:

Tabla 1: Fuerzas que sufre el aerogenerador

Fuente: director del proyecto

HUB SHAFT EXTREM LOADS (according to GL)	Caso de	PSF	Fx	Fy	Fz	Fyz	Mx	My	Mz	Myz	Description	Azimuth	Bld P/itch1	
(FAST simulations)	carga		[KN]	[KN]	[KN]	[KN]	[KNM]	[KNM]	[KNM]	[KNM]		(deg)	(deg)	
Min	Fx	1,5	1,2	-331,7	-16,7	-1431,6	1469,5	-0,1	486,6	925,4	925,4	Producción. Ráfaga. Caída tensión.	316,1	17,0
Max	Fx	1,3	1,35	1375,7	114,4	-1751,0	1754,7	6453,0	430,7	10053,5	10062,7	Producción. Ráfaga. Cambio direc.	315,6	1,9
Min	Fy	1,2	1,35	212,5	-286,3	-1590,3	1615,9	5248,8	3437,1	-10058,9	10629,9	Producción. Turbulencia extrema	94,0	32,7
Max	Fy	6,4	1,2	69,7	233,8	-1508,4	1526,4	0,0	-328,3	-618,4	700,1	Parada. Turbulencia normal	85,9	90,0

Santiago Álvarez Rubal

Diseño de los anclajes para aerogeneradores en áreas marinas

Min	Fz	1,3	1,3 5	1082,3	16,9	-1933,2	1933,3	6293,7	-10077,8	-12044,7	15704,6	Producción. Ráfaga. Cambio direc.	151,4	-1,0
Max	Fz	7,2	1,1	74,6	21,2	-1188,0	1188,2	0,0	656,0	90,0	662,2	Parada. Condición fallo.	135,0	90,0
Max	Fyz	1,3	1,3 5	1096,5	24,2	-1933,2	1933,4	6343,7	-10094,0	-11912,4	15613,9	Producción. Ráfaga. Cambio direc.	152,8	-0,9
Min	Mx	1,4	1,2	447,2	-14,8	-1410,0	1479,2	-0,4	1538,4	-3450,0	3450,0	Producción. Viento normal. Caída red	67,5	28,5
Max	Mx	1,6	1,3 5	531,6	-65,3	-1591,7	1678,1	6453,0	2936,3	3122,6	7168,8	Producción. Ráfaga extrema.	315,0	28,4
Min	My	1,2	1,3 5	429,6	-210,5	-1514,7	1529,3	6420,6	-11712,6	1952,1	11874,2	Producción. Turbulencia extrema	188,8	30,9
Max	My	1,3	1,3 5	1006,7	-54,2	-1904,9	1905,6	6143,9	15862,5	-2393,6	16042,1	Producción. Ráfaga. Cambio direc.	23,3	-1,0
Min	Mz	1,3	1,3 5	981,5	-80,1	-1567,4	1569,4	6453,0	-7408,8	-12842,6	14826,4	Producción. Ráfaga. Cambio direc.	126,6	-0,9
Max	Mz	1,3	1,3 5	989,7	-42,2	-1898,1	1898,6	6057,5	-5904,9	14904,0	16031,1	Producción. Ráfaga. Cambio direc.	261,8	-1,0
Max	My _z	1,3	1,3 5	1006,7	-54,2	-1904,9	1905,6	6143,9	15862,5	-2393,6	16042,1	Producción. Ráfaga. Cambio direc.	23,3	-1,0

Analizaremos los casos en función del caso de carga que tengamos, y el que mayor tensión tenga que soportar el cableado, es el que escogeremos para el dimensionamiento.

- ✓ **Primer caso:** Suponemos la fuerza x como máxima. Primeramente, se analizará cuando estamos en la proyección con las fuerzas z y x:

$$\begin{bmatrix} -1751 \text{ KN} \\ 1375.7 \text{ KN} \end{bmatrix}$$

Y tendremos que la matriz de rigidez global será exactamente la misma, siendo esta:

$$\begin{bmatrix} 8962310601.24 & 0 \\ 0 & 3712310601.24 \end{bmatrix}$$

Por lo que podemos calcular los nuevos desplazamientos con estos dos valores de fuerzas nuevos:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.953 \cdot 10^{-4} \\ 3.657 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

Con estos nuevos valores de desplazamientos, calculamos de nuevo los valores de las fuerzas a las que se verá sometido el cableado:

iv. **Cable 1:**

- Matriz de rotación (45º):

0,70710678	0,70710678	0	0
-0,70710678	0,70710678	0	0
0	0	0,70710678	0,70710678
0	0	-0,70710678	0,70710678

- Matriz de desplazamientos Globales/A:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.7*10^{-4} \\ -1.953*10^{-4} \end{bmatrix}$$

- Matriz de desplazamientos locales:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.24*10^{-4} \\ -3.99*10^{-4} \end{bmatrix}$$

- Reacciones en el nodo (KN):

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -458,587 \\ 0 \\ 458,857 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Con este cálculo, podemos observar que el cable estará trabajando a tracción, por lo que podemos decir que el cálculo es válido.

v. **Cable 2:**

- Matriz de rotación (90º):

0	1	0	0
-1	0	0	0
0	0	0	1
0	0	-1	0

- Matriz de desplazamientos Globales/A:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.7 \cdot 10^{-4} \\ -1.953 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

- Matriz de desplazamientos locales:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1.957 \cdot 10^{-4} \\ -3.7 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

- Reacciones en el nodo (KN):

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1025 \\ 0 \\ -1025 \end{bmatrix}$$

vi. **Cable 3:**

- Matriz de rotación (135°):

-0,70710678	0,70710678	0	0
-0,70710678	0,70710678	0	0
0	0	-0,70710678	0,70710678
0	0	-0,70710678	0,70710678

- Matriz de desplazamientos Globales/A:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.7 \cdot 10^{-4} \\ -1.953 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

- Matriz de desplazamientos locales:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -3.99 \cdot 10^{-4} \\ -1.23 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

- Reacciones en el nodo (KN):

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1483.91 \\ 0 \\ -1483,91 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Podemos decir entonces que la fuerza máxima que tendrá que soportar el cable es de 1483,91 KN funcionando a tracción, mientras que las otras dos estará trabajando a compresión, por lo que se escogerá la mayor fuerza de tensión aplicada para poder dimensionar y se le aplicará una pretensión al cable.

- ✓ **Segundo caso:** cogemos la fuerza F_x min, por lo que tendremos un suceso a analizar como en el apartado anterior:
 - $F_x = -331.7$ KN y $F_z = -1431.6$ KN: con estos dos valores de fuerzas obtenemos que la tensión del cable será de: 184.758.
- ✓ **Tercer caso:** cogemos la fuerza F_y max, y la fuerza F_z asociada a la misma:
 - $F_y = 233.8$ KN y $F_z = -1508.4$ KN: con estos dos valores de fuerzas obtenemos que la tensión del cable será de: 607,121.
- ✓ **Cuarto caso:** cogemos la fuerza F_y min y la fuerza F_z asociada a la misma:
 - $F_y = -286.3$ KN y $F_z = -1590.3$ KN, con estos valores de fuerzas obtendremos que la tensión del cable será de: 263,343 KN
- ✓ **Quinto caso:** cogemos la F_z min con el valor de F_x asociado a la misma:
 - $F_z = -1933.2$ KN y $F_x = 1082.3$ KN cons estos valores de fuerza obtenemos que la tensión del cable será de: 1331.552 KN
- ✓ **Sexto caso:** cogemos la F_z max con el valor de F_x asociado a la misma:
 - $F_z = -1188$ KN y $F_x = 74.6$ KN con estos valores de fuerza obtenemos que la tensión del cable será: 400,707 KN

Analizando los distintos casos, tendremos que el caso más desfavorable será el primero, con lo que tendremos que la fuerza a tracción que tendrá que soportar será de 1483.91.

Podemos observar en la normativa GL, tenemos dos factores de seguridad en función de las condiciones de las cargas que afectan al cableado. Podemos distinguir entre dos tipos de estado según las cargas que son el estado de fatiga y el estado ultimo de carga. El estado en fatiga consiste en las cargas que se producen habitualmente en condiciones normales, y que producen un comportamiento a fatiga de los materiales. Las otras son aquellas que se producen debido a cargas extremas que producirán la rotura del material. Para las primeras la normativa GL expone (ver ilustración 76):

4.4.9.2.2 Partial safety factor for the loads in the analysis of fatigue strength

The partial safety factor for the loads shall amount to $\gamma_F = 1.0$ for all normal and abnormal design situations.

Ilustración 75: Factor de seguridad con comportamiento a fatiga según la norma GL

Fuente: (DNV company, s.f.)

Y, por otro lado, para cargas extremas, tendremos que mirar en la siguiente tabla, que también se puede encontrar en la normativa GL (ver ilustración 77):

Table 4.4.6 Partial safety factors for loads γ_F

Source of loading	Unfavourable loads				Favourable loads
	Type of design situation				All design situations
	N Normal	E Extreme	A Abnormal	T Transport and erection	
Environmental	1.2	1.35	1.1	1.5	0.9
Operational	1.2	1.35	1.1	1.5	0.9
Gravity	1.1/1.35*	1.1/1.35*	1.1	1.25	0.9
Other inertial forces	1.2	1.25	1.1	1.3	0.9
Heat influence	–	1.35	–	–	0.9

* in the event of the masses not being determined by weighing

Ilustración 76: Factores de seguridad a cargas extremas según la normativa GL

Fuente: (DNV company, s.f.)

Y de aquí cogeremos un valor de γ_F de 1,35 para el dimensionamiento. Como vemos, es más restrictivo este último, por lo que habrá que diseñar los cables en función de este factor de seguridad.

Al igual que en el análisis ideal, tendremos que unos de los dos cables se comportarán a compresión, por lo que se le hará una pretensión de los cables, siendo entonces la tensión final que soportará el cable:

$$F_{cable} = F_{tension} + F_{compresion,max} = 1025 + 1483.91 = 2508.91 \text{ KN}$$

Aplicando el factor de seguridad impuesto por la normativa GL obtendremos que:

$$F_{cable} = 1.35 * F_{cable} = 3387 \text{ KN}$$

Una vez calculada esta fuerza, con el módulo de Young y con el máximo de tensión admisible, podemos calcular el área del cable a utilizar:

$$\sigma_{max,admissible} = \frac{F_{cable}}{A} \rightarrow A = \frac{F_{cable}}{\sigma_{max,admissible}} = \frac{3387 * 10^3}{275 * 10^6} = 123.16 \text{ cm}^2$$

Con esta área calculamos el diámetro del cable a utilizar:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} \rightarrow d = 12.52 \text{ cm}$$

1.2.2. Estudio del dimensionamiento del ancla (Real):

Tendremos que las fuerzas debidas al cableado que soportara el ancla serán las obtenidas en el apartado anterior, siendo estos valores:

- ✓ $F_x = 1375.7 \text{ KN}$
- ✓ $F_z = -1751 \text{ KN}$

Con estos valores de fuerzas, nos disponemos a hacer el equilibrio de fuerzas, que se ha hecho en apartados anteriores, con el fin de poder calcular unas primeras dimensiones del ancla ante estas fuerzas:

$$W_{arena} = (\rho_{arena} - \rho_{agua}) * g * V_{arena}$$

Podemos decir que:

- $\rho_{arena} = 1500 - 2000 \frac{Kg}{m^3}$
- $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$
- $V_{arena} = \frac{L * \cos(32) * L * \sin(32)}{2} * b \text{ m}^3$

Podemos entonces decir:

$$W_{arena} = (\rho_{arena} - \rho_{agua}) * g * V_{arena} = 1102,14 * b * L^2 [N]$$

Se ha escogido una densidad de 1500, siendo este el caso límite para aguantar la fuerza con la que tiran los cables.

- ✓ W_{ancla} : peso equivalente del ancla. Se supondrá que el espesor es de 10 mm:

Podemos decir que:

- $\rho_{ancla} = 7850 \frac{Kg}{m^3}$
- $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$
- $V_{ancla} = L * b * e \text{ m}^3$.

$$W_{ancla} = (\rho_{ancla} - \rho_{agua}) * g * V_{ancla} = 67198.5 * L * b * e [N]$$

A continuación, se realizará el equilibrio de fuerzas necesario para que el ancla se mantengan estática:

- ✓ Equilibrio de fuerzas en el eje x:

$$F_n - 1483.91 * \cos(45) = 0 \rightarrow F_n = 1049,28 \text{ KN}$$

- ✓ Equilibrio de fuerzas en el eje z:

$$W_{arena} + W_{ancla} - = 0$$

$$1102,14 * b * L^2 + 67198.5 * L * b * e - 1049.28 = 0$$

Para poder realizar los cálculos vamos a hacer dos suposiciones:

- ✓ Un espesor muy pequeño. Para este caso se supondrá de 10 cm
- ✓ Una longitud de placa. Para este caso se supone de 12 m

Para estos valores obtenemos que el ancho de la placa será: 6.1 m

1. **Calculo de los momentos de inercia y fuerzas de von mises teóricas, con fuerzas en los cables reales:**

Primeramente, calcularemos los momentos de inercia correspondientes a la plancha con las dimensiones que se han definido en el apartado 7:

- ✓ Longitud del ancla: 12 m
- ✓ Ancho del ancla: 6.2 m
- ✓ Espesor del ancla: 80 mm.

Con estos valores de las dimensiones del ancla, se calcula los momentos de inercia principales de la plancha:

$$\begin{aligned} \checkmark I_z &= \frac{1}{12} * 6.2 * 0.08^3 = 2.6 * 10^{-4} m^4. \\ \checkmark I_y &= \frac{1}{12} * 0.08 * 6.2^3 = 1.59 m^4. \end{aligned}$$

Una vez, calculados los momentos de inercia, se calcula mediante la herramienta Ftool el momento flector máximo del ancla sometida a las nuevas cargas. Se pueden ver los resultados en la siguiente imagen (ver ilustración 78):

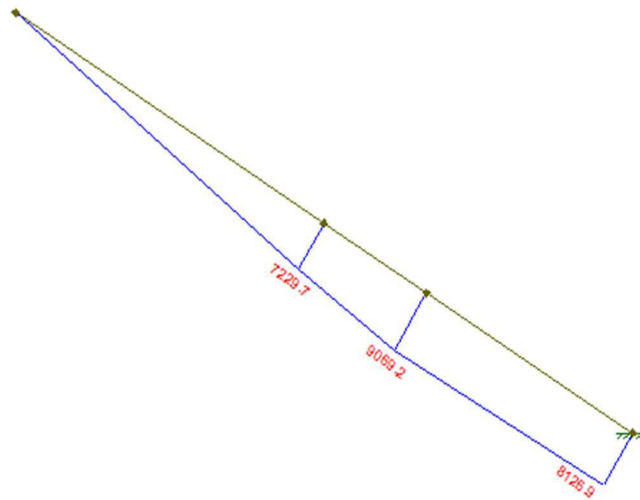


Ilustración 77: Diagrama de momentos flectores con las cargas reales aplicadas

Fuente: Elaboración propia en el programa FTool

Podemos observar que el momento flector máximo en el empotramiento es de 9069.2 KN*m, y con este valor del momento flector somos capaces de calcular las tensiones en el eje y e z de la sección:

$$\checkmark \sigma_z = \frac{9069.2 * 10^3 Nm * 8 * 10^{-2} m}{2 * 0.00026 m^4} = 1371,36 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$\checkmark \sigma_y = \frac{9069.2 \cdot 10^3 \text{ Nm} \cdot 6.2 \text{ m}}{2 \cdot 1.59 \text{ m}^4} = 17,69 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Por otro lado, también sacamos el diagrama de esfuerzos cortantes de la estructura para poder calcular posteriormente la tensión equivalente de Von Mises (ver ilustración 79):

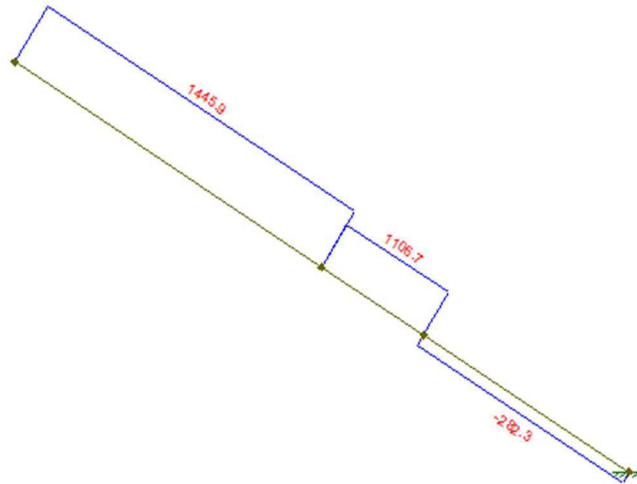


Ilustración 78: Esquema del valor de las fuerzas cortantes

Fuente: Elaboración propia en el programa FTool

Podemos observar que el valor de la cortante en la sección de máximo momento flector es de 1106.7 kN. Una vez tenemos el valor de las tensiones y del cortante calculamos la tensión equivalente de Von Mises:

$$\begin{aligned} \sigma_{von,mises} &= \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_y^2 - \sigma_y \cdot \sigma_z + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \\ &= \sqrt{(1371,36 \cdot 10^6)^2 + (17,69 \cdot 10^6)^2 - 1371,36 \cdot 10^6 \cdot 17,69 \cdot 10^6 + 3 \cdot \left(\frac{1106,7 \cdot 10^3 \cdot 3}{2 \cdot 6,2 \cdot 0,12} \right)^2} = 1362,6 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Por lo que tenemos que las dimensiones propuestas en un primer momento no son válidas, por lo que se propondrá otro dimensionamiento del ancla, cambiando el espesor de esta. Se propone el siguiente modelo:

- ✓ Longitud del ancla: 12 m
- ✓ Ancho del ancla: 6.2 m
- ✓ Espesor del ancla: 120 mm.

Para estos valores de dimensionamiento, se obtendrán los siguientes momentos de área:

$$\begin{aligned} \checkmark I_z &= \frac{1}{12} \cdot 6.2 \cdot 0.12^3 = 8.9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4. \\ \checkmark I_y &= \frac{1}{12} \cdot 0.12 \cdot 6.2^3 = 2.38 \text{ m}^4. \end{aligned}$$

Con estos valores del área, calculamos las tensiones equivalentes con el momento flector obtenido en Ftool:

$$\checkmark \sigma_z = \frac{8787.3 \cdot 10^3 \text{ Nm} \cdot 12 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{2 \cdot 0.00089 \text{ m}^4} = 609,49 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\checkmark \sigma_y = \frac{8787.3 \cdot 10^3 \text{ Nm} \cdot 6.2 \text{ m}}{2 \cdot 2.38 \text{ m}^4} = 11,79 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Se obtendrá con el Ftool, el valor del cortante para ese punto también, que tendrá un valor de: 937 KN. Una vez se tienen los valores de las tensiones y del cortante, se procede a calcular de nuevo la tensión equivalente de Von Mises:

$$\begin{aligned} \sigma_{von,mises} &= \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_y^2 - \sigma_y \cdot \sigma_z + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \\ &= \sqrt{(609,49 \cdot 10^6)^2 + (11,79 \cdot 10^6)^2 - 609,49 \cdot 10^6 \cdot 11,79 \cdot 10^6 + 3 \cdot \left(\frac{937 \cdot 10^3 \cdot 3}{2 \cdot 6.2 \cdot 0.12}\right)^2} \\ &= 603.68 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Podemos observar que con este valor estamos dentro del límite de rotura del material, pero no por debajo del límite elástico. Por lo que se propone otro modelo con el fin de reducir esta tensión equivalente de Von Mises:

- ✓ Longitud del ancla: 12 m
- ✓ Ancho del ancla: 6.2 m
- ✓ Espesor del ancla: 150 mm.

