



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESIS D'ESPECIALITAT

Títol

**PROCEDIMENTS CONSTRUCTIUS I MATERIALS PER A
ESTRUCTURES OFF-SHORE. APLICACIÓ A
AEROGENERADORS**

Autor/a

TRUBAT CASAL, PAU

Tutor/a

MOLINS BORRELL, CLIMENT

Departament

ENGINYERIA DE LA CONSTRUCCIÓ

Intensificació

Data

JUNY 2012

RESUM:

Autor: Pau Trubat Casal

Tutor: Climent Molins i Borrell

Paraules Clau: Aerogenerador, flotant, formigó, mar, vent

En aquesta tesina s'ha realitzat una recerca dels diferents mètodes d'instal·lació de les estructures marines per tal de proposar el procés d'instal·lació d'un aerogenerador marí flotant tipus SPAR.

La tecnologia offshore que existeix actualment es basa principalment en la construcció de plataformes petrolíferes per a l'obtenció del cru. Les tipologies estructurals dels prototips d'aerogeneradors flotants actuals es basen en la tecnologia de les plataformes petrolíferes però en una escala més petita. És per aquest motiu que els processos d'instal·lació s'han de reformular per tal de plantejar una manera més eficient i econòmica, controlant sempre la integritat de l'estructura.

Els estudis principals que s'han dut a terme han estat les configuracions de l'estructura durant el transport d'aquesta i la seva erecció.

Durant el transport l'estructura es troba en unes condicions que no són les configuracions finals de treball i per tant s'ha estudiat els possibles efectes que pot tenir. S'ha estudiat la flotabilitat de l'estructura en la posició de transport. Per altra banda s'han comprovat els esforços als quals es veu sotmesa l'estructura i quins elements són necessaris per al transport i els remolcs que siguin necessaris per dur a terme aquesta operació.

Al transportar l'estructura en posició horitzontal l'operació més important i que cal tenir ben detallada és el procés d'erecció d'aquesta. En aquesta tesina s'ha proposat realitzar el procés d'erecció de l'estructura de l'aerogenerador per mitjà del llastrament d'aigua marina dins de l'estructura que afavoreixi el moviment d'erecció per tal de disposar dels mínims elements mecànics externs possibles. En aquest apartat també s'ha fet un estudi exhaustiu de l'operació per tal d'assegurar la seva integritat, que no sofreixi danys durant aquest procés i un control dels esforços que ha de suportar.

En base als resultats obtinguts s'han proposat les principals fases que s'hauran de dur a terme per tal d'instal·lar una estructura d'un aerogenerador marí flotant del tipus SPAR i per assegurar la seva correcta posada en servei sense que es puguin produir situacions que siguin un risc i puguin malmetre l'estructura.

ABSTRACT:

Author: Pau Trubat Casal

Tutor: Climent Molins i Borrell

Keywords: Turbines, floating, concrete, offshore, wind

In this minor thesis a research on different installation methods of marine structures has been done in order to propose the installation process of a SPAR floating wind platform.

Nowadays offshore technology is mainly founded on building petrol platforms to get crude. The prototypes of the floating wind platforms are based on offshore platforms but on a smaller scale. This is the reason why the installation process must be reformulated to be more efficient and economical, always checking the integrity of the structure.

The main studies carried out in this dissertation are the transport settings of the structure and its erection.

The structure during transport is submitted to different conditions from its final work configuration, therefore the possible effects it can suffer during the operation have been studied. The buoyancy of the structure in the transport position has been studied too. Also, the stress that the structure has to support, the elements which are necessary to transport and the tugs that are required to carry out this operation have been checked.

As the transportation is in horizontal position, the most important operation is the erection process and it has to be very detailed. This thesis proposes carrying out the erection by ballasting seawater inside the structure that helps the rotation without external mechanical elements. In this section, also a thorough study has been made to ensure the integrity of the structure, to guarantee that the structure is not damaged during the process and to control the tensions that it has to support.

Based on the results, it is proposed the main phases that are necessary to install a SPAR floating wind platform and to ensure a proper set up without any risk situations that could damage the structure.

AGRAÏMENTS

Vull agrair a en Climent Molins i Borrell l'oportunitat que m'ha donat per realitzar una tesina d'aquest caire que m'ha permès conèixer un àmbit en expansió dins de l'enginyeria civil i el suport que m'ha donat durant la realització de la mateixa.

També vull agrair l'ajuda constant i el suport que m'ha donat l'Alexis Campos i Hortigüela, i que amb ell he pogut començar a experimentar juntament amb en Climent Molins la sensació de treball en equip per tal de compartir coneixements i tirar endavant amb la tesina.

Per últim també vull agrair el suport de la meva família, mare i germà, i en especial a la meva parella, l'Anna que m'ha ajudat a trobar la motivació necessària quan aquesta defallia.

Gracies a tots els que heu aportat el vostre granet de sorra que m'ha permès dur a terme aquesta tesina.

ÍNDEX

1	INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS	3
1.1	INTRODUCCIÓ.....	3
1.2	OBJECTIUS	7
2	ESTAT DEL CONEIXEMENT.....	8
2.1	INTRODUCCIÓ.....	8
2.2	TIPOLOGIES D'ESTRUCTURES FLOTANTS DE SUPORT PER AEROGENERADORS OFFSHORE EN AIGÜES PROFUNDES.....	8
2.2.1	Equilibri per llast (SPAR).....	9
2.2.2	Equilibri per inèrcia en la flotació.....	10
2.2.3	Equilibri per cables tesats.....	11
2.3	PROTOTIP D'AEROGENERADOR MARÍ TIPUS SPAR.....	12
2.4	OPERACIONS MARINES	14
2.4.1	Transport.....	14
2.4.2	Estiba.....	15
2.4.3	Instal·lació	16
2.5	FLOTABILITAT I EQUILIBRI	17
2.6	RESISTÈNCIA A L'AVANÇ.....	19
2.6.1	Resistència viscosa	21
2.6.2	Resistència d'ona.....	22
3	MODELITZACIÓ DE L'ESTRUCTURA	24
3.1	OBJECTIU	24
3.2	GEOMETRIA DE L'ESTRUCTURA	24
3.3	VOLUM SUBMERGIT I VOLUM D'AIGUA INTERIOR	26
3.3.1	Parametrització del flotador o cilindre	27
3.3.2	Parametrització de la torre o con.....	30
3.4	MOMENTS MÀXIMS QUE POT SUPORTAR L'ESTRUCTURA.....	33
4	TRANSPORT DE L'ESTRUCTURA.....	35
4.1	FLOTACIÓ DE L'ESTRUCTURA DURANT EL TRANSPORT	35
4.1.1	Flotabilitat en horitzontal.....	35
4.1.2	Equilibri de l'estructura en posició horitzontal.....	36
4.2	ESFORÇOS DEGUT A LES FORCES DE GRAVETAT I HIDROSTÀTIQUES	39
4.3	RESISTÈNCIA A L'AVANÇ DURANT EL TRANSPORT	41

4.4	DIMENSIONAMENT DELS ELEMENTS DE FLOTACIÓ I SUBJECCIÓ DE L'ESTRUCTURA DURANT EL TRANSPORT.....	43
4.4.1	Anàlisi dels elements d'estanquitat	43
4.4.2	Anàlisi dels elements de subjecció.....	44
4.4.3	Propostes d'elements d'estanquitat i subjecció	45
5	INSTAL·LACIÓ DE L'ESTRUCTURA	50
5.1	ESTUDI DE LES CONFIGURACIONS D'EQUILIBRI DE L'ESTRUCTURA DURANT EL PROCÉS DE LLASTRAT.....	50
5.2	ESTUDI DELS ESFORÇOS QUE HA DE SUPORTAR L'ESTRUCTURA DURANT EL PROCÉS DE LLASTRAT.....	57
5.3	CONTROL DEL MOVIMENT DE L'ESTRUCTURA DURANT EL PROCÉS DE LLASTRAT I COL·LOCACIÓ VERTICAL	60
5.3.1	Estudi de les diferents configuracions de l'estructura durant el procés de control d'erecció de l'estructura	61
5.3.2	Estudi dels esforços que ha de suportar l'estructura en funció de l'angle d'inclinació, el volum interior llastrat durant el procés de control de posicionament vertical de l'estructura	65
5.4	Proposta de procés de control per l'aixecament de l'estructura mitjançant el llastrat d'aigua.....	69
5.5	DISSENY DELS ELEMENTS DE SUBJECCIÓ	71
6	CONCLUSIONS	73
	BIBLIOGRAFIA.....	74
	ANNEX 1: PARAMETRITZACIÓ DE L'ESTRUCTURA.....	75
	ANNEX 2: LLEI DE MOMENTS DURANT EL PROCÉS D'ERECCIÓ DE L'ESTRUCTURA	78

1 INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

1.1 INTRODUCCIÓ

El gran creixement econòmic que estan duent a terme països emergents com ara la Xina, l'Índia o el Brasil que comporta una gran demanda energètica, sumat a la creixent demanda energètica dels països desenvolupats està exhaurint les reserves energètiques principals de petroli, gas natural i carbó.

A més a més, aquest tipus de font energètica és la responsable del famós efecte hivernacle, que, segons alguns experts, està portant a un sobreescalfament de la Terra, fet que pot provocar grans canvis climàtics, desaparició de moltes espècies i, fins i tot, segons els més catastrofistes podria suposar la desaparició de la vida al nostre planeta.

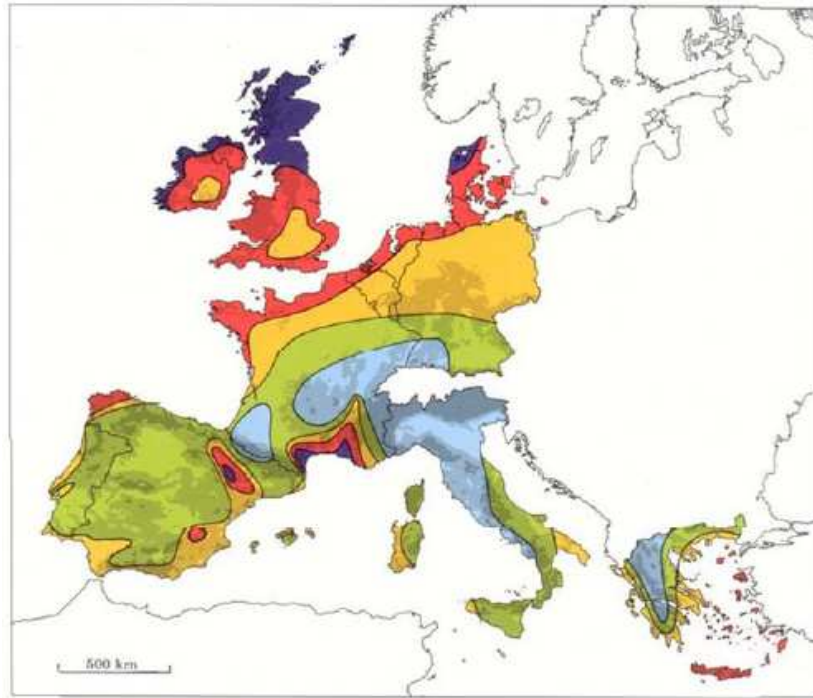
És per tots aquests factors que les noves polítiques energètiques intenten virar de rumb per tal d'assegurar la vida i satisfer aquesta demanda energètica creixent. Dins de la Unió Europea es va aprovar el 2007 un pla energètic obligatori que incloïa una reducció d'un 20% de les emissions de CO₂ abans del 2020 i que les energies renovables representessin un 20% del consum energètic total de la UE.

Les energies renovables són un mitjà per tal d'aconseguir aquests objectius i un sector estratègic amb molt de futur en la situació econòmica actual. En el gràfic de la figura 1.2 es pot observar la potència instal·lada de les diferents fonts d'energia creada per any en l'última dècada a la Unió Europea on s'observa un clar creixement de les energies renovables, les RES (Renewable Energy System).

Un dels sectors de l'energia renovable que està experimentant un creixement més fort i on s'hi estan invertint molts esforços és l'energia eòlica.

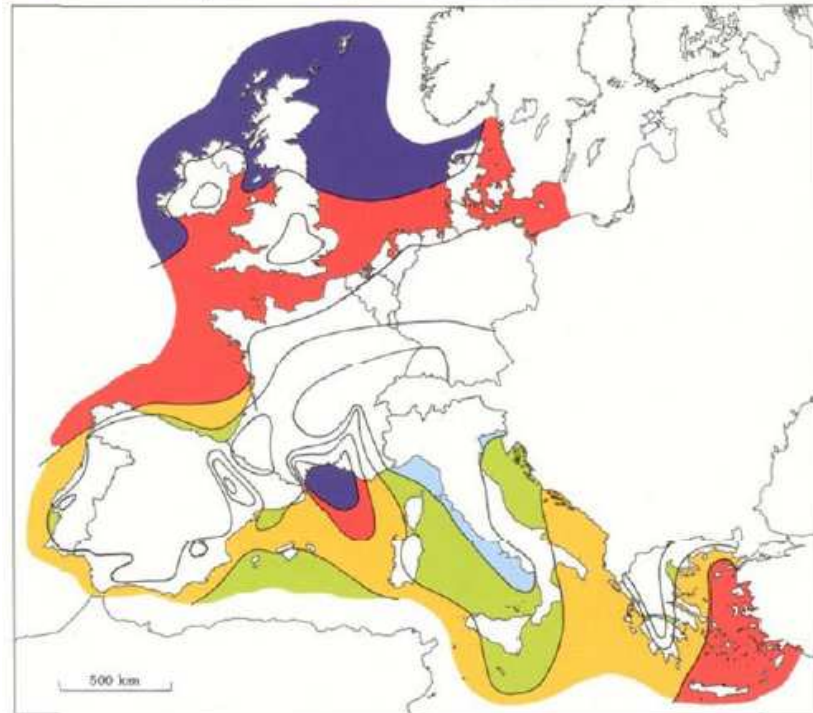
Dins de l'energia eòlica es poden diferenciar dos grans models, l'energia eòlica continental i la marina, coneguda també com a offshore. Degut a la tradició dels molins de vent i el poc desenvolupament d'aquesta tecnologia, l'energia eòlica s'ha concentrat principalment en el continent, per la facilitat en la instal·lació dels aerogeneradors i la connexió a la xarxa elèctrica. Tot i els inconvenients tècnics que l'energia eòlica marina presenta per instal·lar-se en alta mar, el seu principal avantatge és la velocitat del vent, molt major que a la plataforma continental com es pot observar en la il·lustració 1.1.

1. Introducció i objectius



Wind resources¹ at 50 metres above ground level for five different topographic conditions

Sheltered terrain ²		Open plain ³		At a sea coast ⁴		Open sea ⁵		Hills and ridges ⁶	
m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²
> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

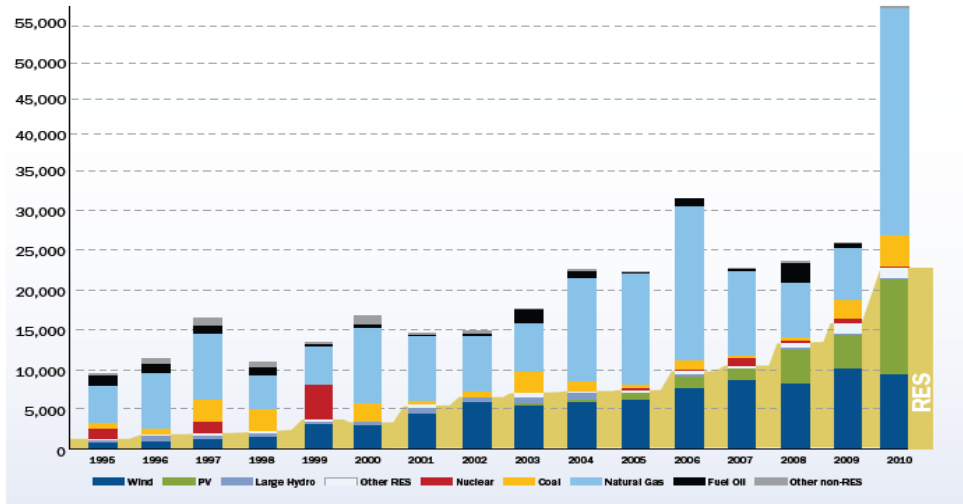


Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights

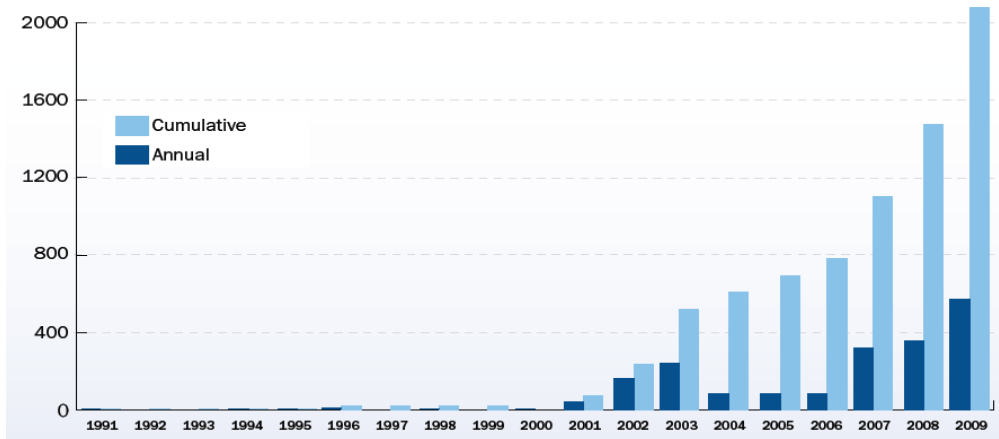
10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²
> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500
6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5- 8.5	450- 650	8.0- 9.5	600- 900
4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0- 7.5	250- 450	6.5- 8.0	300- 600
< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

IL·LUSTRACIÓ 1.1: RECURSOS EÒLICS ESTIMATS A EUROPA. FONT: EUROPEAN WIND ATLAS [1]

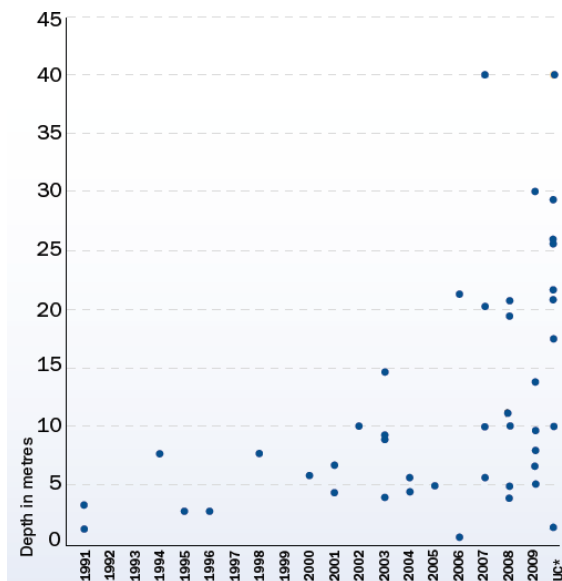
1. Introducció i objectius



IL·LUSTRACIÓ 1.2 NOVA POTÈNCIA INSTAL·LADA PER ANY EN M. FONT EWEA [2]



IL·LUSTRACIÓ 1.3: POTÈNCIA INSTAL·LADA ANUAL I ACUMULADA D'AREOGENERADORS EN MW 1991-2009. FONT EWEA [3]



IL·LUSTRACIÓ 1.4: PROFUNDITAT DELS PARCS ÈOLICS MARINS. FONT EWEA [3]

Segons la llei de Betz's [4] la potència que es pot obtenir d'un molí de vent és proporcional al cub de la velocitat del vent i a l'àrea circular que formen les aspes. És per això que per augmentar l'eficiència dels aerogeneradors s'intenti maximitzar el seu tamany i trobar-se en llocs on la velocitat del vent sigui la més gran possible.

Els parcs eòlics construïts a la plataforma continental tenen un gran impacte ambiental i paisatgístic. Els aerogeneradors produeixen una gran contaminació acústica i visual, ja que a part de la seva grandària tenen elements lluminosos per tal de ser visibles durant la nit. Aquests problemes es podrien solucionar al situar els molins en alta mar ja que es podrien allunyar a suficient distància per tal de minimitzar aquests inconvenients.

L'enginyeria desenvolupada en els aerogeneradors marins està condicionada per la profunditat on aquests es troben ancorats al mar. Aquesta tecnologia molt lligada a la de les plataformes petrolíferes, es va començar a desenvolupar a unes profunditats relativament petites, a la plataforma continental dels països escandinaus entre 2,5 i 10 m de profunditat i a una distància curta de la costa. A mesura que els condicionants físics han anat imposant unes fondàries i distàncies majors a la costa, (han fet sorgir ha portat que sorgeixin) diferents solucions que permeten la construcció de molins de vent fins a 50 m de profunditat i, actualment, al desenvolupament d'una solució que permeti la construcció de molins de vent a grans profunditats mitjançant la flotació de les estructures.

El primer aerogenerador al mar va aparèixer a Dinamarca el 1991, i des de llavors s'han instal·lat 828 molins de vent a les costes europees, agrupades en 38 parcs eòlics en 9 països europeus amb una potència instal·lada de 2,056 MW. En els últims deu anys Europa ha crescut exponencialment en potència instal·lada, il·lustració 1.3, fet que demostra la gran inversió que estan realitzant els països europeus en les energies renovables, i en particular en els molins de vent al mar.

La profunditat d'ancoratge dels molins de vent també ha fet un gran salt en els últims anys tant en la profunditat mitjana dels molins instal·lats anualment, com en la profunditat màxima, que ja arriba a més de 40Km de profunditat, com es pot observar en la il·lustració 1.4.

Si parlem de tipologia estructural, els molins de vent al mar es diferencien principalment pel tipus de fonaments que presenten. Les principals tecnologies de fonamentació utilitzades fins el 2009 han estat les monopiles i les de gravetat que sumen un total de 88% de les estructures dels molins de vent a Europa, seguides per les del tipus "jacket" un 10%, trípode i flotants amb menys d'un 2% .[3]

Si la tendència actual continua en els pròxims anys, estenent la construcció de parcs eòlics per tot Europa i el món, l'energia eòlica es pot convertir en una de les fonts d'energia renovables més importants del moment. Però perquè això succeeixi cal desenvolupar el molí de vent flotant, ja que la plataforma continental representa una superfície ínfima, comparada amb tot el potencial que presenten les aigües profundes, podent instal·lar els parcs eòlics a més distància de la costa, on la velocitat del vent és més(més elevada) superior, i reduir la contaminació acústica i visual que produeixen els actuals parcs eòlics instal·lats tant a la plataforma continental com al continent.

1.2 OBJECTIUS

Aquesta tesina es basa en la proposta d'aerogenerador marí fet per l'Alexis Campos Hortigüela, un alumne de l'Escola de Camins, Canals i Ports de Barcelona. A partir de la proposta d'aerogenerador SPAR es pretén definir els mecanismes de transport i instal·lació, i totes les fases a les quals s'hi veu involucrada.

Els objectius en els quals s'ha basat aquesta tesina són:

- Definir els mecanismes de transport necessaris per tal de conduir l'estructura des del lloc de fabricació fins al punt de servei:
 - o Estudiar la flotabilitat de l'estructura durant el transport
 - o Comprovar els esforços que ha de suportar l'estructura durant el transport
 - o Dissenyar els elements de subjecció per assegurar el transport

- Analitzar el procés d'instal·lació de l'estructura:
 - o Definir el procés d'erecció de l'estructura
 - o Comprovar els esforços
 - o Dissenyar els elements necessaris per a la instal·lació de l'estructura

2 ESTAT DEL CONEIXEMENT

2.1 INTRODUCCIÓ

La majoria del coneixement en enginyeria offshore i marina, prové de l'enginyeria petrolífera que s'ha hagut de desenvolupar per tal d'extreure petroli de profunditats cada cop majors.

Aquesta tecnologia que ha tingut el seu desenvolupament més gran durant el S.XX, ha dissenyat diferents tipus de plataformes, les primeres recolzades al fons marí, i les últimes estructures flotants a profunditats majors de 100 metres.

A més a més, aquesta tecnologia també ha anat molt lligada amb l'enginyeria nàutica degut al transport i instal·lació de l'estructura.

2.2 TIPOLOGIES D'ESTRUCTURES FLOTANTS DE SUPORT PER AEROGENERADORS OFFSHORE EN AIGÜES PROFUNDES

Tot i que és una tecnologia que es troba en una fase de desenvolupament i encara no existeixen aerogeneradors flotants en explotació, existeixen tres grans tipologies bàsiques en fase experimental.

Les tres tipologies de les quals ja existeixen prototips a escala real es diferencien pel mecanisme de flotació considerat, tal i com es mostra en la figura 2.1:

- Per llast (SPAR)
- Per equilibri per inèrcia en la flotació (semisubmergible)
- Per cables tesats (TLP)



FIGURA 2.1: TIPOLOGIES D'AEROGENERADORS FLOTANTS. FONT: NREL [5]

2.2.1 Equilibri per llast (SPAR)

Les estructures d'equilibri per llast també s'anomenen SPAR. Tal com mostra la figura 2.2 són estructures formades per un element vertical de grans dimensions, amb una gran esveltesa.

Aquestes estructures aconseguen l'estabilitat gràcies a tenir el centre de gravetat per sota del centre de flotació per mitjà de l'addició d'un material de llast pesat al fons. Aquest llast crea un moment estabilitzador i també un alt moment d'inèrcia que es contraposa al balanceig de l'estructura. El balanceig que es produeix va en contra del màxim aprofitament de l'energia eòlica i té una important rellevància en el disseny estructural de l'element, incrementant els costos i la durabilitat de l'estructura.

Les estructures SPAR són les estructures flotants més simples de totes les existents, però degut a que el centre de gravetat de la turbina eòlica es troba a una gran alçada, fa que la part de l'estructura submergida també ho sigui per tal de tenir el centre de gravetat el més avall possible.

Aquestes estructures poden estar ancorades i fixades al fons marí mitjançant línies de catenària, amb sistemes de fonamentació basats en pilons de succió.