Para estos valores de dimensionamiento, se obtendrán los siguientes momentos de área:

$$\checkmark I_z = \frac{1}{12} \cdot 6.2 \cdot 0.15^3 = 1.74 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4.$$

$$\checkmark I_y = \frac{1}{12} \cdot 0.15 \cdot 6.2^3 = 2.98 \text{ m}^4.$$

Con estos valores del área, calculamos las tensiones equivalentes con el momento flector obtenido en Ftool:

$$\checkmark \sigma_z = \frac{8564.6 \cdot 10^3 \text{ Nm} \cdot 12 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{2 \cdot 1.74 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4} = 240 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\checkmark \sigma_y = \frac{8564.6 \cdot 10^3 \text{ Nm} \cdot 6.2 \text{ m}}{2 \cdot 2.98 \text{ m}^4} = 5.8 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Se obtendrá con el Ftool, el valor del cortante para ese punto también, que tendrá un valor de: 735.4 KN. Una vez se tienen los valores de las tensiones y del cortante, se procede a calcular de nuevo la tensión equivalente de Von Mises:

$$\sigma_{von,mises} = \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_y^2 - \sigma_y * \sigma_z + 3 * \tau_{xy}^2} =$$

$$\sqrt{(240 * 10^6)^2 + (5.8 * 10^6)^2 - 240 * 10^6 * 5.8 * 10^6 + 3 * \left(\frac{734.5 * 10^3 * 3}{2 * 6.2 * 0.15}\right)^2} = 237 \text{ MPa}$$

Por lo que tendremos que este valor será válido para el dimensionamiento del ancla. Por otro lado, se calculará el peso del ancla:

$$P_{Ancla} = \rho * V = 7850 * 12 * 6.2 * 15 * 10^{-2} = 87.6 \text{ toneladas}$$

Como calculamos teóricamente, este valor es excesivo para el ancla. Por lo que se propone un modelo de ancla hueco, con el fin de poder aumentar el momento de inercia en z, que es el causante de tener una tensión en su eje alta. Con ellos conseguiremos una reducción considerable de peso.

El modelo de ancla se calculará de la misma manera que la propuesta en apartados anteriores y se basa en el siguiente modelo (ver ilustración 80):

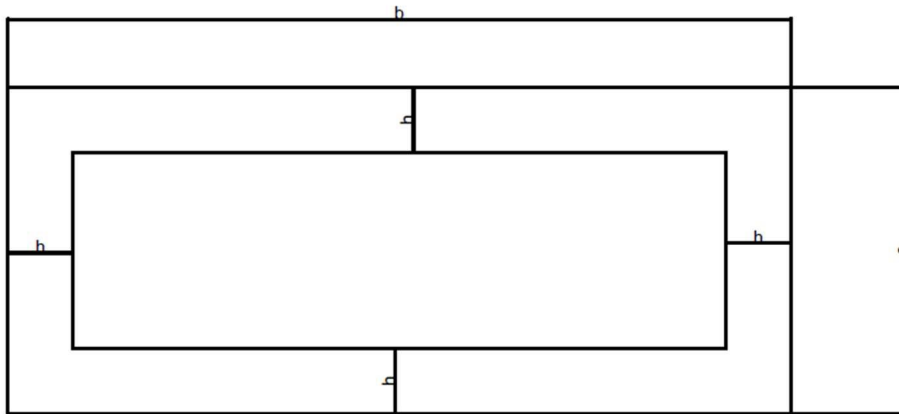


Ilustración 79: Ancla propuesta para reducir el peso de esta

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

Como en el caso anterior se calculará los momentos de área de las siguientes dos imágenes (ver ilustraciones 81 e ilustración 82):

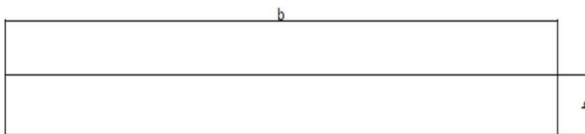


Ilustración 80: Primera área a analizar

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

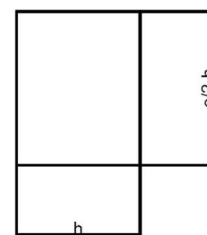


Ilustración 81: Segunda área a analizar

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

Tomaremos en el primer caso, que el valor de la h sea de 20 mm para el cálculo de ambos momentos de área y con un espesor que es igual a 120 mm:

- ✓ **Momentos de área de la primera sección:** Primeramente, se calcula los momentos principales de la sección:

○ $I_z = \frac{1}{12} * 6.2 * 0.02^3 = 4.13 * 10^{-6} m^4.$

○ $I_y = \frac{1}{12} * 0.02 * 6.2^3 = 0.39 m^4.$

Una vez calculados estos, añadimos el término de Steiner a estos para calcularlos con respecto a la sección central del ancla:

○ $I_{z, total\ sección\ 1} = 4.13 * 10^{-6} + 6.2 * 0.02 * \left(\frac{0.12}{2} - \frac{0.02}{2}\right)^2 = 0.00031 m^4.$

○ $I_{y, total\ sección\ 1} = 0.39 m^4.$

Una vez tenemos estos, al tener dos secciones de la misma área, multiplicamos este por 2. También podemos observar que el término de Steiner del eje y es 0 ya que la distancia a este eje del centro de áreas de la sección es 0. Finalmente tenemos:

○ $I_{z, total} = 0.00031 * 2 = 0.00063 m^4.$

○ $I_{y, total} = 0.39 * 2 = 0.79 m^4$

A continuación, nos disponemos a calcular los momentos de área de la segunda sección:

- ✓ **Momentos de área de la segunda sección:** Primeramente, como en el caso anterior, se calculan los momentos principales de la sección:

○ $I_z = \frac{1}{12} * 0.02 * 0.04^3 = 1.066 * 10^{-7} m^4.$

○ $I_y = \frac{1}{12} * 0.04 * 0.02^3 = 2.66 * 10^{-8} m^4.$

Una vez calculados estos, añadimos como en el caso anterior el momento de área que añade el término de Steiner:

○ $I_{z, total\ sección\ 1} = 1.066 * 10^{-7} + 0.04 * 0.02 * \left(\frac{0.02}{2}\right)^2 = 3.2 * 10^{-7} m^4.$

○ $I_{y, total\ sección\ 1} = 2.66 * 10^{-8} + 0.04 * 0.02 * \left(\frac{6.2}{2} - \frac{0.04}{2}\right)^2 = 7.64 * 10^{-3} m^4.$

Ya tenemos los momentos referidos a la sección central del ancla, por lo que procedemos a calcular los totales, multiplicando los anteriores por 4, ya que tenemos 4 secciones iguales:

○ $I_{z, total} = 3.2 * 10^{-7} * 4 = 1.3 * 10^{-6} m^4.$

○ $I_{y, total} = 7.64 * 10^{-3} * 4 = 3.06 * 10^{-2} m^4$

Una vez tenemos todos los momentos calculados los momentos de área de cada sección, se calcula el momento total mediante la suma de ambos:

✓ $I_{z, definitivo} = 0.00063 + 3.2 * 10^{-7} = 6.30 * 10^{-4} m^4$

✓ $I_{y, definitivo} = 0.79 + 3.06 * 10^{-2} = 0.825 m^4.$

Con estos valores, se puede calcular la tensión en cada uno de los ejes de la sección. Para ello se acude de nuevo al Ftool para calcular el momento correspondiente a la sección para este caso en concreto:

✓ $\sigma_z = \frac{9347.3 * 10^3 Nm * 12 * 10^{-2} m}{2 * 6.30 * 10^{-4} m^4} = 890,25 * 10^6 \frac{N}{m^2}$

$$\checkmark \sigma_y = \frac{9347.3 \cdot 10^3 \text{ Nm} \cdot 6.2 \text{ m}}{2 \cdot 0.825 \text{ m}^4} = 35,12 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Tendremos de valor de la cortante 1274 KN. Teniendo todas estas fuerzas, calculamos la tensión equivalente de Von Mises:

$$\begin{aligned} \sigma_{von,mises} &= \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_y^2 - \sigma_y \cdot \sigma_z + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \\ &= \sqrt{(890,25 \cdot 10^6)^2 + (35,12 \cdot 10^6)^2 - 890,25 \cdot 10^6 \cdot 35,12 \cdot 10^6 + 3 \cdot \left(\frac{1274 \cdot 10^3 \cdot 3}{2 \cdot 6.2 \cdot 0.12}\right)^2} \\ &= 873,22 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Podemos observar que este valor está lejos de la tensión admisible por el ancla. Por lo que se propone el siguiente cambio: h=30 mm y aumentar el espesor hasta los 150 mm.

Para estos cambios obtenemos:

- ✓ **Momentos de área de la primera sección:** Primeramente, se calcula los momentos principales de la sección:

- $I_z = \frac{1}{12} \cdot 6.2 \cdot 0.03^3 = 1.40 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4.$
- $I_y = \frac{1}{12} \cdot 0.03 \cdot 6.2^3 = 0.59 \text{ m}^4.$

Una vez calculados estos, añadimos el término de Steiner a estos para calcularlos con respecto a la sección central del ancla:

- $I_{z, \text{total sección 1}} = 1.40 \cdot 10^{-5} + 6.2 \cdot 0.03 \cdot \left(\frac{0.15}{2} - \frac{0.03}{2}\right)^2 = 6.84 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4.$
- $I_{y, \text{total sección 1}} = 0.59 \text{ m}^4.$

Una vez tenemos estos, al tener dos secciones de la misma área, multiplicamos este por 2. También podemos observar que el término de Steiner del eje y es 0 ya que la distancia a este eje del centro de áreas de la sección es 0. Finalmente tenemos:

- $I_{z, \text{total}} = 6.84 \cdot 10^{-4} \cdot 2 = 1.37 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4.$
- $I_{y, \text{total}} = 0.59 \cdot 2 = 1.19 \text{ m}^4$

A continuación, nos disponemos a calcular los momentos de área de la segunda sección:

- ✓ **Momentos de área de la segunda sección:** Primeramente, como en el caso anterior, se calculan los momentos principales de la sección:

- $I_y = \frac{1}{12} \cdot 0.03 \cdot 0.045^3 = 2.28 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4.$
- $I_z = \frac{1}{12} \cdot 0.045 \cdot 0.03^3 = 1.01 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4.$

Una vez calculados estos, añadimos como en el caso anterior el momento de área que añade el término de Steiner:

- $I_{z, \text{total sección 1}} = 1.01 \cdot 10^{-7} + 0.045 \cdot 0.03 \cdot \left(\frac{0.03}{2}\right)^2 = 9.11 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4.$
- $I_{y, \text{total sección 1}} = 2.28 \cdot 10^{-7} + 0.045 \cdot 0.03 \cdot \left(\frac{6.2}{2} - \frac{0.045}{2}\right)^2 = 1.28 \cdot 10^{-2} \text{ m}^4.$

Ya tenemos los momentos referidos a la sección central del ancla, por lo que procedemos a calcular los totales, multiplicando los anteriores por 4, ya que tenemos 4 secciones iguales:

- $I_{z, \text{total}} = 9.11 \cdot 10^{-7} \cdot 4 = 3.65 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4.$

$$\circ I_{y,total} = 1.28 * 10^{-2} * 4 = 5.14 * 10^{-2} m^4$$

Una vez tenemos todos los momentos calculados los momentos de área de cada sección, se calcula el momento total mediante la suma de ambos:

$$\checkmark I_{z, definitivo} = 1.37 * 10^{-3} + 3.65 * 10^{-6} = 1.37 * 10^{-3} m^4$$

$$\checkmark I_{y, definitivo} = 1.19 + 5.14 * 10^{-2} = 1.24 m^4.$$

Con estos valores, se puede calcular la tensión en cada uno de los ejes de la sección. Para ello se acude de nuevo al Ftool para calcular el momento correspondiente a la sección para este caso en concreto:

$$\checkmark \sigma_z = \frac{9200.3 * 10^3 Nm * 15 * 10^{-2} m}{2 * 1.37 * 10^{-3} m^4} = 503,39 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$\checkmark \sigma_y = \frac{9200.3 * 10^3 Nm * 6.2 m}{2 * 0.825 m^4} = 22,94 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Tendremos de valor de la cortante 1187 KN. Teniendo todas estas fuerzas, calculamos la tensión equivalente de Von Mises:

$$\begin{aligned} \sigma_{von,mises} &= \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_y^2 - \sigma_y * \sigma_z + 3 * \tau_{xy}^2} \\ &= \sqrt{(503,39 * 10^6)^2 + (22,94 * 10^6)^2 - 503,39 * 10^6 * 22,94 * 10^6 + 3 * \left(\frac{1187 * 10^3 * 3}{2 * 6.2 * 0.15}\right)^2} \\ &= 492,34 MPa \end{aligned}$$

Todavía no estamos en el límite de tensiones admisibles, por lo que se propone aumentar el espesor a 200 mm y la h a 50 mm:

✓ **Momentos de área de la primera sección:** Primeramente, se calcula los momentos principales de la sección:

$$\circ I_z = \frac{1}{12} * 6.2 * 0.05^3 = 6.46 * 10^{-5} m^4.$$

$$\circ I_y = \frac{1}{12} * 0.05 * 6.2^3 = 0.99 m^4.$$

Una vez calculados estos, añadimos el término de Steiner a estos para calcularlos con respecto a la sección central del ancla:

$$\circ I_{z, total\ sección\ 1} = 4.71 * 10^{-5} + 6.2 * 0.045 * \left(\frac{0.16}{2} - \frac{0.045}{2}\right)^2 = 1.81 * 10^{-3} m^4.$$

$$\circ I_{y, total\ sección\ 1} = 0.99 m^4.$$

Una vez tenemos estos, al tener dos secciones de la misma área, multiplicamos este por 2. También podemos observar que el término de Steiner del eje y es 0 ya que la distancia a este eje del centro de áreas de la sección es 0. Finalmente tenemos:

$$\circ I_{z, total} = 6.84 * 10^{-4} * 2 = 3.62 * 10^{-3} m^4.$$

$$\circ I_{y, total} = 0.59 * 2 = 1.9 m^4$$

A continuación, nos disponemos a calcular los momentos de área de la segunda sección:

- ✓ **Momentos de área de la segunda sección:** Primeramente, como en el caso anterior, se calculan los momentos principales de la sección:

$$\begin{aligned} \circ I_z &= \frac{1}{12} * 0.05 * 0.05^3 = 5.2 * 10^{-7} m^4. \\ \circ I_y &= \frac{1}{12} * 0.05 * 0.05^3 = 5.2 * 10^{-7} m^4. \end{aligned}$$

Una vez calculados estos, añadimos como en el caso anterior el momento de área que añade el término de Steiner:

$$\begin{aligned} \circ I_{z, total\ sección\ 1} &= 5.2 * 10^{-7} + 0.045 * 0.03 * \left(\frac{0.03}{2}\right)^2 = 2.08 * 10^{-7} m^4. \\ \circ I_{y, total\ sección\ 1} &= 5.2 * 10^{-7} + 0.045 * 0.03 * \left(\frac{6.2}{2} - \frac{0.045}{2}\right)^2 = 2.36 * 10^{-2} m^4. \end{aligned}$$

Ya tenemos los momentos referidos a la sección central del ancla, por lo que procedemos a calcular los totales, multiplicando los anteriores por 4, ya que tenemos 4 secciones iguales:

$$\begin{aligned} \circ I_{z, total} &= 2.08 * 10^{-7} * 4 = 8.33 * 10^{-6} m^4. \\ \circ I_{y, total} &= 2.36 * 10^{-2} * 4 = 9.46 * 10^{-2} m^4 \end{aligned}$$

Una vez tenemos todos los momentos calculados los momentos de área de cada sección, se calcula el momento total mediante la suma de ambos:

$$\begin{aligned} \checkmark I_{z, definitivo} &= 3.62 * 10^{-3} + 8.33 * 10^{-6} = 3.63 * 10^{-3} m^4 \\ \checkmark I_{y, definitivo} &= 2.36 * 10^{-2} + 9.46 * 10^{-2} = 2.08 m^4. \end{aligned}$$

Con estos valores, se puede calcular la tensión en cada uno de los ejes de la sección. Para ello se acude de nuevo al Ftool para calcular el momento correspondiente a la sección para este caso en concreto:

$$\begin{aligned} \checkmark \sigma_z &= \frac{9036 * 10^3 Nm * 15 * 10^{-2} m}{2 * 3.63 * 10^{-3} m^4} = 249.26 * 10^6 \frac{N}{m^2} \\ \checkmark \sigma_y &= \frac{9036.3 * 10^3 Nm * 6.2 m}{2 * 2.08 m^4} = 13.46 * 10^6 \frac{N}{m^2} \end{aligned}$$

Tendremos de valor de la cortante 1187 KN. Teniendo todas estas fuerzas, calculamos la tensión equivalente de Von Mises:

$$\begin{aligned} \sigma_{von, mises} &= \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_y^2 - \sigma_y * \sigma_z + 3 * \tau_{xy}^2} \\ &= \sqrt{(249.26 * 10^6)^2 + (13.46 * 10^6)^2 - 249.26 * 10^6 * 13.46 * 10^6 + 3 * \left(\frac{1086.9 * 10^3 * 3}{2 * 6.2 * 0.15}\right)^2} \\ &= 242.83 MPa \end{aligned}$$

Por lo que tendremos que este valor si está dentro de nuestro límite de tensión admisibles, por lo que tendremos que las dimensiones de ambas anclas serán finalmente las mostradas en las siguientes imágenes (ver ilustraciones 83 e ilustración 84):

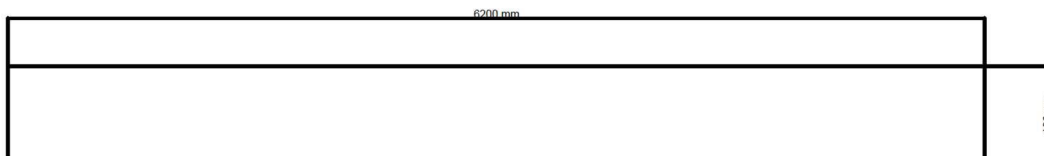


Ilustración 82: Dimensionamiento teórico del ancla, con los valores reales de la tensión de cableado

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

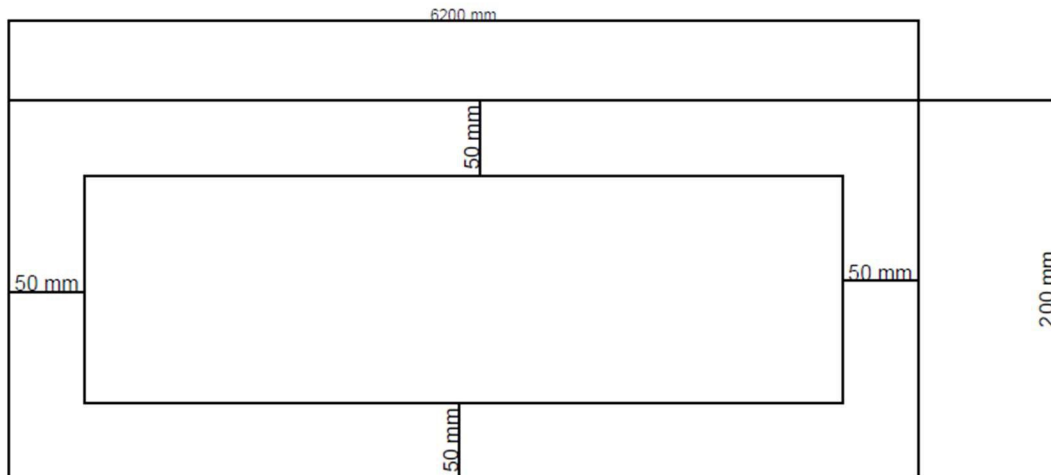


Ilustración 83: Dimensiones teórico del ancla, con los valores reales de la tensión del cableado

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

1.2.3. Análisis de elementos finitos en ANSYS, con los resultados obtenidos en el apartado anterior:

Para este caso, tendremos que las fuerzas aplicadas en la placa serán las que se exponen a continuación, teniendo en cuenta que al variar el espesor habrá un cambio en el peso del ancla, que influirá en el resultado. Las fuerzas aplicadas en el ancla serán (se supondrá el mismo sistema de referencia que en el primer análisis que se hizo anteriormente):

- ✓ Cargas debidas al cableado:
 - $F_{\text{cableado}, eje x} = 1049.3 * \cos(32) - 1049.3 * \text{sen}(32) = -333.81 \text{ KN}$
 - $F_{\text{cableado}, eje z} = 1049.3 * \cos(32) + 1049.3 * \text{sen}(32) = 1145.87 \text{ KN}$
- ✓ Peso propio del ancla:
 - $W_{\text{ancla}, eje x} = -4999568.4 * e * \text{sen}(32) \text{ KN}$
 - $W_{\text{ancla}, eje z} = -4999568.4 * e * \cos(32) \text{ KN}$
- ✓ Peso de la arena:
 - $W_{\text{arena}, eje x} = -983.865 * \text{sen}(32) = -521.369 \text{ KN}$
 - $W_{\text{arena}, eje z} = -983.865 * \cos(32) = -834.36 \text{ KN}$
- ✓ Fuerza Lateral del pavimento:
 - $F_{\text{pavimento}, eje x} = 1049.3 * \cos(32) = 889.85 \text{ KN}$
 - $F_{\text{pavimento}, eje z} = -706.12 * \text{sen}(32) = -556.04 \text{ KN}$

Por lo que, para los distintos espesores, iremos evaluando los resultados obtenidos. Empezamos por el primer caso que obtuvimos teóricamente:

- ✓ **Espesor= 80 mm:** Tendremos entonces que las fuerzas debido al peso del ancla serán:
 - $W_{\text{ancla}, eje x} = -211.949 \text{ KN}$
 - $W_{\text{ancla}, eje z} = -339.189 \text{ KN}$

Para este espesor, obtenemos el siguiente resultado (ver ilustración 85):

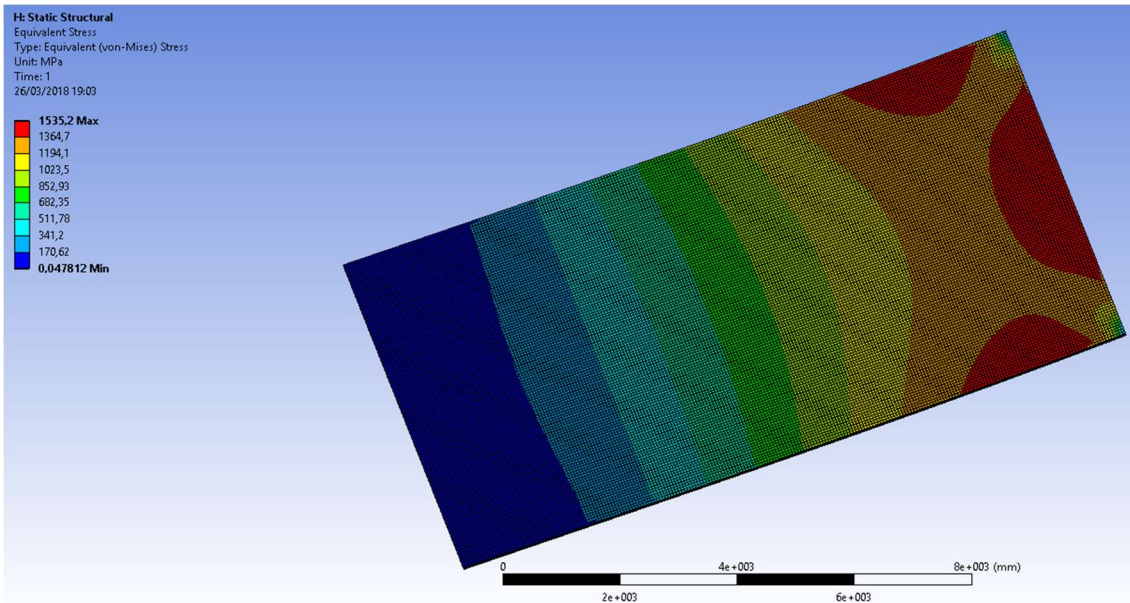


Ilustración 84: Resultados obtenidos con el espesor de 80 mm

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Como podemos observar, la tensión equivalente es de 1364 MPa que es muy superior a la admisible, y al ser su deformación prácticamente nula, se producirá la rotura del material por el punto de aplicación de la cimentación.

- ✓ **Espesor= 120 mm:** Tendremos entonces que las fuerzas debido al peso del ancla serán:
- $W_{ancla, eje x} = -317.92 \text{ KN}$
 - $W_{ancla, eje z} = -508.78 \text{ KN}$

Para este espesor obtenemos los siguientes resultados (ver ilustración 86):

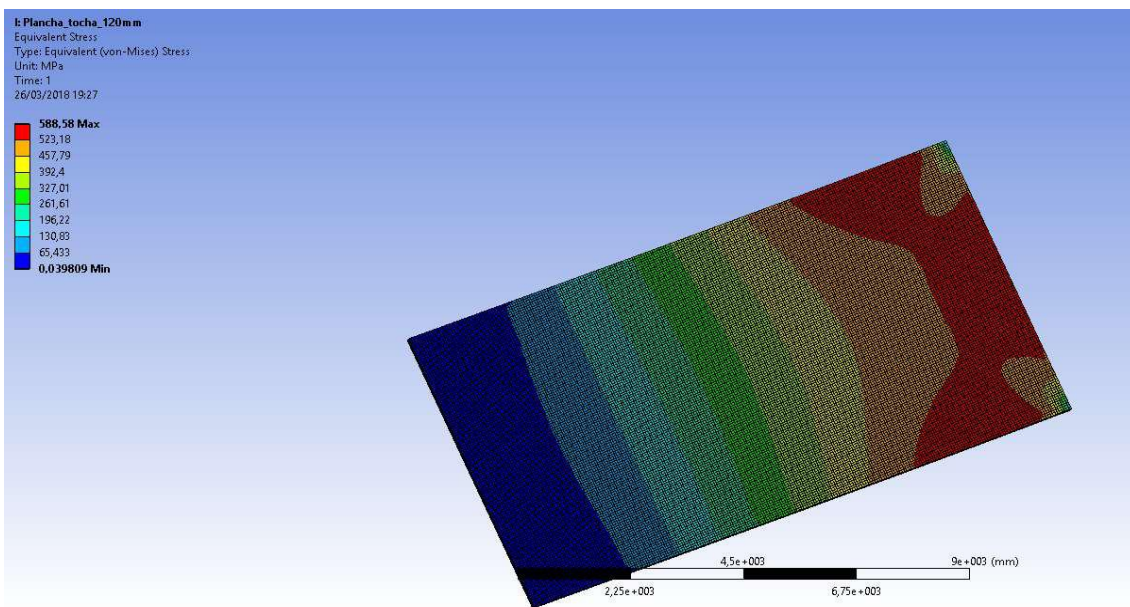


Ilustración 85: Resultados obtenidos con el espesor de 120 mm

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que el resultado obtenido es de 588,5 MPa que es un valor que se ajusta al admisible de deformación plástica. Por lo que analizamos el centro del ancla, para poder averiguar si la tensión está por debajo del límite elástico, y si no es así, analizar la deformación que tengamos. Podemos observar en la anterior ilustración que la tensión equivalente estará entre 327 MPa y 392 MPa, siendo esta zona fuera del límite elástico, produciéndose además una deformación que podemos ver en la siguiente ilustración (ver ilustración 87), estando la deformación en el intervalo de 1.1 y 1.3 m, siendo este valor muy alto.

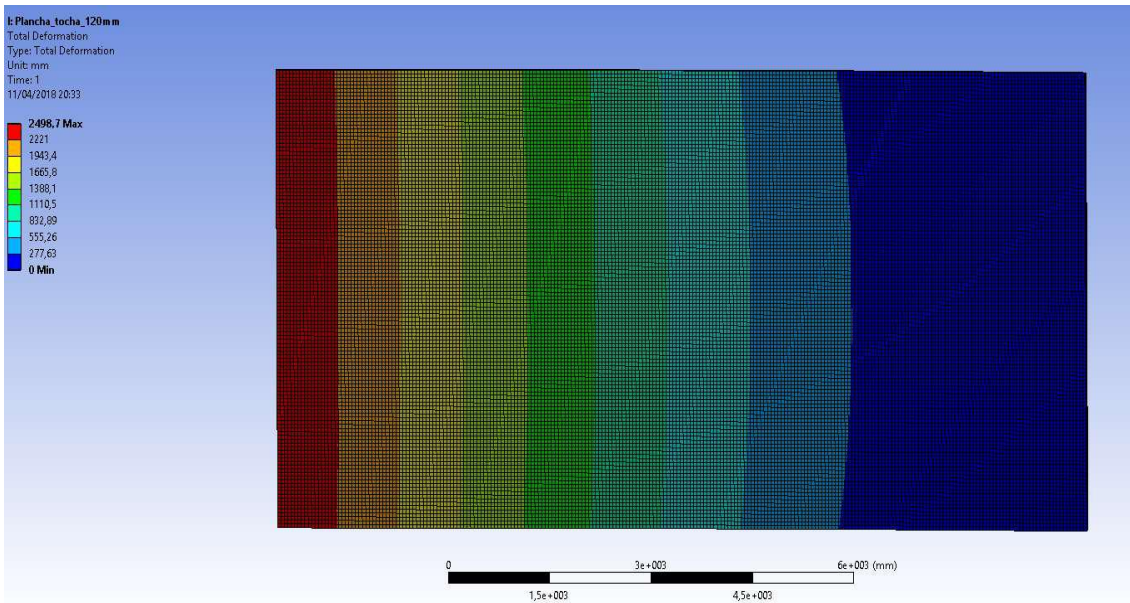


Ilustración 86: Deformación obtenida para el ancla de 120 mm de espesor

Fuente: *Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS*

Por lo que se opta por aumentar el espesor. Los parámetros escogidos para el siguiente análisis serán:

- ✓ **Espesor= 150 mm:** Tendremos entonces que las fuerzas debido al peso del ancla serán:
 - $W_{ancla, eje x} = -397.4 \text{ KN}$
 - $W_{ancla, eje z} = -635.98 \text{ KN}$

Para este espesor obtenemos los siguientes resultados (ver ilustración 88):

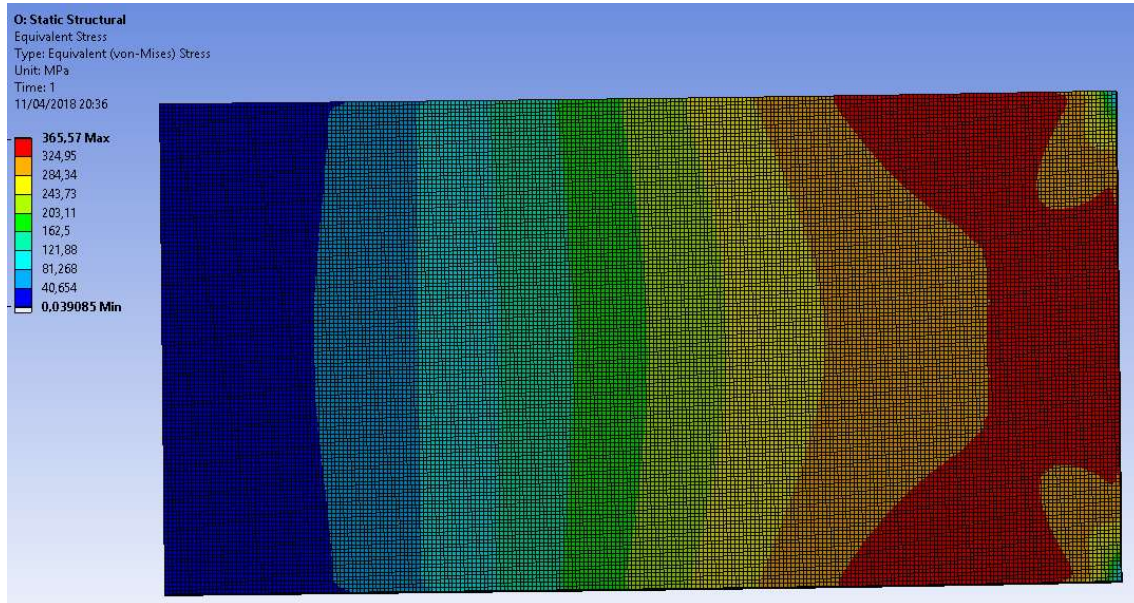


Ilustración 87: Resultado de la tensión equivalente para un espesor de 150 mm

Fuente: *Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS*

Podemos observar que la máxima tensión de 365 MPa se produce en una zona si casi deformación, por lo que se mirara en la zona central, donde tendremos que la tensión se encuentra entre los valores de 203 y 243 MPa, siendo menores que el límite plástico, y como se puede ver en la siguiente imagen (ilustración xxx), tendremos que la deformación será de como máximo 0.5, siendo esta toda elástica. Por lo que este dimensionamiento del ancla será válido.

Como este peso es excesivo, se propuso un modelo de ancla con agujero en el apartado anterior, que analizaremos en ANSYS, distinguiendo los siguientes casos:

- ✓ **Primer caso teórico:** Con las siguientes dimensiones del ancla:
 - Longitud del ancla: 12 m
 - Ancho del ancla: 6.2 m
 - Espesor del ancla: 120 mm.
 - Valor de h: 20 mm

Para este dimensionamiento obtenemos los siguientes resultados (ver ilustración 89):

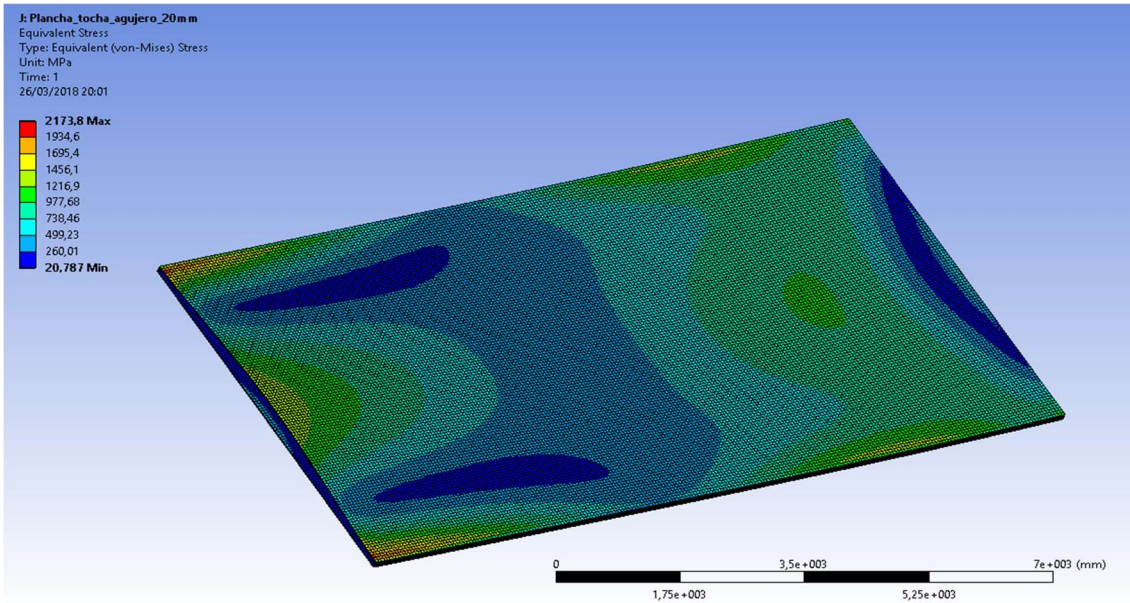


Ilustración 88: Resultados obtenidos para el ancla con agujero, espesor 120 mm y h 20 mm

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Como podemos observar, el resultado es de 2173 MPa, y se producen fundamentalmente en las esquinas del ancla, donde la deformación como podemos ver en la siguiente imagen (ver ilustración 90), tendremos que será de 3 metros, valor que no es aceptable. También tenemos que mirar el valor en el punto de unión con el anclaje, en el que podemos ver que tensión admisible es muy por encima del nivel plástico, además de que la deformación en esos puntos también será muy elevada (con un valor de 5 metros). Por lo que se propone otro caso en función de las dimensiones propuestas teóricamente.