El primer prototip a escala real es va dur a terme a Norega l'any 2009, el Hywind. Aquest projecte el va dur a terme l'empresa StatoilHydro, i està equipat amb un aerogenerador de 2.3 MW amb un rotor de 82,4 m de diàmetre sobre una torre de 65 m d'altura que fondeja sobre una boia tipus SPAR de 100 m de llargada. El Hywind està instal·lat a una profunditat de 200 m davant de la costa noruega.



FIGURA 2.2: ESQUEMA DE MOLÍ FLOTANT TIPUS SPAR I FOTOGRAFIA DEL HYWIND. FONT: ECOVIVE.COM [6]

2.2.2 Equilibri per inèrcia en la flotació

Aquestes estructures aconseguen l'estabilitat a partir de les forces de flotació. Les estructures estan formades per diferents elements de flotació, connectats entre si. A l'escorar l'estructura, o sigui girar sobre el seu eix transversal, els elements de flotació presenten variacions en l'empenta de l'aigua per tal de corregir el moviment tal com mostra la figura 2.3.

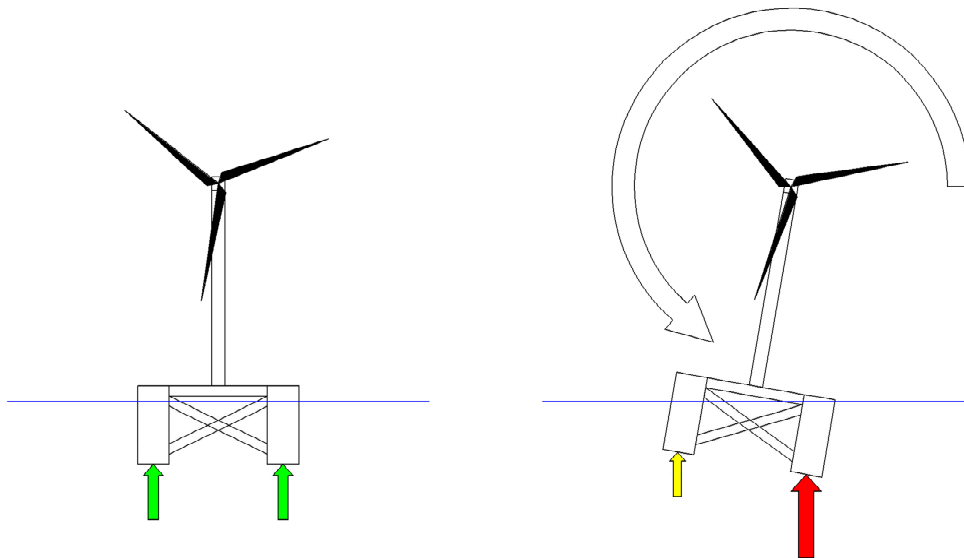


FIGURA 2.3 ESQUEMA DE FORCES D'UN AEROGENERADOR D'EQUILIBRI PER INÈRCIA DE FLOTACIÓ.
FONT: CREACIÓ PRÒPIA

A partir d'aquest principi es poden desenvolupar diferents models:

- Barcassa o boia flotant.
- Estructura semi-submergible tri-flotador. Aquest tipus de flotador recolza la turbina eòlica en tres columnes. Per assegurar el funcionament com a una peça monolítica, les tres columnes estan connectades per una estructura d'acer de forma triangular.
- Estructura semi-submergible quàdruple-flotador. Aquest tipus de flotador és molt semblant al de tres flotadors. La diferència, com el seu nom indica, és l'ús de quatre columnes flotants en lloc de tres, fet que fa augmentar el pes de l'estructura.

La plataforma òptima serà una combinació dels tres tipus principals, una estructura que ofereixi un comportament dinàmic que minimitzi les càrregues i deflexions, i al mateix temps ofereixi els majors avantatges durant el transport, instal·lació, logística i manteniment.

L'empresa Principle Power juntament amb Energias de Portugal (EDP), han instal·lat el 30 de Novembre de 2011, dos aerogeneradors marins de 2MW davant la costa de Portugal, amb una estructura semi-submergible tri-flotador.



FIGURA 2.4: PROTOTIP MOLÍ DE VENT D'EQUILIBRI PER FLOTACIÓ DE L'EMPRESA PRINCIPLE POWER. FONT: PRINCIPLE POWER [7]

2.2.3 Equilibri per cables tesats

Aquestes plataformes són estructures que es troben ancorades al fons marí mitjançant uns cables tesats. Aquests cables queden tesats a partir de l'excés de flotació de la plataforma quan aquesta es troba en posició estable, que es compensa amb la tensió dels cables fixats al fons i són els que proporcionen l'estabilitat desitjada a l'estructura.

Els amarratges per cables tesats proporcionen a l'estructura una menor interacció amb l'ona respecte els amarratges, que es tradueix en que la plataforma tingui uns desplaçaments verticals mínims. Per altra banda cal posar de manifest que degut a la baixa rigidesa transversal que proporcionen els cables verticals, els moviments horitzontals de l'estructura poden ser importants, augmentant sensiblement la tensió que han de suportar els cables.



FIGURA 2.5: PROTOTIP DE MOLÍ FLOTANT TLP. FONT [8]

A més a més la connexió amb els cables tesats induirà a uns sobreesforços a l'estructura que obligarà ha tenir-los en compte en el moment del disseny i que comportarà un augment de cost de l'estructura.

2.3 PROTOTIP D'AEROGENERADOR MARÍ TIPUS SPAR

La geometria de l'estructura de l'aerogenerador a partir de la qual està desenvolupada aquesta tesina, està treta de la tesina, *Estudi estàtic d'una estructura de formigó flotant de suport d'aerogenerador marí*, per l'Alexis Campos Hortigüela. [9]

El disseny de la proposta de l'Alexis Campos és una estructura flotant per al suport d'un aerogenerador offshore SPAR de formigó pretesat. L'estructura té unes dimensions aproximades d'uns 223 m de longitud i una amplada d'uns 9,5 m i es compon per un flotador, que té una forma cilíndrica, i una torre de forma troncocònica com es pot observar en la figura 2.6.

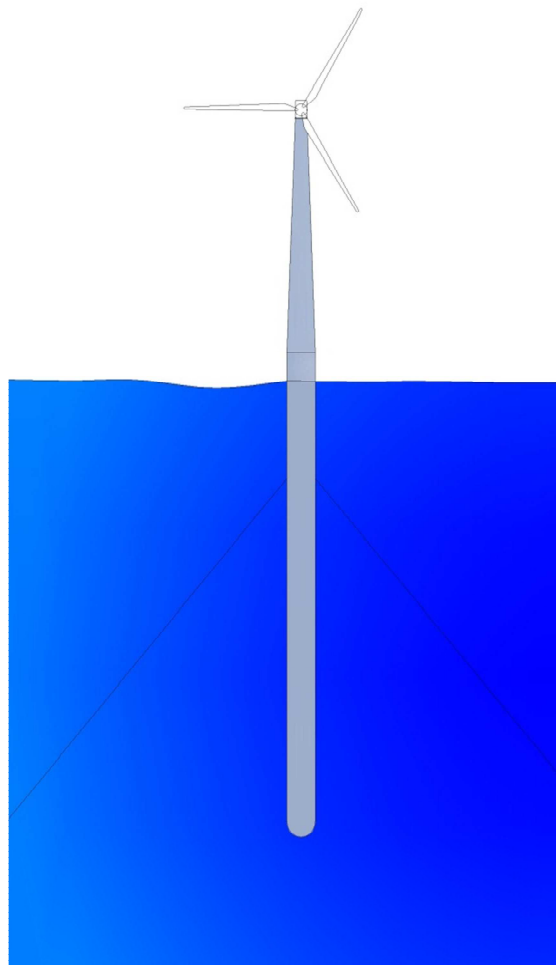


FIGURA 2.6: PROTOTIP DE MOLÍ DE VENT FLOTANT TIPUS SPAR. FONT: CREACIÓ PRÒPIA

2.4 OPERACIONS MARINES

Les principals, i a més costoses, operacions que s'han de dur a terme en qualsevol construcció d'elements marins són el transport de l'estructura des del punt de construcció de la mateixa fins a la seva destinació final, l'estiba o col·locació de càrregues a bord d'un vaixell o barcaça, i els diferents procediments d'instal·lació com l'aixecament i posicionament per un vaixell-grua, l'avarament, el llastrat d'aigua o la connexió als punts d'amarrament. [10]

En els següents apartats es descriuen les operacions més importants que intervindran a l'hora de decidir quin serà el procediment constructiu de l'estructura.

2.4.1 Transport

El transport de les estructures per via marina pot ser de dues tipologies; per via seca o humida. En el transport per via seca, tal com el seu nom indica, és transportada sense estar en contacte directe amb l'aigua a sobre de la coberta d'un vaixell de càrrega o en una barcaça de grans dimensions submergible anomenada "heavy lift vessel" (HLV). En el transport per via humida, l'estructura ha de presentar flotabilitat i és remolcada per un o més vaixells fins a la seva posició.

L'elecció del mètode de transport depèn de:

- Les dimensions, pes i l'altura del centre de gravetat de l'estructura. El HLV ha arribat a transportar una càrrega de 60.000 TM
- Les condicions ambientals de la ruta de transport. Si les càrregues o el moviment degut a les càrregues ambientals associades a un transport per via humida pot malmetre l'estructura, serà necessari fer el transport de l'estructura per via seca.
- Les limitacions per distància i planificació. Els "heavy lift vessels" són els modes de transport més ràpids i són els més usats per transport a grans distàncies.
- El cost. Els HLV són competitius per a grans i mitjanes distàncies, mentre que el remolc és més econòmic per a distàncies curtes.
- La capacitat per evitar el mal temps. El mètode de remolc té velocitats massa baixes per tal de canviar la ruta i evitar previsions meteorològiques dolentes.

En la taula 2.2 es mostren els avantatges i inconvenients dels dos mètodes de transport esmentats, que ens ajudaran a decidir el mètode de transport proposat en la present tesina.

	PROCÉS	AVANTATGES	DESAVANTATGES
VIA SECA	Transport amb vaixells	La càrrega no es malmet Ràpid i econòmic a grans distàncies Permet canviar la ruta	Car a curtes distàncies Influència del centre de gravetat de la càrrega
VIA HUMIDA	Transport flotant	Econòmic en distàncies curtes	Control estabilitat i flotabilitat de la càrrega Es pot malmetre la càrrega

TAULA 2.2: AVANTATGES I DESAVANTATGES DELS DIFERENTS MODES DE TRANSPORT MARINS

2.4.2 Estiba

L'estiba és la fase de transferència de càrrega des del moll a la plataforma d'un vaixell de càrrega. La major part de les operacions d'estiba es poden dur a terme de quatre formes diferents:

- 1. Estiba en remolc:** l'operació d'estiba es du a terme gràcies a uns remolcs hidràulics, que aixequen la càrrega i la transporten a la plataforma de la barcaça on és descarregada.
- 2. Estiba per guies lliscants:** l'estructura reposa en uns carrils d'acer i uns cabrestants per tal d'estirar i empènyer l'estructura sobre la plataforma de la barcaça. La barcaça ha d'estar equipada amb bigues lliscants per tal de col·locar la càrrega a la seva posició final.
- 3. Estiba per aixecament amb grues:** la càrrega s'aixeca cap a la plataforma de la barcaça fent servir grues portuàries o grues flotants.
- 4. Estiba per flotació:** les estructures són construïdes en un dic sec. Un cop acabades, el dic sec és inundat, o des-llastat en el cas de dics secs flotants, i l'estructura que flota a sota és remolcada cap a fora per vaixells remolcadors.

L'elecció del mètode d'estiba depèn de múltiples factors com ara la geometria de l'estructura, el seu pes, la disponibilitat de les instal·lacions adequades a prop del lloc de fabricació i el mode de transport.

En la taula 2.3 es mostren els avantatges i inconvenients dels diferents mètodes d'estiba.

	PROCÉS	AVANTATGES	DESVANTATGES
REMOLC	Remolcs multi-rodes	Ràpid Econòmic	Descarregar remolcs al vaixell Diferents configuracions de repòs de l'estructura
BIGUES LLISCANTS	Per lliscament sobre unes guies, gràcies a gats o cabrestants	Fàcil i econòmic	Resistència al lliscament
AIXECAMENT	Aixecament amb grues	Ràpid Segur	Necessitat grua Diferents configuracions recolzament de l'estructura
FLOTACIÓ	Construcció en dic sec, i transport per flotació	Segur Fàcil construcció	Estructura flotant Necessitat dic sec

TAULA 2.3: AVANTATGES I DESAVANTATGES DELS DIFERENTS MODES D'ESTIBA

2.4.3 Instal·lació

El procés d'instal·lació depèn en un alt grau de la configuració de transport. Si l'estructura ha estat transportada per via seca, en vaixell, les dues formes possibles per col·locar la plataforma al mar són:

1. **Aixecament:** consisteix en aixecar la càrrega al mar per mitjà d'una grua incorporada al mateix vaixell de transport o una grua flotant.
2. **Avarament:** consisteix en posar la càrrega al mar mitjançant l'empenta d'aquesta sobre unes vies lliscants que el condueixen directament a través d'una rampa al mar.

Un cop l'estructura es troba surant en el mar se li poden produir variacions en el calat i el volum submergit a partir del llastrat de l'estructura:

3. **Llastrat:** consisteix en l'increment del pes d'una estructura marina mitjançant l'augment de l'aigua interior o d'un altre material i que provoca un enfonsament d'aquesta per a la seva correcta col·locació.

En la taula 2.4 es mostren els avantatges i inconvenients dels diferents mètodes d'instal·lació.

	PROCÉS	AVANTATGES	DESAVANTATGES
AIXECAMENT	Aixecar i col·locar al mar l'estructura per mitjà d'una grua	Ràpid Segur	Necessitat de grua o vaixell-grua Diferent configuració de suport
AVARAMENT	Avarar l'estructura per mitjà de guies lliscants	Econòmic	Fricció Es pot malmetre l'estructura
LLASTRAT	Enfonsar l'estructura mitjançant l'augment del pes d'aquesta	Procés reversible Econòmic	Canvis configuració dels pesos Possible inestabilitat

TAULA 2.4: AVANTATGES I DESAVANTATGES DELS DIFERENTS MODES D'INSTAL·LACIÓ

2.5 FLOTABILITAT I EQUILIBRI

La flotabilitat d'una estructura ve condicionada pel principi d'Arquímedes que es basa en que l'empenta de l'aigua sobre un cos submergit o semi-submergit és igual al pes de l'aigua del volum que desallotja com es pot observar en la figura 2.8. Aquesta condició es pot escriure en forma de l'equació (2.1).

$$E = V_{desplaçat} \cdot \gamma_w \quad (2.1)$$

on:

E és l'empenta de l'aigua

$V_{desplaçat}$ és el volum d'aigua que desplaça la part de l'estructura submergida

γ_w és el pes específic de l'aigua, que per aigua de mar és $\gamma_w = 10,25 \frac{KN}{m^3}$

Per tal que es produeixi flotabilitat, l'empenta de l'aigua ha de ser igual al pes de l'estructura tal com mostra l'equació (2.2), que resulta d'igualar l'empenta de l'aigua amb el pes total de l'estructura (2.3).

$$E = W_{tot} \quad (2.2)$$

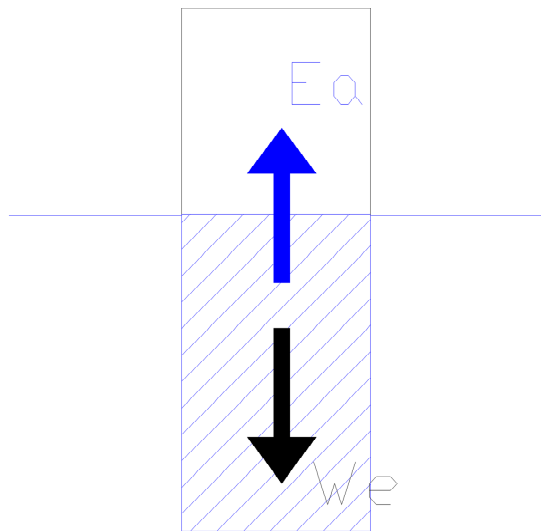
i

$$W_{tot} = V_{tot} \cdot \gamma \quad (2.3)$$

On:

V_{tot} és el volum total de l'estructura

γ és el pes específic equivalent de l'estructura



IL·LUSTRACIÓ 2.7: ESQUEMA DE FORCES D'UN OBJECTE SUBMERGIT. FONT: CREACIÓ PRÒPIA

Per altra banda l'estabilitat és la capacitat d'una estructura marina de tornar a la seva posició d'equilibri inicial després de resultar afectada per una força pertorbadora.

L'equilibri en situació de repòs s'ha de donar per dues condicions: l'empenta de l'aigua ha de ser igual al pes de l'estructura (2.2), i el centre de gravetat de l'estructura (G) i el centre de carena (C) han d'estar a la mateixa vertical. El centre de carena és el punt d'aplicació de la resultant de les pressions exercides sobre el casc submergit, és a dir, el punt d'aplicació de l'empenta de l'aigua, corresponent amb el baricentre del volum desallotjat.

Per comprovar l'estabilitat de l'equilibri cal definir el metacentre (M). Aquest punt es defineix com la intersecció de la línia d'acció de la força de flotació i la línia central de l'objecte en la seva posició original.

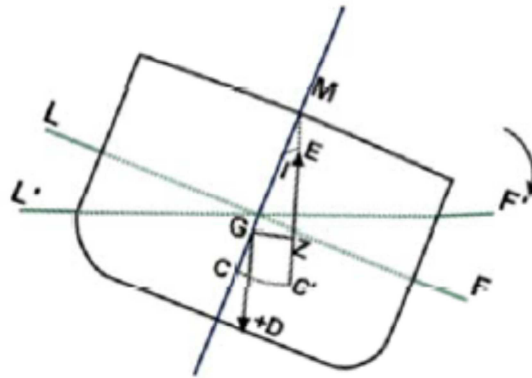


FIGURA 2.8: DEFINICIÓ GEOMÈTRICA DEL METACENTRE I FLOTABILITAT ESTÀTICA. FONT:TEORIA DEL BUQUE [11]

En la figura 2.8 s'ha induït a un gir respecte el pla de flotació LF fins a L'F'. Suposant que el punt G no es desplaça amb el gir, el punt C es desplaça i la seva reacció vertical interseca la vertical original en el punt M. En aquesta figura es comprova que existeix estabilitat degut a que es creen un parell de moments que retornen l'objecte a la seva posició original.

Es considera, doncs, que un objecte presenta flotabilitat estable quan el metacentre (M) es troba per sobre del centre de gravetat (G), $GM > 0$. Aquesta afirmació permet establir que, en condicions estàtiques, l'objecte flotarà de manera estable, però com hem vist, el metacentre varia en funció del grau d'inclinació i per tant cal conèixer el grau d'inclinació màxim per tal de mantenir l'estabilitat.

2.6 RESISTÈNCIA A L'AVANÇ

El càlcul de la resistència a l'avanç d'una estructura flotant, com ara un vaixell, serveix per determinar la potència que han de tenir els motors per tal de fer avançar l'estructura a una velocitat determinada. En aquest cas es fa servir la mateixa teoria de resistència a l'avanç dels vaixells per tal de determinar la força que haurem de fer per mitjà d'un vaixell remolcador per tal de transportar l'estructura des del punt de construcció fins al lloc d'explotació d'aquesta [12] [13].

La resistència total a l'avanç d'una estructura marina, R_t (2.4), ve donada principalment per tres factors: la resistència deguda a la viscositat de l'aigua R_v , la resistència a l'aire en calma R_{aa} i la resistència de les ones generades com a conseqüència del moviment de l'estructura R_w .

$$R_t = R_v + R_{aa} + R_w \quad (2.4)$$

La resistència total varia en funció de la velocitat de navegació de l'estructura, que principalment augmenta amb aquesta tal com mostra la figura 2.9. Les contribucions dels diferents tipus de resistència a la resistència total són diferents depenent de la velocitat a la que es mou l'estructura marina.

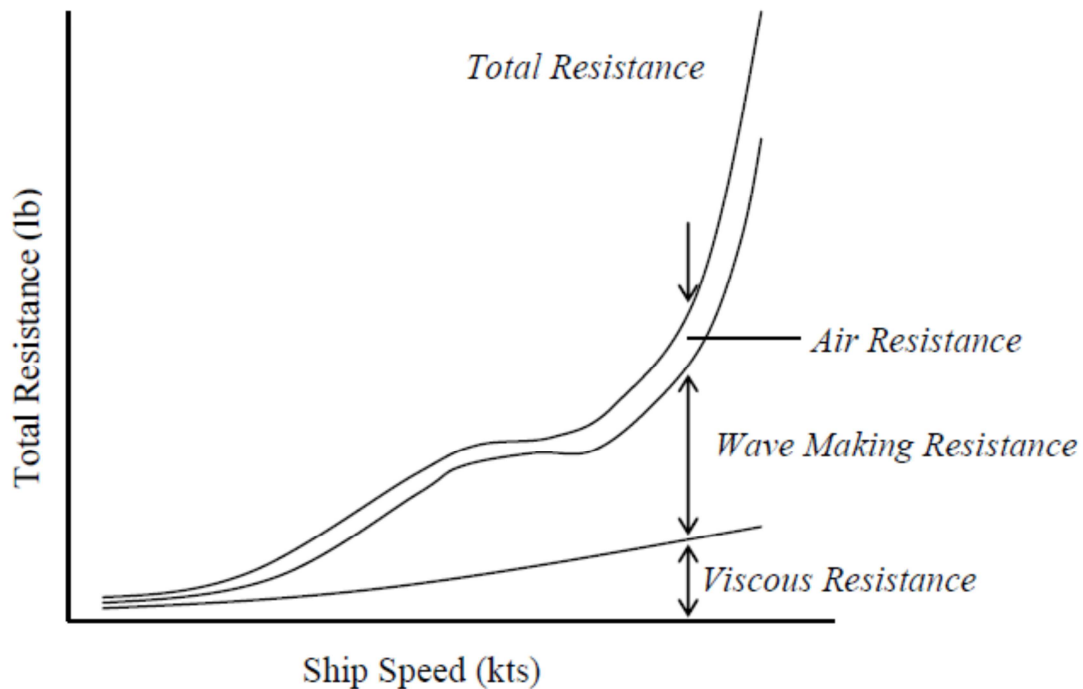


FIGURA 2.9: RESISTÈNCIA TOTAL AL DESPLAÇAMENT EN FUNCÍO DE LA VELOCITAT. FONT: ?

Per tal de poder analitzar i comprar diferents resistències a l'avanç de diferents estructures marines, s'utilitzen coeficients adimensionals per fer els càlculs. El coeficient adimensional de la resistència total de l'avanç d'una estructura C_t (2.5) és el següent:

$$C_t = C_v + C_w \quad (2.5)$$

on

C_v és el coeficient adimensional de la resistència per viscositat

C_w és el coeficient adimensional de la resistència d'ona

El coeficient adimensional de la resistència de l'aire no s'inclou, perquè aquests coeficients es fan servir normalment pel càlcul en models a escala on no s'inclou la superestructura dels elements i per tant només es determina la resistència produïda pel casc.

La relació entre el coeficient adimensional (C_v) i la resistència total (R_t) és la següent:

$$C_t = \frac{R_t}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} \quad (2.6)$$

On

ρ és la densitat de l'aigua

v és la velocitat

S és la superfície mullada del casc sota l'aigua

En l'enginyeria naval també s'utilitza el paràmetre adimensional de la velocitat, el número de Froude (2.7).

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (2.7)$$

2.6.1 Resistència viscosa

Quan un vaixell es mou al mar, la fricció de l'aigua actua sobre tota la superfície mullada del casc, que provoca una força neta oposada al moviment del vaixell. Aquesta resistència, degut a la fricció, és una funció que depèn de la superfície mullada, la rugositat superficial i la viscositat de l'aigua.

La viscositat és una propietat d'un fluid que descriu la seva resistència a fluir. Encara que l'aigua té una baixa viscositat, produeix una força de fricció considerable que s'oposa al moviment del vaixell. Dades experimentals demostren que la fricció de l'aigua pot representar fins a un 85% de la resistència total d'un casc a una velocitat baixa ($F_n \leq 0,12$) i entre un 40-50% de la resistència total d'un vaixell a velocitats més altes.

La resistència viscosa es pot calcular a partir d'una fórmula semi-empírica determinada pel mètode del ITTC 1957 (2.8):

$$C_v = \frac{0.075}{(\log_{10} R_e - 2)^2} \quad (2.8)$$

On:

$$R_e \text{ és el número de Reynolds: } R_e = \frac{LV}{\nu} \quad (2.9)$$

L és la longitud del vaixell

V és la velocitat de creuer

ν és la viscositat cinemàtica del fluid

2.6.2 Resistència d'ona

La resistència d'ona és una de les que més influeix en la resistència a l'avanç.

Aquest onatge es caracteritza per la seva longitud d'ona λ , que és la distància entre dues crestes i la velocitat de propagació c , que varia amb l'arrel quadrada de la longitud d'ona, segons l'equació (2.10):

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (2.10)$$

Quan els vaixells avancen, generen un sistema d'ones, les ones d'acompanyament, que viatgen amb aquesta mateixa velocitat. Aquestes ones es formen al llarg de la línia de flotació del buc.

A partir del número de Froude (2.7) es poden distingir 4 casos diferents de resistència d'ona.

1. A velocitat reduïda, les ones d'acompanyament, tenen una longitud d'ona inferior a la longitud del vaixell $\lambda < L$ i es formen varies ones al llarg de la línia de flotació. Aquest fenomen correspon a un número de Froude petit, $F_n < 0,4$. Quan es formen més de dues ones, que corresponen a un número de Froude de $F_n < 0,4/2 \approx 0,28$, es pot admetre que la resistència d'ona és petita i la resistència viscosa és la predominant de l'ordre del 60 al 90 % de la resistència total. A mesura que augmenta la velocitat també augmenta progressivament la resistència d'ona.
2. Quan la velocitat augmenta, segons l'equació (2.10), la longitud d'ona també augmenta fins aconseguir ser la longitud del buc, $\lambda = L$. En aquesta situació es pot considerar que el buc està portat per l'ona que té una cresta a la proa i la popa. Aquesta velocitat del vaixell s'anomena *Velocitat límit teòrica de la carena*.
3. A l'augmentar la velocitat, la cresta de darrera s'allunya de la popa i ja no és transportada per la cresta posterior, sinó per la pendent de l'ona entre dues crestes. En aquesta situació el vaixell es troba en una situació molt desfavorable des del punt de vista de la resistència a l'avanç ja que no es desplaça segons el seu eix de referència horitzontal que correspon a la millor trajectòria. Aquesta situació es produeix per un número de Froude comprès entre 0,4 i 0,7 amb $L < \lambda < 3L$, aproximadament. La resistència d'ona és predominant i de l'ordre del 70 al 85% de la resistència total segons F_n i la forma del flotador.
4. Si la velocitat augmenta més, el buc pot estar completament governat per l'ona davantera i entra en una situació d'hidroplanejament. Això correspon a un número de Froude superior al 0,7 o $\lambda > 3L$. Tot i això el buc no està portat per tota la seva longitud L , sinó només per la seva part posterior, mentre que la seva part davantera està pràcticament a l'aire i per sobre i davant de la cresta que el porta.