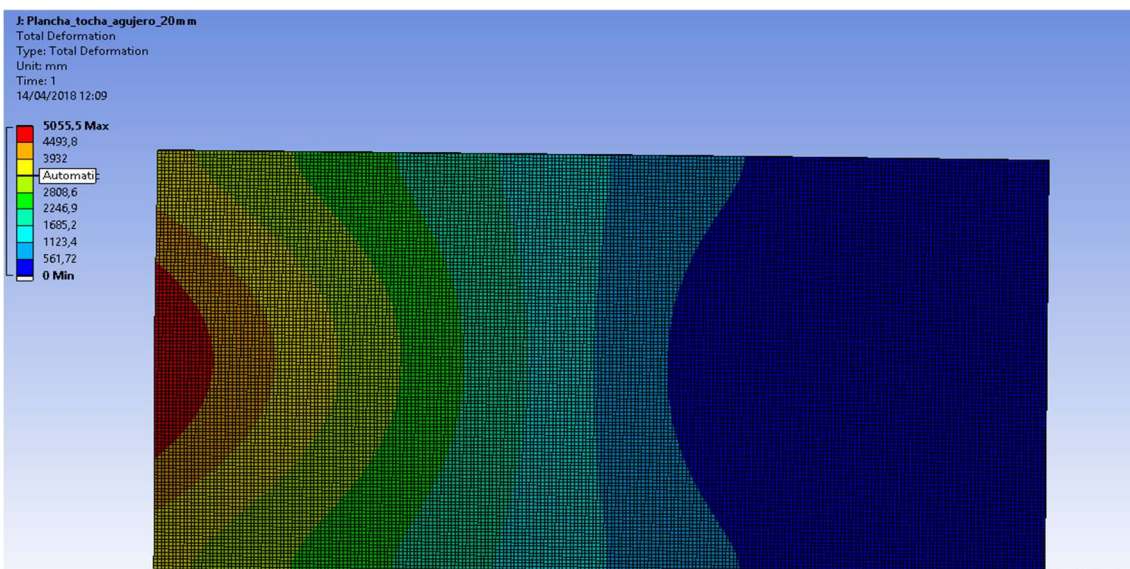


Ilustración 89: Deformación total obtenida para el primer dimensionamiento

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

- ✓ **Segundo caso teórico:** Con las siguientes dimensiones del ancla:
- Longitud del ancla: 12 m
 - Ancho del ancla: 6.2 m
 - Espesor del ancla: 150 mm.
 - Valor de h: 30 mm

Para este dimensionamiento obtenemos los siguientes resultados (ver ilustración 91) :

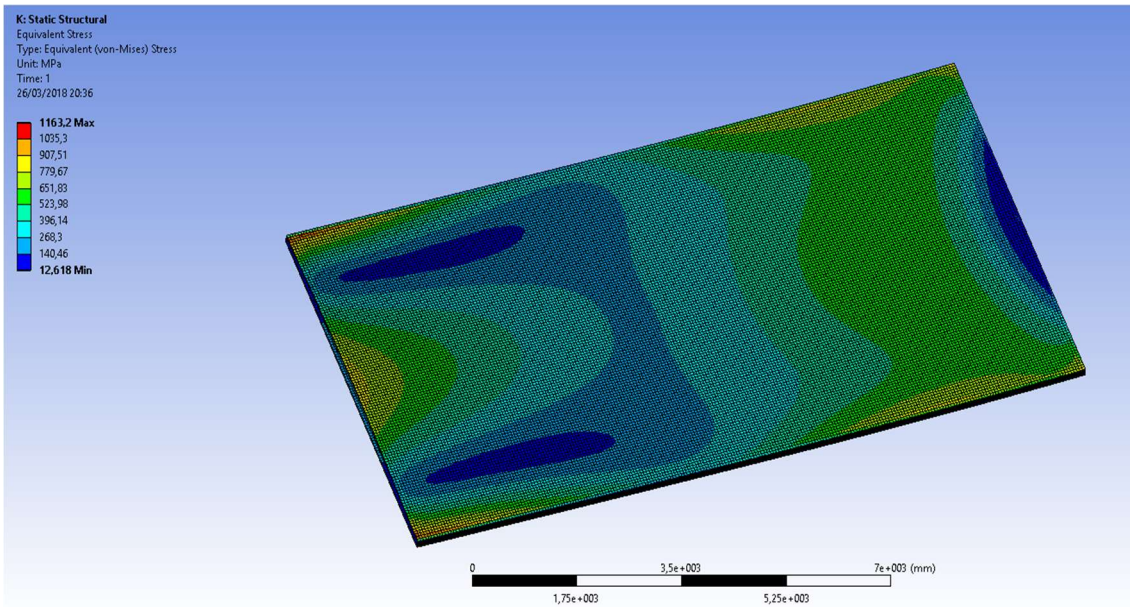


Ilustración 90: Resultados obtenidos para el ancla con agujero, espesor 150 mm y h 30 mm

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Como podemos observar, obtenemos un valor de tensión de 1163 MPa, se produce otra vez en las esquinas, siendo el valor de la deformación en estos puntos el que se puede ver en la siguiente imagen (ver ilustración 92), de 2 metros, siendo un valor muy alto de deformación para este caso. Además, observamos la zona de anclaje de los cables al ancla, y vemos que estamos fuera de los límites plásticos, por lo que podemos decir que la estructura se romperá. Por lo que pasamos a estudiar el tercer caso de dimensionamiento teórico visto anteriormente

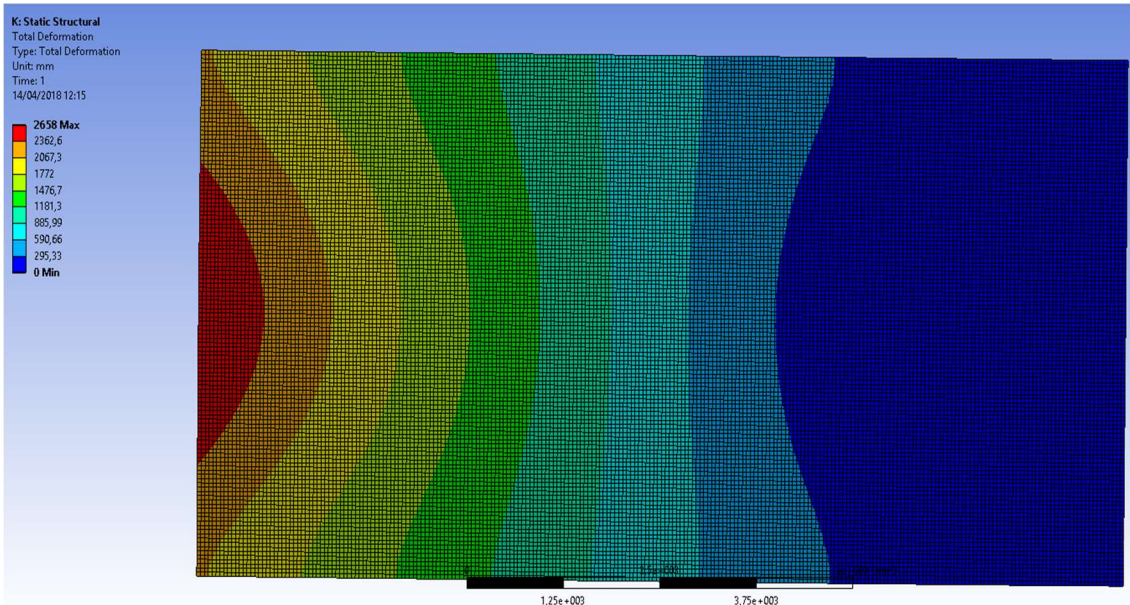


Ilustración 91: Deformación total obtenida para el segundo dimensionamiento

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

✓ **Tercer caso:** Con las siguientes dimensiones del ancla:

- Longitud del ancla: 12 m
- Ancho del ancla: 6.2 m
- Espesor del ancla: 170 mm.
- Valor de h: 40 mm.

Para este dimensionamiento obtenemos los siguientes resultados (ver ilustración 93):

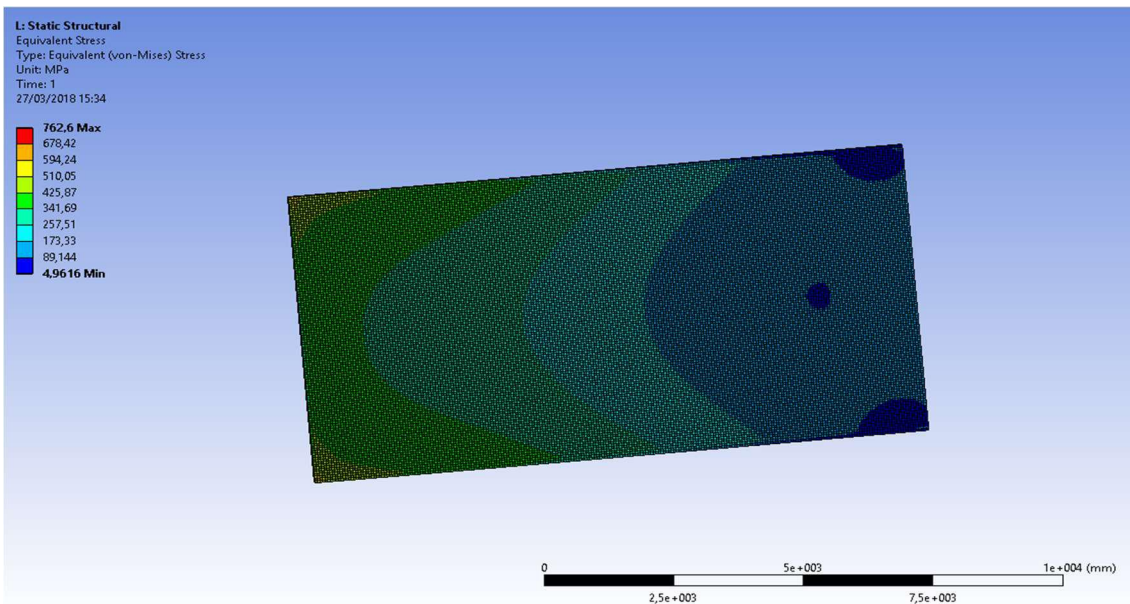


Ilustración 92: Resultados obtenidos para el ancla con agujero, espesor 170 mm y h 40 mm

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos seguir observando que en la zona de las esquinas del ancla se producirá una cierta deformación plástica, aunque en este caso, el área es tan pequeña que podríamos despreciar

estas deformaciones frente al resto analizadas. Por otro lado, analizamos la zona de unión del ancla con los cables, observando que estamos en la zona plástica, por lo que observamos en la siguiente imagen la deformación que se producirá en esta zona del ancla (ver ilustración 94), siendo esta de 1,5 m, por lo que no podemos aceptar como válido este ensayo, al ser un valor excesivo de deformación para estos puntos. Se propone entonces un nuevo caso de ancla:

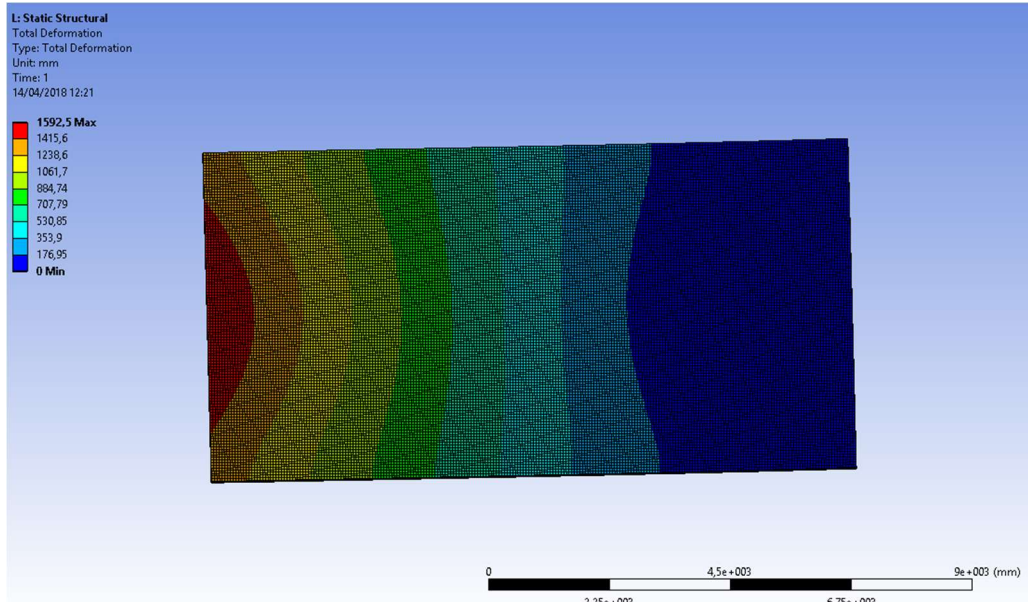


Ilustración 93: Deformación total obtenida para el tercer dimensionamiento

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

- ✓ **Cuarto caso:** Con las siguientes dimensiones del ancla:
- Longitud del ancla: 12 m
 - Ancho del ancla: 6.2 m
 - Espesor del ancla: 190 mm.
 - Valor de h: 48 mm.

Para este dimensionamiento obtenemos los siguientes resultados (ver ilustración 95):

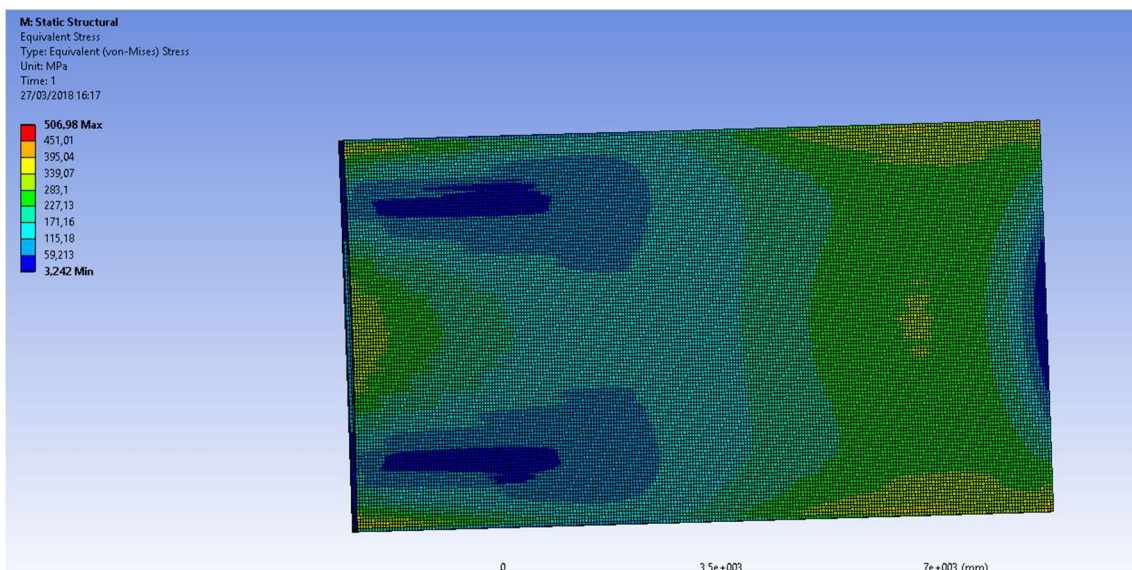


Ilustración 94: Resultados obtenidos para el ancla con agujero, espesor 190 mm y h 48 mm

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Volvemos a obtener que el máximo se produce en las esquinas, aunque podemos decir como en el caso anterior, que el área de deformación es tan pequeña que es despreciable frente al resto del ancla. Analizamos ahora la zona de unión del ancla con los cables y observamos que estamos en la zona plástica de nuevo, por lo que analizaremos la deformación en la siguiente imagen (ver ilustración 96). Como se puede ver la deformación en estos puntos es de 0.8 metros, que todavía no es admisible para el anclaje, por lo que se propondrá otro modelo de dimensionamiento adicional:

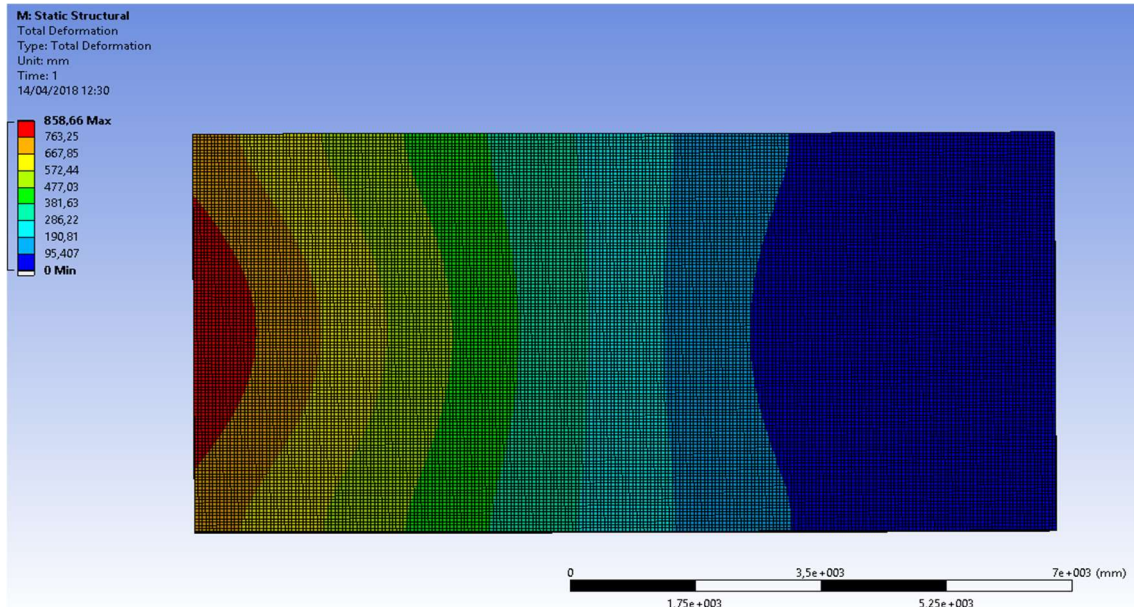


Ilustración 95: Deformación total obtenida para el cuarto dimensionamiento

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

- ✓ **Quinto caso:** Con las siguientes dimensiones del ancla:
 - Longitud del ancla: 12 m
 - Ancho del ancla: 6.2 m
 - Espesor del ancla: 280 mm.
 - Valor de h: 65 mm.

Para este dimensionamiento obtenemos los siguientes resultados (ver ilustración 97):

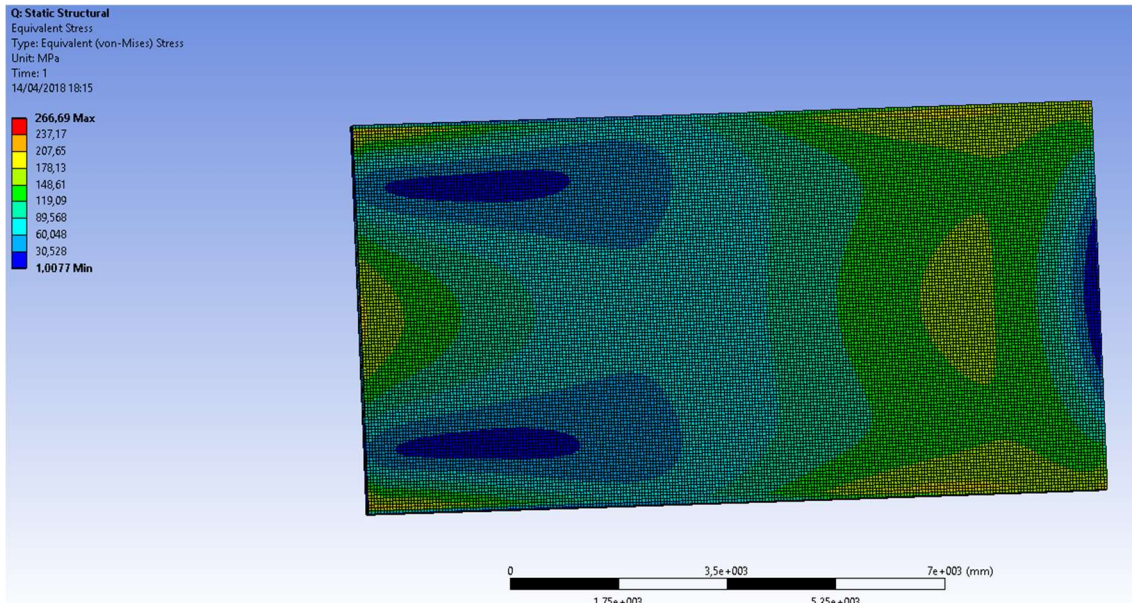


Ilustración 96: resultados obtenidos para el ancla con agujero, espesor 280 mm y h 60 mm

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que superamos el límite elástico otra vez en las esquinas y al ser el área de estas muy pequeña con respecto a el área total, tendremos que tener en cuenta la tensión equivalente en la zona de unión con los cables. Tendremos que en esta zona la tensión es inferior a 250 MPa, por lo que podemos asegurar que no deformara plásticamente el ancla.