2. Estat del coneixement

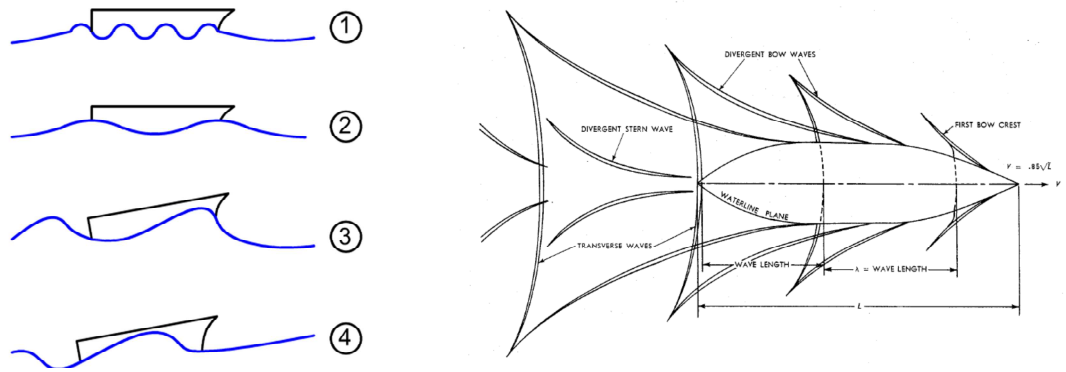


FIGURA 2.10: CASOS DE RESISTÈNCIA D'ONA (ESQUERRA), ESQUEMA DE PATRÓ D'ONA (DRETA)

3 MODELITZACIÓ DE L'ESTRUCTURA

3.1 OBJECTIU

L'objectiu d'aquest estudi és la modelització numèrica de la geometria de l'estructura per tal de poder-la implementar en funcions i programes creats expressament per determinar les diferents configuracions de flotació, estabilitat, esforços i fases en què pot estar sotmesa l'estructura durant les diferents etapes del procés. També a partir de la tensió de pretesat es deduirà el moment màxim que pot suportar cada secció de l'estructura per tal de comparar amb els esforços que haurà de suportar durant el procés de transport i col·locació.

3.2 GEOMETRIA DE L'ESTRUCTURA

A partir de la geometria definida a l'apartat 2.3 de la present tesina es calcularan les característiques geomètriques de l'estructura. L'estructura està definida per la torre de forma troncocònica i el flotador de forma cilíndrica amb els extrems amb formes semiesfèriques.

Per a l'obtenció del volum total de l'estructura i el seu centre de gravetat s'han fet servir les formulacions del volum (3.1) i centre de gravetat (3.2) d'un con truncat, les del volum d'un cilindre (3.3) i el seu centre de gravetat (3.4) i el volum d'una semiesfera(3.5) i el seu centre de gravetat (3.6).

- Les formulacions d'un con truncat són les següents:

$$V_{ct}(R, r, H) = \frac{\pi \cdot H}{3} \cdot (R^2 + r^2 + R \cdot r) \quad (3.1)$$

$$cdg_{ct_z}(R, r, H) = \frac{3 \cdot H \cdot \left(\frac{R^2}{6} + \frac{r^2}{6} + \frac{R \cdot r}{6} \right)}{2 \cdot (R^2 + r^2 + R \cdot r)} \quad (3.2)$$

on:

H és l'altura del con truncat

R és el radi major del con

r és el radi menor del con

- Les formulacions d'un cilindre són les següents:

$$V_{ci}(R, H) = \pi \cdot R^2 \cdot H \quad (3.3)$$

$$cdg_{ci_z}(H) = \frac{H}{2} \quad (3.4)$$

on:

R és el radi del cilindre

H és l'altura del cilindre

- Les formulacions d'una semiesfera són les següents:

$$V_{se}(R) = \frac{4}{6} \cdot \pi \cdot R^3 \quad (3.5)$$

$$cdg_{se_z}(R) = \frac{3}{8} R \quad (3.6)$$

on:

R és el radi de l'esfera

Per tant el volum total de l'estructura (3.7) l'obtindrem restant el volum exterior de l'estructura menys el volum interior buit, segons les dades de l'apartat 2.3 d'aquest document.

$$V_{tot} = V_{ct}(R_e, r_e, H_{ct}) - V_{ct}(R_i, r_i, H_{ct}) + V_{ci}(R_e, H_{ci}) - V_{ci}(R_i, H_{ci}) + V_{se}(R_e) - V_{se}(R_i) + V_{se}(r_e) - V_{se}(r_i) = V_{torre} + V_{flotador} + V_{tapa inferior} + V_{tapa superior} \quad (3.7)$$

on:

R_e és el radi exterior del cilindre i la semiesfera inferior i el radi exterior major del con truncat

R_i és el radi interior del cilindre i la semiesfera inferior i el radi interior major del con truncat

r_e és el radi exterior menor del con truncat i el radi interior de la semiesfera superior

r_i és el radi interior menor del con truncat i el radi interior de la semiesfera superior

H_{ct} és l'altura del con truncat

H_{ci} és l'altura del cilindre

El centre de gravetat de l'estructura l'obtindrem d'acord amb l'expressió (3.8).

$$cdg_{e_z} = \frac{cdg_{torre} \cdot V_{torre} + cdg_{flotador} \cdot V_{flotador} + cdg_{tapa inferior} \cdot V_{tapa inferior} + cdg_{tapa superior} \cdot V_{tapa superior}}{V_{tot}} \quad (3.8)$$

Utilitzant les expressions (3.7) i (3.8) s'ha calculat el **volum material** de l'estructura que és d'uns **2400m³** i el **centre de gravetat** que es troba a **86 m** de la base del flotador.

3.3 VOLUM SUBMERGIT I VOLUM D'AIGUA INTERIOR

Un cop l'estructura de formigó ha estat avarada al mar, aquesta podrà presentar múltiples posicions que dependran de l'aigua interior llastrada, de les subjeccions que pugui tenir i del calat que presenti. Aquestes diferents posicions fan que el volum d'aigua submergit i el volum d'aigua interior canviïn tant de quantitat com de forma, i per tant el centre de gravetat i el de carena també variïn.

És per aquest motiu que s'han modelitzat els volums d'aigua tant submergits i de flotació. Per a la simplificació dels càlculs, el volum submergit i el volum d'aigua interior es calculen suposant que el mar es troba en repòs i que la intersecció de l'estructura amb el mar pot es assimilar a la intersecció d'un pla amb el volum ja sigui cònic com, ara en la torre, o cilíndric com, ara el flotador.

El volum d'aigua submergit per un volum qualsevol, tal com mostra la figura 3.1, es podria calcular per la següent equació (3.9):

$$V = \int A(z) \cdot dz = \sum A_i \cdot d \quad (3.9)$$

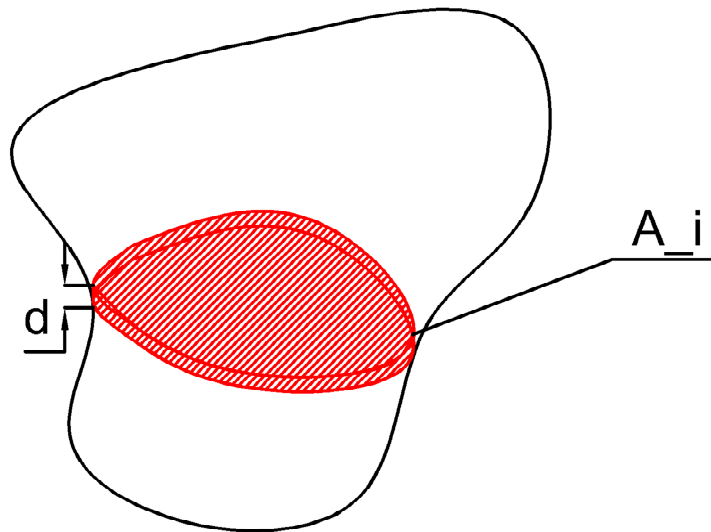


FIGURA 3.1: ESQUEMA D'UN DIFERENCIAL DE VOLUM

Per tant s'hauran d'estudiar les diferents àrees que es formen en els diferents volums submergits. Les parametrizacions es faran en funció de α , que és l'angle que forma l'eix longitudinal de l'estructura amb el nivell mig del mar. A l'annex 1 es poden veure les funcions matlab que s'han utilitzat per calcular els diferencials de volum que s'expliquen en els següents apartats.

També s'ha de posar de manifest la complexitat que ha suposat realitzar aquesta tasca i trobar tots els paràmetres que defineixen els diferencials de volum en funció de l'angle i el calat de l'estructura, i les variacions que es produeixen durant tot el càlcul.

3.3.1 Parametrització del flotador o cilindre

a) Posició horitzontal ($\alpha = 0$)

Tal com mostra la figura 3.2 la superfície que es produeix com a resultat de la intersecció és un rectangle, i la seva equació és la següent:

$$A_i(z) = H_{ci} \cdot 2 \cdot x \quad (3.10)$$

On:

$$x = R \cdot \sin \theta \quad (3.11)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{R-z}{R} \right) \quad (3.12)$$

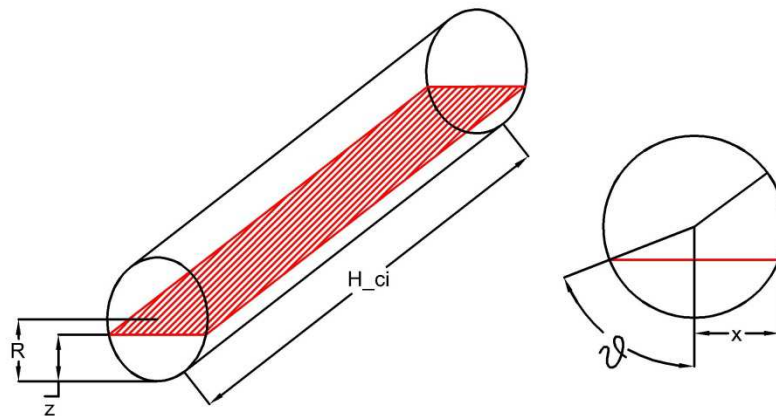


FIGURA 3.2: ESQUEMA DEL DIFERENCIAL DE VOLUM D'UN CILINDRE EN POSICIÓ HORIZONTAL

b) Posició obliqua ($0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$)

En aquest cas la superfície que es produeix en la intersecció del pla i el cilindre és una el·lipse tal com mostra la figura 3.3.

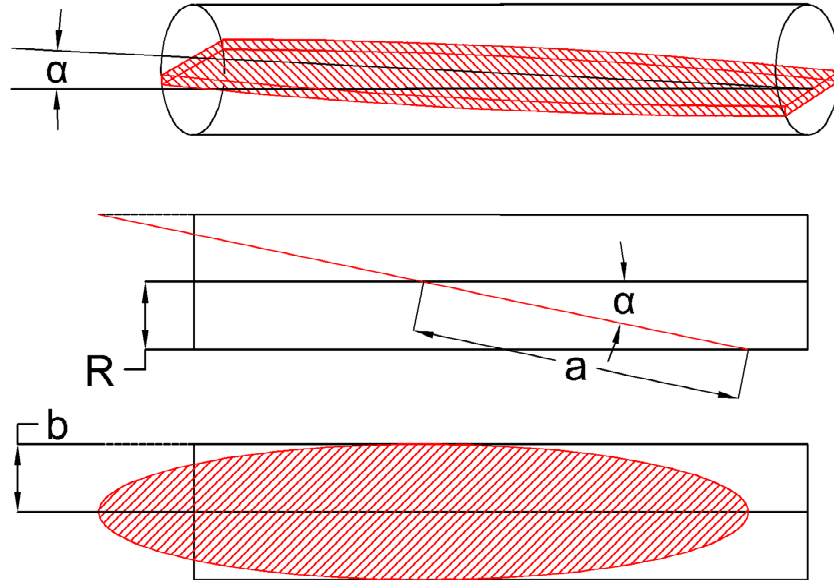


FIGURA 3.3 ESQUEMA DEL DIFERENCIAL DE VOLUM D'UN CILINDRE EN FUNCió D' α

L'equació de l'el·lipse és la següent, amb els paràmetres a i b que estan definits a la figura 3.4:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (3.13)$$

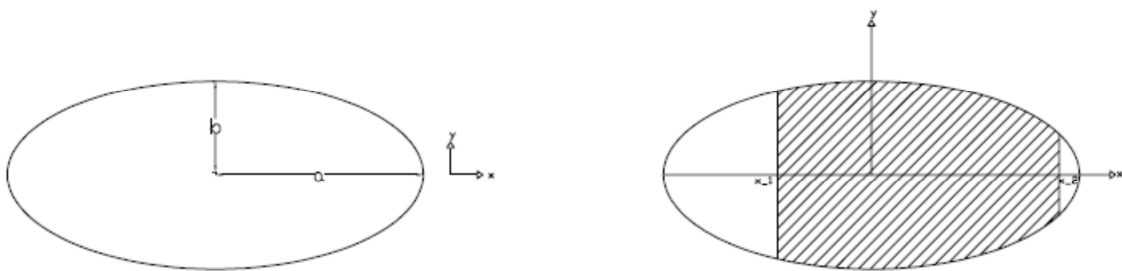


FIGURA 3.4: ESQUEMA DELS PARÀMETRES D'UNA EL·LIPSE

L'àrea d'una part de l'el·lipse en funció de les coordenades x_1 i x_2 tal com mostra la figura 3.3 és la següent:

$$\text{De (3.13): } y = b \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} A_i(z) &= \int_{x_1}^{x_2} 2 \cdot y \cdot dx = 2 \cdot \int_{x_1}^{x_2} b \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \cdot dx = 2 \cdot b \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{1 - \sin^2(\theta)} \cdot a \cdot \cos(\theta) d\theta = \\ &= 2 \cdot a \cdot b \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos^2(\theta) d\theta = 2 \cdot a \cdot b \cdot \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} + \frac{\sin(2 \cdot \theta_2) - \sin(2 \cdot \theta_1)}{4} \right) \quad (3.15) \end{aligned}$$

On s'ha aplicat el canvi de variable $x = a \cdot \sin(\theta)$ i per tant $dx = a \cdot \cos(\theta) d\theta$

$$a = \frac{R}{\sin(\theta)} \quad (3.16)$$

$$b = R \quad (3.17)$$

c) Posició vertical ($\alpha=90^\circ$)

La superfície d'intersecció serà en aquest cas una circumferència de radi R i l'àrea:

$$A_i(z) = \pi \cdot R^2 \quad (3.18)$$

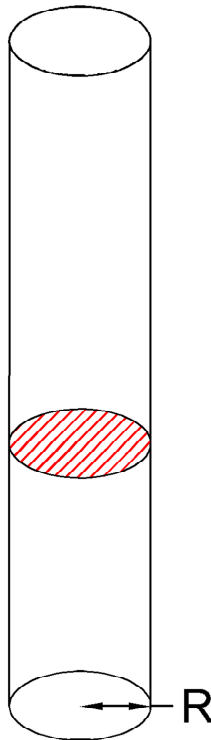


FIGURA 3.5: ESQUEMA DEL DIFERENCIAL DE VOLUM D'UN CILINDRE EN POSCIÓ VERTICAL

3.3.2 Parametrització de la torre o con

a) Posició horitzontal i obliqua ($0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}$)

La superfície d'intersecció que es produeix en aquest cas és una hipèrbole, tal com mostra la figura 3.6.

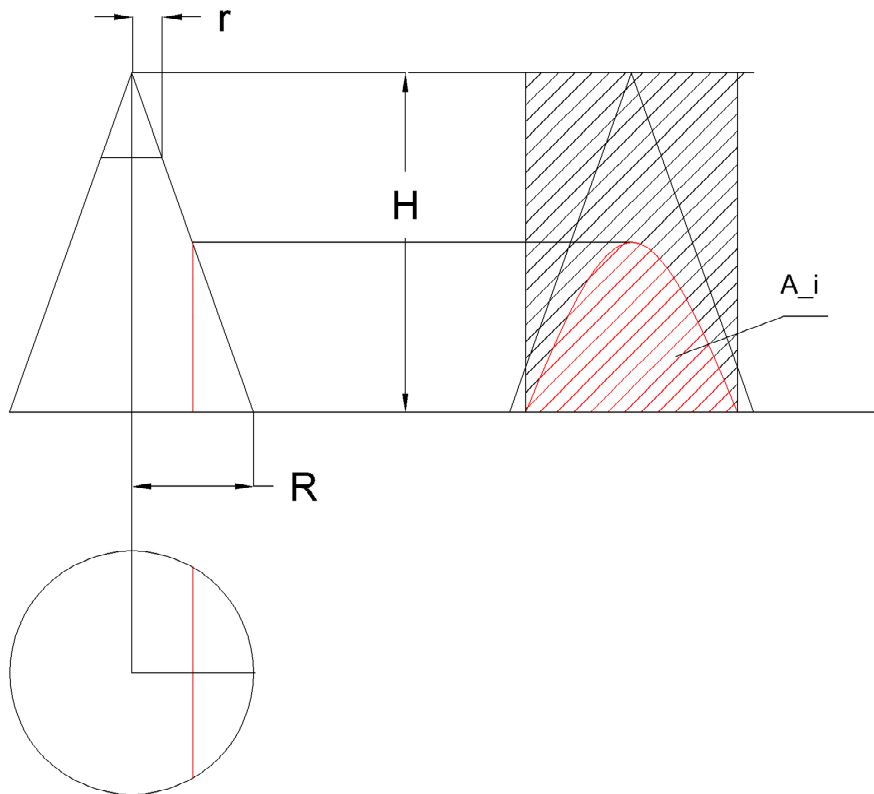


FIGURA 3.6: ESQUEMA DEL DIFERENCIAL DE VOLUM D'UN CON EN POSICIÓ HORITZONTAL

L'equació que defineix una hipèrbole és la següent, i els paràmetres queden definits en la figura 3.7:

$$\frac{x^2}{a} - \frac{y^2}{b} = 1 \quad (3.19)$$

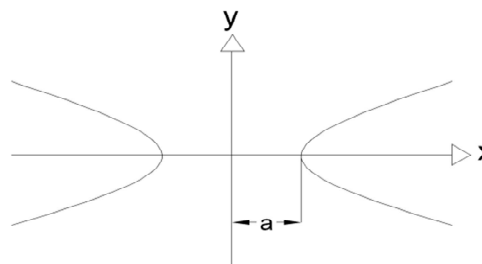


FIGURA 3.7: REPRESENTACIÓ DE LA FUNCIÓ DE LA HIPÈRBOLA

Com podem comprovar, la "a" és la separació entre l'eix OY i el vèrtex de la hipèrbola ja que per $y=0$, $x=a$.

Per obtenir el paràmetre b de l'equació l'aïllem de la funció per un punt conegut:

$$b = \sqrt{\frac{y^2 a^2}{x^2 - a^2}} \quad (3.20)$$

Per tant l'àrea compresa entre la hipèrbola que forma la intersecció del pla amb la base del con, tal com mostra la figura 3.5, és la següent:

$$A_i(z) = 2x_o y_o - \int_0^{y_o} x \cdot dy = 2x_o y_o - \int_0^{y_o} a \sqrt{1 + \frac{y^2}{b^2}} \cdot dy = 2x_o y_o - \int_0^{\gamma} ab \cdot \sqrt{1 + \sinh(\gamma) \cdot \cosh(\gamma)} \cdot d\gamma = 2x_o y_o - ab \int_0^{\gamma} \cosh^2(\gamma) \cdot d\gamma = 2x_o y_o - ab \left(\frac{\sinh(2\gamma)}{2} + \gamma/2 \right) \quad (3.21)$$

On s'ha aplicat el canvi de variable $y = b \cdot \sinh(\gamma)$ i per tant $dy = b \cdot \cosh(\gamma) d\gamma$

b) Posició obliqua ($\frac{\pi}{2} < \alpha < 0$)

La superfície d'intersecció que es produeix en aquest cas, és una hipèrbola tal com mostra la figura 3.8 o una el·lipse tal com mostra la figura 3.9 depenent de l'angle

b.1) Hipèrbole

L'equació que defineix l'àrea és la calculada en l'equació (3.21)

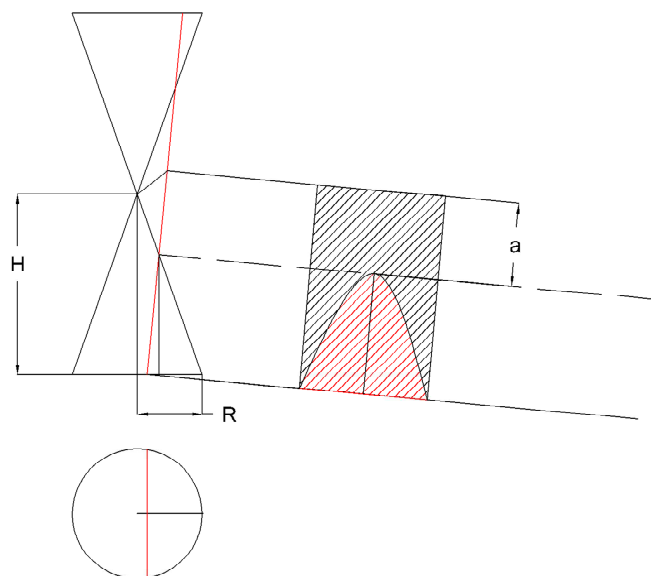


FIGURA 3.8: ESQUEMA DEL DIFERENCIAL DE VOLUM D'UN CON EN POSICIÓ OBLIQUA

b.2) El·lipse

L'equació que defineix l'àrea és la calculada en l'equació (3.15)

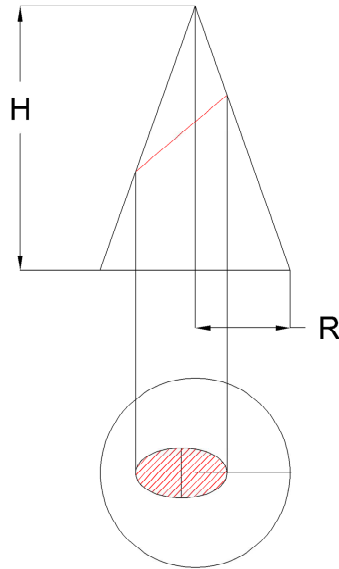


FIGURA 3.9: ESQUEMA DEL DIFERENCIAL DE VOLUM D'UN CON EN POSICIÓ OBLIQUA

c) Posició vertical ($\alpha = \frac{\pi}{2}$)

La superfície d'intersecció que es produeix en aquest cas és una circumferència tal com es mostra a la figura 3.10, i l'àrea és l'equació següent:

$$A_i(z) = \pi \cdot r^2 \quad (3.22)$$

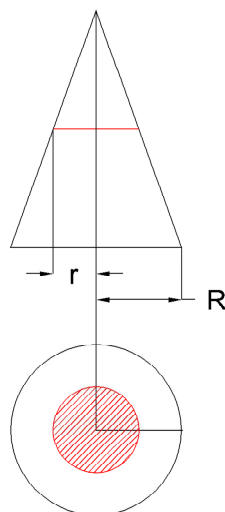


FIGURA 3.10: ESQUEMA DEL DIFERENCIAL DE VOLUM D'UN CON EN POSICIÓ VERTICAL

3.4 MOMENTS MÀXIMS QUE POT SUPORTAR L'ESTRUCTURA

Segons l'apartat 2.3 d'aquest document on es descriu l'estructura SPAR, la tensió que el pretensat dona a l'estructura és d'uns 10MPa. Aquesta tensió la considerarem constant en totes les seccions de l'estructura per tal de tenir una aproximació al moment màxim que pot suportar sense que es produeixi descompressió.

El flotador, al ser una estructura marina, no pot tenir esforços de tracció en cap secció per tal d'eliminar els problemes sorgits de la corrosió de les armadures actives i passives al produir-se fissures. Per tant l'esquema de tensions que haurà de suportar l'estructura com a superposició dels esforços del pretensat i del moment màxim és el que es pot observar a la figura 3.11.

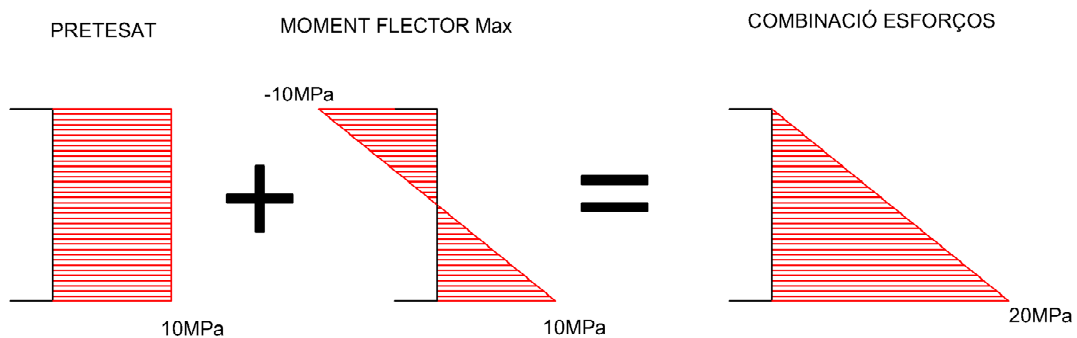


FIGURA 3.11: ESQUEMA DE TENSIONS D'UNA SECCIÓ DEGUT AL PRETESAT I AL MOMENT FLECTOR

Per tant els esforços màxims de tracció que produeix el moment flector i que pot suportar la secció seran de 10 MPa.

El Moment màxim que podrà suportar cada secció serà:

$$M_{max} = W \cdot \sigma \quad (6.1)$$

on:

W és el mòdul resistent, que per a una estructura circular com la figura 3.12 és:

$$W = \frac{\pi \cdot D^3}{32} \cdot (1 - \alpha^4) \quad (6.2) \quad [14]$$

$$\alpha = \frac{d}{D} \quad (6.3)$$

$$\sigma = 10 \text{ MPa}$$

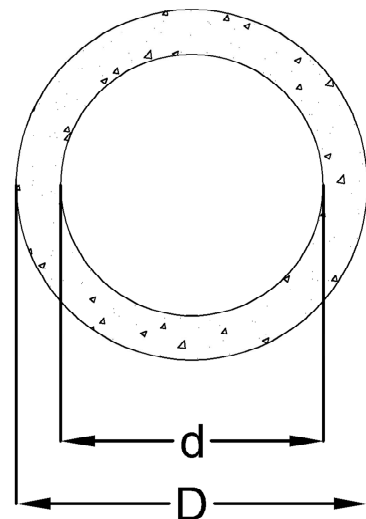


FIGURA 3.12: ESQUEMA DE LA SECCIÓ DEL FLOTADOR

En la següent gràfica es mostren els moments màxims en valor absolut que pot resistir cada secció de l'estructura.

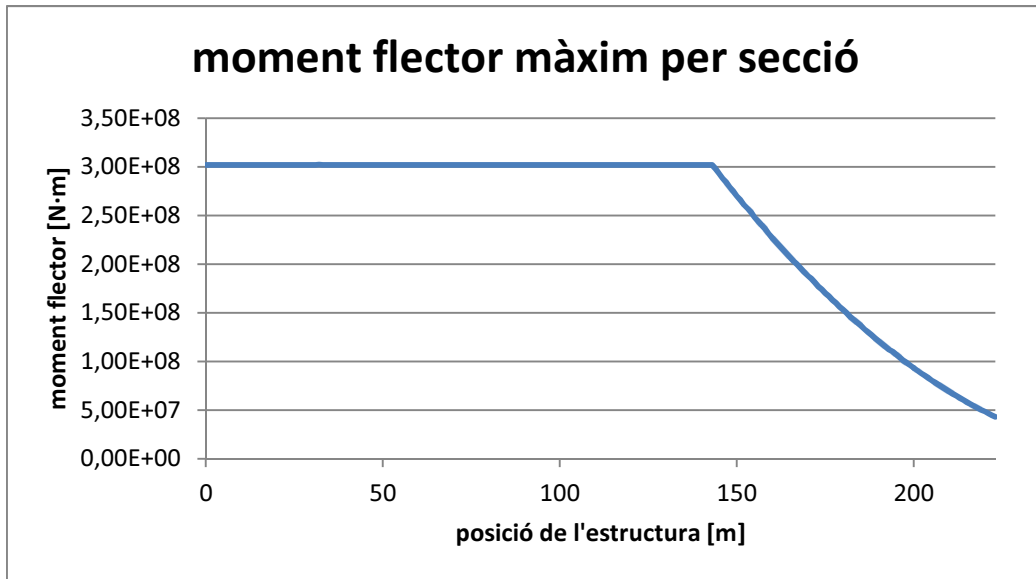


FIGURA 3.13: MOMENT FLECTOR QUE RESISTEIX LA SECCIÓ DE L'ESTRUCTURA

Com mostra la gràfica el **moment màxim** que pot suportar és de **302000 KN·m** constant en la part cilíndrica, i que baixa fins a **43000 KN·m** en la secció més desfavorable del con que es troba en la part superior de la torre.

4 TRANSPORT DE L'ESTRUCTURA

El mètode de transport que s'ha escollit per al procediment constructiu de l'estructura és en humit. Aquest mètode aprofita la flotabilitat que ja té l'estructura per remolcar-lo des del lloc de fabricació fins al punt d'instal·lació, ja que aquest, per motius econòmics, no pot estar molt allunyat de la costa, per l'alt cost dels cables elèctrics submarins.

Es pretén transportar l'estructura en posició horitzontal, per tal de reduir les forces de fregament entre l'estructura i el mar i evitar moviments no controlats durant el seu transport. Tot i això s'ha de realitzar un estudi exhaustiu de la flotabilitat de l'estructura en posició horitzontal ja que no és la posició per la qual ha estat dissenyada. També es pretén portar a terme un estudi del moviment de l'estructura durant el transport i els esforços als que estarà sotmesa.

Al ser una operació delicada i per tal de limitar els possibles efectes que poguessin malmetre l'estructura s'opta per un transport a baixa velocitat, uns 5 nusos, que equival a 2,57 m/s i amb unes condicions de mar en calma que facilitin el seu transport. Aquestes condicions no seran un problema en el moment de la instal·lació, ja que com hem dit, la localització de la instal·lació no serà molt allunyada de la costa i, per tant, al tenir un transport relativament curt podem esperar a condicions de mar i previsions meteorològics favorables per al transport i posterior instal·lació.

4.1 FLOTACIÓ DE L'ESTRUCTURA DURANT EL TRANSPORT

4.1.1 Flotabilitat en horitzontal

El primer estudi de flotabilitat es realitza sobre la configuració de transport en horitzontal, tal com s'ha explicat. Com que l'estructura no és simètrica longitudinalment podem preveure que tindrà un lleuger angle d'inclinació longitudinal que farà que l'estructura no romangui en posició horitzontal en condicions de repòs.

A partir de les parametritzacions de l'estructura s'ha realitzat el càlcul del volum submergit de l'estructura i el seu centre de carena, punt d'aplicació de la resultant de l'empenta de l'aigua, suposant que l'estructura surarà de forma perfectament horitzontal tal com mostra la figura 4.1.

Per a realitzar aquest càlcul s'ha modelitzat el volum submergit en funció del calat, i per mitjà d'un programa recurrent s'ha pogut obtenir l'empenta de l'aigua que contraresta el pes de l'estructura i el seu punt d'aplicació, equació (2.2) de l'apartat 2.5 d'aquesta tesina.

En aquestes condicions el resultat del càlcul del centre de gravetat i el centre de carena obtenim un calat de 4,3m a la base del flotador, que equival pràcticament a la meitat del flotador.

Per altra banda el centre de carena es troba a una posició d'uns 93,8m en direcció longitudinal i de -2,2m en direcció vertical respecte la base i l'eix longitudinal tal com mostra la figura 4.1.

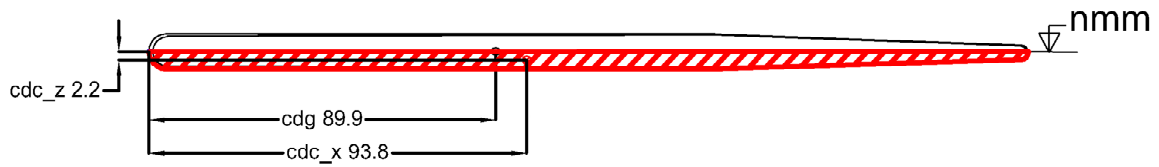


FIGURA 4.1: POSICIÓ DEL CENTRE DE CARENA I CENTRE DE GRAVETAT EN POSICIÓ HORITZONTAL

Comparant el centre de gravetat de l'estructura amb el centre de carena trobat, es pot comprovar fàcilment que l'estructura no es troba en equilibri. Degut a la contraposició de les direccions del pes i de l'empenta de l'aigua, i que el centre de carena en posició horitzontal es troba a la part dreta del centre de gravetat de la figura 4.1, aquestes forces crearan un moment que farà girar l'estructura augmentant l'angle longitudinal fins a produir-se l'equilibri tal com mostra la figura 4.2, confirmant la suposició que s'havia fet al principi.

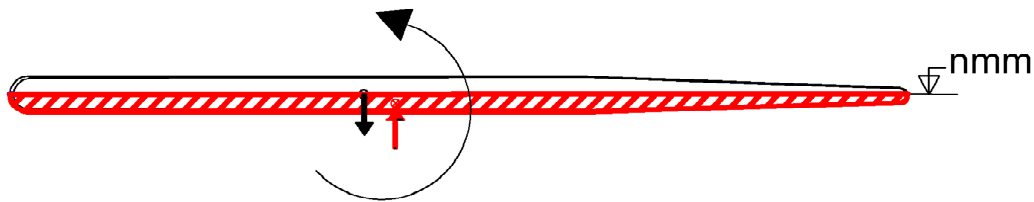


FIGURA 4.2: ESQUEMA DE FORCES DE L'ESTRUCTURA EN POSICIÓ HORITZONTAL

4.1.2 Equilibri de l'estructura en posició horitzontal

En aquest apartat es pretén trobar l'angle de gir en direcció longitudinal que presentaria l'estructura un cop fondejada al mar en condicions de repòs. Aquest és l'angle que presentaria deixant l'estructura surar lliurement de la forma més horitzontalment possible.

Per tal de realitzar aquest càlcul s'ha fet d'una forma anàloga a l'anterior, modelitzant el volum submergit de l'estructura en funció del calat. Per mitjà d'un programa recurrent calcula en funció de l'angle el calat pel qual l'empenta de l'aigua contraresta el pes de l'estructura. Un cop trobat el calat compara el centre de gravetat de l'estructura amb el centre de carena. Si els centres no coincideixen augmenta l'angle de gir de l'estructura fins que aquests coincideixin en la mateixa vertical i per tant es trobin en equilibri, tal com mostra la figura 4.3.

Com que el programa creat calcula el centre de carena i el centre de gravetat en les direccions x' i y' , l'eix longitudinal i perpendicular de l'estructura respectivament, s'ha de realitzar un canvi de coordenades per tal de poder-los comparar segons la direcció de la gravetat, que és la que ens donarà l'equilibri de l'estructura.

L'equació que permet realitzar el canvi de coordenades en funció de l'angle longitudinal de gir α és la 4.1.

A partir del canvi de coordenades s'igualava el centre de gravetat de l'estructura amb el centre de carena del volum submergit (4.2), que ens donarà la condició d'equilibri.

$$\vec{x} = A \cdot \vec{x}' \quad (4.1)$$

On:

\vec{x} és el vector de posició d'un punt de coordenades x i y

\vec{x}' és el vector de posició d'un punt de coordenades x' i y' relatives a la base i eix del cilindre respectivament

$$A \text{ és la matriu de canvi de base } A = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}$$

$$cdg_x = cdc_x \quad (4.2)$$

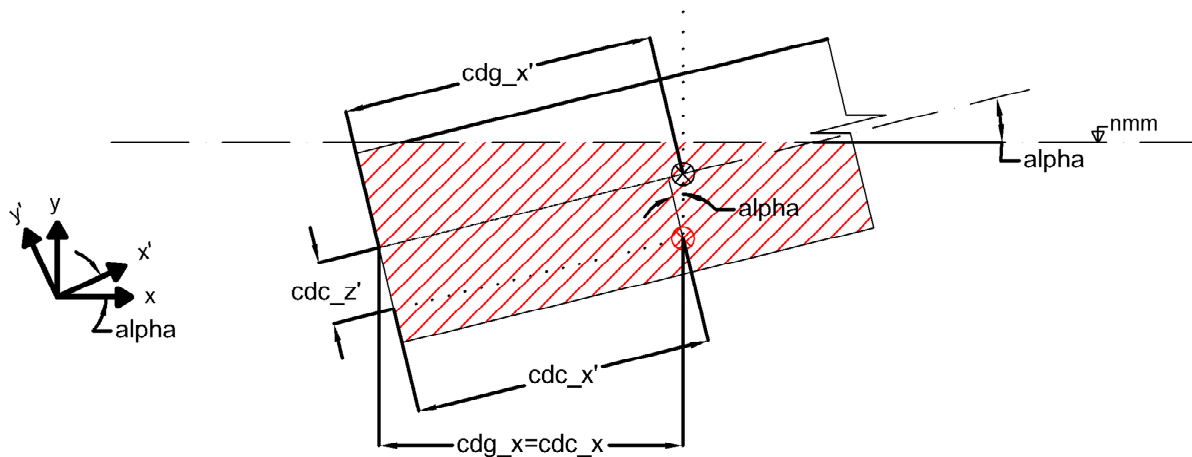


FIGURA 4.3 DETALL ESQUEMÀTIC DE LA POSICIÓ D'EQUILIBRI DE L'ESTRUCTURA

L'angle del gir longitudinal pel qual es produeix l'equilibri de l'estructura en posició horitzontal és d'uns $0,3^\circ$. Els resultats de la posició del centre de gravetat i del centre de carena en funció de la direcció dels eixos x es poden veure a la taula 4.1. Amb aquestes condicions l'estructura presenta un calat d'uns 5 metres a la base del flotador.

	x	y
cdg	89,9932	0,36
cdc	89,39472	-1,6426
	x'	y'
cdg'	89,9932	0
cdc'	89,9399	-2,0004

TAULA 4.1 COORDENADES DEL CENTRE DE GRAVETAT I DE CARENA

A partir d'aquestes dades i de les obtingudes a l'apartat 4.1.1 comprovarem l'estabilitat de la flotació, a partir de la localització del metacentre com es mostra a la figura 4.4.

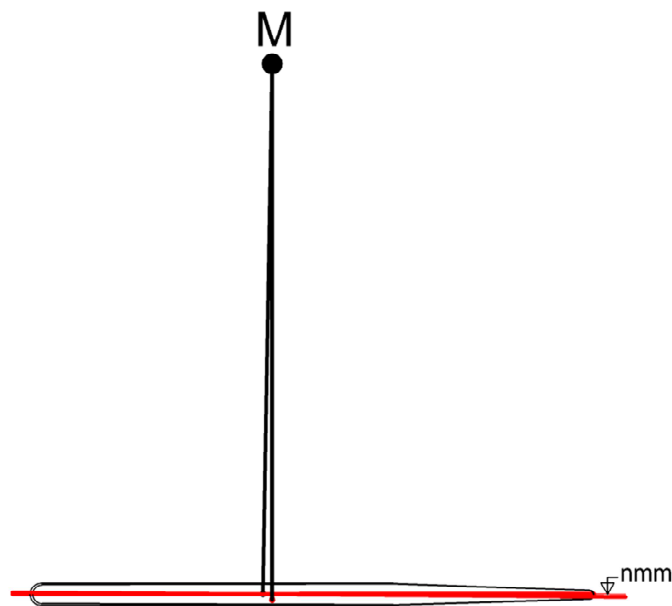


FIGURA 4.4: POSICIÓ DEL METACENTRE EN L'ESTABILITAT LONGITUDINAL

Tal com mostra la figura 4.4, el GM és positiu i per tant l'estabilitat està assegurada, ja que com hem vist en l'apartat 4.1.1 quan es produeix un gir de l'angle longitudinal es produeix un moment estabilitzador.

Per altra banda en el pla transversal no es produeix estabilitat. Aquest fet és degut a que és una peça simètrica en aquest pla. Per tant quan l'estructura escora, gira en direcció l'eix transversal, el centre de carena es manté a la mateixa posició i per tant no existeix cap força estabilitzadora que torni l'estructura a la seva posició original i per tant no existirà estabilitat transversal. Aquest fet s'haurà de tenir en compte al dissenyar els elements de

subjecció i d'estira durant el transport per tal de minimitzar i/o evitar aquesta falta d'estabilitat

4.2 ESFORÇOS DEGUT A LES FORCES DE GRAVETAT I HIDROSTÀTIQUES

El transport de l'estructura es durà a terme amb estat de la mar en calma per tal d'evitar situacions on l'onatge pugui malmetre l'estructura degut a sol·licitacions que no han estat previstes, com mostra la figura 4.5 en què l'estructura s'ha de comportar com una estructura bi-recolzada, o que l'estructura entri en ressonància amb les ones i es produeixin esforços dinàmics que no es puguin controlar.

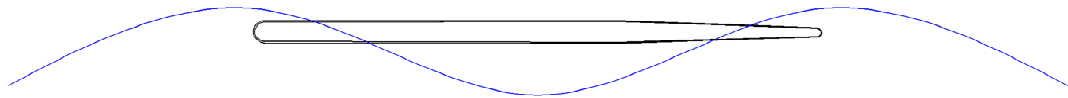


FIGURA 4.5: ESQUEMA DE L'ESTRUCTURA TREBALLANT COM UNA BIGA BIRECOLZADA DEGUT A L'ONATGE

En aquest apartat es pretenen calcular els esforços que haurà de suportar l'estructura suposant que es transporta en un mar en calma i per tant només està sotmesa als esforços hidrostàtics de la part enfonsada.

En la figura 4.6 es pot observar l'esquema de forces a la que estarà sotmesa l'estructura.

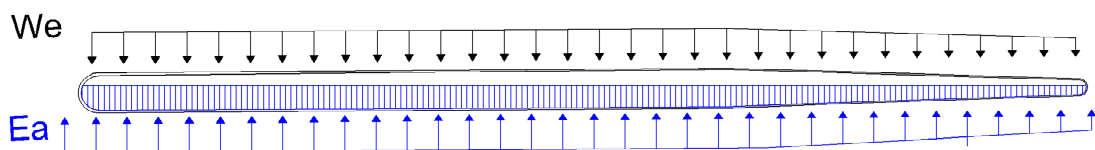


FIGURA 4.6: ESQUEMA DE FORCES A LA QUE ESTÀ SOTMESA L'ESTRUCTURA EN REPÒS

A partir de les dades obtingudes de l'apartat 4.1.2, on s'ha obtingut l'angle d'equilibri i el calat de l'estructura, es calcula la llei de moments flectors que té l'estructura en condicions de repòs. Aquesta llei es pot calcular a partir de l'equació (4.3)

$$M_o = \sum A_e \cdot pe_f \cdot d \cdot (x_o - x_e) \cdot \cos(\alpha) - \sum A_s \cdot pe_s \cdot d \cdot (x_o - x_s) \cdot \cos(\alpha) \quad (4.3)$$

on:

A_e és l'àrea del diferencial del volum de l'estructura

A_s és l'àrea del diferencial del volum de l'aigua desplaçada

pe_f és el pes específic del formigó

pe_a és el pes específic de l'aigua de mar

d és el diferencial

x_o és la posició del punt on calculem el moment flector

x_e és la posició del diferencial de volum de l'estructura

x_s és la posició del diferencial de volum de l'aigua desplaçada

La llei de moments flectors que es veu sotmesa l'estructura en condicions d'estabilitat de flotació és la que s'observa a la figura 4.7:

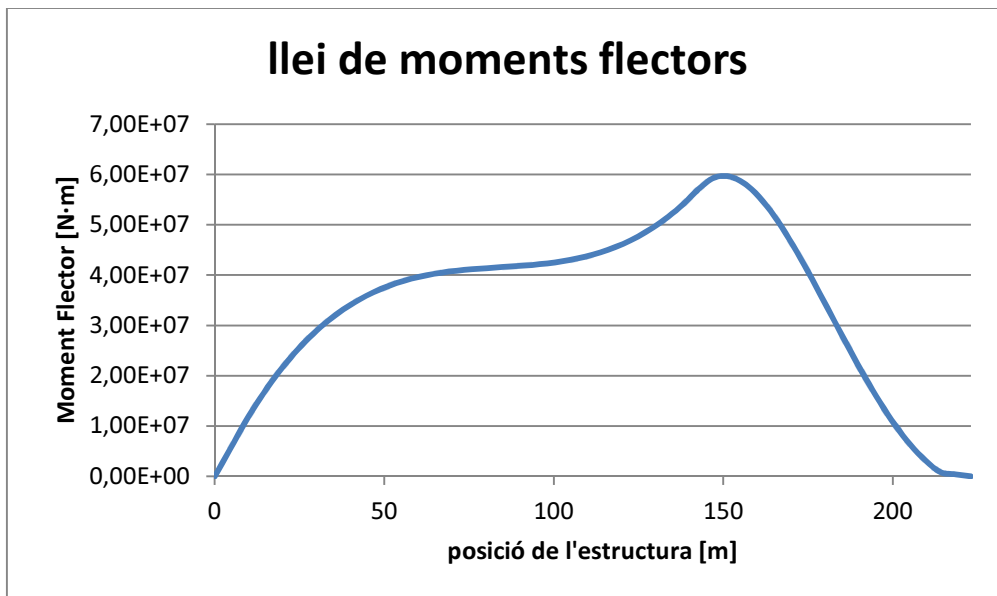


FIGURA 4.7: LLEI DE MOEMENTS FLECTORS

Com es pot observar el moment màxim que ha de suportar l'estructura és de l'ordre de $6 \cdot 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}$ inferior al moment màxim que pot suportar l'estructura de l'ordre de $3 \cdot 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}$ calculat en l'apartat 3.4. Per tant l'estructura pot reposar en posició horitzontal sense preocupació que s'indueixin esforços que poguessin malmetre l'estructura.

4.3 RESISTÈNCIA A L'AVANÇ DURANT EL TRANSPORT

En aquest apartat es pretén calcular la resistència a l'avanç de l'estructura per tal de saber quants i quin tipus de remolcadors necessitem per transportar l'estructura.

La formulació que es farà servir és la que es mostra en l'apartat 2.7 de la present tesina.

El transport de l'estructura es farà a baixa velocitat, per tal de controlar el moviment i disminuir la resistència a l'avanç. La velocitat serà d'uns 5 nusos que equival a 2,57 m/s.

Si calculem el número de Froude segons l'equació (2.7), on la velocitat és igual a 2,57 m/s i la longitud de l'estructura segons l'apartat 2.3 de 223 m.

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{gL}} = \frac{2,57}{\sqrt{9,8 \cdot 223}} = 0,055$$

Tenir un número de Froude inferior a 0,4 implica que la resistència d'ona és pràcticament nul·la i per tant la depreciarem. A la resistència total d'avanç només s'hi tindrà en compte la resistència viscosa, que segons l'equació (2.6) i (2.8) serà:

$$C_t = \frac{R_t}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} \quad (2.6)$$

$$C_v = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (2.8)$$

i $C_t = C_v$ per tant:

$$R_t = \frac{1}{2}\rho v^2 S \cdot \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (4.3)$$

El número de Reynolds segons l'equació (2.9), amb una viscositat cinemàtica de l'aigua de mar (ν) de $1,003 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ serà igual:

$$Re = \frac{LV}{\nu} = \frac{223 \cdot 2,57}{1,003 \cdot 10^{-6}} = 5,718 \cdot 10^8$$

La superfície mullada S calculada a partir dels resultats de l'apartat 4.1 és de $2516,3 \text{ m}^2$.

La resistència total a l'avanç a partir de l'equació (4.3), per tal de tenir en compte la resistència que ofereix la cara frontal de l'estructura, la majorarem per un factor de 1,2.

Per tant la resistència total a l'avanç per una velocitat de 5 nusos, és de **168,2 KN** o **17 Tones**.

4. Transport de l'estructura

Per aquesta operació s'ha triat el remolcador Montfred, operatiu des del Port de Barcelona. En la figura 4.8 es poden observar les seves característiques on el Bolard Pull és la càrrega màxima que pot tirar:

Montfred



GENERALIDADES	
Año de Construcción	2.002
Eslora Total	27 m
Manga	9,7 m
Puntal	3,9 m
Calado Máximo	5,3 m
G.T.	269
Bolard Pull	45 Tn
Sociedad de Clasificación	Germanischer Lloyds
Cota de Clasificación	HULL: +100 A5 Tug Machinery: + MC AUT
Puerto Base	Barcelona

EQUIPO PROPULSOR	
M.M.P.P	2 X Ulstein-Bergen
Potencia Efectiva	2.650 kw
Propulsores	2 X Schottel SRP 1010
Velocidad	11'

CAPACIDAD DE TANQUES	
Combustible	85 m ³
Agua dulce	24 m ³
Aceite	6 m ³

FIGURA 4.8: CARACTERÍSTIQUES DEL REMOLCADOR MONTFRED. FONT:GRUPO REBARSA[15]

4.4 DIMENSIONAMENT DELS ELEMENTS DE FLOTACIÓ I SUBJECCIÓ DE L'ESTRUCTURA DURANT EL TRANSPORT

Per tal que l'estructura pugui ser remolcada durant el transport s'ha d'assegurar la seva flotació i la subjecció.

Com ja hem comprovat en el punt 4.1, l'estructura presenta flotació estable en posició horitzontal, però per què això es produeixi també cal assegurar l'estanquitat. Com que l'estructura és una peça de formigó monolítica i dissenyada per estar al mar és estanca en tota la seva longitud, excepte el cap de la torre. Aquesta part està dissenyada per poder connectar el rotor per mitjà d'uns cargols i es troba obert a l'exterior.

Per altra banda l'element de subjecció de l'estructura durant el transport ha de ser capaç de transmetre les càrregues que es produeixen durant l'arrossegament a l'estructura calculades a l'apartat 4.3. A més a més ha de ser un sistema que impedeixi la rotació de l'estructura sobre el seu eix longitudinal i que permeti l'enganxament de les cadenes o cables que facin possible la connexió amb el remolcador.

També s'ha de tenir en compte que els elements de subjecció han d'estar operatius durant la vida útil de l'estructura, ja que aquesta pot ser transportada fins a una altra localització. És per això que s'han de tenir en compte els elements d'acer que es poden malmetre degut a l'oxidació i als desperfectes que pot causar a l'estructura si es troben ancorats en el seu interior.

4.4.1 Anàlisi dels elements d'estanquitat

Per tal d'assegurar l'estanquitat en la part superior de l'estructura hem d'assegurar que quedi tapada per impedir l'entrada d'aigua a l'interior de l'estructura i faci perillar la seva flotabilitat.

A la part superior de l'estructura s'hi troben els extrems dels cables de pretensat. A més a més aquest extrem està dissenyat per tal d'ancorar l'estructura del rotor a través de 36 cargols que el subjectaran, tal com mostra les figura 4.9 i 4.10.



FIGURA 4.9: DETALL DEL CAP DE L'ESTRUCTURA.