Calculamos de nuevo el peso del ancla que obtendríamos:

$$P_{Ancla} = \rho * V = 7850 * 12 * (6.2 * 0.28 - ((6.2 - 0.065 * 2) * (0.28 - 0.065 * 2))) = 64.8 \text{ toneladas}$$

Por lo que tendremos que le dimensionamiento final de las anclas será (ver ilustraciones 98 y 99):

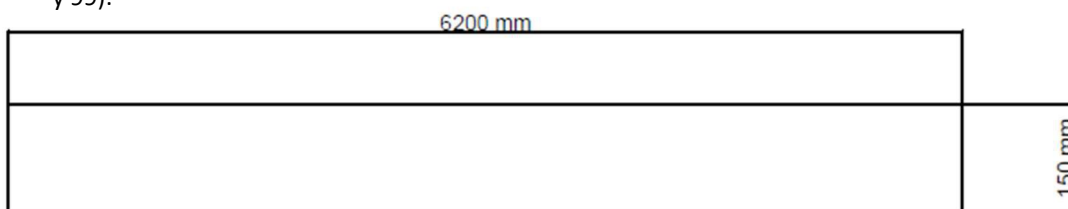


Ilustración 97: Dimensionamiento final del ancla sin agujero

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

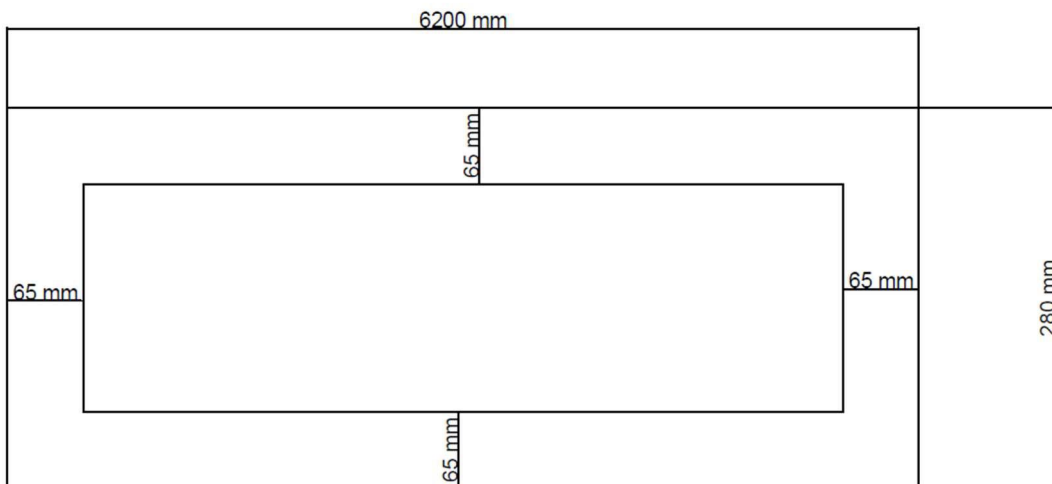


Ilustración 98: Dimensionamiento final del ancla con agujero

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

1.2.4. Diseño de anclaje con enganche, con tensión de los cables real:

De la misma manera que se ha analizado en el apartado número 5 de este proyecto, tendremos que dimensionar el enganche del anclaje, tanto para el ancla sin optimizar, como con el ancla optimizada. Primeramente, se propondrá el primer modelo como el ultimo dimensionamiento obtenido en los cálculos de ANSYS, y primeramente para el anclaje sin optimizar. Por lo que tendremos:

- ✓ **Primer caso:** Con las siguientes dimensiones del ancla:
 - Longitud del ancla: 12 m
 - Ancho del ancla: 6.2 m
 - Espesor del ancla: 150 mm.

Para estas dimensiones del ancla se ha obtenido que la tensión equivalente del ancla es la que podemos observar en la siguiente imagen (ver ilustración 100):

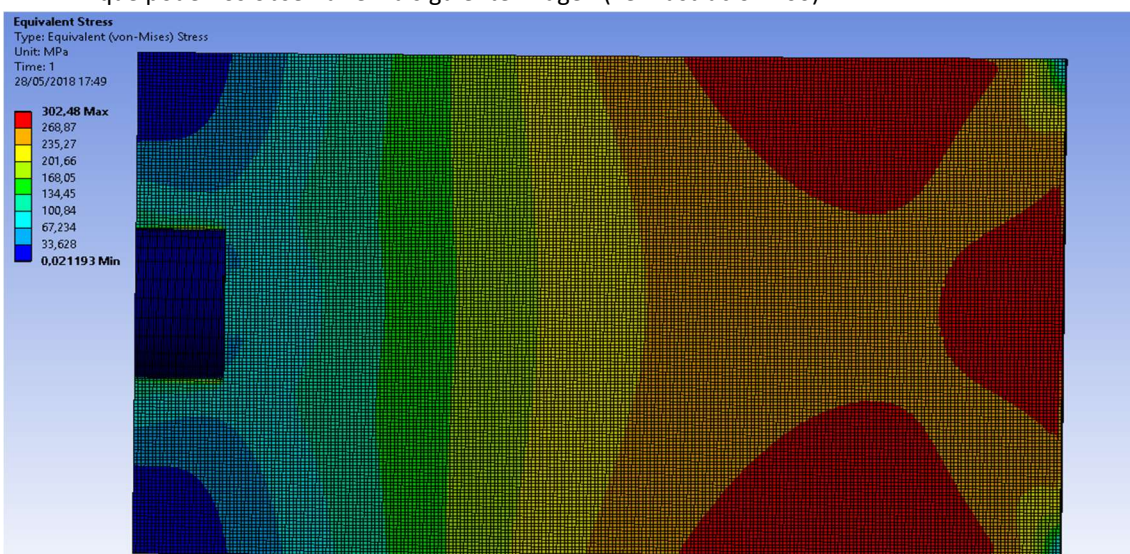


Ilustración 99: Tensión equivalente obtenida

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que, a pesar de superar el límite elástico en la zona posterior del ancla, tendremos que la deformación en la zona será mínima, por lo que podemos dar como válido el ensayo. La deformación la podemos observar en la siguiente imagen (ver ilustración 101):

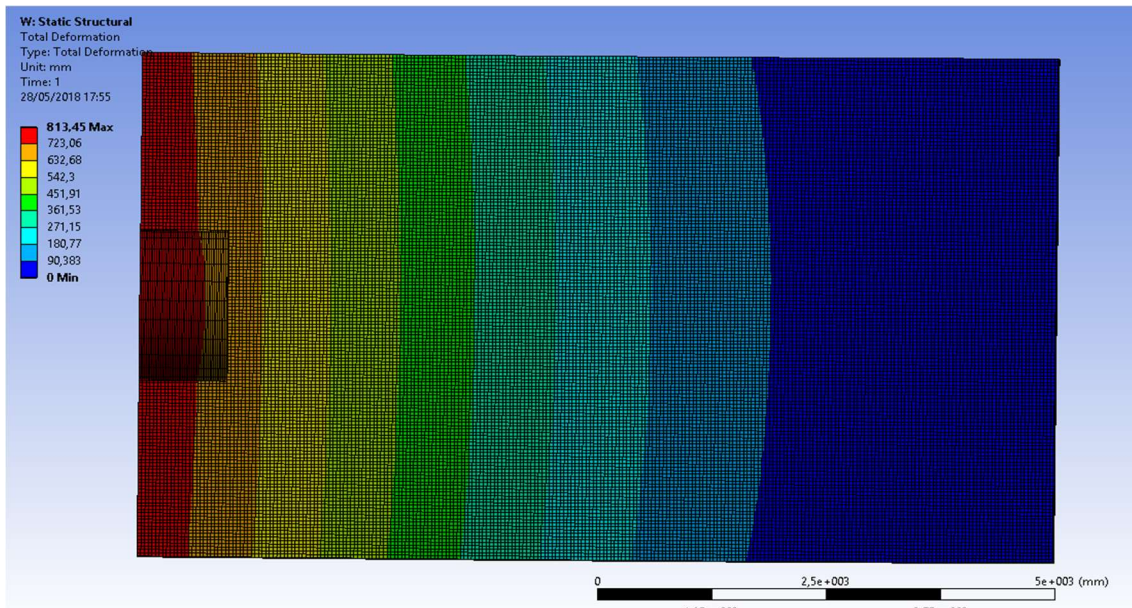


Ilustración 100: Deformación total obtenida

Fuente: *Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS*

Se obtiene un peso del ancla:

$$P_{Ancla} = \rho * (V + V_{enganche}) = 7850 * (11.16 + 1.44) = 98.9 \text{ toneladas}$$

Para el ancla optimizada, tendremos los datos obtenidos en el apartado anterior como punto de partida:

- ✓ **Primer caso:** Con las siguientes dimensiones del ancla:
 - Longitud del ancla: 12 m
 - Ancho del ancla: 6.2 m
 - Espesor del ancla: 280 mm.
 - Valor de h: 65 mm.

Para estas dimensiones del ancla se ha obtenido que la tensión equivalente del ancla es la que podemos observar en la siguiente imagen (ilustración 102):

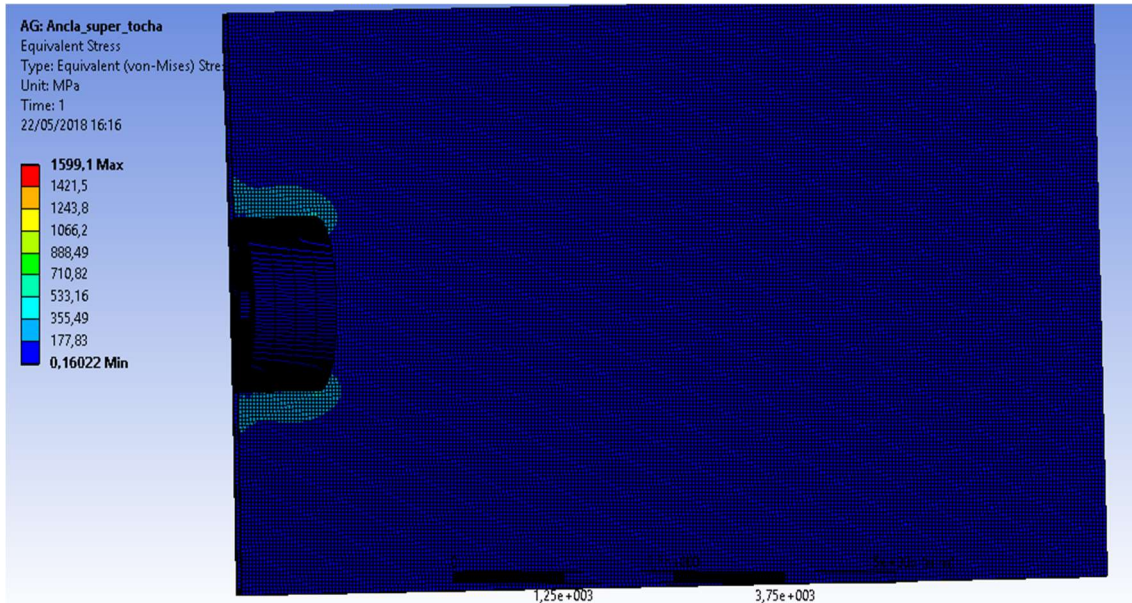


Ilustración 101: Tensión total obtenida tras el primer caso

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que la tensión en la zona de unión es de 533 MPa, por lo que tendremos que el material estará en zona plástica, cosa que no es admisible, por lo que se propondrá otro dimensionamiento con el fin de poder estar en la zona de límite elástico. Para este dimensionamiento se ha obtenido también la deformación que podemos ver en la siguiente imagen (ver ilustración 103), en la zona de deformación plástica, tendremos un valor de 0,206:

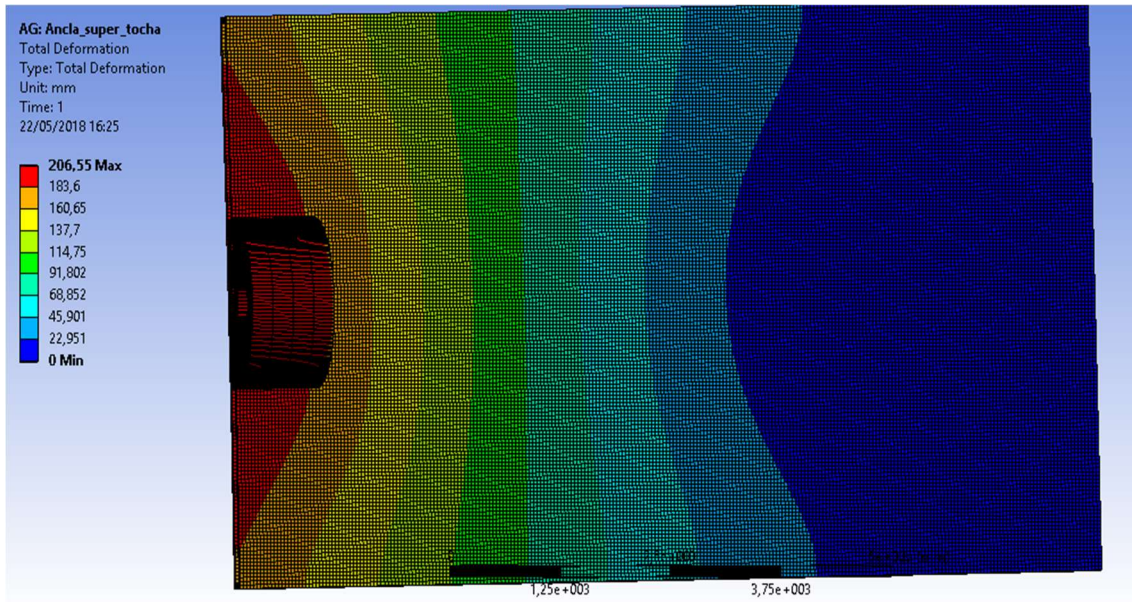


Ilustración 102: Deformación total obtenida tras el primer caso

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

✓ **Segundo caso:** Con las siguientes dimensiones del ancla:

- Longitud del ancla: 12 m
- Ancho del ancla: 6.2 m
- Espesor del ancla: 300 mm.

- Valor de h: 75 mm.

Para estas dimensiones del ancla se ha obtenido que la tensión equivalente del ancla es la que podemos observar en la siguiente imagen (ver ilustración 104):

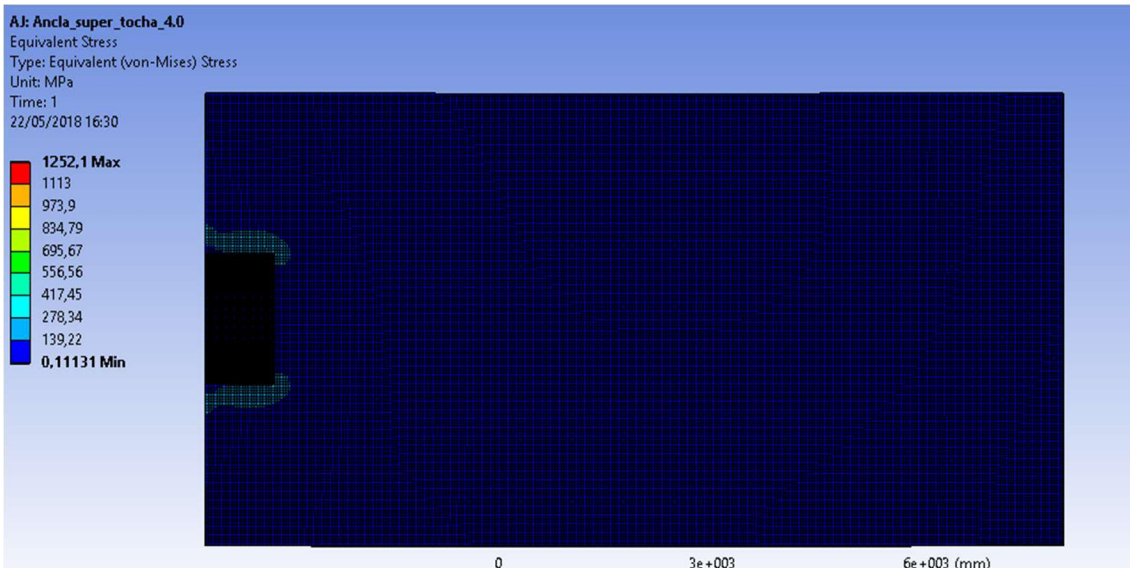


Ilustración 103: Tensión total obtenida tras el segundo caso

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que la tensión equivalente en la zona del enganche es menor de 250 MPa que corresponde con la tensión elástica del material, tendremos entonces que analizar la zona de las esquinas del ancla, para poder disminuir la tensión en esos puntos, para impedir la rotura del material en esos puntos. Para este modelo se ha obtenido que la deformación total corresponde con la siguiente imagen (ver ilustración 105):

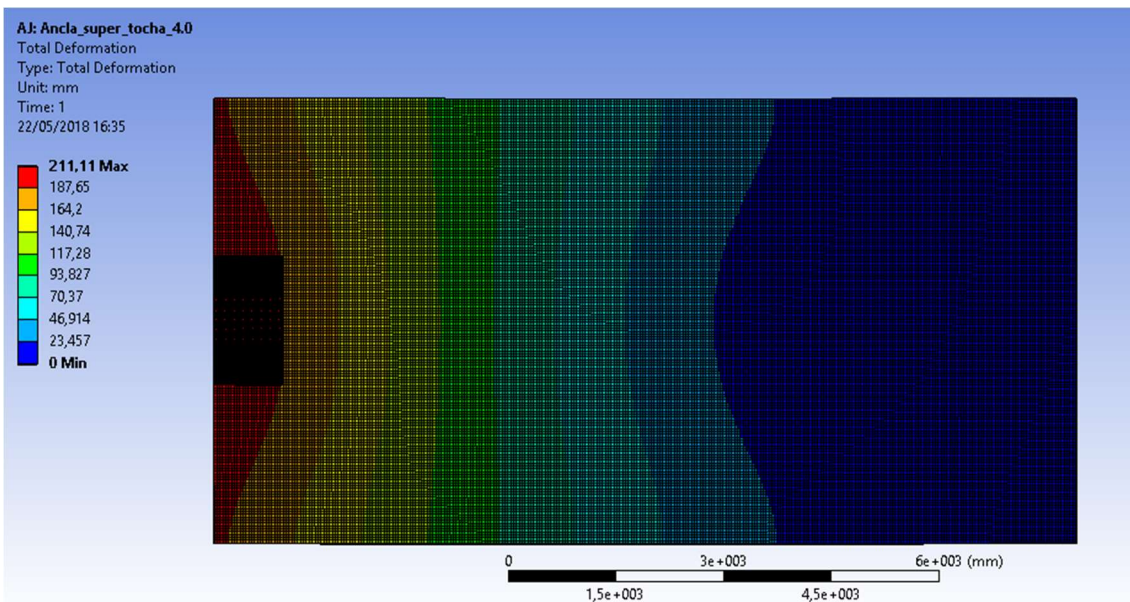


Ilustración 104: Deformación total obtenida tras el segundo caso

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Para poder solucionar los problemas de las esquinas, se propone un modelo como en el planteado en el apartado 1.1.4 de los cálculos, teniendo el siguiente esquema (ver ilustración 105):

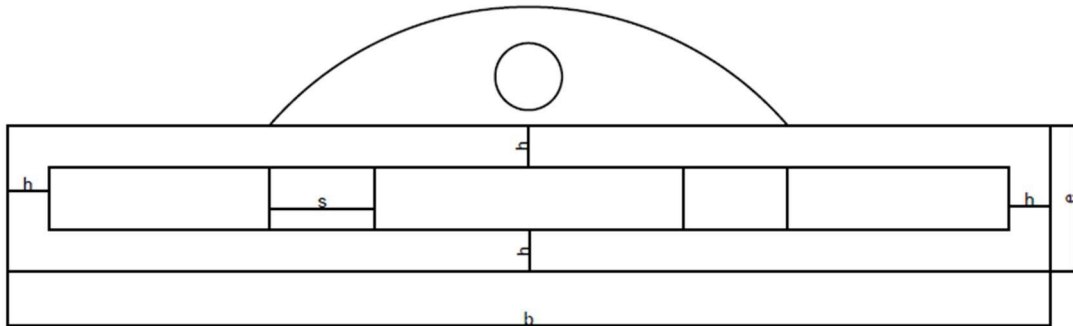


Ilustración 105: Propuesta dimensiones del ancla con cargas reales

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

Se hará un primer dimensionamiento de esta con los siguientes valores:

- ✓ **Primer caso:** Con las siguientes dimensiones del ancla:
 - Longitud del ancla: 12 m
 - Ancho del ancla: 6.2 m
 - Espesor del ancla: 280 mm.
 - Valor de h: 60 mm.
 - S=300 mm.

Para estos valores se ha obtenido la tensión equivalente que podemos ver en la siguiente imagen (ver ilustración 106):

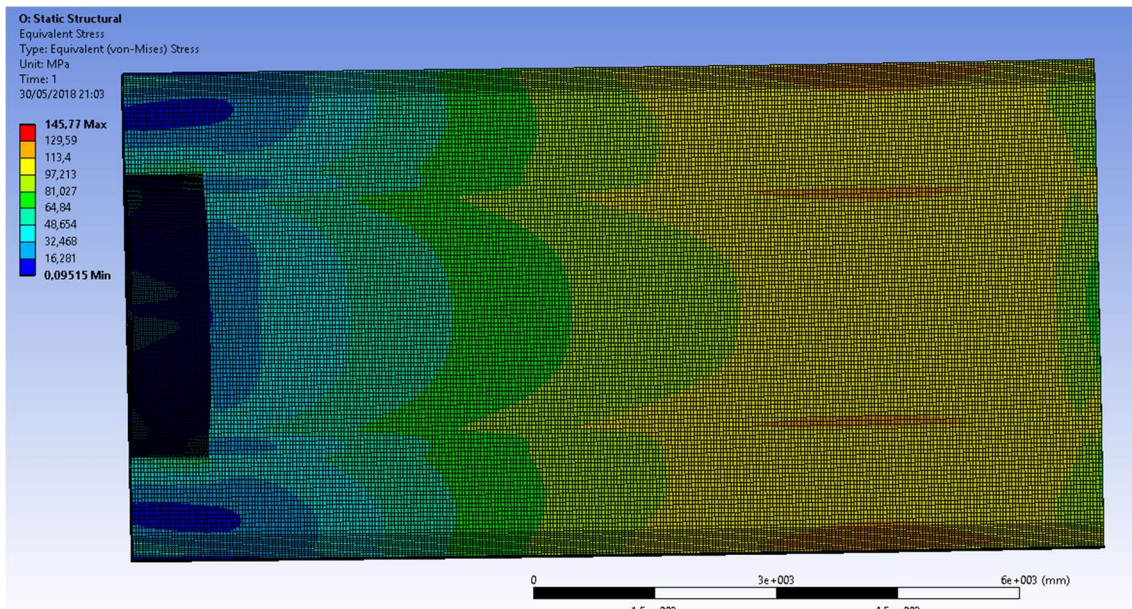


Ilustración 106: Tensión total obtenida tras el primer caso

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que los valores son menores que la tensión de de 250 MPa, por lo que podemos dar el ensayo por válido. Para poder reducir el peso del ancla, se ha propuesto el siguiente dimensionamiento:

✓ **Segundo caso:** Con las siguientes dimensiones del ancla:

- Longitud del ancla: 12 m
- Ancho del ancla: 6.2 m
- Espesor del ancla: 260 mm.
- Valor de h: 50 mm.
- S=300 mm.

Para estos valores se ha obtenido la tensión equivalente que podemos ver en la siguiente imagen (ver ilustración 107):

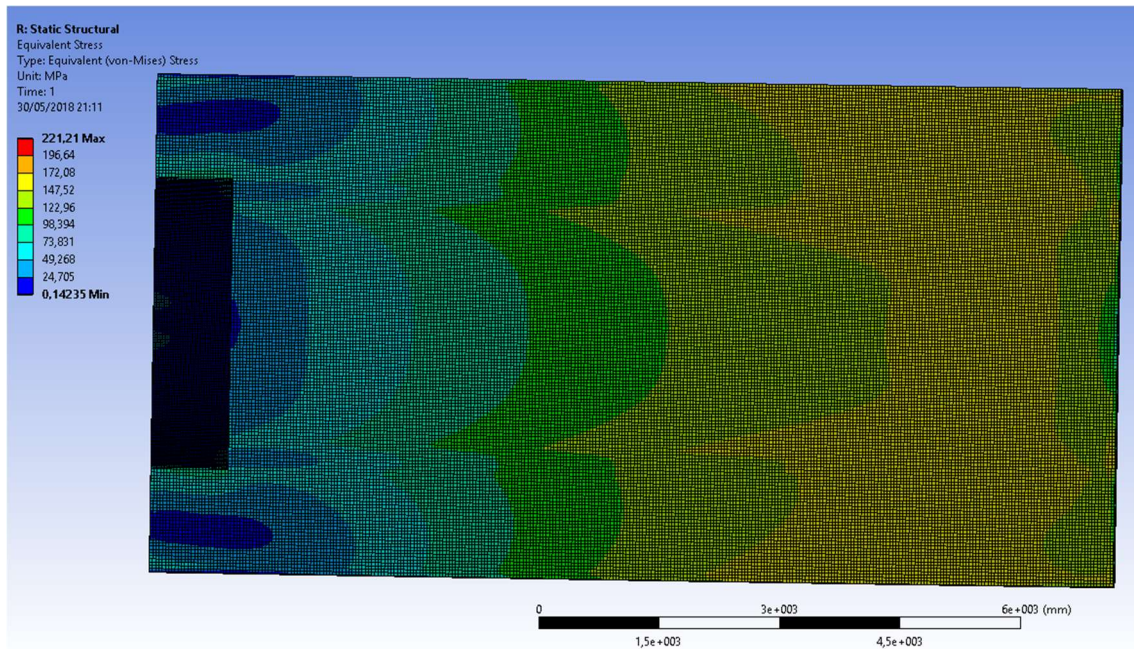


Ilustración 107: Tensión total obtenida tras el primer caso

Fuente: Elaboración propia en el programa de análisis de elementos finitos ANSYS

Podemos observar que seguimos en los límites del límite elástico, por lo que podremos dar por válido este ensayo. Calculamos el peso para estos parámetros:

$$P_{Ancla} = \rho * (V + V_{enganche} + V_{añadidos} = 7850 * (7.62 + 1.44 + 0.54 * 2) = 79.59 \text{ toneladas}$$

1.3. Conclusiones:

- ✓ Como se puede observar, el vaciado del material, a pesar de hacer que el ancla sea más ancha, reduce el peso total del mismo, debido a que el espesor de la chapa es más significativo, que el ancho de esta.
- ✓ Para futuras investigaciones, se podría incluir la optimización topológica en ANSYS, que nos dará unos resultados mejores en cuanto a ahorro de material que el que podamos hacer con un simple vaciado.
- ✓ Al ser una estructura offshore de tipo taut leg, tendremos que habitualmente se utiliza en mares con profundidades muy altas, pero en este trabajo se ha realizado con el fin de poder observar este tipo de estructuras que en la actualidad son las más utilizadas y en las que más se invierte dinero.
- ✓ Otra forma de mejora sería comprobar los mismos ensayos realizados en ANSYS, con otro programa como podría ser CATIA, con el paquete correspondiente a aerogeneradores, que nos permitiría un cálculo más exacto del mismo.
- ✓ Se ha podido observar, que los resultados obtenidos teóricamente mediante la tensión equivalente de Von Mises, son muy similares a los obtenidos experimentalmente.
- ✓ Se ha aprendido la importancia de las teorías de cimentaciones (estudiadas por los ingenieros de caminos), como son la teoría de Rankine y de Coulomb, para distintas disposiciones de las cimentaciones.
- ✓ La normativa GL ha sido de vital importancia para el desarrollo de este proyecto, tanto de la zona de anclajes, como del resto de partes del aerogenerador.
- ✓ Por último, se podría también hacer un estudio del impacto ambiental de la zona seleccionada, además de realizar el trabajo con otro tipo de fondos marinos como sería el fondo arcilloso y el fondo rocoso.

Bibliografía

- 4COffshore. (2013). *Monopile Support Structures*. Recuperado el 21 de enero de 2018, de 4COffshore: <http://www.4coffshore.com/windfarms/monopiles-support-structures-aid4.html>
- Aguilar, I. D. (2018). *Estudio y diseño para la incorporación de energía solar en aerogeneradores en áreas marinas*. MADRID.
- Alternative Energy in New York. (s.f.). *Wind Energy in NYC*. Recuperado el 26 de enero de 2018, de Alternative Energy in New York: <https://macaulay.cuny.edu/eportfolios/alternativeenergyinnewyork/wind-energy-in-nyc/>
- Arefin, U. A. (2014). *Feasibility Analysis of Wind Energy at Different Coastal Areas*. Obtenido de Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/271770428_Feasibility_Analysis_of_Wind_Energy_at_Different_Coastal_Areas_of_Bangladesh
- Asenjo, S. C. (2016). Sistema de anclaje en aerogeneradores marinos.
- Carnicero, A. (s.f.). Apuntes análisis de estructuras.
- Cleantechcamp. (2016). Ahora los parques eólicos marinos pueden ser más eficientes. Recuperado el 15 de enero de 2018, de Cleantechcamp: <http://www.cleantechcamp.com/parques-eolicos-marinos-mas-eficientes/>
- CNN. (2012). Floating turbine buoys offshore wind potential. Recuperado el 25 de enero de 2018, de CNN: <https://edition.cnn.com/2012/06/28/world/windplus-floating-wind-turbine/index.html>
- DNV company. (s.f.). Normativa de anclaje en suelos arcillosos . Obtenido de DNV.GL: <https://www.dnvgl.com/>
- Drilling Formulas. (2016). Suction Anchor Calculation. Recuperado el 27 de enero de 2018, de Drilling Formulas: <http://www.drillingformulas.com/suction-anchor-calculation/>
- Engeneering, Dred. (2006). CATENARY MOORING SYSTEM. Recuperado el 30 de enero de 2018, de OFFSHORE MOORING LINES: <http://www.dredgingengineering.com/moorings/lines/Offshore%20mooring%20lines%20mooring%20system.htm>
- Engineering, Power. (2016). The London Array turns two. Recuperado el 2 de febrero de 2018, de Power Engineering int: <http://www.powerengineeringint.com/articles/print/volume-23/issue-8/features/the-london-array-turns-two.html>
- EOI de Sevilla. (2011). Impacto medioambiental. Recuperado el 07 de 06 de 2018, de <https://www.eoi.es/es/file/17812/download?token=SHaZPNzB>

- Escribano, C. (2018). Determinación de cargas aerodinámicas en el aerogenerador de una turbina eólica. Madrid.
- Interempresas. (07 de 06 de 2018). Deformación y chapa. Obtenido de [https://www.interempresas.net/Deformacion-y-chapa/Articulos/1831-El-corte-de-chapa-mediante-oxicorte-\(1-parte\).html](https://www.interempresas.net/Deformacion-y-chapa/Articulos/1831-El-corte-de-chapa-mediante-oxicorte-(1-parte).html)
- INTERMOOR. (s.f.). SEPLA Offshore Anchors. Recuperado el 29 de enero de 2018, de INTERMOOR: <http://www.intermoor.com/services-5/mooring-services-6/sepla-offshore-anchors-166>
- Jose Luis Almazán, M. d. (s.f.). Ingeniería Marítima: Sistemas de Fondeo y Anclaje. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- (2017). Libro de cimentaciones .
- Maria. (2011). *Peculiaridades de los parques eólicos marinos*. Recuperado el 21 de enero de 2018, de SMI Energías renovables: <https://smienergias.wordpress.com/category/energia-eolica/offshore-vs-onshore/>
- Net Zero Tools. (s.f.). *Safewaze PPE Fall Protection - Base Plate Anchor - 4002*. Recuperado el 27 de enero de 2018, de NetZeroTools: http://www.netzerotools.com/Safewaze-PPE-Fall-Protection--Base-Plate-Ancor--4002_p_7959.html
- NOTE, THE. (2015). *Conozca el London Array: El parque eólico marino más grande del mundo*. Recuperado el 19 de enero de 2018, de The note: <http://www.thenote.cl/category/conozca-a-london-array-el-parque-eolico-marino-mas-grande-del-mundo/>
- Paul M. Thompson, K. L. (2014). *Assessing Environmental Impacts of Offshore Wind Farms: Lessons Learned and Recommendations for the Future*. Recuperado el 15 de enero de 2018, de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/266086383_Assessing_Environmental_Impacts_of_Offshore_Wind_Farms_Lessons_Learned_and_Recommendations_for_the_Future
- Power, The Wind. (s.f.). *Bases de datos Parques eólicos Offshore*. Recuperado el 21 de enero de 2018, de The Wind Power: https://www.thewindpower.net/store_continent_es.php?id_zone=1006
- Renewable energy Hamburg. (2016). *The last wind turbine is installed at the Gode Wind offshore wind farm*. Recuperado el 23 de enero de 2018, de Renewable energy of Hamburg: <http://www.erneuerbare-energien-hamburg.de/en/news/overview/details/the-last-wind-turbine-is-installed-at-the-gode-wind-offshore-wind-farm.html>
- Sector, Dutch Water. (2014). *Van Oord signs EPC contract to build largest Dutch offshore wind farm*. Recuperado el 18 de enero de 2018, de Dutch Water Sector: <https://www.dutchwatersector.com/news-events/news/10530-van-oord-signs-epc-contract-to-build-largest-dutch-offshore-wind-farm.html>

- Uceta, J. (2018). *Estudio de cargas sobre el soporte en un aerogenerador marino*. Madrid.
- Universidad de la republica de Uruguay. (s.f.). *Momentos de áreas de diferentes secciones*. Recuperado el 20 de enero de 2018, de la página web de la Universidad de la Republica de Uruguay: <https://eva.fing.edu.uy/mod/folder/view.php?id=2954>
- VRYHOF ANCHORS. (s.f.). *Anchors: Stevmanta VLA*. Recuperado el 29 de enero de 2018, de VRYHOF ANCHORS: http://www.vryhof.com/products/anchors/stevmanta_vla.html
- Wikipedia. (s.f.). *Catenary versus Tautleg*. Recuperado el 29 de enero de 2018, de Wikipedia: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CatenaryversusTautleg.PNG>
- Wind Energy. (2015). *Offshore support structures*. Recuperado el 25 de enero de 2018, de Wind Energy The Facts: <https://www.wind-energy-the-facts.org/offshore-support-structures-7.html>
- Zhao, Y. (2012). *Preliminary Design of a Multi-Column TLP Foundation for a 5-MW Offshore Wind Turbine*. Recuperado el 25 de enero de 2018, de MDPI: <http://www.mdpi.com/1996-1073/5/10/3874>

Parte III: **Pliego de** **condiciones**

1. Condiciones económicas y generales:

En esta sección del trabajo fin de grado, se analizará la normativa a utilizar durante la fase de diseño.

1.1. Normativa GL (Germanischer Lloyd):

La normativa que se utilizará para el dimensionamiento de los cables será la mencionada en este título. De ella podremos sacar los coeficientes de seguridad que tendrán los cables de la estructura a analizar, consiguiendo con esto, el dimensionamiento posterior del ancla. A si mismo se sacaran los valores de viento y oleaje necesarios para el dimensionamiento de la torre y de las palas.

1.2. Normativa UNE ISO 1461:

En esta normativa se recoge el proceso de galvanizado en caliente, así como los espesores de galvanizado necesarios para un determinado espesor de acero. Esta normativa contempla que el galvanizado sea realizado en caliente, con el fin de poder realizar capas más finas efectivas del material.

1.3. Plazo de entrega del proyecto y lugar de entrega del mismo:

El plazo de entrega del proyecto después de ser aprobada la licitación será de entre 2 y 3 meses y el lugar de entrega de este será en la sede de la Universidad Pontificia Comillas situada en la calle Alberto Aguilera 21.

2. Condiciones técnicas y particulares:

2.1. Proceso de diseño del ancla:

- Para el diseño del ancla, se utilizarán los siguientes programas de diseño que se exponen a continuación: Solid Works (programa de diseño 3D) y los ensayos de elementos finitos, una vez terminado su diseño en 3D serán dos programas que elegir: ANSYS o CATIA, y en el programa CATIA, con el módulo correspondiente a aerogeneradores. Al igual que con el ancla, el diseño del cableado y de los enganches del ancla mencionada anteriormente, se realizarán con cualquiera de estos dos programas, y siguiendo las normativas de diseño expuestas en el apartado anterior.

2.2. Proceso de taladrado del fondo marino:

El proceso de taladrado del fondo marino será necesariamente subcontratado y además deberá cumplir las siguientes condiciones de fondo marino:

- Fondo arenoso.
- Profundidad de establecimiento del cableado: 40 metros.
- La instalación de este se realizará en la costa del Sahara Occidental³ entre 30- 40 kilómetros de la costa.

³ Localización aportada por el alumno Ignacio Diez de Aguilar en su proyecto "Estudio y diseño para la incorporación de energía solar en un aerogenerador marino"

2.3. Proceso de fabricación del ancla, cableado y enganches:

- Primeramente, se deberá realizar con un tipo de acero que tenga un límite elástico comprendido entre 250-275 MPa debido a que el diseño del ancla así lo requiere. Además, tendrá que tener como máxima tensión a rotura 640 MPa.
- Para la fase de fabricación del ancla, se hará necesario:
 - La contratación de un soldador homologado, para la unión de las distintas partes del ancla, expuestas en el presupuesto económico de este proyecto.
 - Además, para el proceso de mecanizado, se seguirá la tabla también expuesta en el presupuesto económico, adaptándose dicha velocidad al espesor que se desea mecanizar.
 - Se deberá realizar un proceso de galvanizado en la parte exterior del ancla, con el objetivo de mejorar los problemas de corrosión que pueda tener en el fondo marino. Además, este proceso se realizará con Zinc para poder abaratar costes, además de ser realizado en caliente. El espesor que se debe de incluir en el ancla será de entre 70 y 85 micrómetros, como recoge la normativa expuesta en el apartado anterior.
 - Se seguirá el mismo proceso en la fabricación del enganche.

2.4. Proceso de transporte y instalación del anclaje:

Para el proceso de transporte, tanto del anclaje como del cableado, se realizará mediante una subcontratación de un equipo de transporte marino, especializado y con las herramientas necesarias como para poder realizar de manera correcta la instalación del anclaje en el fondo marino.

Parte IV: Presupuesto

1. Preparación del terreno:

En la presupuestación del anclaje, tendremos que tener en cuenta todas las fases posibles, desde primeramente la preparación del fondo marino, así como la fabricación del ancla y su posterior instalación en el fondo marino. Para la preparación del terreno, acudiremos a la empresa perforaciones Diamond Offshore, que dispone de maquinaria con la potencia suficiente para poder realizar las perforaciones a una altura de 40 metros, que tenemos en nuestro caso. La máquina elegida en su catálogo es la Ocean Scepter, cuya hoja de especificaciones se incluye en el proyecto posteriormente en la zona de anexos.