CORONA ANCORATGE ROTOR

36 UNITATS M 50 - R 10.10
segons especificacions

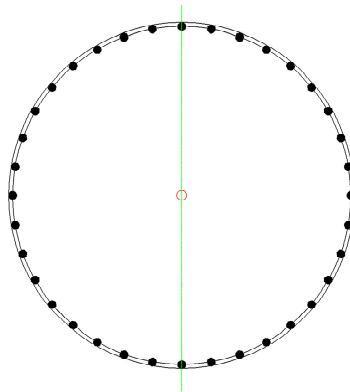


FIGURA 4.10: DETALL CORONA AMB ELS 36 CARGOLS

Amb aquestes consideracions es pretén dissenyar una tapa estanca que tanqui la part superior de l'estructura i quedi subjecta amb els cargols de subjecció del rotor. La tapa d'estanquitat haurà de suportar la pressió d'aigua deguda a la part enfonsada de la tapa.

4.4.2 Anàlisi dels elements de subjecció

Durant el transport, l'estructura no té equilibri estable en la direcció transversal tal com s'ha demostrat en l'apartat 4.1.2. Per tal d'impedir el gir de l'estructura sobre el seu eix longitudinal es proposa que hi hagi dos elements de subjecció, cada un connectat al remolcador per un cable diferent, tal com mostra la figura 4.11, aquest tipus de distribució impedirà que l'estructura giri sobre el seu eix longitudinal.

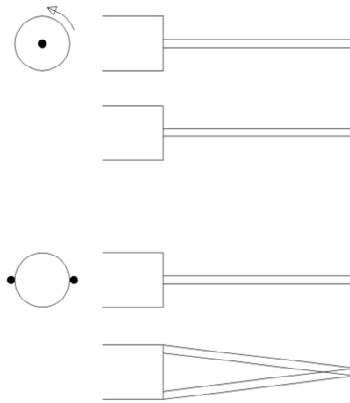


FIGURA 4.11. ESQUEMA DE TIPOLOGIES D'ARROSSEGAMENT

La subjecció haurà de suportar una tensió com a mínim de 17 T, la força d'arrossegament de l'estructura calculada en l'apartat 4.3, i l'haurà de transmetre a l'estructura de forma repartida.

Per aquests motius es proposa que els elements de subjecció es trobin a la tapa d'estanquitat de la part superior de l'estructura i transmeti la força d'arrossegament a través dels cargols de subjecció de la tapa superior d'estanquitat.

4.4.3 Propostes d'elements d'estanquitat i subjecció

La tapa de l'estructura s'ha dissenyat amb una forma de casquet esfèric per tal que sigui el més hidrodinàmica possible. A més a més la forma de casquet esfèric de gran radi permetrà tenir un gran cantell al centre de la tapa que afavorirà la resistència de la tapa.

La tapa té un diàmetre d'uns 4 m per tal de cobrir tota la part superior de la torre, i el radi del casquet esfèric és de 5m. En la figura 4.12 es mostra un esquema de la forma de la tapa.

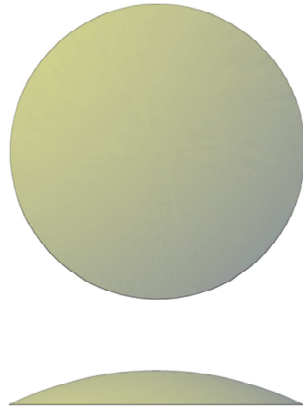


FIGURA 4.12: ESQUEMA DE LA TAPA EN FORMA DE CASQUET SEMIESFÈRIC

La tapa de la torre ha de suportar la pressió que es produeix quan aquesta queda submergida que en el moment més desfavorable, si la tapa es trobés totalment submergida, seria de 40 KN/m^2 . Per tal de suportar aquestes accions, la tapa de la torre està formada per una xapa d'acer exterior que dona la forma de casquet a la tapa d'un espessor de 16 mm. La tapa es troba recolzada per 8 nervis en forma de biga de cantell variable formades per dues xapes de diferent espessor en forma de T invertida. L'ànima té un espessor de 10 mm i les ales una amplada de 20 cm i un espessor de 16mm. Els nervis es troben units al centre de la tapa per mitjà d'un cilindre d'acer per les ànimes i un disc per les ales inferiors. La part més exterior de la tapa està formada per una xapa en forma d'anell de 20 mm d'espessor que lliga les bigues i dona rigidesa al conjunt de la tapa.

A l'esquema de les figura 4.13 es pot observar la distribució i els elements que conformen els nervis de la tapa.

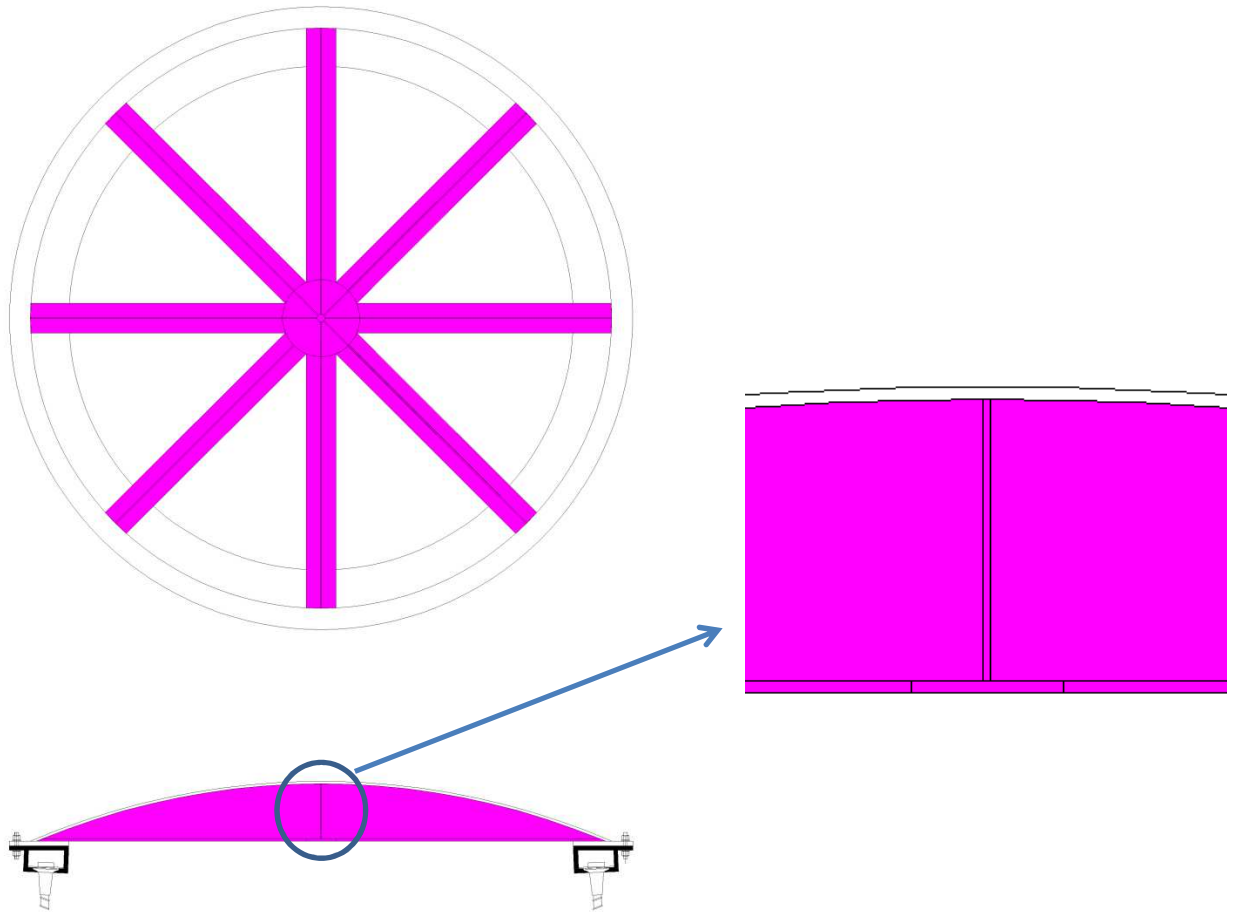


FIGURA 4.13: DETALL DE LA TAPA DE LA TORRE ON S'HAN DESTACAT ELS NERVIS EN FORMA DE T INVERTIDA DE CANTELL VARIABLE

A l'esquema de la figura 4.14 es pot observar la distribució i els elements que conformen la xapa que conforma el casquet de la tapa.

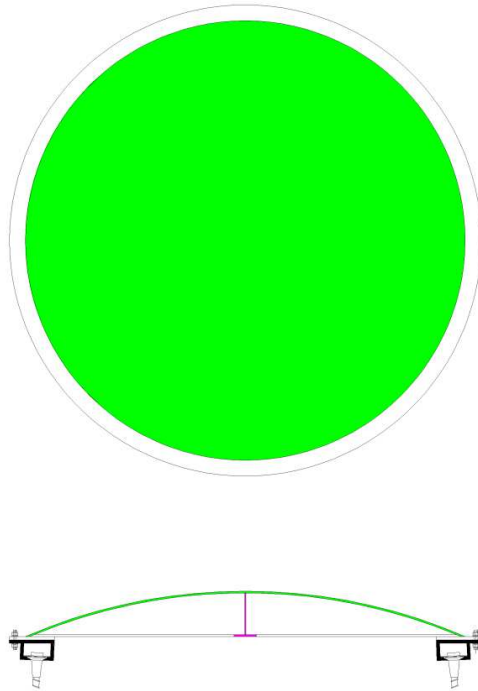


FIGURA 4.14: DETALL DE LA TAPA DE LA TORRE AMB EL CASQUET DE XAA EN VERD

A l'esquema de la figura 4.15 es pot observar la distribució i els elements que conformen l'anella que aporta rigidesa i monolitisme a l'estructura de la tapa.

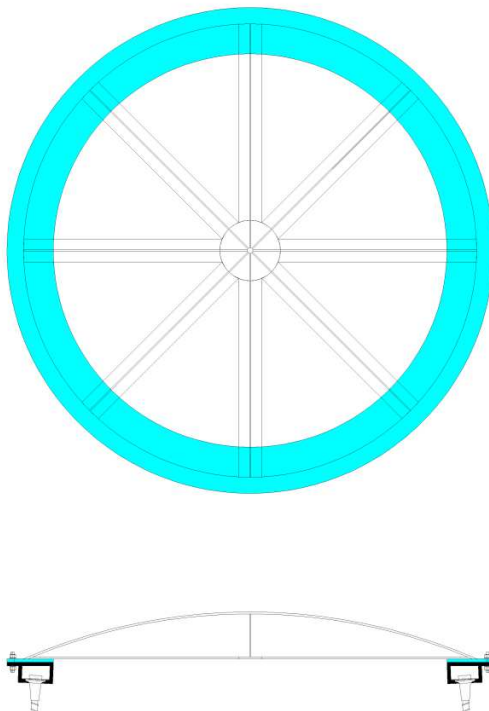


FIGURA 4.15: DETALL DE LA TAPA DE LA TORRE ON S'HA DESTACAT L'ANEL EN CIAN

4. Transport de l'estructura

Els elements de subjecció seran unes orelles d'acer que aniran soldades a l'extrem de la tapa. Les orelles han de suportar el tir de l'estructura i estan dissenyades per què suportin una càrrega molt superior per si es produeixen sobrecàrregues. Les orelles consisteixen en unes plaques d'acer de 25 mm d'espessor amb uns passadors per tal de connectar els cables de tir de l'estructura. Aquestes orelles es troben soldades a la xapa del casquet i de l'anella exterior.

A l'esquema de la figura 4.16 es pot observar la distribució i els elements que conformen les orelles de tir.

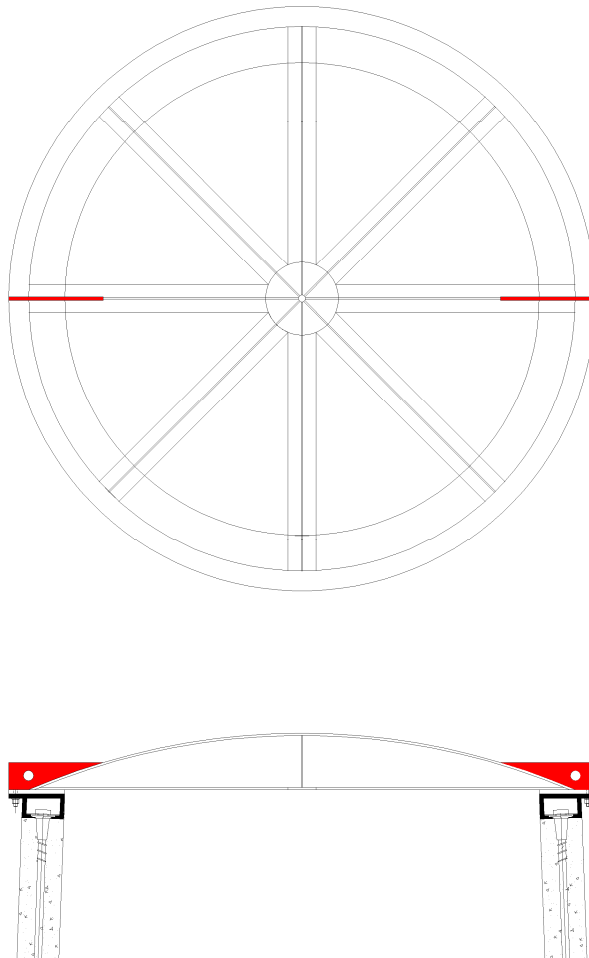


FIGURA 4.16: DETALL DE LES ORELLES DE TIR DE L'ESTRUCTURA

5 INSTAL·LACIÓ DE L'ESTRUCTURA

La instal·lació de l'estructura consisteix en el canvi de posició d'horitzontal, que és la configuració de transport, a vertical, que és la configuració final per la qual ha estat dissenyada l'estructura. Les fixacions marines hauran estat degudament instal·lades i connectades a l'estructura després de l'operació d'erecció d'aquesta.

L'operació d'erecció vertical es pretén dur a terme mitjançant el llastrat d'aigua de mar a l'interior de l'estructura, ja que aquesta degut a la seva morfologia SPAR, tendirà a col·locar-se verticalment degut a l'efecte del moment estabilitzador. Amb aquest procés s'intenta evitar la necessitat de disposar de barcasses especials amb grues de gran dimensions que comportarien un increment del cost d'aquesta operació.

5.1 ESTUDI DE LES CONFIGURACIONS D'EQUILIBRI DE L'ESTRUCTURA DURANT EL PROCÉS DE LLASTRAT

Per tal de conèixer les diferents posicions en què es trobarà l'estructura durant el procés de llastrat es realitza un estudi que calcula les configuracions en què es produeix equilibri en funció de l'aigua llastrada. Aquest estudi s'ha dut a terme estudiant els diferents punts d'equilibri i els seus respectius angles a mesura que anem llastrant l'estructura, o sigui introduint aigua del mar a l'interior d'aquesta.

Els càlculs s'han dut a terme a partir de les equacions de l'apartat 3, amb les quals s'ha parametrizat el volum d'aigua llastrada, per tal de calcular l'increment del pes de l'estructura i el seu nou centre de gravetat. Amb la parametrizació del volum submergit també s'ha pogut calcular l'empenta total que contraresta el pes de l'estructura llastrada. A partir d'aquestes parametrizacions, i imposant que el centre de gravetat i el centre de carena coincideixin en la mateixa vertical, equació 4.2, s'ha trobat l'angle longitudinal d'equilibri, tal com mostra la figura 5.1. L'evolució de l'angle en funció del volum d'aigua llastrat es pot observar a la figura 5.2.

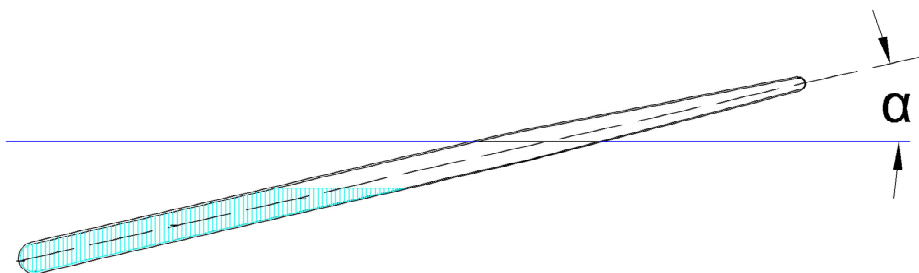


FIGURA 5.1: ESQUEMA ESTRUCTURA LLASTRADA EN EQUILIBRI

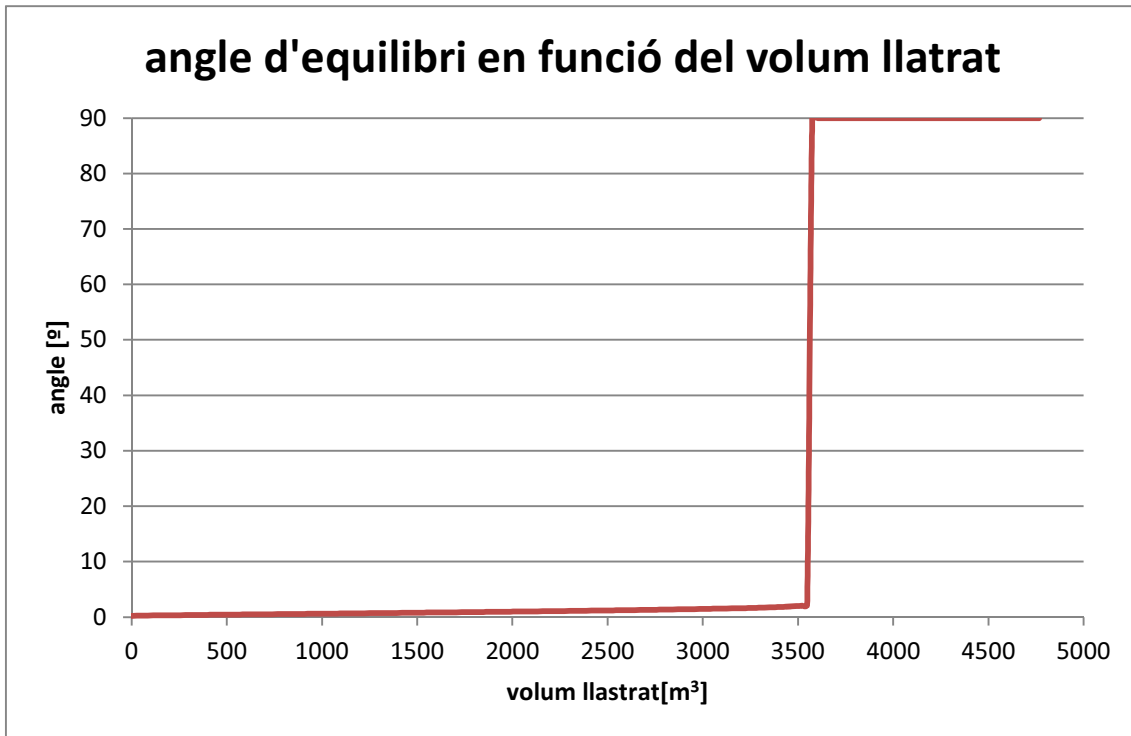


FIGURA 5.2 EVOLUCIÓ DE L'ANGLE D'EQUILIBRI EN FUNCIÓ DEL VOLUM D'AIGUA LLASTRADA

Com es pot observar a la figura 5.2 l'angle d'equilibri augmenta linealment amb l'augment del volum llustrat de 0 a 3600 m³ d'aigua interior, amb un angle d'equilibri per un volum de 3600 m³ de 2.2°. A partir d'aquest punt, al continuar augmentant l'aigua llustrada interior, l'angle d'equilibri fa un salt fins a 90°, on l'estructura es troba en posició vertical, i al continuar augmentant el volum d'aigua interior l'estructura romandrà en posició vertical.

Per tal de confirmar els resultats i assegurar que els angles obtinguts a la gràfica de la figura 5.2 són les úniques configuracions d'equilibri estables, s'ha fet un estudi més exhaustiu de la variació del centre de gravetat i de carena en funció del volum d'aigua interior. Aquest estudi també pretén trobar possibles errors, ja que el mètode de càlcul que s'ha utilitzat calculava l'angle d'equilibri següent a l'incrementar el volum d'aigua llustrada un valor constant. Aquest procediment recurrent pot ometre altres posicions d'equilibri per als mateixos volums.

Aquest segon estudi s'ha realitzat de manera inversa a l'anterior. S'han imposat els angles d'inclinació, de 0° a 90° i per aquets s'ha trobat el volum d'aigua interior pel qual es presenta equilibri.

La figura 5.3 mostra la gràfica d'evolució del mínim volum d'aigua llustrada per al qual existeix equilibri per als angles entre 0° i 90°, i la taula 5.1 mostra aquests volums i l'evolució dels respectius centres de gravetat i de carena per a cada situació.

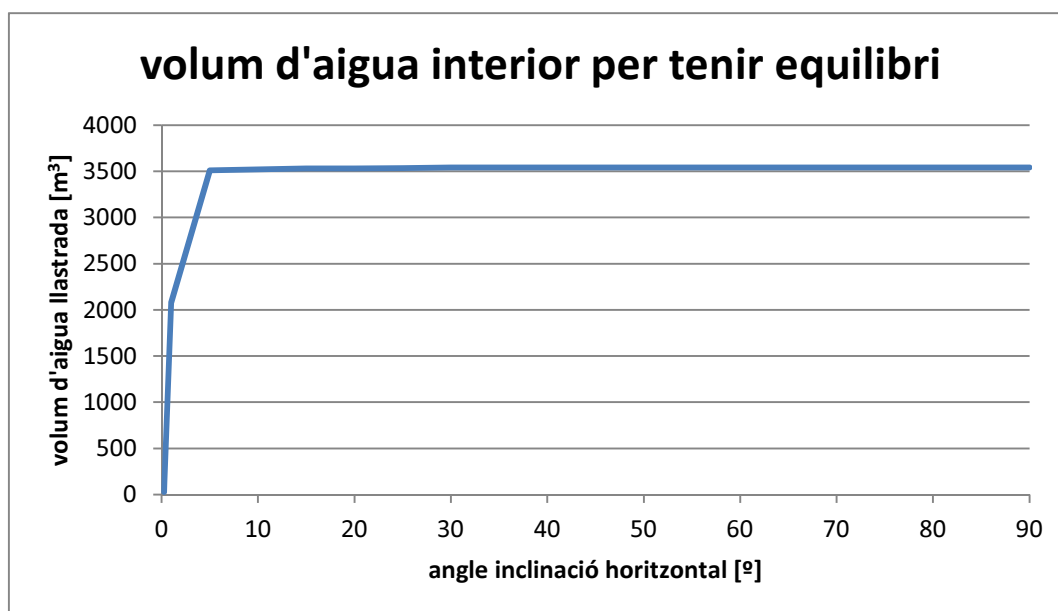


FIGURA 5.3 EVOLUCIÓ DEL VOLUM MÍNIM D'AIGUA LLASTRADA QUE PRESENTA EQUILIBRI EN FUNCIÓ DE L'ANGLE D'INCLINACIÓ

α	V_aigua	cdc_X	cdc_Y	cdg_X	cdg_Y	cdc_X-cdg_X	cdc_Y-cdg_Y
0,25	28	89,68	-1,59	89,48	0,35	0,2	-1,94
0,3	142	88,96	-1,48	88,8	0,36	0,16	-1,84
1	2075	82,29	0,15	82,18	0,77	0,11	-0,62
5	3510	70,63	5,8	70,59	5,87	0,04	-0,07
10	3521	68,54	11,87	68,5	11,93	0,04	-0,06
15	3529	66,96	17,79	66,96	17,84	0	-0,05
20	3532	65,07	23,57	65,06	23,6	0,01	-0,03
25	3535	62,71	29,15	62,71	29,18	0	-0,03
30	3540	59,93	34,52	59,9	34,53	0,03	-0,01
40	3540	52,99	44,4	52,97	44,41	0,02	-0,01
50	3540	44,45	52,92	44,44	52,93	0,01	-0,01
60	3540	34,57	59,84	34,57	59,84	0	0
70	3540	23,65	64,93	23,64	64,93	0,01	0
80	3540	12	68,01	12	68,06	0	-0,05
90	3540	0	69,1	0	69,1	0	0

TAULA 5.1: VOLUM D'AIGUA LLASTRADA I POSICIONS DEL CENTRE DE GRAVETAT I CARENA RESPECTIUS

Com es pot observar en la figura 5.3 i a la taula 5.1, el volum d'aigua llastrada necessari perquè existeixi equilibri augmenta juntament amb l'angle d'inclinació fins a un angle d'inclinació de 30° i un volum de 3540 m³ d'aigua, que es manté constant fins a un angle de 90°. Si s'observen les columnes 7 i 8 de la taula 5.1, que mostren la diferència entre el centre de gravetat i el centre de carena, a partir dels 30° d'angle d'equilibri, la posició dels centres de gravetat i de carena és la mateixa, per tant el punt d'aplicació de l'empenta coincideix exactament amb el punt d'aplicació de la resultant del pes de l'estructura.

A partir d'aquest volum, el centre de carena quedarà per sobre el centre de gravetat i per tant tindrem estabilitat inicial, o sigui per un volum llastrat de 3540 m³ és el volum d'aigua interior mínim perquè es produeixi estabilitat quan l'estructura es troba en posició vertical.

Si comparem els resultats d'aquest segon estudi amb els del primer, la primera dada més rellevant és que el volum de 3540 m³ trobat és pròxim però inferior al volum que provoca el salt del gir de l'estructura de 2.2º a 90º que és de 3600 m³. Aquest resultat posa de manifest que existeixen volums per al qual existeixen diferents angles d'equilibri com ara els 3510m³ que té un angle d'equilibri menor a 2.2º i a major a 5º.

Per tal de finalitzar aquest estudi i confirmar els resultats, s'ha calculat i comparat els centres de carena i de gravetat en funció de l'angle en què es troba l'estructura per a diferents volums d'aigua, per tal de comprovar l'equilibri i la seva estabilitat. Aquests càlculs es realitzen perquè el programa utilitzat anteriorment només calcula l'equilibri però no comprova l'estabilitat de flotació.

Els volums representatius que s'han agafat són quatre volums que defineixen tots els estats possibles d'equilibri, un volum per al qual existeix un angle d'equilibri menor a 2.2º, un volum d'aigua llastrada $V_a=2270\text{m}^3$, un que presenta dos punts d'equilibri, $V_a=3500\text{m}^3$, el volum d'aigua límit perquè es produeixi estabilitat, $V_a=3540\text{m}^3$, i un volum d'aigua, $V_a=3970\text{m}^3$ per al qual només existeix equilibri quan l'angle és de 90º, o sigui en posició vertical.

L'estudi es du a terme comparant la posició del centre de carena amb el centre de gravetat fent la seva diferència, per tots els angles de gir longitudinal en què es troba l'estructura. Els resultats s'han representat en les gràfiques de les figures 5.4 i 5.5.

Amb aquestes gràfiques es pretén observar d'una manera clara l'evolució de la posició relativa del centre de carena i el centre de gravetat de l'estructura. Quan la diferència sigui positiva voldrà dir que el centre de carena es troba més allunyat que el centre de gravetat respecte de la base del flotador de l'estructura; quan la diferència sigui negativa el centre de carena estarà més a prop de la base del flotador, i quan sigui zero el centre de carena coincidirà amb el centre de gravetat i per tant es produirà equilibri en la flotació.

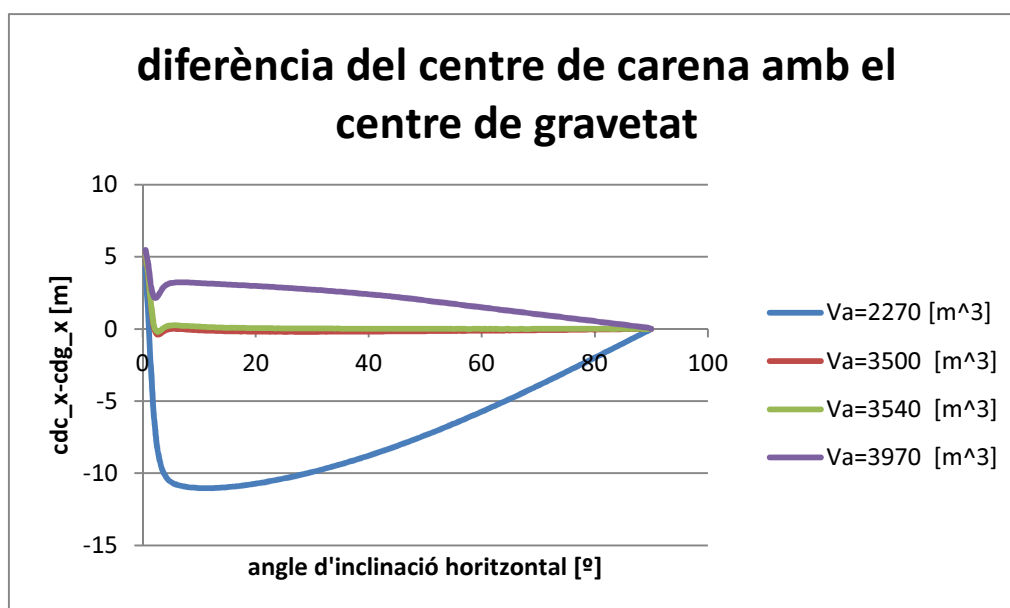


FIGURA 5.4: DIFERÈNCIA DEL CENTRE DE CARENA AMB EL CENTRE DE GRAVETAT PER A DIFERENTS VOLUMS D'AIGUA LLASTRADA

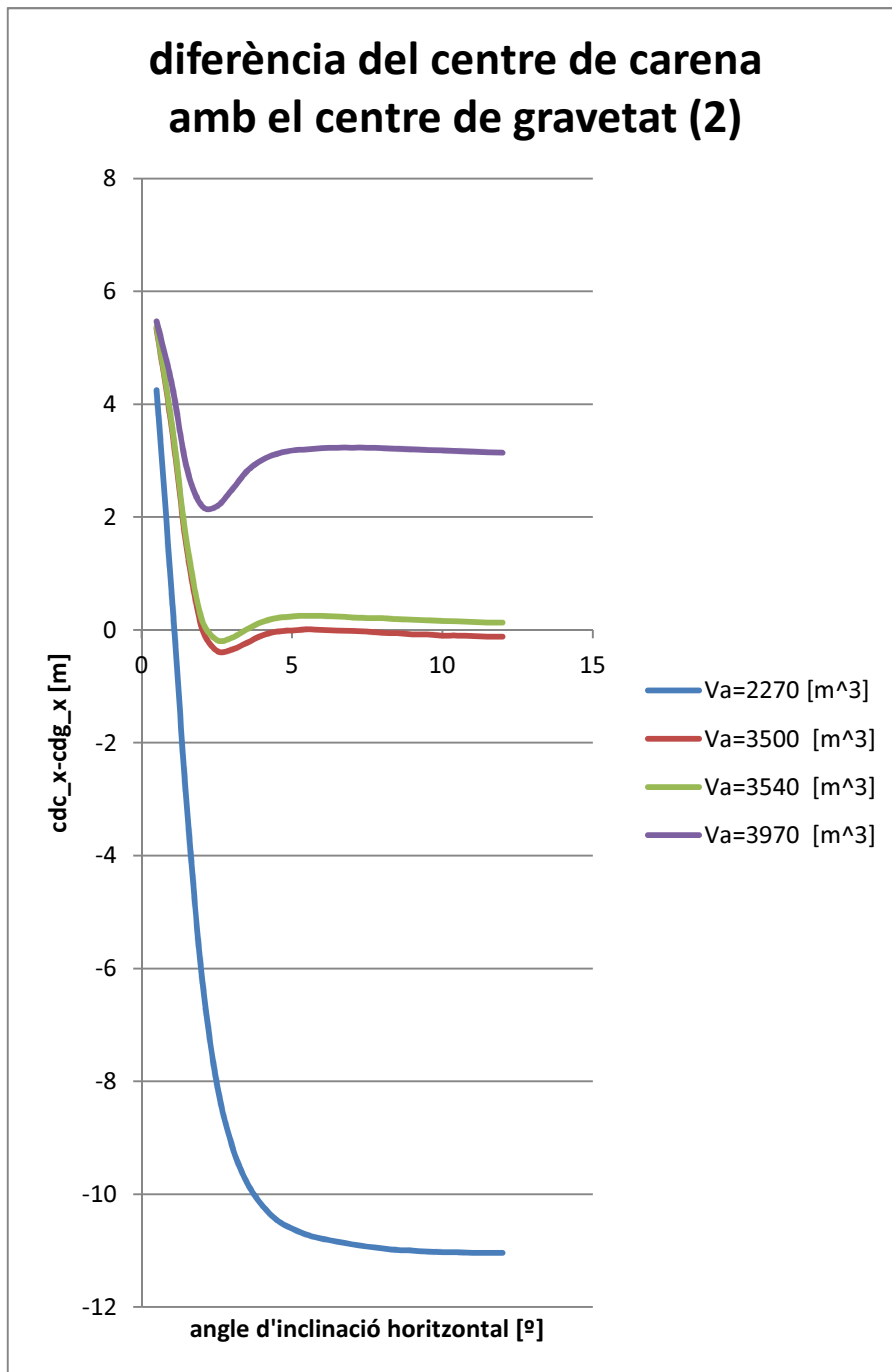


FIGURA 5.5: AMPLIACIÓ DE LA FIGURA 5.4

- **Estudi per un volum il·lustrat de 2270 m^3**

Com podem observar per a un volum d'aigua interior de 2270 m^3 tenim dos punts d'equilibri un per sota de $2,2^\circ$ i l'altre als 90° . Com es demostra en l'esquema de la figura 5.6, l'equilibri per l'angle inferior a $2,2^\circ$ és estable, ja que si augmentem l'angle el centre de gravetat es troba més allunyat del centre de carena i per tant es produeix un moment estabilitzador, i si l'angle disminueix és el centre de carena el que es troba més allunyat i per tant el moment que produeixen també és estabilitzador.

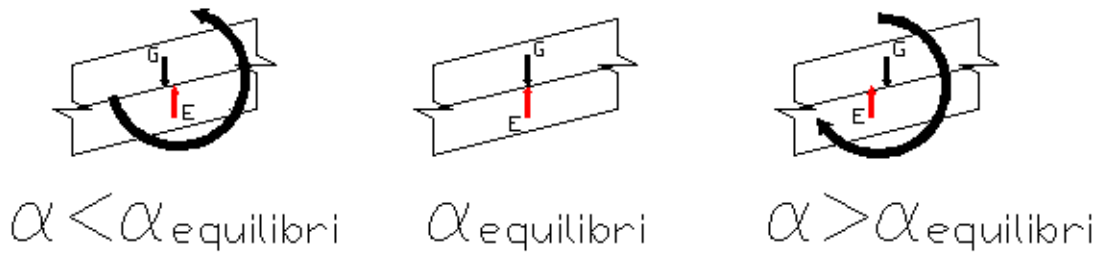


FIGURA 5.6: POSICIÓ DEL CENTRE DE GRAVETAT I DEL CENTRE DE CARENA PER UN VOLUM LLASTRAT DE 2270 m³ I UN ANGLE INFERIOR A 2.2°.

- **Estudi per un volum llastrat de 3500 m³**

Per a un volum inferior de 3500 m³ d'aigua es produeixen tres configuracions d'equilibri: un amb un angle menor de 2,2°, un altre a l'entorn dels 5° i a 90°. Per l'angle inferior a 2,2° es produeix un cas anàleg al punt d'equilibri menor de 2,2° per a un volum de 2270 m³ i per tant serà estable.

Per l'angle de l'entorn dels 5°, si ens fixem en l'esquema de la figura 5.7, la configuració és semiestable, ja que si augmentem l'angle es produeix un moment estabilitzador que farà tornar a la posició d'equilibri d'on sortia, i si disminuïm l'angle es produirà un moment que ens portarà a l'angle anterior d'equilibri menor a 2,2°.

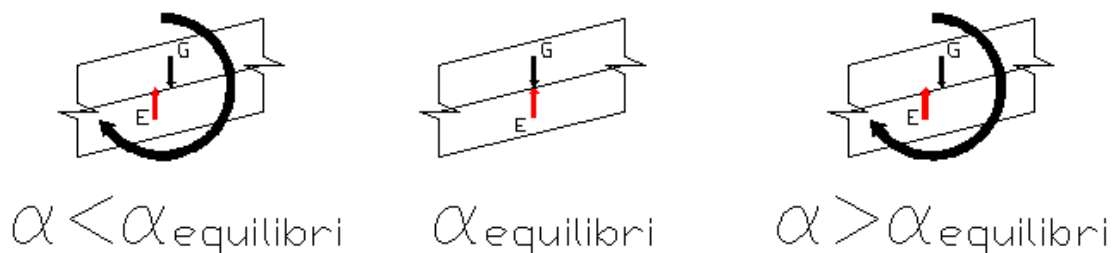


FIGURA 5.7: : POSICIÓ DEL CENTRE DE GRAVETAT I DEL CENTRE DE CARENA PER UN VOLUM LLASTRAT DE 3500 m³ I UN ANGLE SOBRE ELS 5°.

- **Estudi per un volum llastrat de 3540 m³**

Per a un volum de 3540m³ també es produeix un punt d'equilibri estable per un angle inferior a 2.2° com en el cas d'un volum d'aigua interior de 2270m³ i el de 3500 m³.

L'altre punt d'equilibri, entre 2.2° i 5°, és completament inestable, ja que si disminueix l'angle tendirà a anar al punt d'equilibri estable inferior a 2,2° i si augmenta l'angle tendirà a anar a l'equilibri per un angle de 90°, tal com mostra l'esquema de la figura 5.8.

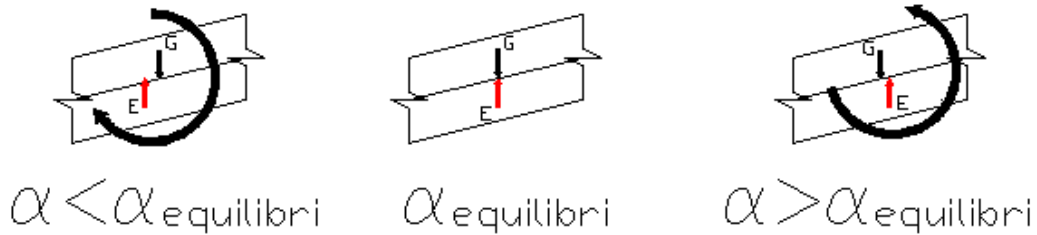


FIGURA 5.8: POSICIÓ DEL CENTRE DE GRAVETAT I DEL CENTRE DE CARENA PER UN VOLUM LLASTRAT DE 3540 m³ I UN ANGLE ENTRE ELS 2,2º I ELS 5º.

- **Estudi per un volum llastrat de 3970 m³**

Per a volum superior a 3540 m³ com el de 3970m³ podem comprovar que només existeix equilibri per a un angle de 90º.

- **Conclusions de l'estudi de les configuracions d'equilibri de l'estructura durant el procés de llastrat**

L'erecció de l'estructura es pot dur a terme en principi sense cap ajuda mecànica ja que degut a la geometria de l'estructura i per l'efecte estabilitzador per a la qual ha estat dissenyada, l'angle d'equilibri augmenta durant l'operació de llastrament fins a posicionar-se verticalment per si sol.

Durant l'operació de llastrament, l'estructura només presenta posicions d'equilibri estables per a angles inferiors a 2,2º i per a 90º. Per tant a mesura que es vagi augmentant el volum d'aigua interior, l'angle d'equilibri anirà augmentant fins a 2,2º amb un volum d'aigua interior de 3600 m³. Al continuar llastrant d'aigua l'interior de l'estructura si no s'impedeix el moviment d'aquesta, farà un salt fins a situar-se verticalment amb un angle d'equilibri de 90º, en la seva posició de treball final, tal com mostra la figura 5.2.

En el salt de l'estructura de 2,2º a 90º provocarà que aquesta es trobi sotmesa a diferents configuracions depenent de l'angle d'erecció sense presentar equilibri. Aquestes configuracions no coincideixen en les quals ha estat dissenyada l'estructura i per tant l'estructura pot estar sotmesa a esforços molt importants que la poden malmetre. Per tant s'ha de realitzar un estudi dels esforços a que està sotmesa l'estructura durant el procés d'erecció per assegurar la seva integritat.

Per altra banda també es pot constatar que, a partir del moment que l'estructura fa el salt per posar-se verticalment, degut al gran pes de l'estructura i a la seva gran inèrcia, pot ser que ho faci amb un moviment molt brusc i a velocitats molts grans que poden fer tombar l'estructura i malmetre-la. És per aquest motiu que també es durà terme un estudi d'aquest possible problema i les diferents solucions per tal de mitigar-lo.

5.2 ESTUDI DELS ESFORÇOS QUE HA DE SUPORTAR L'ESTRUCTURA DURANT EL PROCÉS DE LLASTRAT

Durant el procés d'alçament vertical de l'estructura per mitjà del llastrat amb aigua marina aquesta presenta diferents configuracions de posicionament que no coincideixen en la seva configuració de treball, o sigui vertical, i per tant es produeixen esforços pels quals l'estructura no ha estat dissenyada i que la poden malmetre.

Si els esforços que ha de suportar l'estructura durant aquest procés sobrepassen els esforços màxims per els quals ha estat dissenyat, s'haurà de trobar el millor procediment d'enginyeria per tal de solucionar-ho, com per exemple un redimensionament de l'estructura o un canvi en el procés d'erecció que mitigués aquests esforços.

Els paràmetres necessaris per tal de poder calcular els esforços als que es veu sotmesa l'estructura són l'angle de gir longitudinal, el calat de l'estructura i el volum d'aigua llastrada. Aquestes dades s'han extret dels resultats de l'apartat 5.1 a partir dels calats i posicions dels centres de gravetat i de carena per a un volum de 3600 m^3 quan es produeix el salt entre $2,2^\circ$ i 90° . En la figura 5.9 es pot observar la distribució de forces que permetrà treure l'equació de moments:

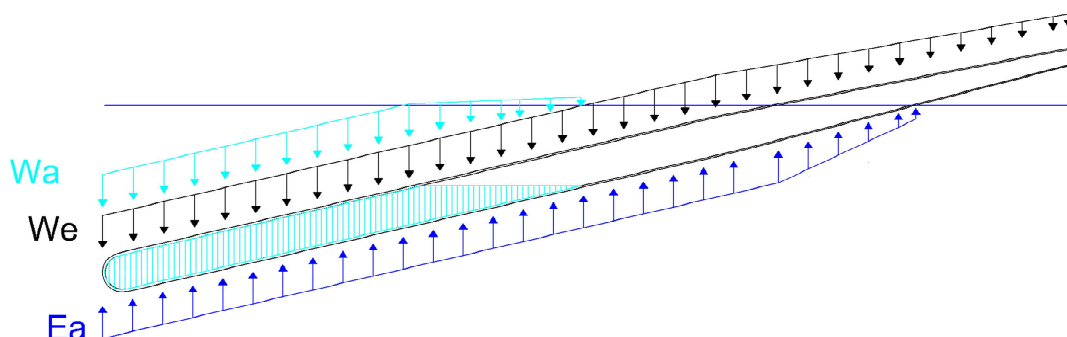


FIGURA 5.9: DISTRIBUCIÓ DE FORCES DURANT EL PROCÉS DE LLASTRAMENT

L'equació del moment que suporta l'estructura en funció de la seva posició longitudinal, M_o (5.1).

$$M_o = \sum A_e \cdot pe_f \cdot d \cdot (x_o - x_e) \cdot \cos(\alpha) + \sum A_a \cdot pe_a \cdot d \cdot (x_o - x_a) \cdot \cos(\alpha) - \sum A_s \cdot pe_s \cdot d \cdot (x_o - x_s) \cdot \cos(\alpha) \quad (5.1)$$

on:

A_e és l'àrea del diferencial del volum de l'estructura

A_a és l'àrea del diferencial del volum de l'aigua llastrada

A_s és l'àrea del diferencial del volum de l'aigua desplaçada

pe_f és el pes específic del formigó

pe_a és el pes específic de l'aigua de mar

d és el diferencial

x_o és la posició del punt on calculem el moment flector

x_e és la posició del diferencial de volum de l'estructura

x_a és la posició del diferencial de volum de l'aigua llastrada

x_s és la posició del diferencial de volum de l'aigua desplaçada

Els resultats obtinguts es poden veure en la figura 5.10 que mostra la llei d'esforços per als diferents angles en que es va trobant l'estructura durant el procés de llastrament.

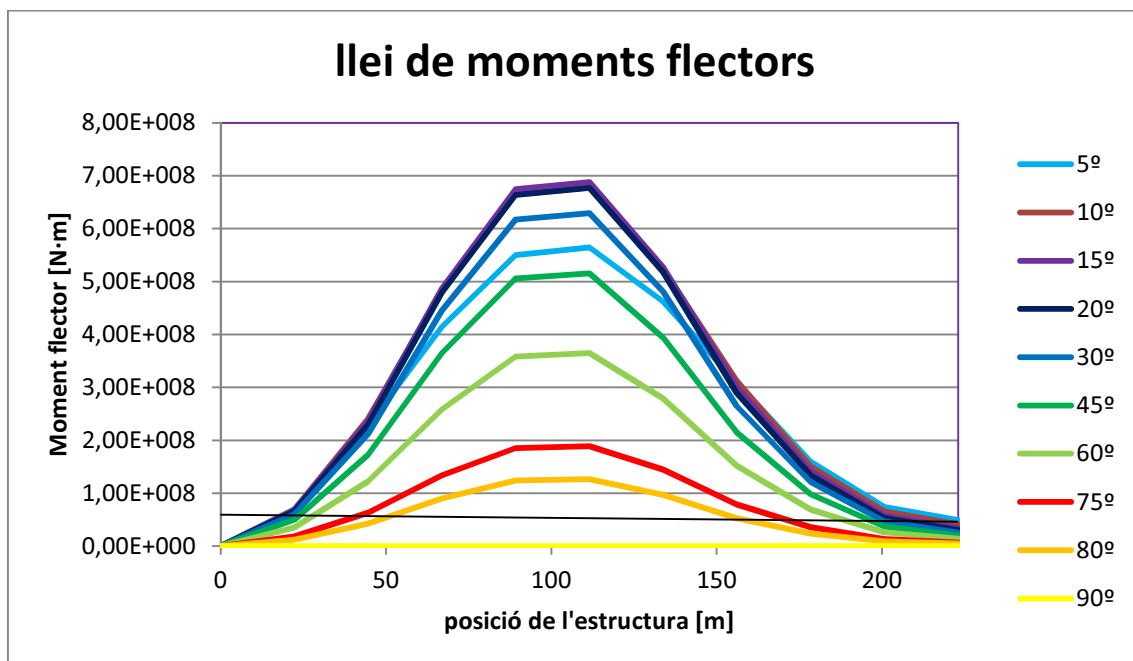


FIGURA 5.10: LLEI DE MOMENTS FLECTORS DURANT EL PROCÉS DE LLASTRAMENT

Les conclusions que extraiem dels resultats d'aquest gràfic són els diferents efectes que produeix l'operació de llastrament durant el procés d'erecció de l'estructura. Es produeixen dos efectes contraris que fan variar les lleis de moment flector. El primer efecte negatiu de cara als esforços és que a mesura que augmenta el volum augmenta la longitud de la torre que queda penjada com una mènula, i per tant, fa augmentar el moment flector que ha de suportar l'estructura. El segon efecte, contrari al primer, és la disminució del braç de palanca d'aquesta mènula quan augmenta l'angle d'inclinació, fet que provoca una disminució del moment flector en tots els punts de l'estructura fins a ser 0 en posició vertical.

El moment màxim es produeix quan l'estructura presenta una inclinació d'uns 15º, i pren un valor de $6,87 \cdot 10^5$ KN·m.

També s'ha calculat utilitzant l'equació (5.1) la llei de moments en el punt últim d'equilibri, als 2,2º i es pot observar en la següent gràfica.

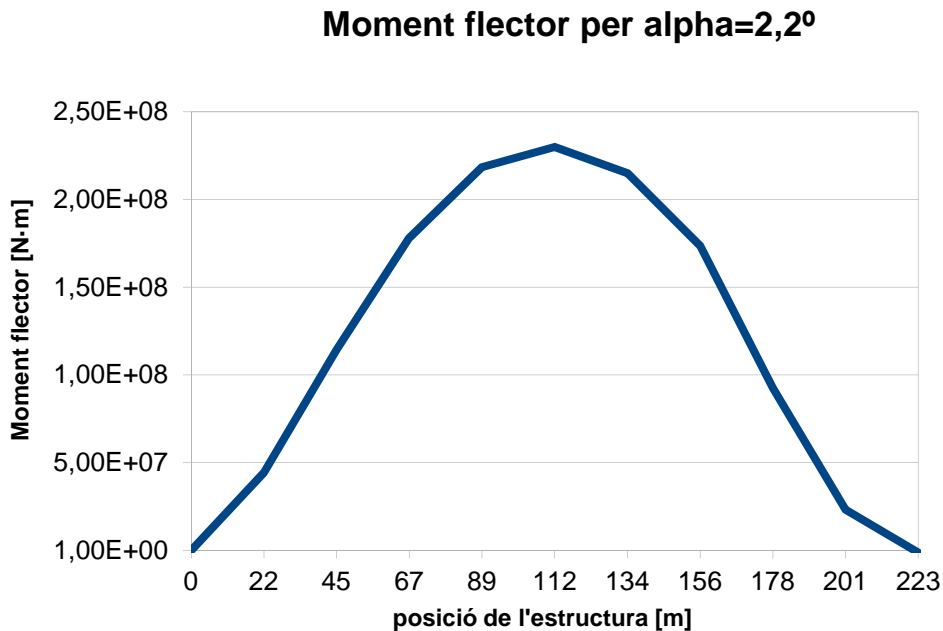


FIGURA 5.11: LLEI DE MOMENTS FLECTORS PER UN ANGLE D'INCLINACIÓ DE 2.2º

Un cop obtinguts els moments flexors que ha de suportar l'estructura durant el procés de llastrament els comparem amb la gràfica de moments màxims que pot suportar l'estructura detallat en l'apartat 3.4 d'aquesta tesina obtenim el següent gràfic, en la figura 5.12.

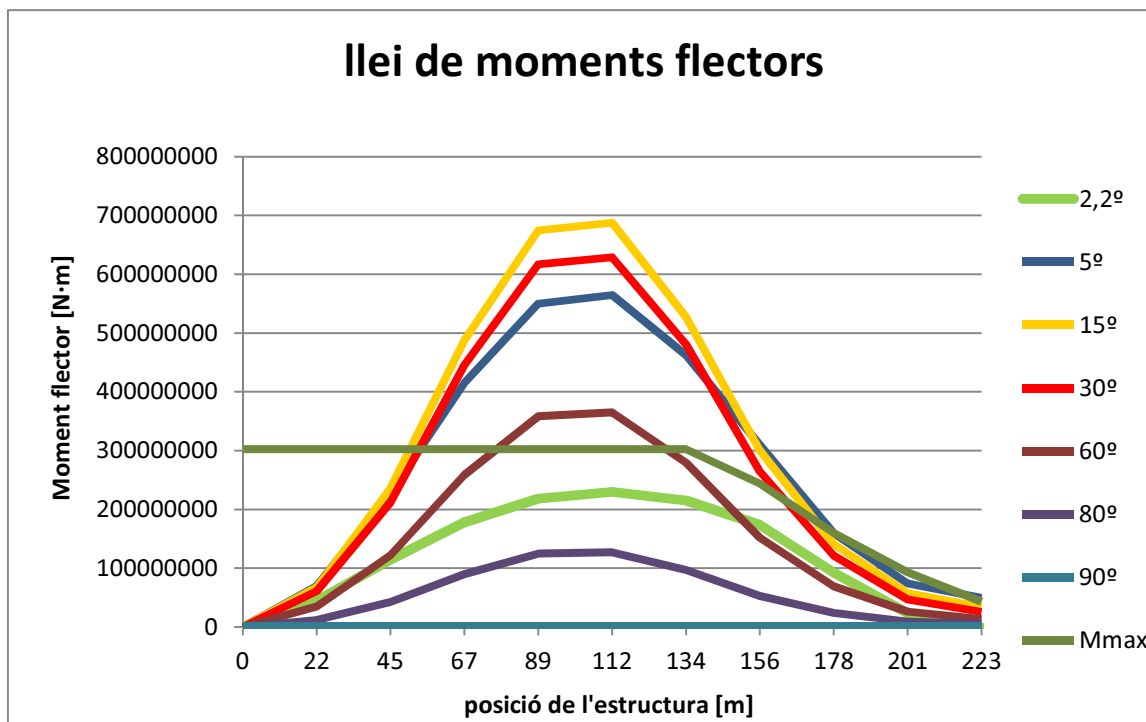


FIGURA 5.12: LLEI DE MOMENTS FLECTORS DURANT PROCÉS DE LLASTRAMENT I MOMENT MÀXIM

Com es pot observar en el gràfic anterior durant el procés de llastament es produeixen moments molt superiors en el centre de l'estructura al moment màxim que pot suportar aquestes seccions. Per tal d'evitar aquests sobre esforços es proposa realitzar una modificació en el procés de llastament i erecció de l'estructura.

Aquest fet fa que, juntament amb el poc control del moviment lliure de l'estructura, necessitem plantejar algun element de control del llastament de l'estructura per tal de limitar el moviment lliure i el moment flector tant gran degut a que la torre de l'estructura es comporta com una mànscula al passar de la posició horitzontal a la vertical.

5.3 CONTROL DEL MOVIMENT DE L'ESTRUCTURA DURANT EL PROCÉS DE LLASTRAT I COL·LOCACIÓ VERTICAL

L'operació de control del posicionament vertical de l'estructura durant el llastament per aigua marina pretén reduir significativament els esforços que ha de suportar l'estructura i controlar el moviment lliure per evitar possibles problemes dinàmics que la puguin malmetre.

Per dur a terme aquest control es proposa que durant el procés de llastament es subjecti la part submergida de l'estructura SPAR per mitja d'una sèrie de cables a una barca. El primer objectiu d'aquesta subjectió és impedir que l'estructura giri descontroladament per l'efecte estabilitzador de l'estructura. Per altra banda s'estudiarà l'efecte de fer el llastament mentre l'estructura es troba fixa pels cables. D'aquesta manera es pretén augmentar el volum

submergit controlant que no augmenti la longitud lliure en forma de mènula de la torre que era la causant dels moments flectors tant importants.

A la figura 5.13 es mostra un esquema del procés del control de l'operació de posicionament vertical de l'estructura que s'està proposant.

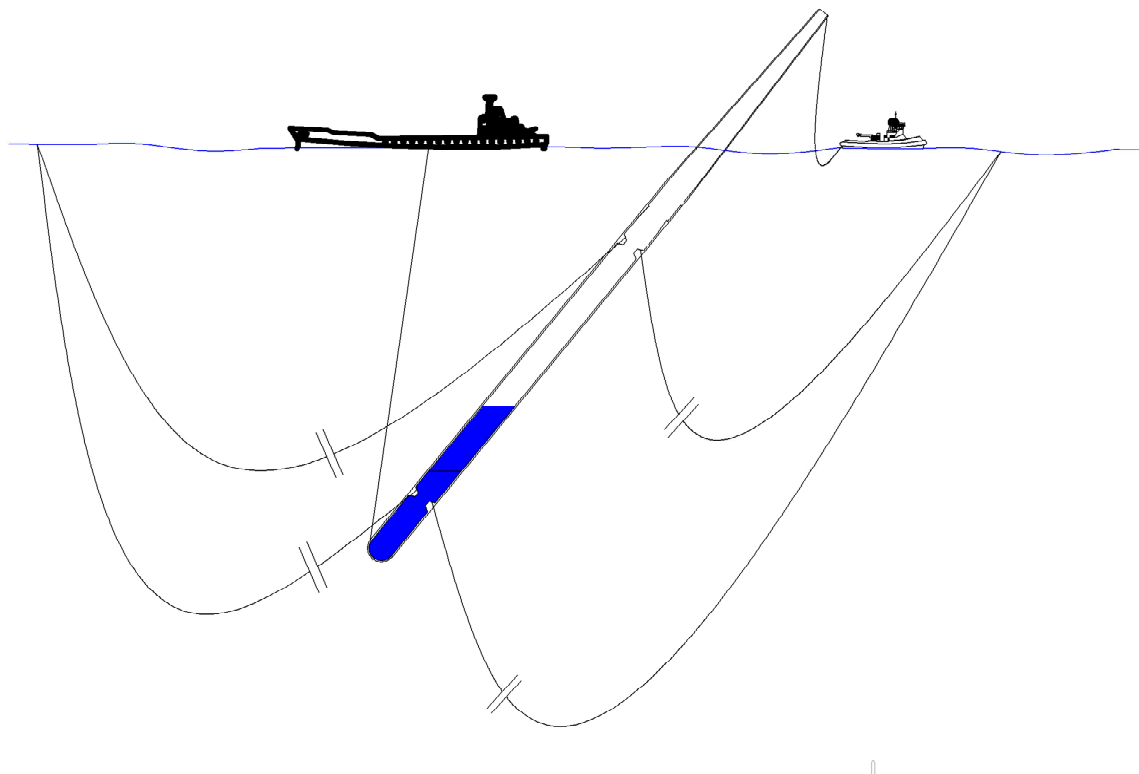


FIGURA 5.13: ESQUEMA DEL PROCÉS DE CONTROL D'ERECCIÓ DE L'ESTRUCTURA

5.3.1 Estudi de les diferents configuracions de l'estructura durant el procés de control d'erecció de l'estructura

Durant el procés de llustrat mantenint subjectat l'extrem submergit de l'estructura es poden produir múltiples configuracions. Aquestes configuracions depenen de dos graus de llibertat, 1 l'angle en què es troba l'estructura i 2 el volum d'aigua llustrada a l'interior de l'estructura. Aquests dos paràmetres els podem controlar de la manera que es produeixi l'efecte més favorable per a les nostres intencions de control del procés d'erecció de l'estructura.

A partir d'aquests dos graus de llibertat podem trobar la força necessària que haurà de mantenir l'estructura en equilibri per tal de controlar el seu gir i el calat de l'estructura. Aquests dos aspectes, junt amb l'angle d'inclinació en què es trobi l'estructura, influiran els moments que haurà de suportar aquesta. Basant-nos en els resultats de l'apartat 5 d'aquest document, *Esforços en el procés d'alçament*, el moment màxim creixerà per a angles entorn als 10 i 20 ° per l'augment del braç en forma de mènula. Per a angles majors disminuirà el moment al reduir-se el braç de palanca per trobar-se en posició cada cop més

vertical. Per altra banda, amb l'efecte de la variació de l'aigua de llastrat, podem apuntar que hi haurà un augment de la força exterior, ja que augmentarà l'efecte del moment estabilitzador de l'estructura, i per tant la força per contrarestar-lo serà major. També s'hauran de tenir en compte els sobreesforços que pugui produir aquesta força exterior.

La figura 5.14 mostra l'esquema de forces a que es veu sotmesa durant el procés de control d'erecció de l'estructura.

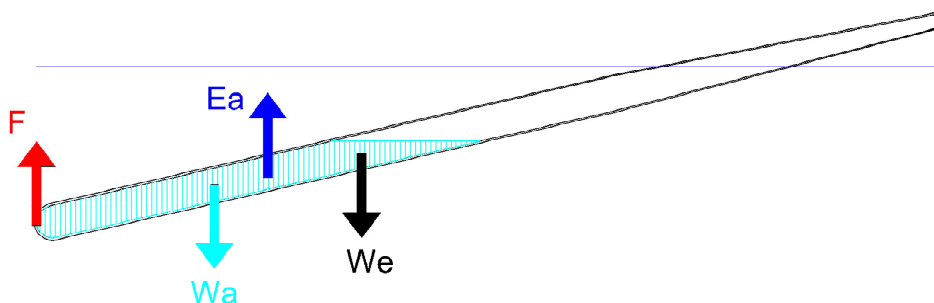


FIGURA 5.14 ESQUEMA DE FORCES DURANT EL PROCÉS DE CONTROL D'ERECCIÓ DE L'ESTRUCTURA

Com que és un procés controlat per mitjà dels cables que subjectaran l'estructura, aquesta es trobarà en equilibri, i per tant el sumatori de les forces verticals haurà de ser 0, equació 5.2. Per una altra banda si fem el sumatori de moments en l'extrem submergit, el punt A, trobem l'expressió (5.3):

$$\sum F_y = E + F - W_e - W_a = 0 \quad (5.2);$$

On:

E és l'empenta de l'aigua

F és la força que fa el cable que subjecta l'estructura

W_e és el pes de l'estructura

W_a és el pes del volum de l'aigua llastrada

$$M_A = E \cdot x_s \cdot \cos(\alpha) - W_e \cdot x_e \cos(\alpha) - W_a \cdot x_a \cos(\alpha) = 0 \quad (5.3)$$

On:

x_s és la distància en direcció l'eix longitudinal de l'estructura de la base del flotador al centre de carena

x_e és la distància en direcció l'eix longitudinal de l'estructura de la base del flotador al centre de gravetat de l'estructura

x_a és la distància en direcció l'eix longitudinal de l'estructura de la base del flotador al centre de gravetat del volum d'aigua llastrada

i si aïllem la força F:

$$F = W_e + W_a - E_a \quad (5.4)$$

Per realitzar aquest càlcul s'ha creat un programa recurrent que calcula, a partir d'un angle i un volum d'aigua interior fixat, l'empenta de l'aigua E_a que permet igualar l'equació 5.3. Un cop trobada l'empenta, s'imposa l'equació d'equilibri (5.4) per tal de trobar la força exterior que hem d'aplicar.

El següent gràfic mostra la variació de la força F en KN, segons el volum d'aigua llastrada i per diferents angles que s'ha de fer perquè l'estructura es trobi en equilibri.

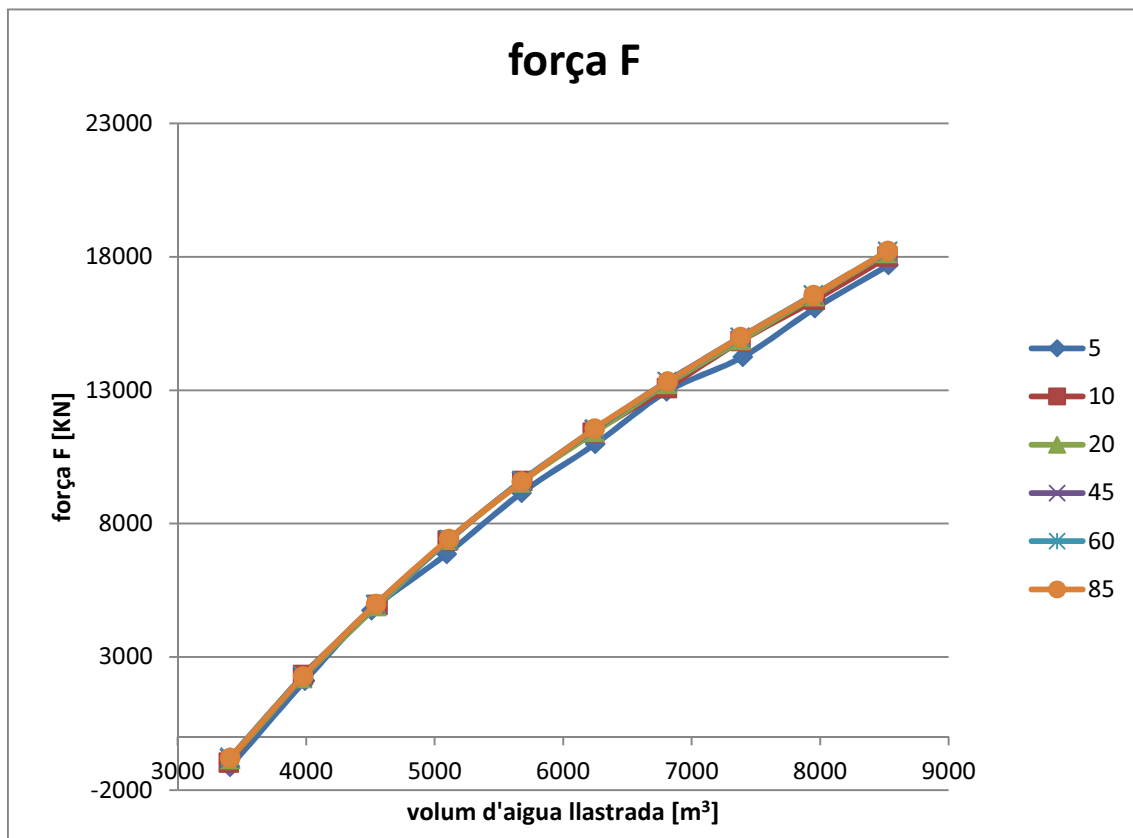


FIGURA 5.15: FORÇA DE SUBJECCIÓ DE L'ESTRUCTURA EN FUNCIÓ DEL VOLUM LLASTRAT I L'ANGLE D'INCLINACIÓ LONGITUDINAL

El gràfic de la figura 5.15 mostra que la força vertical que s'ha de fer per mantenir en equilibri l'estructura durant el procés de llastrat és constant per un volum d'aigua interior constant independentment de l'angle de gir en què es trobi. També, i com era d'esperar, la força de subjecció augmenta amb l'increment d'aigua llastrada, ja que el moment estabilitzador creix i per tant la força per mantenir-lo en equilibri també creix.

A partir del calat de l'estructura i de l'angle d'inclinació longitudinal també s'ha calculat la longitud lliure en forma de mènula de la torre que és la causant dels moments flectors tan desfavorables durant el procés d'erecció. L'evolució de la longitud lliure de la torre en funció del volum d'aigua llastrada i l'angle d'inclinació es pot veure en la figura 5.16.

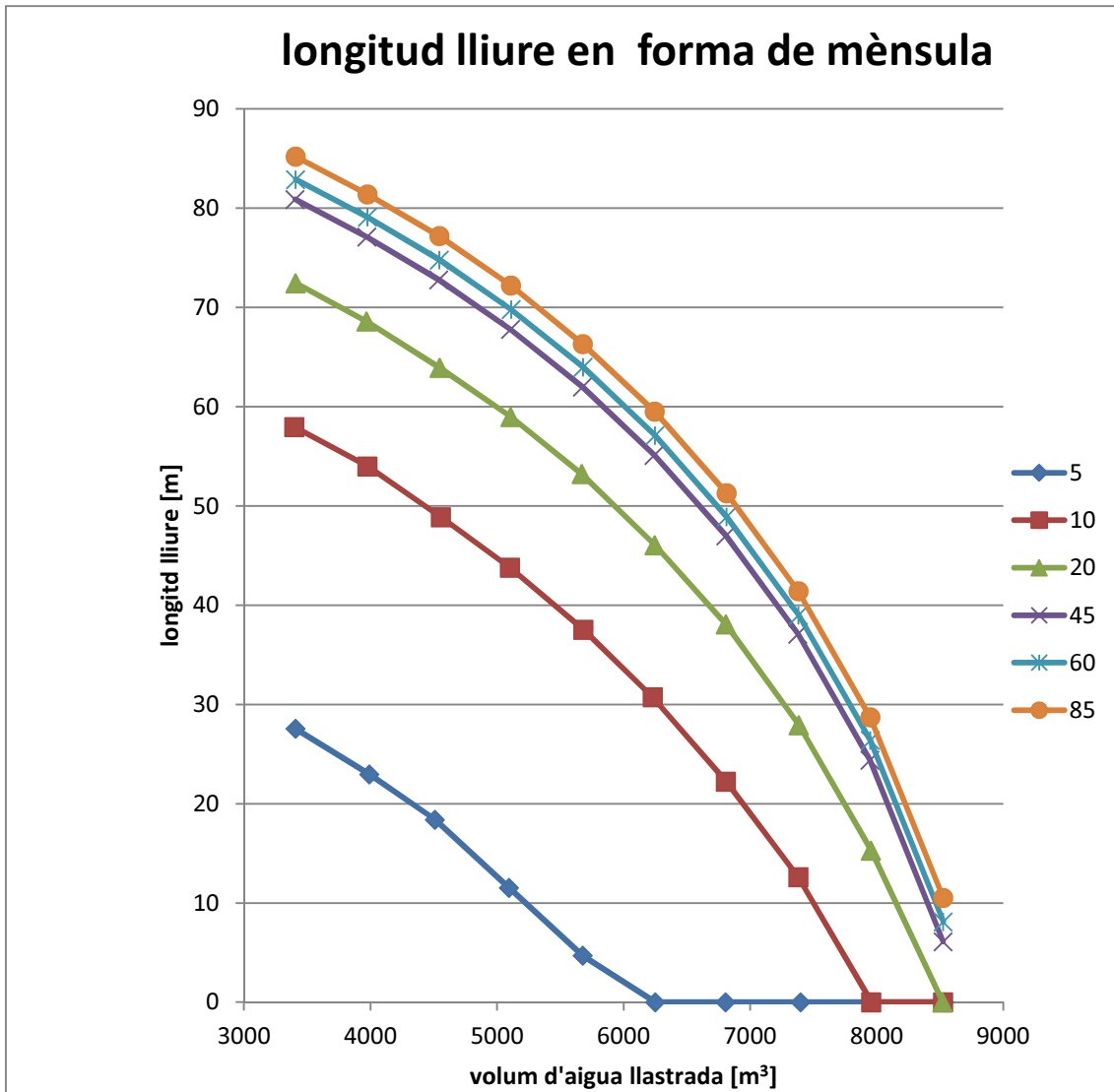


FIGURA 5.16: EVOLUCIÓ DE LA LONGITUD LLIURE EN FORMULA DE MÈNSULA

La longitud lliure per un angle d'inclinació constant disminueix amb l'augment del volum llastrat, tal com havíem intuït, degut a l'augment de la part submergida de l'estructura i per tant presentarà una disminució del moment flector.

A partir dels resultats obtinguts, la força exterior i la longitud en voladiu es pretén calcular la llei de moment flectors que haurà de suportar l'estructura on s'espera una disminució important, encara que també s'ha de tenir en compte que la força de subjecció també induirà a uns esforços que no estaven contemplats en els apartats anteriors.

A partir d'aquests resultats i juntament amb la força F exterior que s'haurà de fer per mitjà d'una barcaça es pretén escollir la millor seqüència de posicionament vertical de l'estructura.

5.3.2 Estudi dels esforços que ha de suportar l'estructura en funció de l'angle d'inclinació, el volum interior il·lustrat durant el procés de control de posicionament vertical de l'estructura

Aquest estudi s'ha portat a terme de manera anàloga al de l'apartat 5.2 de la present tesina amb la incorporació del moment produït per la força exterior exercida pel cable de control del moviment. I per tant l'equació (5.1) quedaria reformulada en l'equació (5.5)

$$M_o = \sum A_e \cdot p e_f \cdot d \cdot (x_o - x_e) \cdot \cos(\alpha) + \sum A_a \cdot p e_a \cdot d \cdot (x_o - x_a) \cdot \cos(\alpha) - \sum A_s \cdot p e_s \cdot d \cdot (x_o - x_s) \cdot \cos(\alpha) - F \cdot x_o \cdot \cos(\alpha) \quad (5.5)$$

On F: és la força calculada a partir de l'expressió (5.4)

En el gràfic de la figura 5.17 es mostra la distribució de moments per a una posició d'angle longitudinal de 5° i per als diferents volums d'aigua il·lustrada interior calculats anteriorment. Aquest gràfic es mostra com a exemple del patró que segueixen la distribució de moments per als diferents angles calculats, que es poden observar a l'annex 2.

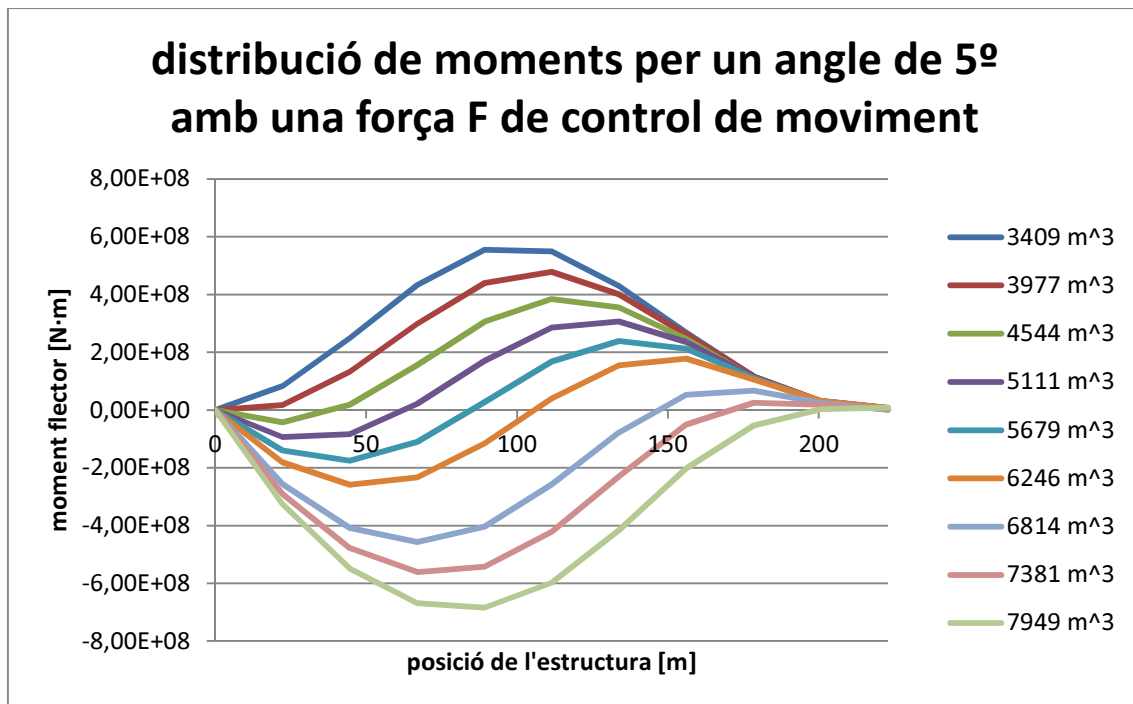


FIGURA 5.17: DISTRIBUCIÓ DE MOMENT FLECTOR PER UN ANGLE DE 5° AMB UNA FORÇA PEL CONTROL DE L'ERECCIÓ DE L'ESTRUCTURA

Les conclusions que podem extreure de la figura 5.17 són que el moment que ha de suportar l'estructura disminueix en augmentar el volum d'aigua il·lustrada per l'efecte de la disminució de la longitud en forma de mènscula de la part emergida de la torre. Per altra banda aquest fet, es converteix en perjudicial a partir d'uns 6800m³, ja que en augmentar tant la força exterior per evitar el moviment de l'estructura, el moment flector que ha de suportar l'estructura creix en sentit contrari.

Com que l'objectiu del present estudi és limitar el moment flector que ha de suportar l'estructura durant el procés de posicionament, s'agafarà un volum d'aigua que presenti un menor moment flector en valor absolut. En el nostre cas es produirà per un volum d'aigua interior de 6246m^3 .

A partir d'aquest volum es continuarà l'estudi per tal d'assegurar que els esforços que ha de suportar l'estructura no superin els màxims pels quals ha estat dissenyada.

En el següent gràfic es mostren les diferents lleis de moment que ha de suportar l'estructura per a un volum d'aigua llastrada de 6246m^3 i per a les diferents posicions d'angle longitudinal que presentarà durant el procés d'erecció. Les lleis de moment flectors es comparen amb el moment màxim i mínim que pot resistir les seccions de l'estructura SPAR calculades en l'apartat 3.4.

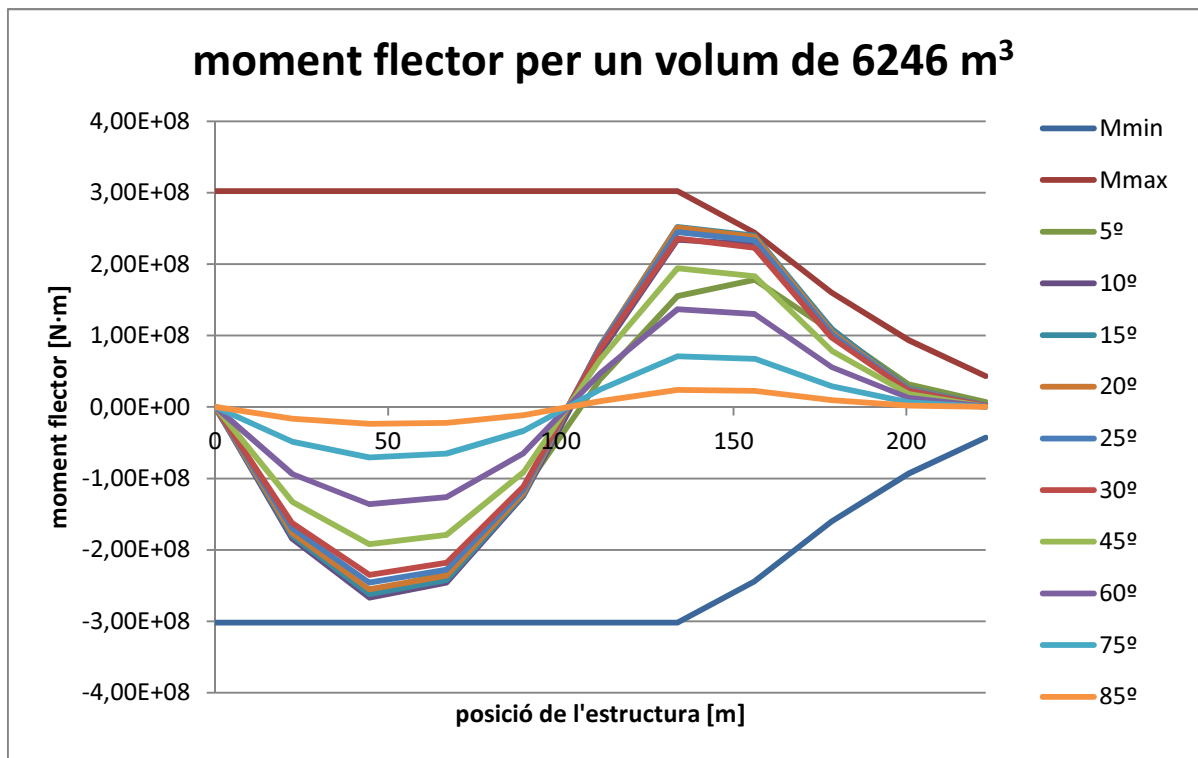


FIGURA 5.18: MOMENT FLECTORS PER UN VOLUM DE 6246m^3 EN FUNCIÓ DE L'ANGLE

Com es pot comprovar, l'estructura podrà suportar els esforços que es produeixen durant aquest procés i el moment màxim es produiria per un angle d'inclinació longitudinal de 15° .