2. Fabricación del anclaje (incluido precio cables):

Para la fabricación del anclaje se ha escogido un acero utilizada para la fabricación de los barcos, que viene dado por la normativa 10025-3, y se adjuntará la hoja de especificaciones en los anexos. Este tipo de aceros tiene la característica de soportar adecuadamente tensiones elásticas comprendidas entre 200-275 MPa, por lo que estamos en el rango de tensiones en el que se ha diseñado el anclaje. Para la protección del material en el fondo marino (frente a la corrosión producida por el fondo oceánico), se utilizará un proceso de galvanizado del material, proceso consistente en cubrir un metal con otro, en nuestro caso, se utilizará el Zinc, al ser el más barato para el proceso de galvanizado. Para la fabricación del ancla, se optará por la soldadura, al ser un proceso complejo fresar la zona interior del ancla, por lo que se opta por la soldadura arco sumergido, al ser una superficie de soldado muy grande (12 metros del ancla). Para ello se muestra el siguiente esquema de soldado de las diferentes partes (ver ilustración 105):

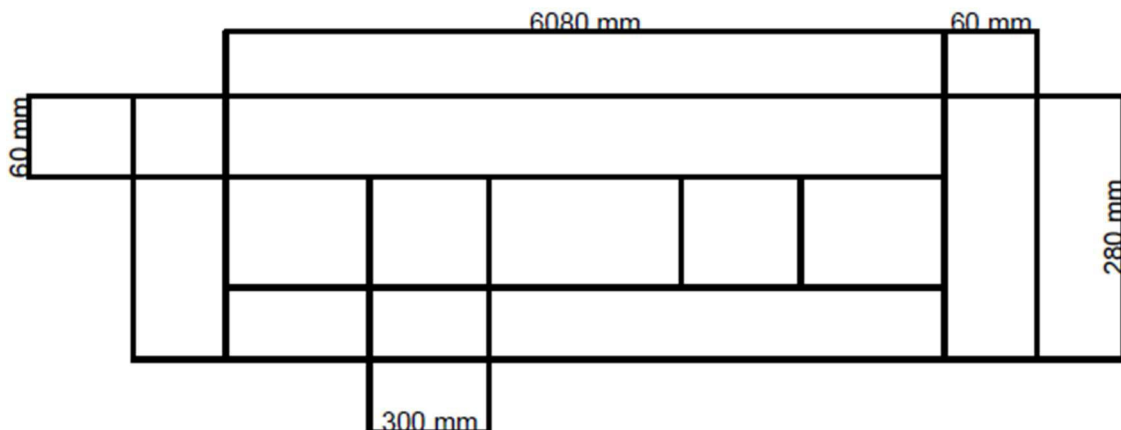


Ilustración 108: Diseño de las planchas para su posterior soldado

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD

Para ello, pediremos el material, teniendo en cuenta el peso, y el euro kilo de este. En nuestro caso, tendremos que el acero este en torno a 1,5-2 euros el kilo, por lo que se escoge 1.7 euros el kilo. Por lo que tendremos que el precio del material bruto será:

$$\text{Precio} = \text{Peso ancla} * \frac{\text{€}}{\text{Kilo}}$$
$$\text{Precio} = 3 * 75,59 * 10^3 * 1.7 \frac{\text{€}}{\text{Kilo}} = 3 * 128503 = 385.509 \text{ €}$$

Una vez tenemos el dinero del material, tendremos que sumarle el precio de la soldadura. Para ello tenemos que tener en cuenta los siguientes factores:

- Primeramente, tendremos que preparar los bordes del material⁴, consistente en la realización de chaflanes en la zona de unión, para poder asegurar que la zona de unión de la soldadura se realiza de manera segura. Esto es necesario para espesores mayores de 6 mm. Para ello tendremos que utilizar la técnica de oxicorte para esta tarea. Para el espesor de 60 mm tendremos que utilizar la velocidad de corte que viene expresada en la siguiente tabla:

VALORES RECOMENDADOS PARA OXICORTE									
SOPLETE SIMPLE					SOPLETE DOBLE, DE CHAFLANES, ETC.				
Espesor (mm)	Presión O ₂ (bar)	Sangría % kerf (mm)	Velocidad de corte (mm/min)		Espesor (mm)	Presión O ₂ (bar)	Sangría % kerf (mm)	Velocidad de corte (mm/min)	
			Recto	Curvo				Recto	Curvo
3 ÷ 4	2	1	700	600	3	2 ÷ 4	1.5	800	530
5 ÷ 6	4		730	630	5			750	480
					10			700	400
6 ÷ 7	5 ÷ 7.5	1.8	730	630	10	3 ÷ 4	2	640	460
8 ÷ 9			700	600	15			550	400
10			660	560	20			520	360
15			620	520	25			500	330
15	7 ÷ 8	1.9	620	520	25	4 ÷ 5	2.5	530	360
20			560	460	30			450	300
25			520	420	40			400	260
					50			350	250
25	7.5 ÷ 8.5	2.3	520	420	50	4 ÷ 5	3	390	260
30			500	400	60			320	230
35			480	380	80			300	210
40			430	360					
40	7 ÷ 7.5	2.2 ÷ 2.4	430	360	80	4 ÷ 5	3.5 ÷ 4	320	220
50			410	310	100			300	200
60			390	290	120			270	170
60	6 ÷ 8	3.2 ÷ 3.5	390	290	120	5 ÷ 6	4.5 ÷ 5.5	300	190
75			340	270	150			200	150
100			330	250	200			170	120
100	7.5	3.5 ÷ 3.8	340	250	200	6	5.5 ÷ 6	190	130
150			260	210	250			140	110
200			170	160	300			120	90
200	7.5	4	170	160					
250			4.2	150	140				
300			8	130	110				

Ilustración 109: Tabla con las velocidades de corte correspondiente con los distintos espesores.

Fuente: (Interempresas, 2018)

Podemos observar que, en nuestro caso, para el soplete simple, tendremos una velocidad de corte de 130 mm/min. Si realizamos esta operación con una maquina CNC multieje, tendremos que el precio aproximado saldría de 29 euros por hora trabajada. Por lo que tendremos que el precio en la maquina CNC será:

$$Precio_{mecanizado} = 29 \frac{\text{€}}{\text{hora}} * \frac{12000 \text{ mm}}{300 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 19,33 \text{ €}$$

⁴ Preparación que nos dará los del grupomav.

- Posteriormente, se tendrán en cuenta los útiles de sujeción para la realización de la soldadura, estimando que su coste será de aproximadamente 40 euros la hora y que el proceso de soldado se llevara a cabo en 2 días, es decir en 16 horas laborables:

$$Precio_{preparación} = 40 \frac{\text{€}}{\text{hora}} * 16 h = 640 \text{ €}$$

- Por último, tendremos las cuentas el propio proceso de soldado de las piezas a realizar, teniendo en cuenta el salario mínimo de un trabajador cualificado, siendo también homologado, cuyo sueldo esta aproximadamente entre los 60-70 euros la hora. Para la tarea utilizaremos el alambre de arco sumergido que se incluirá en los anexos de la empresa indura5. La velocidad de corte de para un alambre de diámetro 2.4 mm será de 20 cm/min, por lo que el coste de la soldadura será el siguiente (considerando que el número de pasadas sea 2):

$$Precio_{soldadura} = 60 \frac{\text{€}}{\text{hora}} * \frac{1200 \text{ cm}}{20 \frac{\text{cm}}{\text{min}}} * \frac{1 h}{60 \text{ min}} * 2 \text{ pasadas} * 8 \text{ uniones} = 960 \text{ €}$$

Tendremos entonces que el precio total de la soldadura será de:

$$Precio_{total,mecanizado} = 3 * (Precio_{mecanizado} + Precio_{preparación} + Precio_{soldadura}) = 4.933,93 \text{ €}$$

Por último, se incluirá el precio del galvanizado de la pieza, siendo su coste de entre 0.8 euros la hora y 1 euro la pieza. Por lo que el coste del galvanizado será:

$$Precio_{galvanizado} = 1 \frac{\text{€}}{\text{Kg}} * 75.59 * 10^3 \text{ Kg} * 3 \text{ anclas} = 226.770 \text{ €}$$

Ahora se calculará el precio de los cables, en función de los parámetros de diseños definidos en el apartado de cálculos. Tenemos tres cables de longitud 56.56 metros con un diámetro de sección de 12,52 cm, teniendo entonces que el volumen de un solo cable será:

$$Volumen_{cable} = 56.56 * \frac{\pi * (12.52 * 10^{-2})^2}{4} = 0,7 \text{ m}^3$$

Teniendo el volumen, calculamos el peso de un solo cable:

$$Peso_{cable} = Volumen * 7850 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 5.466,1 \text{ Kg}$$

Por lo que calculamos el precio de los cables, teniendo en cuenta que el precio del acero es de 1.7 euros el kilo:

$$Precio_{cable} = 5466.1 \text{ kg} * 1.7 \frac{\text{€}}{\text{Kg}} = 9292.37 \frac{\text{euros}}{\text{cable}} = 27.877,11 \text{ €}$$

3. Instalación del anclaje:

Para esta tarea, se llamarán a 12 operarios a razón de 8 euros la hora trabajada, más un plus de peligrosidad de 3 euros la hora, dando entonces un total de 11 euros la hora trabajada. Además, se alquila los servicios de una embarcación por 5000 euros el día trabajado. Con esto se adjunta la siguiente tabla con los valores del presupuesto:

Tabla 2: Presupuestos del proyecto

Función	Precio unitario	Precio Total
Perforación del lecho marino con la tecnología de Diamond Offshore	-	-
Perforación del lecho marino de 20 metros de profundidad y el coste de maquinaria y operarios	$60000 \frac{\text{€}}{\text{perforación}}$	180.000 €
Coste total de la preparación del terreno	-	180.000 €
Fabricación del anclaje y cables de la estructura		
Material en bruto	$1.7 \frac{\text{€}}{\text{Kg}}$	385.509 €
Precio mecanizado, preparación para la soldadura (máquina CNC)	$29 \frac{\text{€}}{\text{hora}}$	19,33 €
Útiles de sujeción de la pieza	$40 \frac{\text{€}}{\text{hora}}$	640 €
Soldar	$60 \frac{\text{€}}{\text{hora}}$	960 €
Galvanizado	$1 \frac{\text{€}}{\text{Kg}}$	226.770 €
Cables	$1.7 \frac{\text{€}}{\text{Kg}}$	27.877,71 €
Total, proceso de fabricación	-	641.801,32 €
Instalación del sistema de anclaje	-	-
12 operarios (considerando 8 horas trabajadas y 21 días laborables por mes)	$11 \frac{\text{€}}{\text{hora}}$	$1.056 \frac{\text{€}}{\text{día}}$

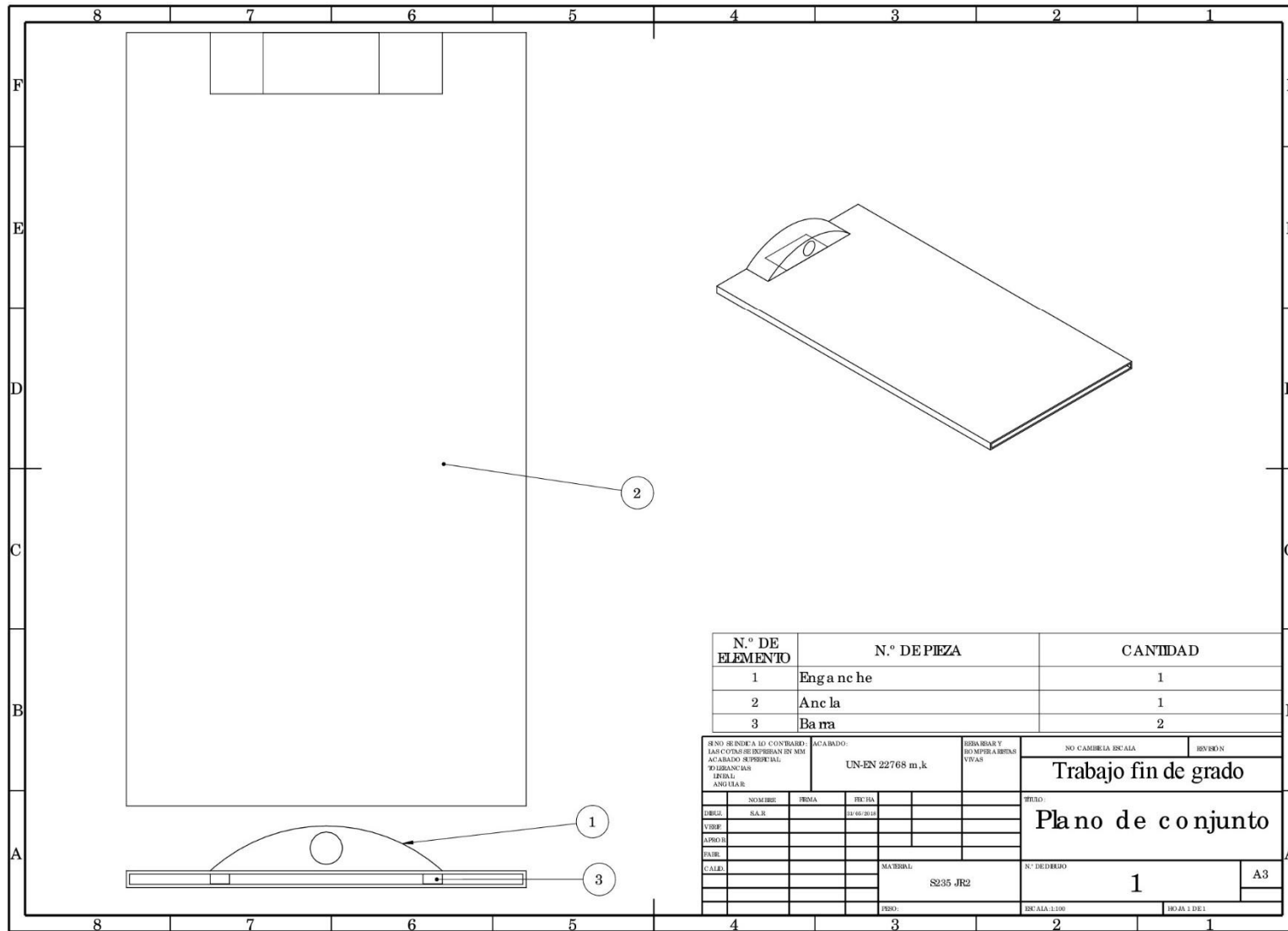
Santiago Álvarez Rubal
Diseño de los anclajes para aerogeneradores en áreas marinas

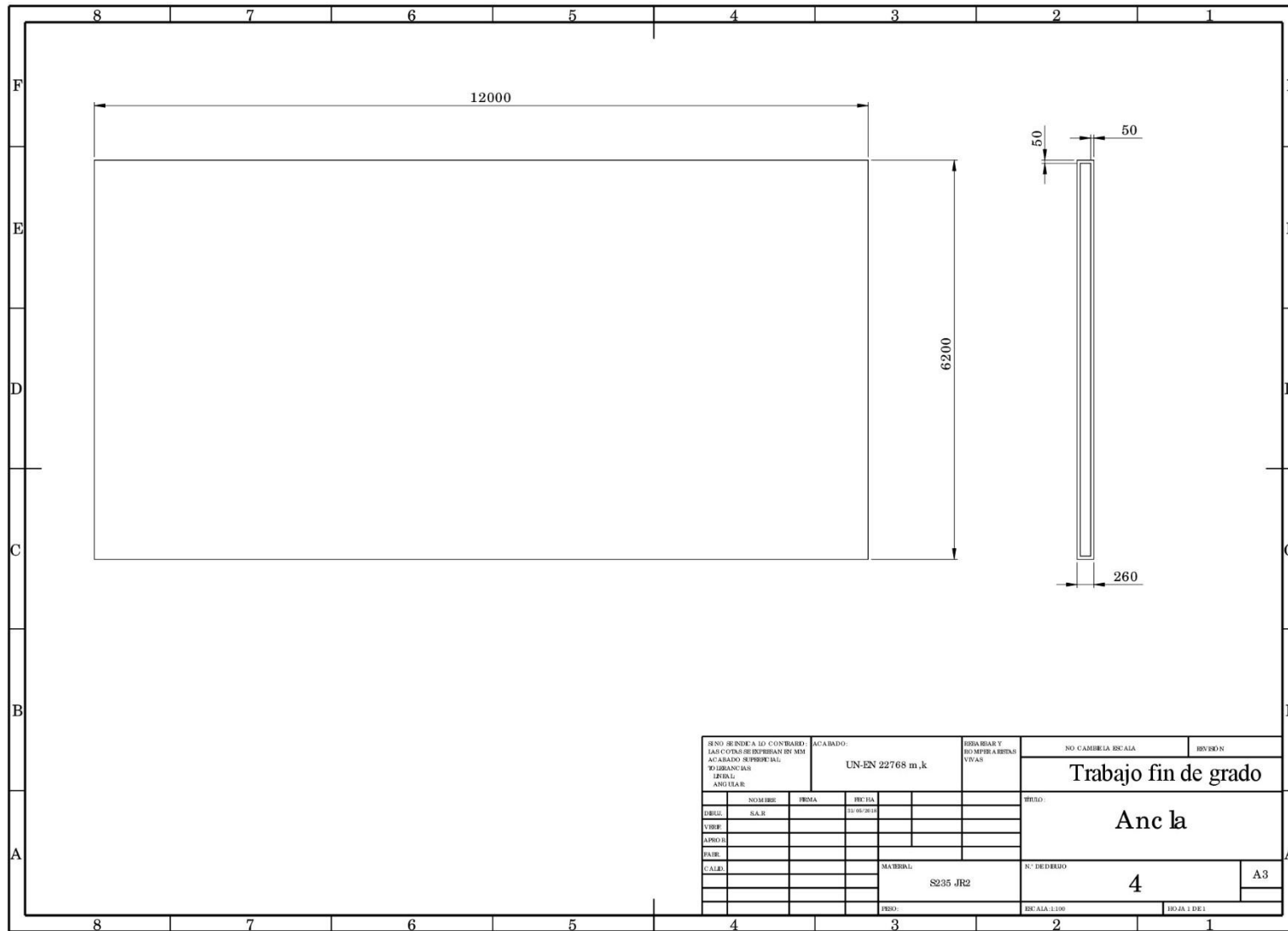
Durante 8 semanas	-	44.352 €
Embarcación	$6000 \frac{\text{€}}{\text{dia}}$	288.000 €
Coste de instalación	-	332.352 €
Gastos Generales (40 %)	-	1.329.40,8 €
Coste total	-	1.287.094 €
Beneficio (12%)	-	15.4451,29 €
Coste total	-	1.441.520,13 €