També s'han estudiat els esforços que es produeixen per un angle de 2,2º abans que el cable de control de moviment es comenci a tensar, que es poden observar en la figura 5.19. Amb aquesta comprovació tindrem tots els estadis possibles verificats en que l'estructura podrà resistir els esforços a la que se'l sotmetrà.

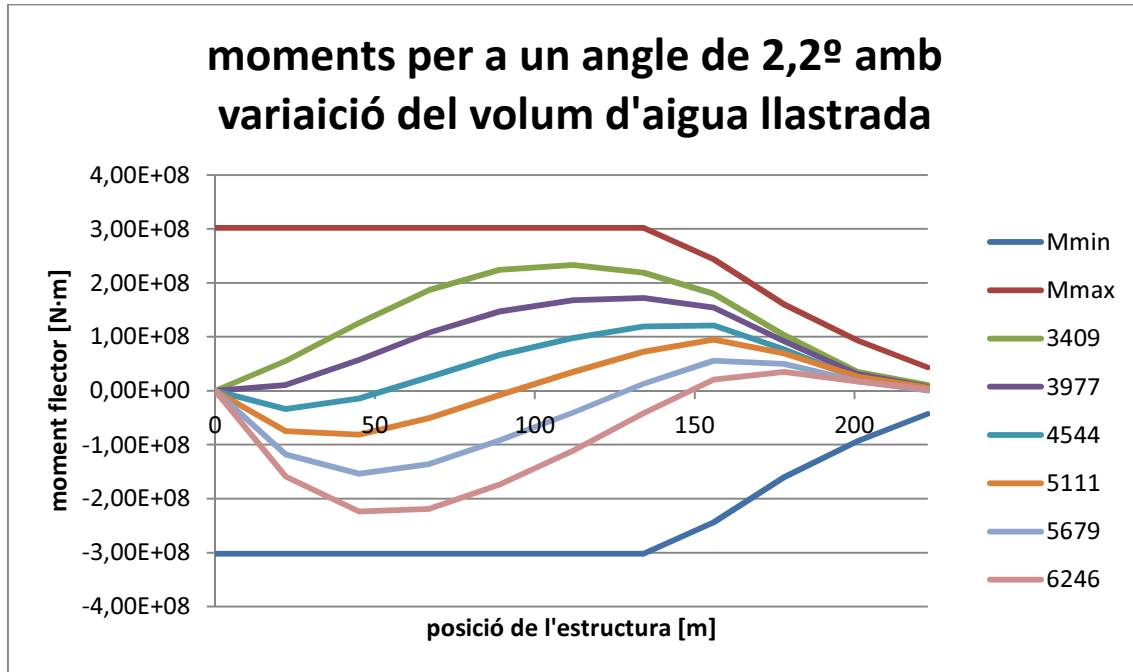


FIGURA 5.19: MOMENTS PER UN ANGLE DE 2.2º AMB VARIACIÓ DEL VOLUM D'AIGUA LLASTRADA

Aquests resultats confirmen la possibilitat de realitzar el procés de posicionament vertical de l'estructura de manera controlada, evitant que l'estructura hagi de suportar esforços superiors per als quals ha estat dissenyada. D'aquesta manera s'evita haver de reforçar l'estructura amb un armat més quantiós que faria augmentar de manera considerable el cost econòmic de l'estructura.

Els passos que seguirà el procés d'erecció de l'estructura, seran:

1. Llastrat de l'aigua fins que es produeixi un angle 2,2º pel qual el cable de subjecció es tensionarà, amb volum interior llastrat d'uns 3600 m³
2. Continuació del llastrat de l'estructura fins a un volum d'uns 6300 m³ amb el cable fix. El cable haurà de suportar una força vertical de 11500 KN
3. Solta de cable controladament per tal que l'estructura giri i es posicioni verticalment.

En l'esquema de la figura 5.20 es mostren les posicions que tindrà l'estructura durant el procés d'erecció partint que el volum il·lustrat és de 6250m^3 i es comença a deixar anar a poc a poc per tal de posicionar-lo verticalment.

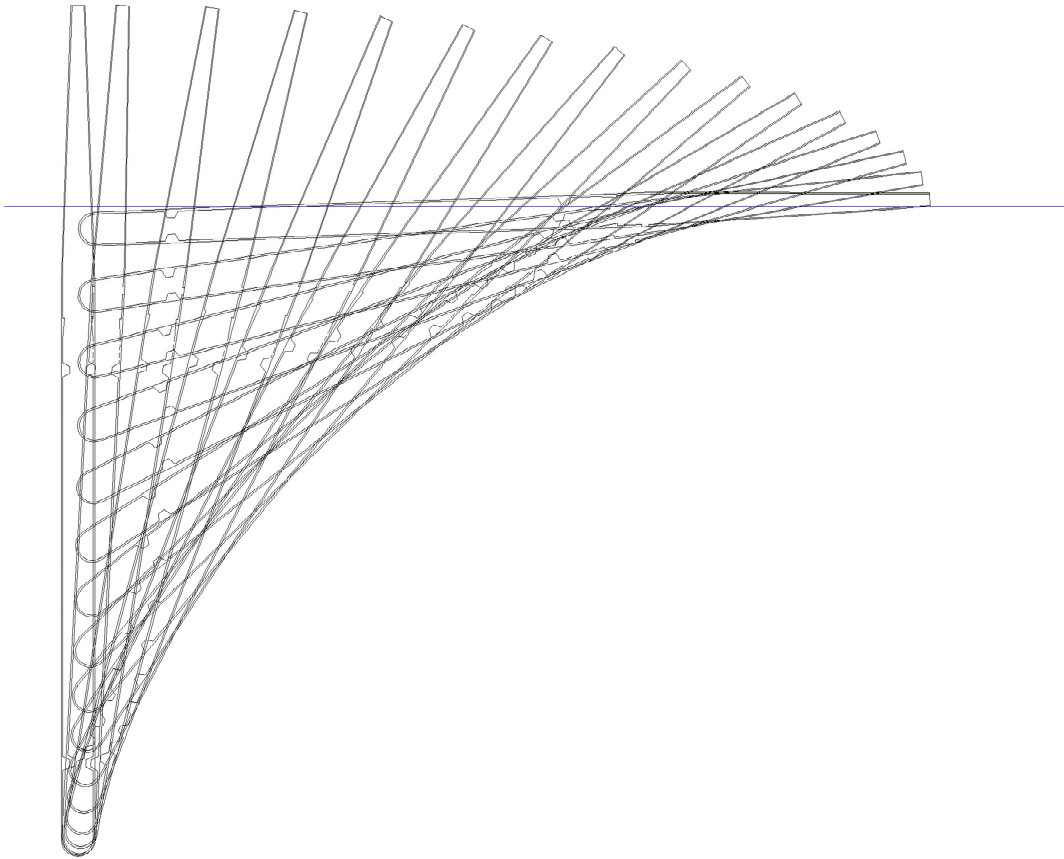


FIGURA 5.20: ESQUEMA DE LES POSICIONS DURANT EL PROCÉS CONTROLAT D'ERECCIÓ DE L'ESTRUCTURA

5.4 Proposta de procés de control per l'aixecament de l'estructura mitjançant el llastrat d'aigua

El procediment es realitzarà amb una barcaassa que permetrà la subjecció de l'estructura tipus SPAR per la part enfonsada a través d'un cable, i que per mitjà d'unes bombes, introduirà l'aigua de llastrat a l'interior de l'estructura. A més a més es disposarà d'una altra barcaassa que subjecti l'estructura per l'extrem que sobresurt de l'aigua com a punt de seguretat, per si hi hagués qualsevol incidència o problema amb l'altre subjecció.

Els principals passos que es duran a terme durant aquesta operació i que es poden observar en l'esquema de la figura 5.21, són els següents:

1. Connexió i subjecció dels extrems a les seves barcaasses.
2. Llastrat de l'aigua a l'interior de l'estructura fins a un volum aproximat de 3540 m³. En aquest punt es produeix l'equilibri límit de 2,2º sense l'ajuda de cap força exterior per mitjà dels cables connectats a les barcaasses.
3. Tensionat del cable connectat a la part submergida de l'estructura per tal que no es produeixi cap efecte dinàmic i es pugui controlar el procés de llastrat.
4. Represa del llastrat d'aigua fins a un volum de 6250 m³ controlant que l'angle d'inclinació longitudinal de l'estructura no sobrepassi els 2,2º.
5. Gir de l'estructura mitjançant l'augment de longitud del cable de subjecció controladament fins a un angle prudencial.
6. Desconnexió de l'estructura per la part enfonsada de l'estructura.
7. Connexió dels elements d'ancoratge definitius de l'estructura.

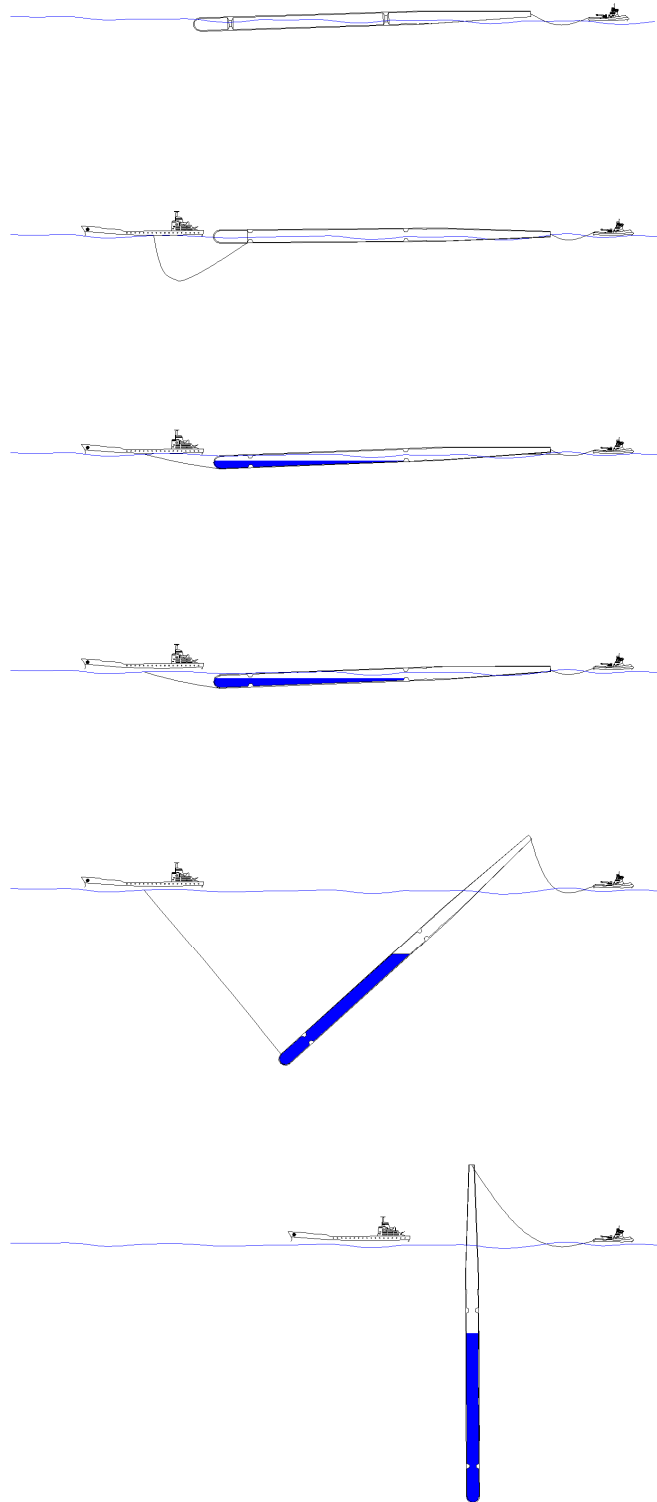


FIGURA 5.21: ESQUEMA DELS PASSOS DE L'OPERACIÓ D'ERECCIÓ DE L'ESTRUCTURA

5.5 DISSENY DELS ELEMENTS DE SUBJECCIÓ

Els elements necessaris descrits per a la subjecció de l'estructura es troben en els extrems d'aquesta. Aquests elements han de ser capaços de connectar-se a cables mitjançant ganxos, poder-se desconnectar amb facilitat a l'acabar l'operació i han d'estar degudament dimensionats per tal de resistir els esforços als que estaran sotmesos.

Com a element de subjecció del cap de la torre de l'estructura es farà servir la tapa d'estanquitat dissenyada pel transport, ja que es farà servir per tal de controlar i redirigir els petits moviments que pugui tenir l'estructura durant l'operació d'erecció.

L'element de subjecció de la base ha de ser capaç de resistir una força vertical de 11500 KN. A més a més ha de permetre una subjecció que permeti desconnectar l'estructura amb el cable tensionat per tal de deixar que es posi verticalment al finalitzar l'operació.

La solució que es proposa per tal de poder complir amb aquests requeriments és utilitzar una connexió de l'estructura mitjançant un grilló que envolti la base del flotador. A més a més es preveu dissenyar la base del flotador amb unes incisions en forma d'anella per on el grilló subjectarà l'estructura en tot el perímetre li aporti una major subjecció entre ells.

El grilló estarà format per dues peces metàl·liques de forma semicircular amb unes extensions per tal de poder-les ajuntar mitjançant uns cargols. A més a més una de les extensions tindrà un orifici on es situarà el passador que permetrà connectar l'estructura amb el cable de control durant el procés d'erecció. En la figura 5.22 es pot observar una imatge de la forma del grilló.

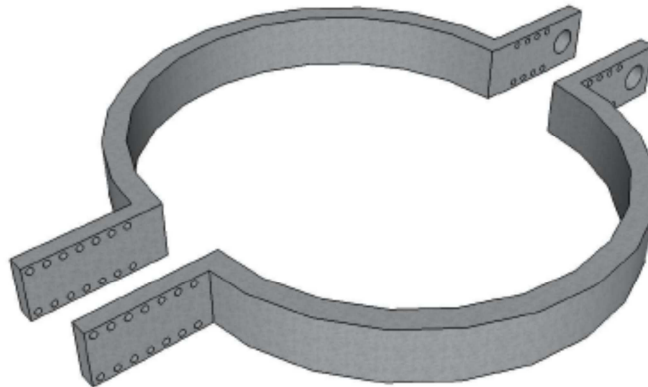


FIGURA 5.22: ESQUEMA EN 3D DELS GRILLONS

Aprofitant l'espessor de la base del flotador es realitzarà una incisió circular a l'estructura per tal de poder acoblar i maximitzar el contacte enter el grilló i aquesta perquè els esforços es transmetin el més homogèniament possible. A la figura 5.23 es mostra el detall de la incisió i en la figura 5.24 l'assemblatge de la part final del flotador amb el grilló i el cable de control del moviment.



FIGURA 5.23 DETALL DE LA INCISIÓ AL FLOTADOR DE L'ESTRUCTURA



FIGURA 5.24: ASSEMBLATGE DEL GRILLÓ AMB L'ESTRUCTURA I EL CABLE DE CONTROL

6 CONCLUSIONS

Durant el desenvolupament d'aquesta tesina s'ha posat de manifest la viabilitat tècnica del transport i instal·lació de l'estructura de manera controlada aprofitant al màxim les característiques físiques de l'estructura de l'aerogenerador SPAR.

El transport de l'estructura es realitzarà a baixa velocitat i amb el mar en calma per tal d'evitar possibles sobrecàrregues del tipus dinàmic que puguin malmetre l'estructura. Aquest fet no suposa un problema, ja l'aerogenerador no pot estar instal·lat molt lluny de la costa pel sobrecost que comportaria l'excés de cable elèctric submergible. Per tant el temps del transport des del punt de fabricació de l'estructura fins el punt on s'instal·larà no serà molt gran i tindrem marge suficient per escollir la millor data gràcies a les previsions meteorològiques. El transport es farà per via humida, en posició horitzontal i tirat per un remolcador estàndard que es poden trobar als ports per al remolc de vaixells. Durant el transport s'aprofita la flotabilitat que presenta l'estructura sense cap element extern, ja que presenta unes molt bones prestacions en posició horitzontal, i sense llast interior per tal que l'àrea mullada sigui la menor possible i per tant la resistència d'avanç també.

El tir de l'estructura es durà a terme des de la tapa d'estanquitat superior. Aquesta tapa està dissenyada per tal de suportar l'empenta de l'aigua si tot el cap de l'estructura es trobés submergida. La tapa d'estanquitat disposa de dues orelles, situades a dos extrems diametralment oposats, que aportaran l'estabilitat transversal necessària i evitaran que l'estructura pugui tenir moviments de gir sobre el seu eix longitudinal no desitjats.

La següent operació estudiada és la instal·lació de l'estructura fent èmfasi en l'erecció d'aquesta, ja que la seva configuració de treball és en posició vertical i el seu transport ha estat en posició horitzontal. Aquesta operació és la més delicada i per la que s'han de tenir més elements de control i vigilància per tal que no es produeixi l'efecte desitjat i posem en perill la integritat dels operaris i de la mateixa estructura.

L'operació d'erecció de l'estructura es du a terme mitjançant el llastrat de l'estructura, o sigui introduint aigua de mar al seu interior per tal que augmenti la part submergida d'aquesta i degut a la seva naturalesa d'equilibri per llast, es posicioni verticalment degut al moment estabilitzador. En aquesta operació serà necessari un vaixell equipat amb una bomba per tal d'introduir l'aigua a l'interior de l'estructura i que al mateix temps fixi amb l'ajut d'un cable de seguretat el cap emergit de l'estructura. També farà falta un vaixell connectat a la base del flotador de l'estructura mitjançant un o més cables que permeti el control del moviment de l'estructura. Aquesta és la fase més delicada ja que un mal control d'aquesta fase podria portar a un moviment bruscat i incontrolat de l'estructura molt perillós degut al gran pes d'aquesta que la podria tombar, fer-se malbé i topar contra els vaixells necessaris per realitzar l'operació. A més a més un mal control del moviment de l'estructura també podria induir a que aquesta hagués de suportar uns esforços molt superiors per als quals ha estat dissenyat que el malmetrien i el farien inservible amb tots els costos que això comporta.

BIBLIOGRAFIA

- [1]: Troen, I. and E.L. Petersen (1989). European Wind Atlas. ISBN 87-550-1482-8. Risø National laboratory, Roskilde. 656 pp.
- [2]: Justin Wilkes, Jacopo Moccia. Wind in power 2010 European statistics. EWEA. Febrer 2011. Pag.7
- [3]: Jacopo Moccia . The European offshore wind industry -key trends and statistics 2009. EWEA. Gener 2010. Pag.7
- [4] Betz' LAW, Wikipedia. [en línia]. [Consulta: 4 abril 2012]. Disponible a: http://en.wikipedia.org/wiki/Betz'_law
- [5] Johanna Knapschaefer Maine Surges Forward With Offshore Turbine Plans. Green Source [en línia]. [Consulta: 10 maig 2012]. Disponible a: <http://greensource.construction.com/news/2011/03/110307-Offshore-Turbine.asp>
- [6] Parques Eólicos Terrestres y Marinos, e Instalaciones Minieólicas (Aisladas). Ecovivi.com [en línia]. [Consulta: 10 maig 2012]. Disponible a: <http://www.ecovive.com/parques-eolicos-terrestres-y-marinos-e-instalaciones-eolicas-aisladas>
- [7] WindFloat. Principle renewable energy delivered. [en línia]. [Consulta: 10 maig 2012]. Disponible a: <http://www.principlepowerinc.com/products/windfloat.html>
- [8] Segalés Torras, Jordi. Diseño, cálculo y verificación de un aerogenerador marino con fondeo tlp.pfc, UPC, Facultat de nàutica 2011. [consulta 29 maig2012], disponible a: <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/13712>
- [9] Alexis Campos Hortigüela. Estudi estàtic d'una estructura de formigó flotant de suport d'aerogenerador marí. UPC, Escola, Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Novembre 2011.
- [10] Bader Diab; Naji Tahan. Chapter 14; Offshore Installation. HANDBOOK OF Offshore Engineering. Edited by Subrata K. Chakrabarti. ELSEVIER (ed.). 2005. Volume II, p.1086-1097
- [11] Joan Olivella Puig. Estabilitat inicial. Teoria del Buque. 1995. Edicions UPC 1994. Pag. 180
- [12] Volker Bertram. Practical Ship Hydrodynamics. ISBN 0 7506 4851
- [13] Rawson, K. J; Tupper, E. C. Basic ship theory. 5th ed. Boston Butterworth-Heinemann, 2001. 0750653973; 9780750653967
- [14] Calculo online de áreas, momentos de inercia, módulos resistente y radios de giro de secciones planas. Características geométricas, [en línia]. [Consulta: 5 abril 2012]. Disponible a: http://www.portalplanetasedna.com.ar/archivos_varios2/tabla_formulas1.swf
- [15] Grupo Rebarsa. [en línia]. [Consulta: 10 juny 2012]. Disponible a: http://www.remolcadores.com/A05_0_Flota.php?c=11&f=89

ANNEX 1: PARAMETRITZACIÓ DE L'ESTRUCTURA

Parametrització del diferencial de volum del cilindre

```

function V=volum_submergit_cilindre(h,R,d,i,alpha)
if tan(alpha)<2*R/h
    j=i/tan(alpha);
    ac=R/sin(alpha);
    bc=R;
    c_oc=sqrt(ac^2-R^2);
    if j<h
        x1c=ac-j*ac/c_oc;
        x2c=ac;
        phi_1=asin(x1c/ac);
        phi_2=asin(x2c/ac);
        V=d*cos(alpha)*2*bc*ac*((phi_2-phi_1)/2+((sin(2*phi_2)-
sin(2*phi_1))/4));
    else
        if j<2*c_oc
            x1c=ac-j*ac/c_oc;
            x2c=ac-(j-h)*ac/c_oc;
            phi_1=asin(x1c/ac);
            phi_2=asin(x2c/ac);
            V=d*cos(alpha)*2*bc*ac*((phi_2-phi_1)/2+((sin(2*phi_2)-
sin(2*phi_1))/4));
        else
            if j<h+2*c_oc
                x1c=-ac;
                x2c=ac-(j-h)*ac/c_oc;
                if x2c<-ac
                    x2c=-ac;
                end
                phi_1=asin(x1c/ac);
                phi_2=asin(x2c/ac);
                V=d*cos(alpha)*2*bc*ac*((phi_2-phi_1)/2+((sin(2*phi_2)-
sin(2*phi_1))/4));
            else
                V=0;
            end
        end
    end
end
else
    j=i/tan(alpha);
    ac=R/sin(alpha);
    bc=R;
    c_oc=sqrt(ac^2-R^2);
    e=d*h/R;
    if j<2*c_oc
        x1c=ac-j*ac/c_oc;
        x2c=ac;
        phi_1=asin(x1c/ac);
        phi_2=asin(x2c/ac);
        V=d*cos(alpha)*2*bc*ac*((phi_2-phi_1)/2+((sin(2*phi_2)-
sin(2*phi_1))/4));
    else
        if j<h
            x1c=-ac;
            x2c=ac;
            phi_1=asin(x1c/ac);

```

```

        phi_2=asin(x2c/ac);
        V=d*cos(alpha)*2*bc*ac*((phi_2-phi_1)/2+((sin(2*phi_2)-
sin(2*phi_1))/4));
    else
        if j<h+2*c_oc
            x1c=-ac;
            x2c=ac-(j-h)*ac/c_oc;
            if x2c<-ac
                x2c=-ac;
            end
            phi_1=asin(x1c/ac);
            phi_2=asin(x2c/ac);
            V=d*cos(alpha)*2*bc*ac*((phi_2-
phi_1)/2+((sin(2*phi_2)-sin(2*phi_1))/4));
        else
            V=0;
        end
    end
end
end
end
end

```

Parametrizació del diferencial de volum del con:

```

function V=volum_submergit_con(h,R,d,i,alpha)
    beta=atan(h/R);
    gamma=pi/2-beta;
    if alpha<gamma
        if i<2*R
            f=sqrt(R^2+h^2)-i*sin(pi/2-alpha)/sin(alpha+pi/2-beta);
            if f>=0
                l=f*sin(2*beta)/sin(pi/2-alpha-beta);
                a=l/2;
                x=l/2+i*sin(beta)/sin(alpha+pi/2-beta);
                y=sqrt(R^2-(R-i)^2);
                b=sqrt(a^2*y^2/(x^2-a^2));
                a2=asinh(y/b);
                V=2*(x*y*d*cos(alpha)-
d*cos(alpha)*a*b*((sinh(2*a2)/4+a2/2)));
            elseif f<0
                f2=sqrt(R^2+h^2)-(2*R-i)*sin(pi/2+alpha)/sin(-alpha+pi/2-
beta);
                l=f2*sin(2*beta)/sin(pi/2+alpha-beta);
                a=l/2;
                x=l/2+(2*R-i)*sin(beta)/sin(-alpha+pi/2-beta);
                y=sqrt(R^2-(R-i)^2);
                b=sqrt(a^2*y^2/(x^2-a^2));
                a2=asinh(y/b);
                V=2*(x*y*d*cos(alpha)-
d*cos(alpha)*a*b*((sinh(2*a2)/4+a2/2)));
            end
        else
            V=0;
        end
    else
        g=i*sin(pi/2-alpha)/sin(alpha+pi/2-beta);
        lo=h/sin(beta);
        l=lo-g;
        a=sin(2*gamma)*l/(2*sin(beta+alpha-pi/2));
    end
end

```



```

h1=a*sin(pi/2-alpha);
r=R-g*cos(beta);
hi=r*tan(beta);
R1=(hi+h1)/tan(beta);
d1=a*sin(alpha+gamma)/sin(beta)-R1;
b=sqrt(R1^2-d1^2);
if i<2*R
    x1=a-i*sin(beta)/sin(alpha+pi/2-beta);
    x2=a;
    phi_1=asin(x1/a);
    phi_2=asin(x2/a);
    V=d*cos(alpha)*2*b*a*((phi_2-
phi_1)/2+((sin(2*phi_2)-sin(2*phi_1))/4));
else
    if i<h*tan(alpha)+R
        V=d*cos(alpha)*pi*b*a;
    else
        V=0;
    end
end
end
end
end

```

ANNEX 2: LLEI DE MOMENTS DURANT EL PROCÉS D'ERECCIÓ DE L'ESTRUCTURA