Parte V: **Planos**

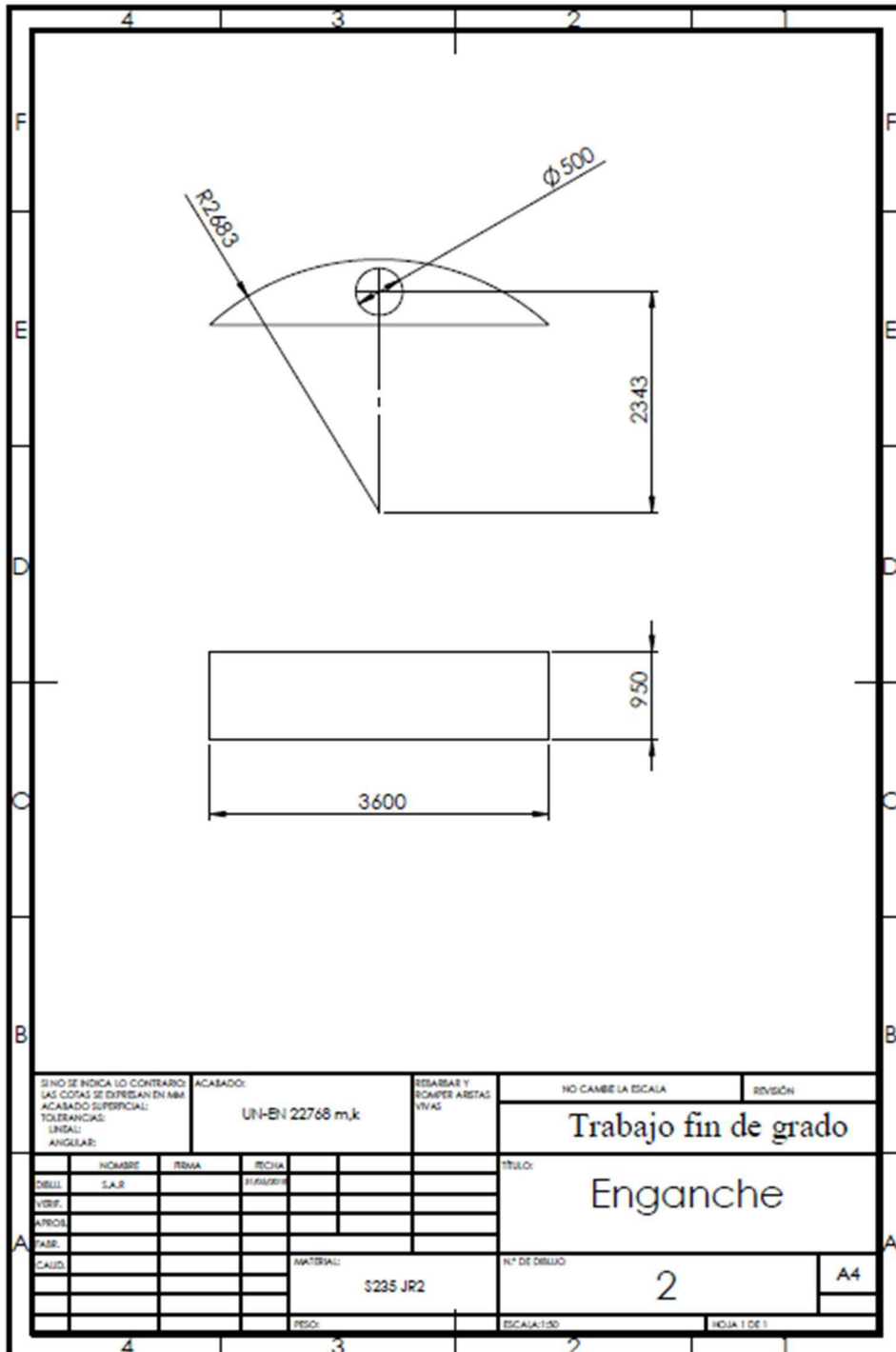
1. Índice de planos:

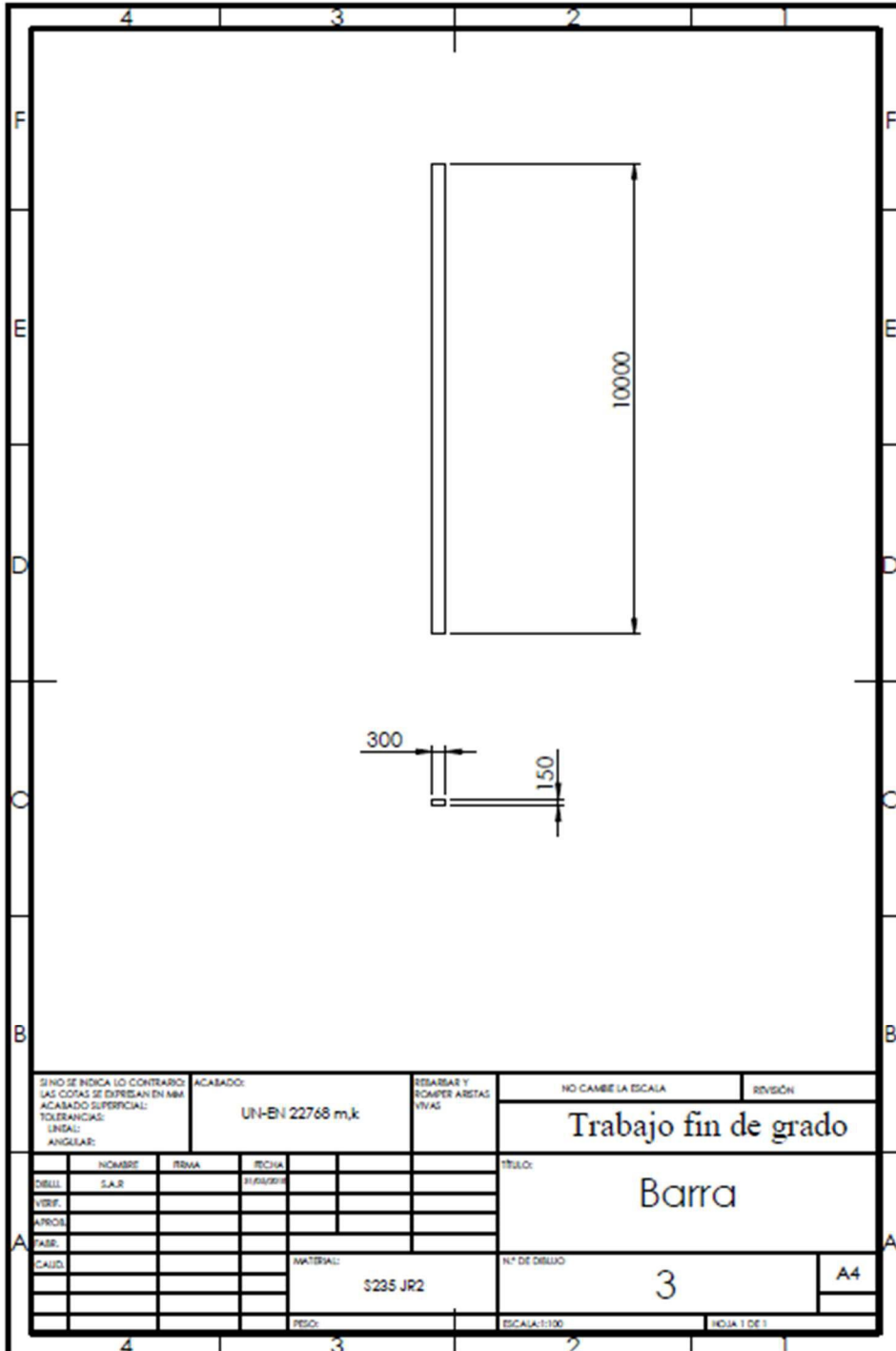
- 1.1.*** Plano de conjunto
- 1.2.*** Plano del ancla
- 1.3.*** Plano del enganche
- 1.4.*** Plano de los insertos de acero





SI NO SE ENDE A LO CONTRARIO, LAS COTAS SE ENTENDEN EN MM ACABADO: SUPERCIAL, TOLERANCIAS ISO 1101 UNIDAD: ANGULAR		ACABADO: UN-EN 22768 m.k	REBARBAR Y DIMENSIONES VARIAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISION
			Trabajo fin de grado		
			Título: Ancla		
NOMBRE SA.R	FIRMA	FECHA 11-05-2018	MATERIAL: S235 JR2		N.º DE DIBUJO 4
DIBUJ. VIZO P			N.º DE DIBUJO 4		A3
APROB. PA.RE			ESCALA: 1:100		HOJA 1 DE 1
CALIF. CALIF.			FECH. 11-05-2018		





Parte VI:

Anejos

1. Equipo utilizado para la realización de taladros en el fondo marino:



GENERAL DESCRIPTION		STORAGE CAPACITIES	
Design	KFELS Mod Super B	Liquid Mud	5,971 bbls
Year Entered Service	2008	Base Oil	1,560 bbls
Classification	ABS, +A1, Self-Elevating Drilling Unit	Brine	1,015 bbls
Dimensions	246 ft long x 218 ft wide x 25 ft high	Drill Water	21,745 bbls
Spud Can Diameter	47 ft	Potable Water	2,000 bbls
Variable Deck	3,992T operating	Bulk Material	15,755 cu ft (mud + cement)
Transit Speed	up to 8 knots	Sack Storage	5,000 sacks
Legs	486 ft	CRANES	
Water Depth	350 ft	1 x 62 ton Seatrax S7220 with 120 ft boom	
Drilling Depth	35,000 ft	2 x 53 ton Seatrax S5624 with 120 ft boom	
DRILLING EQUIPMENT		WELL CONTROL EQUIPMENT	
Derrick	National Oilwell, 170 ft high with 36 ft x 36 ft base, static hook load capacity of 2,000 kips	Divertor	Vetco Gray KFDJ 49 1/2" 500 psi with 16" flow line
Drawworks	National Oilwell SSGD-850-4600-57, four AC electric motors, 1,150hp each, with 2" drilling line	BOP Stack	Shaffer 18 3/4" 15,000 psi four-ram preventer Shaffer 18 3/4" 10,000 psi annular preventers APIS53 compliant
Rotary Table	National Oilwell D-495, 49 1/2"	C&K Manifold	3 1/16", 15,000 psi
Top Drive	National Oilwell HPS, 1,000T	CANTILEVER	
Tubular handling	NOV Hydratong for tubular range 3 1/2" to 9 3/4"	Reach	70 ft from stern to rotary center line, 15 ft x 15 ft transverse
Mud Pumps	3 x Oilwell 14-P-220, 2,200hp, 7,500 psi	Load Capacity	2,700 kips drilling
POWER EQUIPMENT		OTHER INFORMATION	
Main Power	5 x Wartsila 6L26A2 diesel engines rated 1,874 kW @ 900 rpm each driving 2,500 kVA AC generators	Air Gap	31 ft - 90 ft
Emergency Power	Caterpillar 3412TA diesel electric set rated 500 kW driving 625 kVA generator	Jacking/ Skidding	Keppel Fels, self-positioning fixation system
		Accommodation	120 people
		Helideck	I.C.A.O. 2009 compliant



DIAMOND
OFFSHORE

DIAMOND OFFSHORE | Jan 2018

These specifications are intended for general reference purposes only, actual equipment may vary upon the contract situation and customer needs.

2. Material a utilizar para la fabricación del ancla, cables y enganche:

CES 2017 EDUPACK		Structural steel, S275N, normalized		Page 1 of 6
General information				
Designation				
BS EN 10025-3:2004 Structural Steel S275N				
US name	ASTM A633 Grade			
EN name	BS EN 10025-3:2004			
EN number	1.049			
JIS (Japanese) name	SM400B			
Typical uses				
S275N/S275NL is non-alloy weldable fine grain steel used for general structural purposes. It is used in many applications as it provides good welding properties with guaranteed strengths. Applications include structural sections, construction equipment, drilling machines, excavators, tip lories, grabs, conveyor belts, bulldozers and chain blocks. High strength low alloys have replaced many structural steels where weight reduction is important (e.g. automotive).				
Composition overview				
Compositional summary				
Fe97-99.5 / Mn0.5-1.4 / Al0.02-0.024 (impurities: Si<0.4, Cu<0.35, Cr<0.3, Ni<0.3, C<0.18, Mo<0.1, Nb<0.05, V<0.05, P<0.035, S<0.03, Ti<0.03, N<0.015)				
Material family	Metal			
Base material	Fe			
Composition detail (metals, ceramics and glasses)				
Al (aluminum)	0,02	-	0,024	%
C (carbon)	0	-	0,18	%
Cr (chromium)	0	-	0,3	%
Cu (copper)	0	-	0,35	%
Fe (Iron)	* 96,7	-	99,5	%
Mn (manganese)	0,5	-	1,4	%
Mo (molybdenum)	0	-	0,1	%
N (nitrogen)	0	-	0,015	%
Nb (niobium)	0	-	0,05	%
Ni (nickel)	0	-	0,3	%
P (phosphorus)	0	-	0,035	%
S (sulfur)	0	-	0,03	%
Si (silicon)	0	-	0,4	%
Ti (titanium)	0	-	0,03	%
V (vanadium)	0	-	0,05	%
Price				
Price	* 0,573	-	0,689	EUR/kg
Price per unit volume	* 4,47e3	-	5,44e3	EUR/m ³
Physical properties				
Density	7,8e3	-	7,9e3	kg/m ³

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

Electrical properties

Electrical resistivity	* 16	- 19	μohm.cm
Galvanic potential	* -0,51	- -0,43	V

Magnetic properties

Magnetic type	Magnetic
---------------	----------

Optical properties

Transparency	Opaque
--------------	--------

Healthcare & food

Food contact	Yes
--------------	-----

Restricted substances risk indicators

RoHS (EU) compliant grades?	✓
REACH Candidate List Indicator (0-1, 1 = high risk)	0
SIN List Indicator (0-1, 1 = high risk)	0

Critical materials risk

Contains >5wt% critical elements?	No
-----------------------------------	----

Processing properties

Metal casting	Unsuitable	
Metal cold forming	Excellent	
Metal hot forming	Excellent	
Metal press forming	Acceptable	
Metal deep drawing	Limited use	
Machining speed	45,7	m/min
Weldability	Good	
Notes	Preheating and post weld heat treatments may be required	
Carbon equivalency	0,017	- 0,278

Durability

Water (fresh)	Acceptable
Water (salt)	Limited use
Weak acids	Limited use
Strong acids	Unacceptable
Weak alkalis	Acceptable
Strong alkalis	Limited use
Organic solvents	Excellent
Oxidation at 500C	Acceptable
UV radiation (sunlight)	Excellent
Galling resistance (adhesive wear)	Acceptable
Flammability	Non-flammable

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

Corrosion resistance of metals

Stress corrosion cracking	Slightly susceptible
Note	Rated in chloride; Other susceptible environments: Hydrogen sulfide

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	* 25,2	- 27,8	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 2,28	- 2,51	kg/kg
NOx creation	3,71	- 4,1	g/kg
SOx creation	8,08	- 8,93	g/kg
Water usage	* 43,2	- 47,7	l/kg

Processing energy, CO2 footprint & water

Rough rolling, forging energy	* 17,8	- 23,5	MJ/kg
Rough rolling, forging CO2	* 1,34	- 1,76	kg/kg
Rough rolling, forging water	* 9,94	- 14,9	l/kg
Extrusion, foil rolling energy	* 3,8	- 4,94	MJ/kg
Extrusion, foil rolling CO2	* 0,285	- 0,371	kg/kg
Extrusion, foil rolling water	* 3,33	- 4,99	l/kg
Wire drawing energy	* 13,4	- 17,7	MJ/kg
Wire drawing CO2	* 1,01	- 1,33	kg/kg
Wire drawing water	* 5,58	- 8,36	l/kg
Metal powder forming energy	* 30,1	- 34,1	MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 2,26	- 2,55	kg/kg
Metal powder forming water	* 33,3	- 49,9	l/kg
Vaporization energy	1,11e4		MJ/kg
Vaporization CO2	835		kg/kg
Vaporization water	* 4,41e3	- 6,61e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 0,763	- 0,848	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,0572	- 0,0636	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 3,13	- 3,98	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,235	- 0,299	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 5,76	- 7,46	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0,432	- 0,56	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	111		MJ/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)	8,35		kg/kg

Recycling and end of life

Recycle	✓		
Embodied energy, recycling	* 6,96	- 7,7	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 0,547	- 0,604	kg/kg
Recycle fraction in current supply	39,9	- 44	%
Downcycle	✓		
Combust for energy recovery	✗		

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

Landfill	✓
Biodegrade	✗

Possible substitutes for principal component

Iron is the least expensive and most widely used metal. In most applications, iron and steel compete either with less expensive nonmetallic materials or with more expensive materials having a property advantage. Iron and steel compete with lighter materials, such as aluminum and plastics, in the motor vehicle industry; aluminum, concrete, and wood in construction; and aluminum, glass, paper, and plastics in containers.

Geo-economic data for principal component

Principal component	Iron		
Typical exploited ore grade	45,1	- 49,9	%
Minimum economic ore grade	25	- 70	%
Abundance in Earth's crust	4,1e4	- 6,3e4	ppm
Abundance in seawater	0,0025	- 0,003	ppm
Annual world production, principal component	2,3e9		tonne/yr
Reserves, principal component	1,6e11		tonne

Main mining areas (metric tonnes per year)

Australia, 530e6
Brazil, 389e6
Canada, 40e6
China, 1,32e9
India, 150e3
Iran, 37e3
Kazakhstan, 25e6
Russia, 102e6
South Africa, 67e6
Sweden, 25e6
Ukraine, 80e6
United States of America, 52e6
Venezuela, 30e6
Other countries, 88e6

Eco-indicators for principal component

Eco-indicator 95	83	millipoint/kg
------------------	----	---------------

Notes

Other notes

UK: 43DD (BS 4360:1990)

Standards with similar compositions

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

• Europe:
1.0486 to EN 10028/3, 1.0490 to EN 10113/2, 1.0491 to EN 10113/2, 1.8825 to EN 10113/3, 1.8836 to EN 10113/3, S275N to EN 10113/2, S275NL to EN 10113/2, S420M to EN 10113/3, S420ML to EN 10113/3

• Germany:
1.0505 to DIN 17102, 1.0506 to DIN 17102, 1.8978 to DIN EN 10208, L415NB to DIN EN 10208, L555MB to DIN EN 10208, P315N to DIN 17102, StE285 to DIN 17102, StE315 to DIN 17102, WStE315 to DIN 17102

• International:
P235GH to ISO 9328-2, P265GH to ISO 9328-2, P275NH to ISO 9328-3, P275NL1 to ISO 9328-3, P275NL2 to ISO 9328-3, P28 to ISO 9327-4, PH26 to ISO 9327-2, PH28 to ISO 9327-4, PH29 to ISO 9327-2, PL28 to ISO 9327-4, PT400NL1 to ISO 9328-3, PT410GH to ISO 9328-2, PT440M to ISO 9328-5, PT440N to ISO 9328-3, PT440NH to ISO 9328-3, PT450GH to ISO 9328-2, PT480GH to ISO 9328-2, PT490M to ISO 9328-5, PT490Q to ISO 9328-5, PT490QH to ISO 9328-6, PT520M to ISO 9328-5, PT520Q to ISO 9328-6, PT520QH to ISO 9328-6, PT550M to ISO 9328-5, S275NH to ISO 10799, S275NL to ISO 630-2, S275NLH to ISO 10799, S275NLH to ISO 630-2

• UK:
224-410 to BS 1503, E275K2 to BS EN 10296-1, E275K2 to BS EN 10297-1, L360MB to BS EN 10208-2, L360NB to BS EN 10208-2, L415MB to BS EN 10208-2, L415NB to BS EN 10208-2, L415QB to BS EN 10208-2, L450MB to BS EN 10208-2, L450QB to BS EN 10208-2, L485MB to BS EN 10208-2, L485QB to BS EN 10208-2, L555MB to BS EN 10208-2, P235GH to BS EN 10028-2, P235GH to BS EN 10273, P265GH to BS EN 10028-2, P265GH to BS EN 10273, P275NH to BS EN 10028-3, P275NH to BS EN 10273, P275NL1 to BS EN 10028-3, P275NL2 to BS EN 10028-3, P285NH to BS EN 10222-4, P285QH to BS EN 10222-4, S275N to BS EN 10025-3, S275NH to BS EN 10210-1, S275NH to BS EN 10219-1, S275NL to BS EN 10025-3, S275NLH to BS EN 10210-1, S275NLH to BS EN 10219-1

• Tradenames:
KRUPP E STE 315, KRUPP STE 315, KRUPP T STE 255, KRUPP T STE 285, KRUPP T STE 315, KRUPP W STE 255, KRUPP W STE 285, KRUPP W STE 315, TKS E STE 255, TKS E STE 285, TKS STE 255, TKS STE 285

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape