

## MEMÒRIA

1- Introducció.....	2
1.1- Antecedents. ....	2
1.2- Objecte general del projecte. ....	3
1.3- Especificacions. ....	3
2. VALIDACIÓ DEL MODEL DE SIMULACIÓ.....	4
2.1- Introducció.....	4
2.2- Estudi del model.....	7
2.3- Generació del mallat.....	18
2.4- Simulació numèrica. ....	28
2.5- Resultats.....	43
3.- ESTUDI HIDRODINÀMIC DE MODELS DE MERCAT .....	68
3.1- Introducció.....	68
3.2- Simulació dels models.....	69
3.3- Resultats.....	74
4.- ESTUDI HIDRODINÀMIC DE MODELS PROTOTIPS.....	79
4.1- Introducció.....	79
4.2- Simulació dels models.....	80
4.3- Resultats.....	85
5.- CONCLUSIONS.....	108
6.- RELACIÓ DE DOCUMENTS DEL PROJECTE .....	110
7.- BIBLIOGRAFIA .....	111

## 1- INTRODUCCIÓ.

### 1.1- Antecedents.

Actualment l'esport del rem només s'entén com a activitat de lleure o esport de competició. Dins del rem, hi ha una gran varietat de disciplines esportives; totes coincideixen en l'impuls d'una embarcació mitjançant un sistema de palanques simple.

Es diferencien en dos grans grups: el banc mòbil i el banc fix. El banc mòbil disposa d'un seient sobre rodes que permet aprofitar la força de les cames per la impulsió, en canvi, en el banc fix, no hi ha desplaçament del seient, el que implica el treball del tors i braços.

Les embarcacions de banc fix de l'actualitat provenen d'antigues embarcacions de pesca, que han evolucionat en disseny i materials de construcció i han esdevingut embarcacions de competició. Possiblement les més conegudes són les traineres de la costa atlàntica, que són conegudes arreu per l'alt nivell i duresa de les seves competicions.

A part de les traineres, hi ha molts més tipus d'embarcacions de competició de banc fix com serien la trainerilla, el batel, el falucho, la jàbega, el llagut català i el llaüt del mediterrani. Es diferencien pel nombre de persones que remen, les mides i per la zona de la costa on es competeix.

Un dels punts que tenen en comú tot el banc fix, és el disseny del seu rem; a diferència del banc mòbil on la pala pot tenir el disseny que es vulgui. En banc fix la pala del rem ha de ser simètrica i alineada amb la canya del rem.

L'alt nivell de competició que està assolint aquest esport, fins a la dedicació exclusiva, i la gran evolució que ha patit amb l'entrada de nous materials, ha permès augmentar el rendiment de l'esportista.

Aquesta evolució, ha portat a augmentar la rigidesa, resistència i rebaixar el pes fins als límits permesos. S'ha de millorar el disseny i optimització dels elements per aconseguir un millor rendiment.

## **1.2- Objecte general del projecte.**

L'objectiu d'aquest projecte és l'anàlisi hidrodinàmic de diferents models de pales simètriques per tal de determinar el model més eficient, des del punt de vista hidrodinàmic, per a la impulsió de l'embarcació de banc fix.

Així, es simularan virtualment diferents models de pales simètriques disponibles en el mercat, com models prototipus amb un programa de dinàmica de fluids computacional. L'anàlisi dels resultats determinarà el model més eficient.

## **1.3- Especificacions.**

En la realització del projecte, l'estudi hidrodinàmic es realitzarà de manera virtual a partir de la utilització de programes comercials de dinàmica de fluids. Així com també programes de disseny 3D i programes de mallat que siguin compatibles amb el programa de simulació a utilitzar.

En el disseny s'utilitzaran programes com Autocad i Rhinoceros, després, en funció del disseny, utilitzarem un programa d'elements finits anomenat ICEM "ANSYS" que mallarà la geometria emprada. Finalment, la simulació s'efectuarà amb el programa ANSYS CFX.

L'estudi no preveu el càlcul de resistència mecànica dels models ni la seva construcció.

## 2. VALIDACIÓ DEL MODEL DE SIMULACIÓ

### 2.1- Introducció.

Pel desenvolupament hidrodinàmic d'una pala de rem fa falta conèixer el comportament dinàmic del fluid amb l'objectiu de trobar millores en el flux generat per la pala, per així poder reduir els factors contraproductius i potenciar-ne els favorables.

Tots aquests aspectes es poden estudiar de forma experimental mitjançant túnels de forma virtual a partir de la simulació numèrica.

El mètode numèric és un sistema més ràpid i pràctic ja que és completament virtual, però cal dir que experimentalment és molt semblant a la realitat i per tant el més precís en quan a l'obtenció de dades.

Així, aquí es tracta la simulació d'una pala de rem de banc fix, és treballa sobre una pala estàndard que s'utilitza actualment en competició. Caldrà disposar de les mides d'aquesta pala per poder treballar amb un model virtual a escala real, aquestes mides es prendran directament preses sobre un rem de competició estàndard, mitjançant eines de mesura com el peu de rei i el regle mil·limetrat a més de disposar de les cotes importants facilitades pel proveïdor.

La simulació virtual del model, permet obtenir un gran nombre de dades. Les de més utilitat les velocitats, pressions i forces en cada part del model i el comportament del flux de fluid a l'entorn del rem.

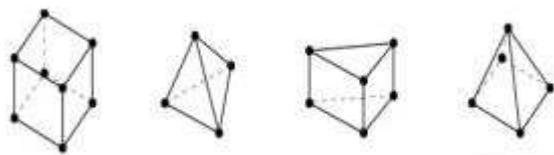
A partir d'aquí s'ha desenvolupat l'estudi del model d'una pala de rem a través de CFD (Computational Fluid Dynamics) per comprovar que el programa que utilitzem reproduïx de forma acceptable el comportament real.

La simulació numèrica com bé diu el nom, fa servir els mètodes numèrics per poder resoldre les equacions de Navier-Stokes que governen la dinàmica del fluid. El programa ANSYS CFX aplica el mètode dels volums finits per resoldre el sistema d'equacions diferencials en derivades parcials que defineixen el moviment dels fluids i, així poder trobar una solució en l'espai i el temps.

Això se'n diu modelat d'elements discrets. La discretització es una divisió del volums de càlcul en petits volums geomètrics anomenats elements, el conjunt d'aquests elements s'anomena malla.

El mallat condiciona els resultats obtinguts a partir del CFD, per tant es requereix una malla de qualitat abans de dur a terme qualsevol simulació.

La validesa de la malla depèn de varis paràmetres com la relació de mides, angles dels vèrtexs i disposició dels elements (capes de prismes, malla hexaèdrica, etc). A la figura 1 podem veure diferents elements possibles.



**Figura 1.** Possibles elements de malla en volum (hexaedres, tetraedres, prismes i piràmides). La seva projecció en la superfície són quadrilàters, triangles, triangles i quadrilàters, respectivament.

Aquestes malles es generen amb programes denominats malladors que transformen la nostra geometria de partida en una retícula de nodes en l'espai, en els que es resolen les equacions de mecànica de fluids.

Mallar es un procediment complex en que s'han de valorar molts aspectes com sensibilitat de malla, qualitat, geometria, etc.

En el nostre cas el mallat no té en general una forma senzilla degut a alguns factors com és per exemple la complexitat de la superfície i que s'ha d'adaptar correctament en aquelles regions on el flux presenta irregularitats més grans és a dir menys uniformes.

Per aquest motiu, la malla s'ha de posar en funció dels resultats que es vol obtenir. Cal dir que molts detalls necessaris per analitzar el flux amb precisió al voltant del model, junt amb algunes perturbacions o canvis de forma poden afectar la mesura del flux.

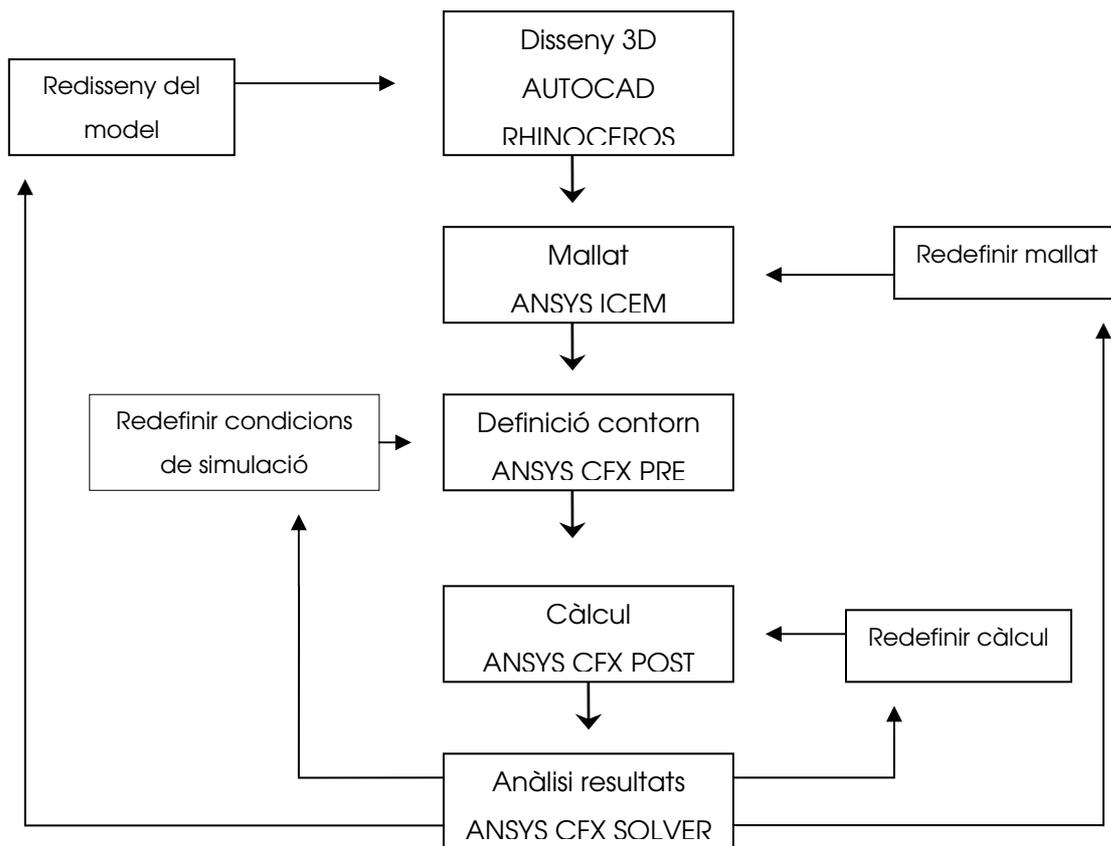
Per a la resolució dels estudis s'utilitzen varis programes. Primer es parteix de la geometria a utilitzar, aquesta es pot realitzar amb programes de disseny 3D, en el vigent projecte s'ha utilitzat Autocad 2002 i Rhinoceros 4.0.

Un cop es té la geometria a utilitzar es carrega en l' ANSYS ICEM 10.0, tercer programa utilitzat, on s'aplicarà un tipus de mallat per determinar la precisió en què es farà la simulació.

A partir d'aquí ja es pot utilitzar l'últim programa, ANSYS CFX 10.0, que està compost per tres parts diferenciades:

- CFX-Pre, on es pot carregar la geometria mallada i generar les condicions inicials.
- CFX-Solver, on es calcula, mitjançant iteracions les condicions inicials.
- CFX-Post, on es pot treballar amb resultats obtinguts del càlcul.

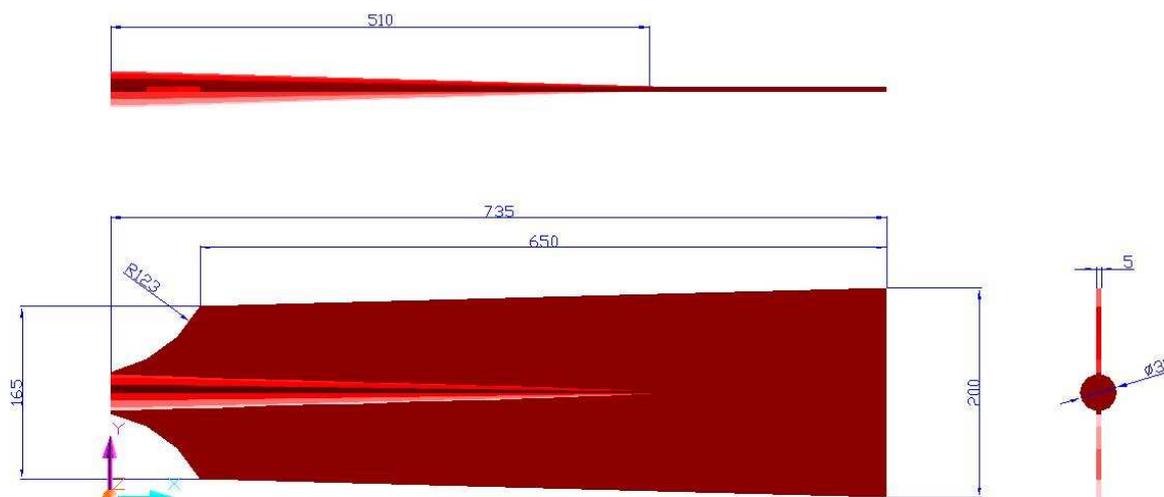
A continuació en la Figura 2 es mostra un esquema amb el procés a seguir:



**Figura 2:** esquema del procés a seguir

## 2.2- Estudi del model

A la figura 3 es pot veure la forma del model a estudiar, és una pala de rem simètrica disponible al mercat i una de les més utilitzades actualment en competició, realitzada en format sandwich amb materials plàstics compostos. Les mides concretes s'han obtingut de la mesura detallada d'un rem físic, mitjançant peu de rei i regla mil·limetrat.



**Figura 3.** Forma del model a estudiar, pala de rem estàndard de competició. Cotes en mm.

Tot i que hi ha estudis previs dins el món del rem, en aquest cas concret referent a banc fix només hi ha un estudi experimental previ (J.M.Francisco García;1996), on no es disposa de dades contrastables, doncs no es tenia en compte la simetria, només la variació d' amplada i llargada en models de fusta.

La particularitat més important de l'estudi experimental portat a terme és la interacció del model respecte el flux que estarà generat al seu voltant, i la reacció en forma d'esforços als que el model estarà sotmès.

La majoria d'esforços vindran marcats per la pressió exercida pel flux en xocar sobre la superfície del model. Però part d'aquests esforços vindran marcats per les turbulències formades pel flux al passar el model.

El flux turbulent ocasionat en la part posterior de la pala ve donat pel despreniment, que és en general associat a la formació de terbolins.

Per representar la influència de la velocitat del corrent uniforme i de la viscositat del fluid a les característiques del corrent un cop sobrepassat un cos sòlid situat dins el flux, i catalogar els diferents models de flux passat aquest obstacle, es fa servir com a paràmetre el nombre de Reynolds definit per:

Als nombres de Reynolds més baixos ( $Re < 1$ ), el flux al voltant del sòlid és estacionari, encara que asimètric en la direcció del corrent, com a resultat del retard produït pel sòlid.

A mesura que augmenta el nombre de Reynolds ( $1 < Re < 50$ ), el flux és cada cop més asimètric: un parell de vòrtexs apareixen sotavent i la regió que s'estén corrent avall, comença a oscil·lar. El flux turbulent esdevé més estret a mesura que augmenta el nombre de Reynolds.

A alts nombres de Reynolds ( $Re > 200$ ), el flux turbulent conté una doble sèrie de vòrtexs idènticament separats. El fluid sembla com si s'enrotllés sobre els extrems del cos sòlid.

A partir de la part posterior del sòlid s'estenen dues capes tallants a través de les quals la velocitat canvia bruscament des del deixant lent al corrent extern ràpid. Aquestes capes tallants primes s'anomenen làmines de terbolí, o de vòrtex, equivalents a una fila de terbolins lineals concentrats adjacents. Les capes s'enrotllen per formar vòrtexs concentrats a mesura que es mouen corrent avall, però aquests no són estables, de manera que s'esfondren i es disgreguen, amb la qual cosa generen turbulència.

Un altre factor que marcarà les reaccions del model serà la resistència o força d'arrossegament aquest vindrà marcat per diferents condicions pròpies del fluid, com del propi model, segons l'expressió (1):

$$W = 1/2 (C_w \cdot A \cdot \rho \cdot V^2) \quad (1)$$

On W: és la resistència o força d'arrossegament

A: és la superfície del sòlid

$\rho$ : és la densitat del fluid

$V$ : és la velocitat lliure del fluid

$C_w$ : és el coeficient d'arrossegament del sòlid

Aquest coeficient ve marcat per la forma més o menys aerodinàmica de la superfície exposada al corrent del fluid, i ja estipulada per diferents formes més o menys definides. En el cas del model, no s'adapta a cap d'aquestes ja tabulades.

Si tenim en compte que els paràmetres que fan referència al fluid, com són la densitat i velocitat, els marcarem dins les condicions de simulació. I en totes les simulacions es mantindrà la mateixa superfície per els models a simular, llavors s'obté que la força obtinguda vindrà marcada pel coeficient  $C_w$ .

Directament i gràcies al programa de treball es podrà obtenir la força resultant al conjunt, i en alguns cassos com possiblement podria ser la part posterior del model, l'influència directa dels esforços als que està sotmesa vindria marcada per la formula anterior. Caldria destacar que el coeficient  $C_w$ , vindrà marcat en els models a simular pels dissenys i forma d'aquests.

Un cop es disposa del model, ara cal el túnel virtual on provar-lo. Aquest túnel serà un volum molt més gran que el model on virtualment s'hi introduirà un flux, en aquest cas de dos fluids diferents (aire i aigua).

El túnel, tindrà forma de tetraedre així és més pràctic treballar amb les parets d'aquest i poder-ho visualitzar millor. Les dos parets que marcaran la posició del model dins el seu interior seran, l'entrada i la sortida. Serà per on entrarà i sortirà el flux en el túnel, marcarà la direcció i sentit de treball d'aquest. Caldrà tenir en compte que la posició on s'ubicarà el model i les mides del túnel tindran a veure amb la velocitat del fluid i la possible reacció d'aquest amb el fluid.

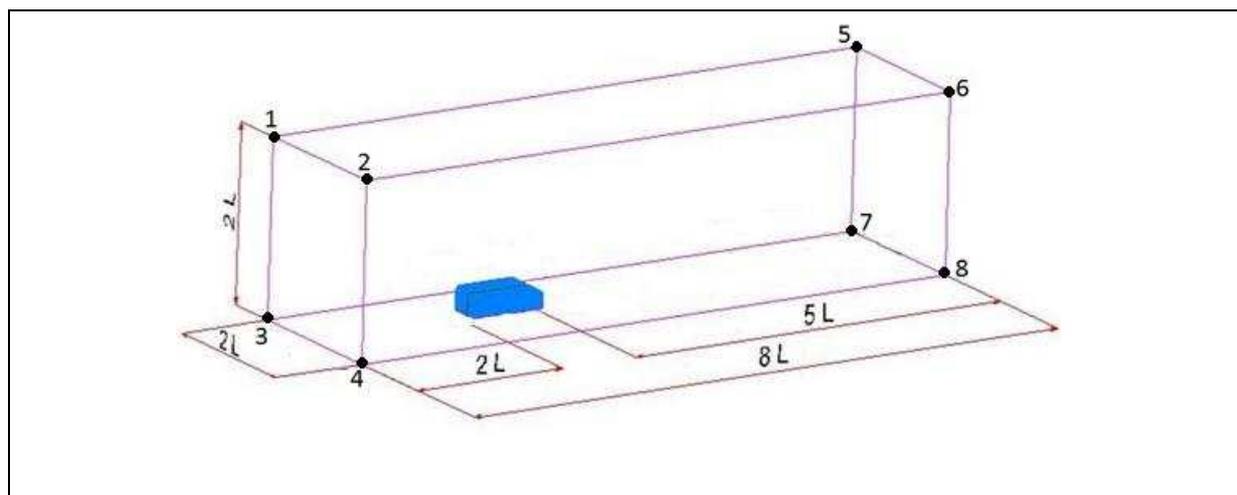
Amb la finalitat d'obtenir unes dades contrastables i fiables, es treballarà sobre el model virtual, aquest model interactuarà dins un túnel virtual bifàsic. La necessitat de disposar d'un túnel bifàsic, ve donat per la proximitat del rem a la superfície de l'aigua, i rebent l'influència dels dos fluids. Les mides i ubicació del rem dins el túnel han de garantir una correcta entrada i sortida dels fluids, i evitar la distorsió d'altres elements com podrien ser les parets. També ajudarà a efectes de càlcul disposar de la mida més compacta i concreta possible a fi d'evitar càlculs innecessaris.

S'espera poder estudiar la reacció del fluid amb el model, per aquest motiu el model no pot estar adherit a cap paret, si no que ha de tenir tot un volum proper lliure per on pugui circular el flux sense cap tipus d' entrebanc o inconvenient.

Per la part davantera del model hi haurà una reacció, però la més important vindrà generada per les turbulències que es formaran en la seva part posterior, per això caldrà que l'espai que quedi en la seva part posterior sigui molt més gran que el de part davantera.

Tenint en compte l'esmentat i estudis previs ( Davidson i Krajnovic, 1999) ens marcarà unes mides de túnel de partida sobre les quals poder començar a treballar. Ja que la geometria no és la típica que es simula en túnels virtuals, de forma allargada i aerodinàmica, si no més aviat al contrari, al seu un perfil pla i perpendicular al flux.

Per aquest motiu possiblement s'haurà d'adaptar el túnel per optimitzar-lo. En la taula 1 s'observen la relació de mides del túnel en funció de la llargada del model aerodinàmic a simular, les mides estan en referència a una cota L, que normalment s'utilitza la llargada del cos, en aquest cas es prendrà la llargada de la pala del rem.



	predeterminades	Mida model [m]	Mida túnel predeterminada [m]	Mida túnel final [m]
alçada	2L	0.75	1.5	1.5
llargada	8L	0.75	6	3.5
profunditat	2L	0.75	1.5	1.5

**Taula 1.** Proporció mides túnel en funció de la llargada del model.

És pot veure que la mida final del túnel, amb el qual s'han fet les simulacions varia respecte el predeterminat, aquest fet ha esdevingut, després de fer varies proves i veure que gran part del túnel no tenia cap tipus de reacció, debut a la forma del model i velocitat del flux.

Per tant i amb la finalitat d'optimitzar la simulació s'ha buscat una mida de compromís que funcionés correctament.

El model ha de tenir una posició el més similar possible a la del seu treball habitual per a que la simulació sigui el més correcta possible.

El rem està recolzat sobre l'embarcació, concretament es recolza sobre l'orla d'aquesta, i o fa subjectada a l'escàlem mitjançant l'estrop. Orla és la part lateral més aixecada de l'embarcació, l'escàlem és la peça que sobresurt de l'orla on pivota el rem durant el seu moviment i l'estrop és una corda o teixit trenat que uneix el rem a l'escàlem, permetent el seu moviment i la seva subjecció.

En total es pot considerar tres inclinacions del rem, un primer que seria la inclinació de la canya del rem respecte la superfície de l' aigua, que un cop donat no variarà, doncs ve marcat per les mides de l' embarcació i llargada del rem. El segon vindria donat per les posicions d'entrada i sortida del rem a l'aigua i un tercer marcat pel gir del canell que faria oscil·lar la pala sobre la perpendicular de la superfície de l'aigua.

Com que no totes les orles de les diferents embarcacions de banc fix, estan a la mateixa alçada, fins i tot cada embarcació en varia la seva alçada en funció de l'eslora i la mànega, i si a més tenim en compte que ni la llargada dels remes és per tots la mateixa. Això dona diferents inclinacions de la canya del rem sobre la superfície de l'aigua. Si es fa un tall longitudinal per diferents tipus d' embarcacions s'obtidrien diferents inclinacions sobre aquest pla.

Tot el tema referent a inclinacions del rem és molt important i molt treballat per qüestions de tècnica de rem, i per buscar una màxima impulsió i velocitat.

En aquest punt es busca que la pala del rem quedi submergida però al mateix temps el més propera possible a la superfície, d'aquesta manera resulta més fàcil portar un elevat nombre de palades per minut. Si es submergís molt la pala del rem, es perdria temps en enfonsar en excés aquest i en tornar-lo a treure a la superfície sense aportar un rendiment extra, i en canvi penalitzant en temps i en esforç.

Així la posició del rem, respecte la seva immersió és totalment submergit, i a escassos mil·límetres de la superfície en el seu punt més elevat.

Després d'observar diferents tipus d'embarcacions i estudiar-ne mides, i diferents llargades de les canyes dels remes per cadascuna de les embarcacions. S'observa que en la majoria de cassos uns angles comuns que estarien situats a:  $15^{\circ} \pm 2^{\circ}$ . Per tant es prendrà el valor de  $15^{\circ}$  com a angle d'inclinació de la canya sobre la superfície de l'aigua en tots els cassos i simulacions que es facin.

A part de la inclinació de la canya respecte la superfície de l'aigua, la posició del rem dins l'aigua pot adoptar múltiples posicions i cada individu en funció de la seva tècnica i entrenament n'utilitzarà unes o altres.

La posició que es comuna a tots els cassos és la perpendicular a l'embarcació i perpendicular a la superfície de l'aigua. Aquesta marca la màxima superfície de treball del rem i és utilitzada en tot tipus de tècnica.

Aquesta posició serà la simulada dins el túnel virtual i utilitzada com a referència, ja que marcarà la màxima superfície exposada al flux.

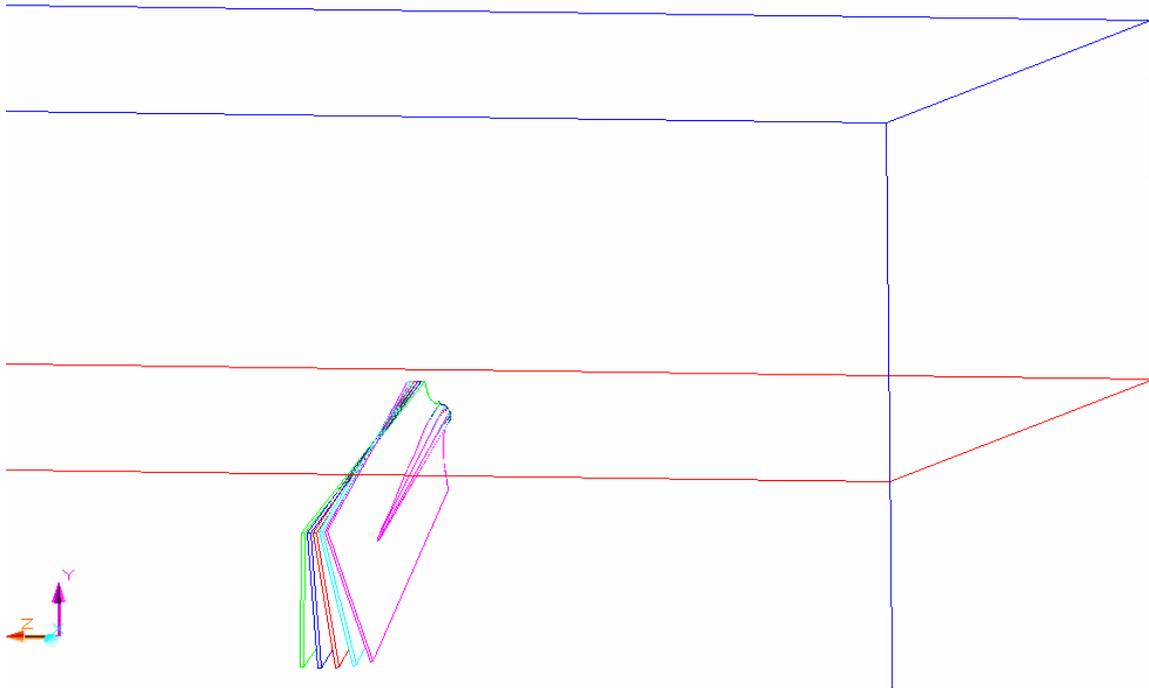
El moviment d'avanç de l'embarcació, ve marcat per el moviment del rem dins l'aigua, a efectes pràctics aquests moviments es poden simplificar en dos, en funció del gir que adopta el rem dins el fluid. Que serien, la passada i el gir.

El gir és el moviment ocasionat per la rotació de la canya del rem, aquest provoca la rotació sobre la perpendicular de la superfície. Està causat per la forma rodona de la canya del rem i pel punt de rotació d'aquesta. El control d'aquest gir ve marcat pel gest manual del canell de cada individu durant la passada.

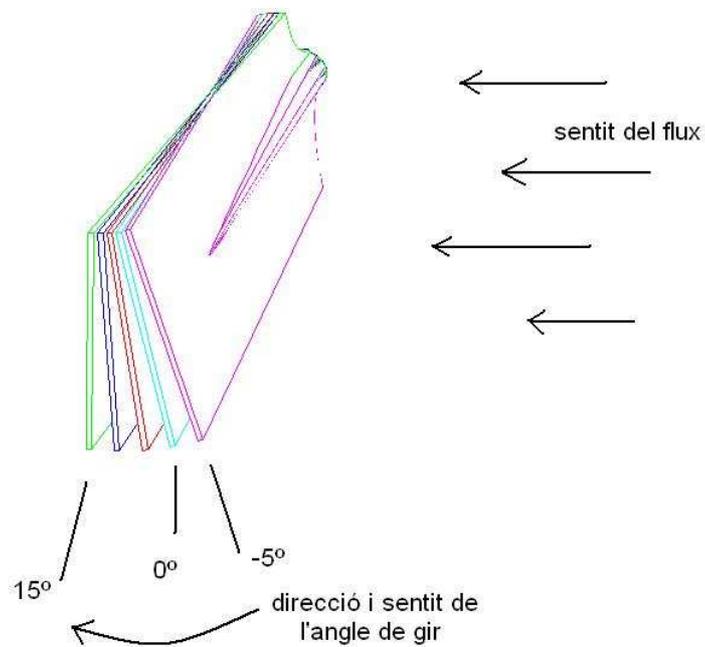
Aquest gir de vegades marcat per la falta de tècnica o per facilitar la passada en condicions climatològiques adverses (fort vent o onatge), també influeix en la posició del rem submergit, perdent aquest la seva posició de perpendicularitat respecte el pla de la superfície.

Aquest fet també marca una diferent exposició del rem al flux, per a avaluar-ne els efectes, es farà rotar el rem sobre el seu eix, en la posició de referència. Tot i que aquest gir pot venir donat en qualsevol posició de la passada, s'avaluarà únicament sobre aquesta posició i amb diferents angles amb la finalitat de contrastar els valors sobre el punt de màxima superfície afectada o posició de referència.

El rang d'aquest gir, a diferència de la passada, és més experimental, doncs no hi ha uns valors definits, ni es poden comparar entre diferents individus d'una mateixa embarcació. Per tant el rang de gir s'estudiarà per angles des de  $-5^{\circ}$  a  $15^{\circ}$ . En les Figures 4 i 5, es veu la disposició i el detall dels models en el gir



**Figura 4:** es poden veure les diferents posicions de gir amb les que es simularà el model dins el túnel. Essent el model cian el de referència ubicat a  $0^\circ$ , el magenta el màxim gir antihorari a  $-5^\circ$  i el verd el màxim horari a  $15^\circ$ .



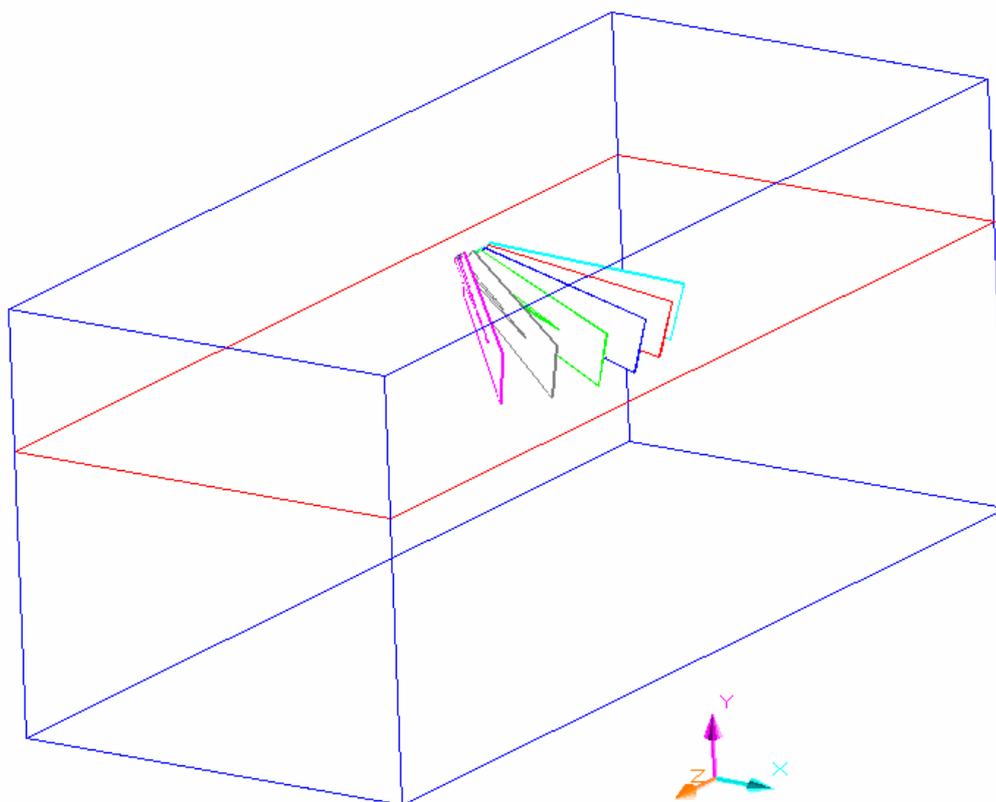
**Figura 5:** es poden veure la direcció i sentit de l'angle de gir del model i el sentit del flux

Per altre banda, l'altre moviment que afecta el rem, i es el que provoca el desplaçament de l'embarcació és la passada.

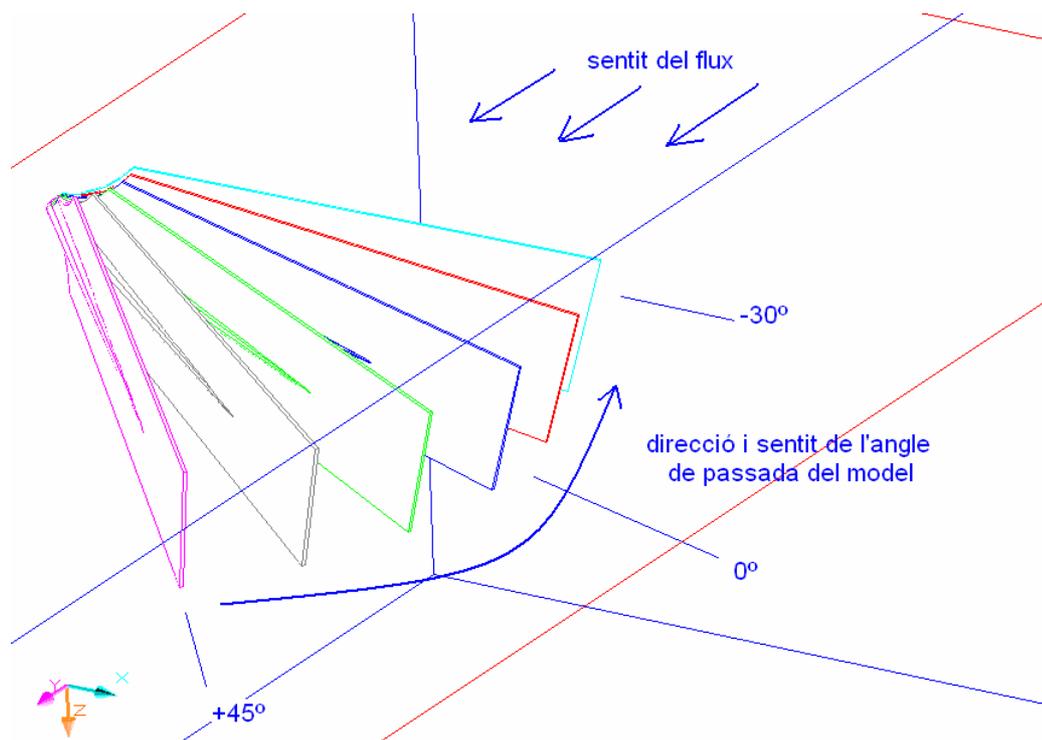
La passada seria un "escombrat" del rem dins l'aigua. Aquest moviment l'anomenarem *passada* i s'iniciarà en la posició més avançada en que el rem entri a l'aigua (angles +) fins que aquest en surti en la posició més endarrerida (angles -). Aquestes dues posicions es consideraran totalment submergides, i vindran marcades per l'angle respecte la posició de referència o perpendicular a l'embarcació.

El rang de la passada, vindrà marcat per la tècnica utilitzada, tipus d'embarcació i entrenament de cada individu o equip. A efectes de la simulació i observant diferents tipus de passada es simularà sobre un rang de treball  $45^{\circ}$  a l'entrada i  $-30^{\circ}$  a la sortida. Tot i que el rang de treball no cobreix tots els tipus de passades diferents utilitzades en competició, els valors a observar si que estan dins la seva zona de treball, de tots ells.

Es prendrà un valor de càlcul cada  $15^{\circ}$  de desplaçament, així doncs s'observaran els valors  $45^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $0$  o valor de referència,  $-15^{\circ}$  i  $-30^{\circ}$ . Tal i com es pot veure en la Figures 6 i 7, les diferents posicions adoptades pel rem dins el túnel virtual.



**Figura 6:** es poden veure les diferents posicions amb les que es simularà el model dins el túnel. Essent el model blau el de referència ubicat a  $0^\circ$ , el magenta el màxim avançat o d'entrada a  $45^\circ$  i el cian o de sortida a  $-30^\circ$



**Figura 7:** en la figura es detallen les línies de flux, els angles de passada i la direcció i sentit de l'angle de passada del model.

Un cop simulades les diferents posicions esmentades, s'ha de poder observar el comportament del rem en les diferents fases de la palada i com influeix el gir i l'angle de passada en els esforços sobre el conjunt del rem.

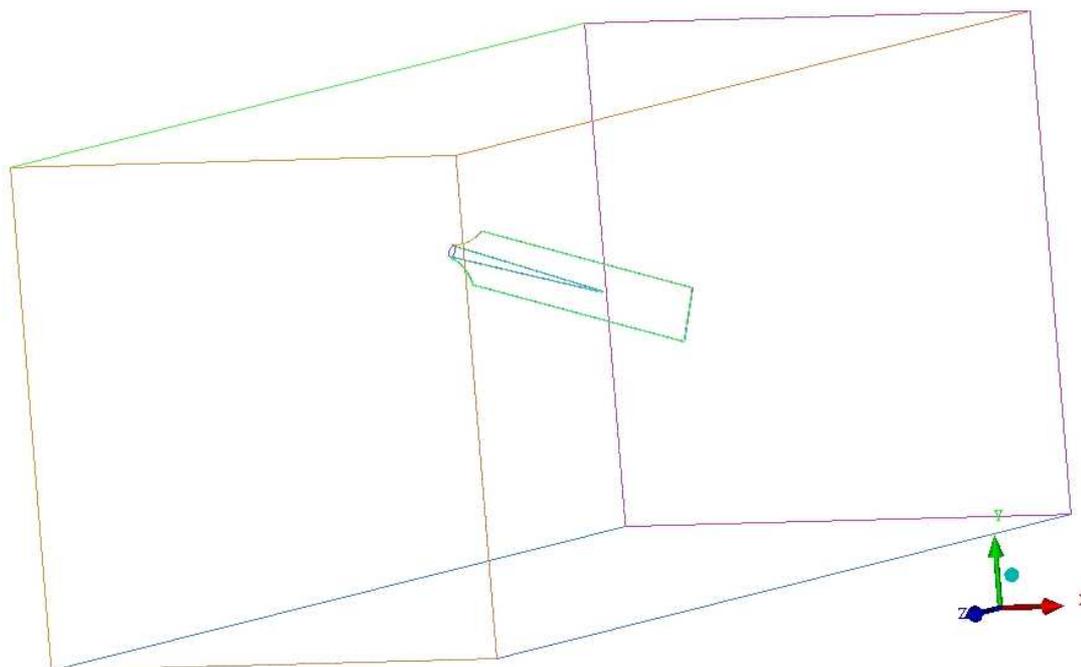
## 2.3- Generació del mallat.

En aquest apartat s'explica com s'ha generat el mallat a partir del disseny en 3D del sòlid i túnel virtual.

El mallador emprat fa servir la tècnica dels elements finits permetent així solució en l'espai i el temps. Aquest s'anomena modelat d'elements discrets. La discretització es una divisió del volums de càlcul en petits volums geomètrics anomenats elements, el conjunt d'aquets se'n diu malla. Aquesta malla depèn de varis paràmetres com la qualitat, relació de mida, angles, disposició dels elements (capes de prismes, malla hexaèdrica, etc).

Aquestes malles es generen amb programes denominats malladors que transformen la nostre geometria 3D de partida en una "retícula" de nodes en l'espai, en els que es permet resoldre les equacions de mecànica de fluids. Mallar es un procediment complex en que s'han de valorar molts aspectes com, sensibilitat de malla, qualitat, geometria, etc. Per això cal definir bé els valors.

Una vegada feta la geometria a simular, aquesta importar-la al programa de mallar (ICEM d'ANSYS) triant l'arxiu corresponent en el programa. En aquest cas el format és ".iges". Un cop es disposa de la geometria cal fragmentar-la per poder reconèixer cadascuna de les parts, d'aquesta manera es podrà definir el mallat corresponent de cada part. En la Figura 8, es poden distingir en diferents colors cada superfície que conforma cada volum.



**Figura 8:** volum del túnel virtual i rem, en diferents colors, separats per superfícies.

El túnel es divideix en 6 parts, que seran cadascuna de les seves cares. La part inferior serà anomenada *fons*, la part superior serà *dalt*, les dues parts laterals del túnel s'anomenaran *lateral 1 i 2*, la part prevista com a entrada del flux i més propera al model serà anomenada *entrada*, la superfície oposada a aquesta i prevista com a sortida del flux serà *sortida*.

El model es divideix en :

*Pala davantera*, és la part plana del model i de màxima superfície exposada directament al flux, o entrada.

*Pala posterior*, és la part plana del model i de màxima superfície que queda exposada a la sortida.

*Nervi davanter*, és la part cònica del model que està ubicada enmig de la pala davantera.

*Nervi posterior*, és la part cònica del model que està ubicada enmig de la pala posterior.

*Canto final*, zona final del model que està en contacte amb la part final de les dues pales

*Canto dalt*, zona final del model que està en contacte amb la part superior de les dues pales

*Canto baix*, zona final del model que està en contacte amb la part inferior de les dues pales  
*Corba dalt*, zona corbada de l'inici del model, part superior, que està en contacte amb les dues pales.

*Corba baix*, zona corbada de l'inici del model, part inferior, que està en contacte amb les dues pales.

*Pal*, zona circular on s'ubicaria la canya del rem

Totes aquestes superfícies, pas previ al mallat, cal concretar que estan unides entre elles formant un conjunt de superfícies que delimiten un cert volum. Un cop definits les unions de les superfícies i la generació del volum dins el túnel, és el moment de definir la mida del mallat. En aquesta part, es concreta la definició del mallat per cada part de les superfícies i volum existents en el model i túnel virtual. En la Figura 9, es pot veure la taula per definir aquests valors.

Part	Prism	Hexa-Core	Max Size	Height	Height Ratio	Num Layers	Tetra Size Ratio	Min Size	Max Deviation	Int Wall	Split Wall
FLUID	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	200.0								
PART_1/CANTOBAIX	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PART_1/CANTODALT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PART_1/CANTOFINAL	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PART_1/CDRVABAIX	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PART_1/CDRVADALT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PART_1/DALT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	300	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PART_1/ENTRADA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	200	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PART_1/FONS	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	300	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PART_1/LATERAL1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	300	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PART_1/LATERAL2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	300	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PART_1/NERVIDARRERA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PART_1/NERVIDAVANT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PART_1/PAL	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Show size params using ref size

Please Note that Highlighted families have at least one blank field because not all entities in that family have identical entity parameters.

Apply Dismiss

**Figura 9.** Definició de les mides de cada part de la malla.

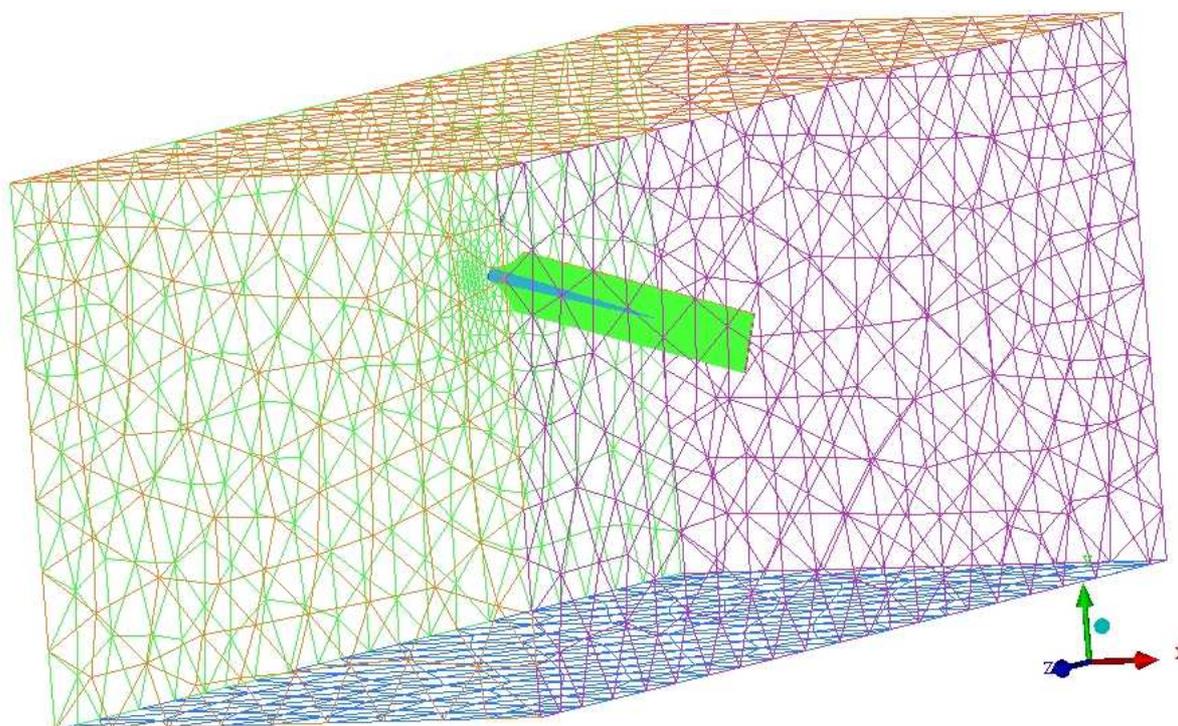
Per saber si els valors són els correctes, cal anar provant fins a trobar una correcta definició de cada part per separat, el total d'elements del conjunt i sense perjudicar en escriure el temps de càlcul.

Els valors, finals són els expressats en la taula 2

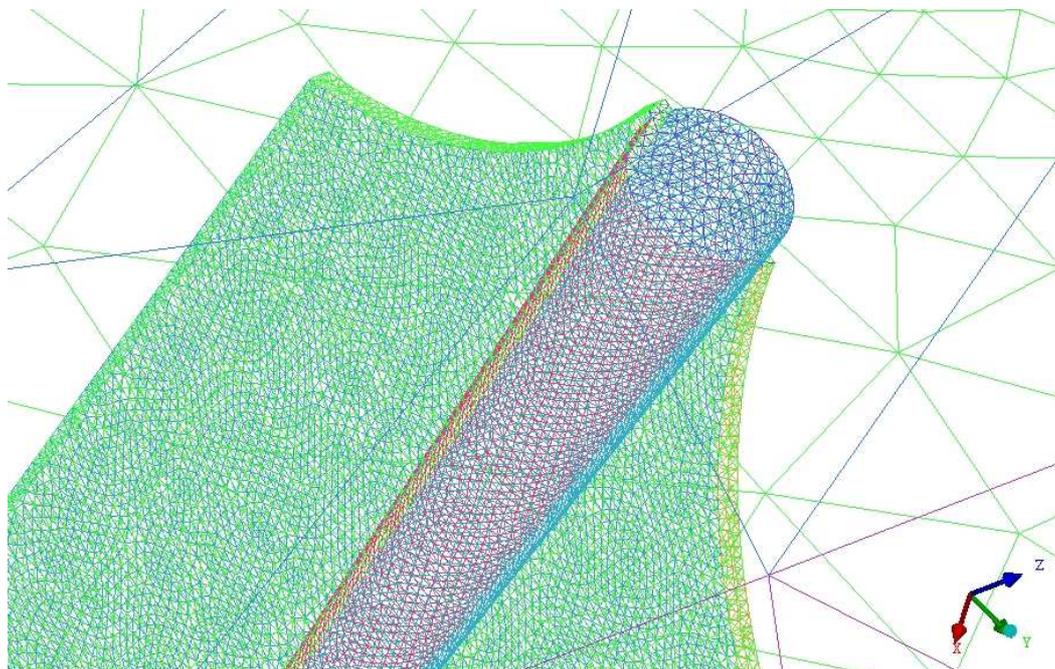
tunel	valor [mm]	model	valor [mm]
entrada	200	pala davantera	5
sortida	300	pala posterior	5
lateral 1	300	canto final	3
lateral 2	300	canto dalt	3
fons	300	canto baix	3
dalt	300	nervi davanter	4
fluid	200	nervi posterior	4
		corva dalt	3
		corva baix	3
		pal	5

**taula 2:** valors mida màxima dels elements del mallat

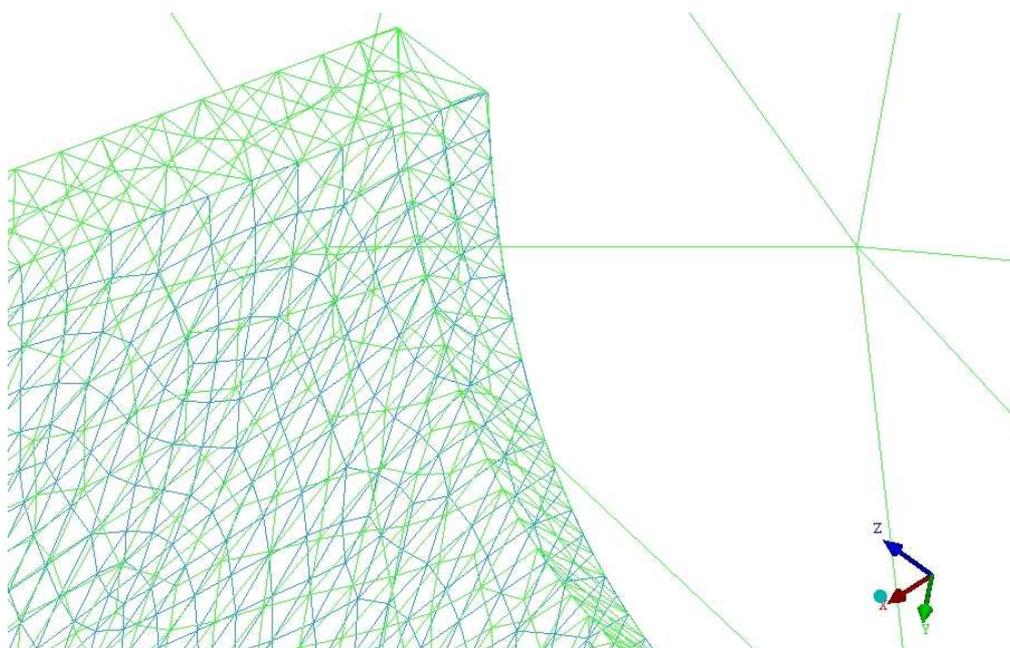
Per poder visualitzar el mallat definit cal primerament executar el mallat de superfícies, on només es defineixen les superfícies sense tenir en compte els volums. En aquest pas, podem comprovar el correcte mallat de superfícies que es podrien considerar delicades per la seva geometria. En les Figures 10 a 12 es pot observar el correcte mallat de les superfícies.



**Figura 10.** Vista mallat del conjunt túnel virtual i model.

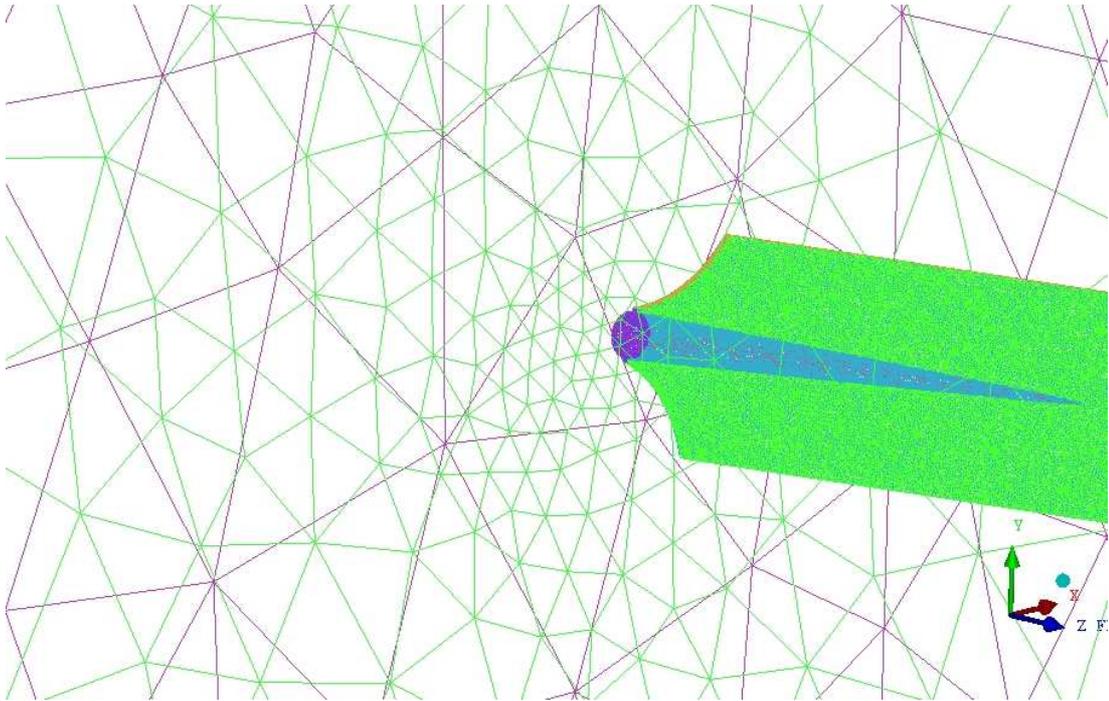


**Figura 11.** Detall del mallat d'una part del model.



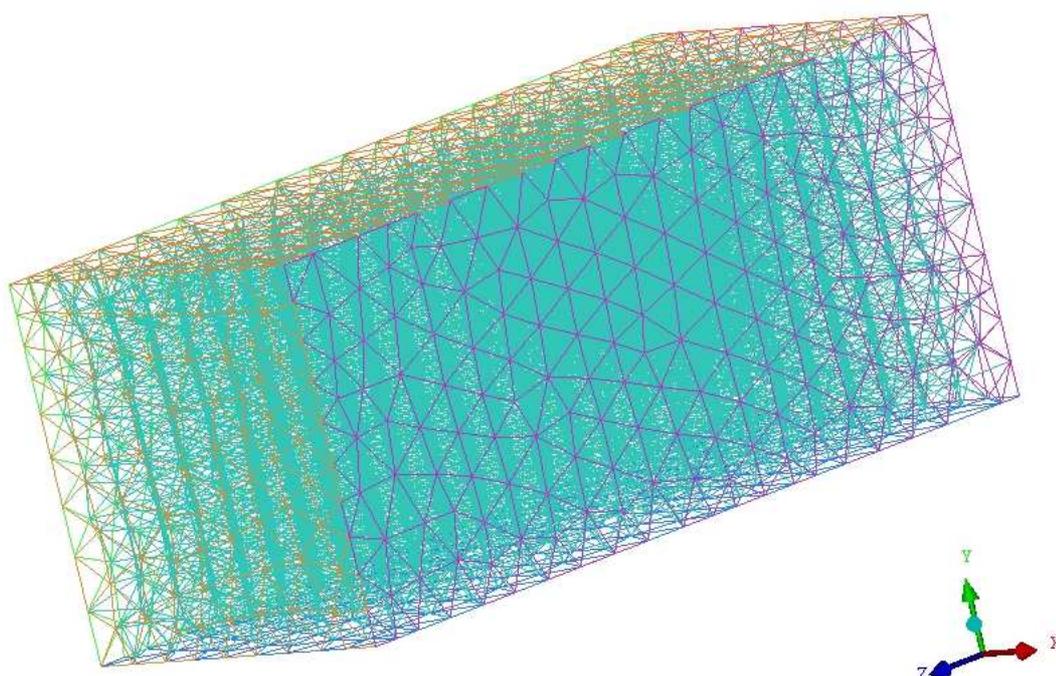
**Figura 12.** Detall ampliat d'una part del model.

Un cop mallades les superfícies, cal mallar el volum definit prèviament. Aquest volum omple tot el túnel virtual i l'entorn del model excepte el seu interior. Tot i que la mida màxima d'element del volum ja està definida, a mesura que s'aproximen al model la mida es redueix progressivament fins adaptar-se a la mateixa mida que els elements d'aquest. ( veure Figura 13 )



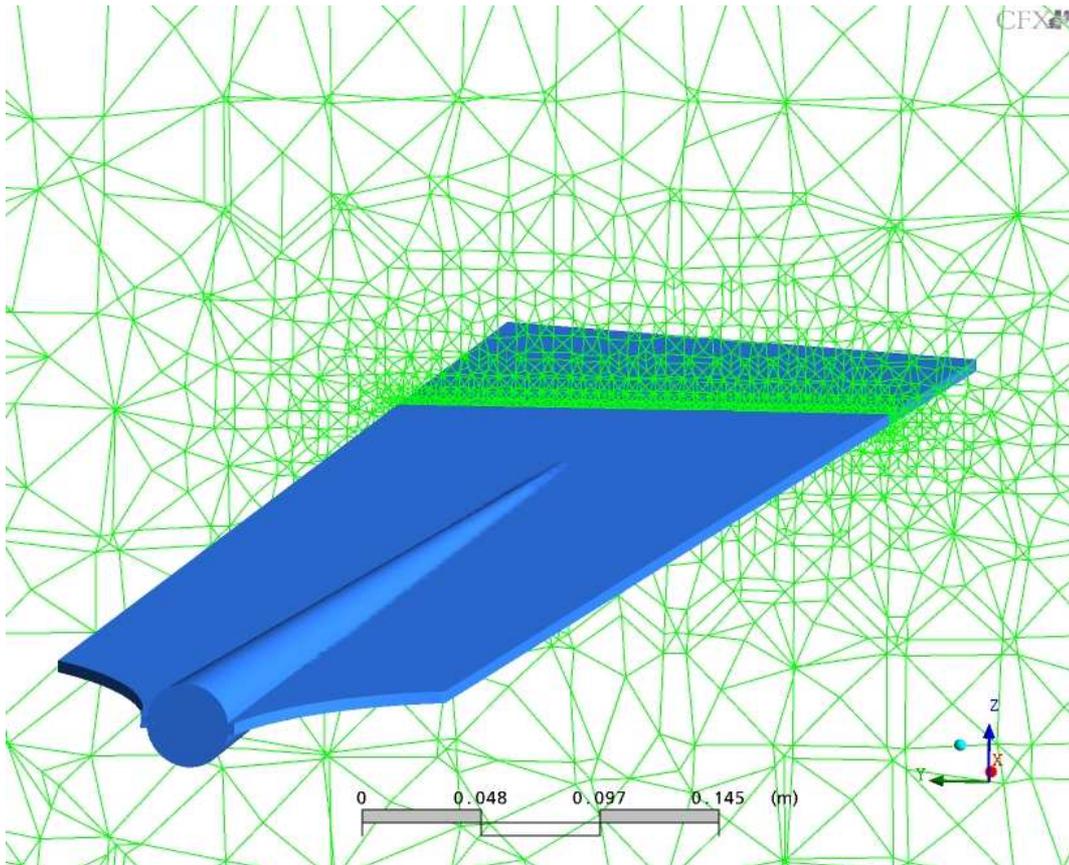
**Figura 13.** Detall de l'adaptació de la malla en un lateral del túnel, a mesura que s'acosta al model.

Un cop mallat tot el volum, es crea tot un núvol d'elements que formaran el fluid i els quals omplen tot el túnel i no permeten observar el model generat i mallat prèviament. (veure Figura 14).



**Figura 14.** Vista del mallat del túnel virtual, on només es pot veure un gran nombre d'elements.

Un cop fet el mallat, per assegurar que aquest s'ajusta al model, es possible visualitzar-lo millor mitjançant unes eines de tall i poder extreure unes seccions del volum del túnel virtual, d'aquesta manera es pot observar de forma més entenedora. (veure Figura 15).

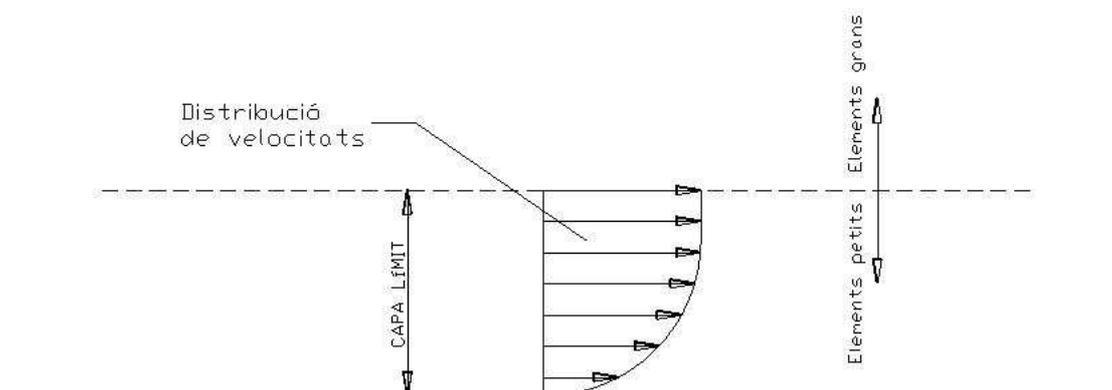


**Figura 15:** en aquest tall transversal es pot observar la variació de la mida dels elements per adaptar-se al model

Arribat aquest punt a simple vista es diferencien les zones on el mallat està més concentrat, però cal ajustar-ho i ens permetrà tenir una malla més precisa.

Un aspecte molt important en la mecànica de fluids és la capa límit. És per aquest motiu que aquesta zona rebrà una atenció més acurada que la resta de mallat.

Dins la capa límit és on hi ha un gradient de velocitat important (es pot veure la distribució de velocitat entre la superfície del cos i la capa límit de la Figura 16).

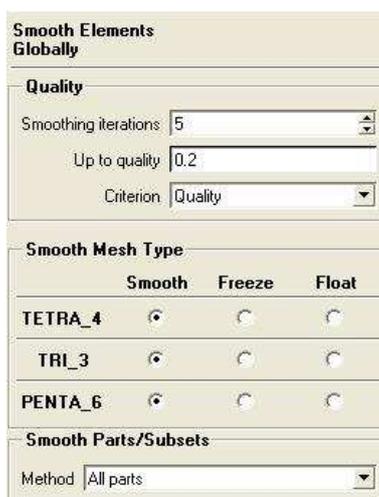


**Figura 16.** Distribució de velocitats en la capa límit.

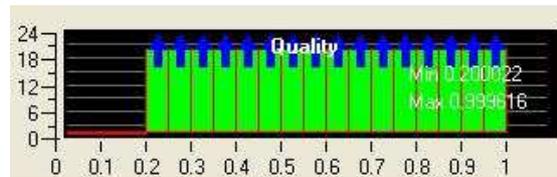
Just a la superfície, el fluid té la mateixa velocitat que el cos, és a dir nul·la, i a mesura que augmentem l'altura, la velocitat també ho fa i amb un grau d'intensitat important (Mataix C.,1986).

Aquesta variació brusca s'ha de simular correctament i, per això, el mallat s'ha de precisar més en aquesta zona, per aquest motiu el mallat disminueix tant al apropar-se al model de simulació.

Un cop està tot el volum mallat cal realitzar un ajustatge general. Aquest procés se'n diu planxat, i el que fa és donar una mica més d'uniformitat a tota la malla. Cal posar una certa qualitat de malla i una xifra d'iteracions adequada perquè hi arribi. Es poden veure els passos i com es visualitza després del planxat en les Figures 17 i 18.



**Figura 17.** Ubicació dels paràmetres de planxat.



**Figura 18.** Visualització de la qualitat del planxat.

El procés de planxat, es realitza amb la finalitat de polir les arestes dels tetraedres, el fet d'augmentar el valor de planxat, millora la definició del mallat. Al retallar les arestes més punxegudes, els tetraedres que conformen el mallat s'adapten millor a la geometria del cos on estan ubicats, i permeten una millor definició del mallat

Per últim només ens cal definir les condicions de contorn i definir el tipus de programa amb el que es farà la simulació.

## 2.4- Simulació numèrica.

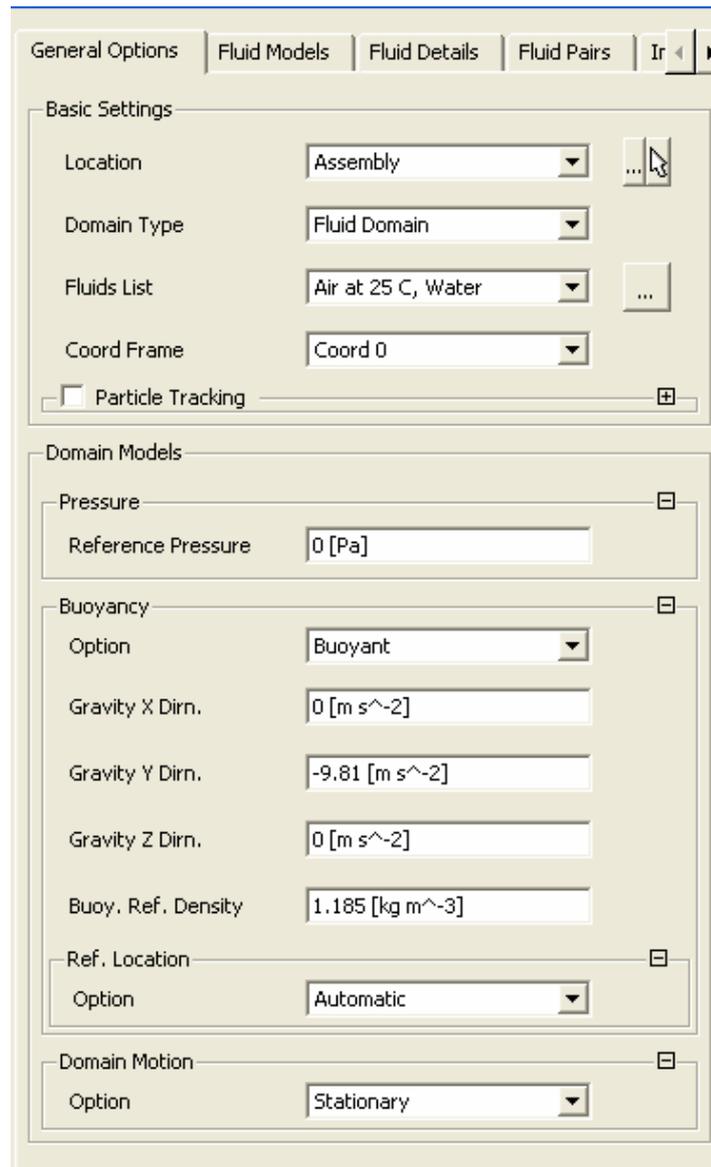
La simulació numèrica com bé diu el nom fa servir els mètodes numèrics. Aquests càlculs es basen en les equacions de Navier-Stokes, formant així un sistema d'equacions diferencials en derivades parcials que defineixen el moviment dels fluids.

El programa emprat per aquesta simulació ha estat ANSYS-CFX, dins d'aquest programa cal diferenciar-ne tres, El que determinarà les condicions de contorn, d'inici referent a la definició, és el CFX-Pre. L'encarregat del càlcul segons les condicions generades amb el CFX-Pre serà el CFX-Solver. I per últim per poder treballar amb els resultats obtinguts del càlcul s'emprarà el CFX-Post.

Durant el projecte s'executaran molts models, per tant en aquest apartat es comenta el procés general que s'ha utilitzat per a la simulació numèrica, on també es donaran els valors d'alguns paràmetres que, sinó es comenta el contrari, seran general per a tots. La resta de paràmetres de cada model s'expliquen en els respectius apartats de cada model simulat.

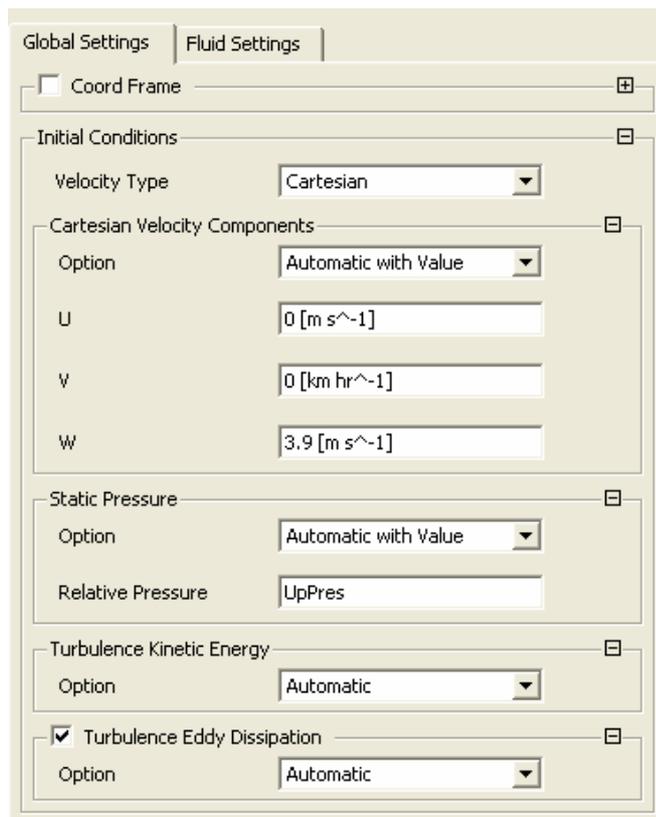
Per la simulació dels models, s'ha creat un arxiu base sobre el qual, s'ha carregat les diferents geometries mallades i posicions dels models, per mantenir d'aquesta manera les mateixes condicions de càlcul amb la finalitat d'obtenir resultats contrastables entre ells.

A partir del model mallat ja es pot començar la simulació numèrica CFD. D'entrada cal carregar el mallat, a l'escala corresponent i col·locar-lo correctament sobre els eixos de coordenades. Tot seguit cal definir les condicions de la simulació, ja que el model estarà aturat i es forçarà un flux al seu entorn, s'utilitzarà per aquest càlcul el tipus *steady state* o fluid estacionari. Es donaran les condicions d'entrada tal i com s'indica en la Figura 19.



**Figura 19:** Es poden observar les diferents condicions que aplicarem al túnel virtual

Es pot observar que es seleccionen les opcions de *fluid domain* ( domini fluid ) i en l'apartat de fluids, al ser un model bifàsic, es treballarà amb aire a 25°C i aigua. En aquest punt no s'aplica cap pressió de referència, però en canvi si que aplicarem la gravetat sobre l'eix Y, i la densitat de l'aire.(veure Figura 20).



**Figura 20:**condicions d'inici de la simulació

Al definir les condicions d'inicialització, cal definir la velocitat sobre cada eix, en el túnel Z, serà sobre el qual ha de circular el flux de fluid, en canvi els altres dos eixos no tenen cap velocitat d'inici. El valor 3,9 m/s és una velocitat mitja assolida en competició per diferents tipus d'embarcacions de banc fix, segons la taula 3.

Tipus d'embarcació	Batel	Llagut català	Llaüt mediterrani	trainerilla	jàbega	Trainera
Velocitats [m/s]	4,0	3,9	4,3	4,2	3,9	4,5

**Taula 3:** velocitat de navegació de diferents embarcacions de banc fix en m/s

La pressió estàtica la definim mitjançant una fórmula matemàtica que es defineix en la Figura 18, aquest fa referència a la pressió d'entrada que es defineix. Les turbulències es fixen en mode automàtic, sense definir un valor d'entrada.

El volum del túnel tot i estar mallat i definit com un sol volum, caldrà separar-l'ho en dos fluids: aigua i aire. S'han provat diferents mètodes, el programa permet fer-ho de diferents maneres i amb diferents instruccions per trobar una solució adequada a aquesta

partició bifàsica. Finalment el que ha donat millor resultat, ha estat mitjançant una fórmula, que es pot veure en la Figura 21.

Name	Definition
DenH	998[kg m <sup>-3</sup> ]
DownH	1[m]
DownPres	DenH*g*DownVFWater*(DownH-y)
DownVFAir	step((y-DownH)/1[m])
DownVFWater	1-DownVFAir
UpH	1[m]
UpPres	DenH*g*UpVFWater*(UpH-y)
UpVFAir	step((y-UpH)/1[m])
UpVFWater	1-UpVFAir

**Figura 21.** Fórmula per definir els dos volums de fluid.

Per entendre la formulació emprada, on  $H$  seria l'alçada de la suposada superfície de l'aigua. Per tant  $DenH$  es defineix com la densitat del fluid (aigua). El termes  $Up$ , fan referència a l'entrada i  $Down$  a la sortida.

Així doncs  $UpH$ , seria alçada d'entrada i  $DownH$ , alçada de sortida, totes dues es defineixen en 1 metre que és l'alçada de columna d'aigua prevista dins el túnel virtual.

$DownVFAir$ , és la diferència entre el total d'alçada del túnel (eix Y) i el paràmetre d'alçada columna d'aigua en la sortida, fa referència al nivell d'aire de la sortida. Exactament el mateix amb  $UpVFAir$ , que és nivell d'aire a l'entrada.

Els paràmetres  $UpVFWater$  i  $DownVFAir$  són la diferència, respecte els anteriors i marquen el volum d'aigua en l'entrada i sortida respectivament.

Les pressions de columna d'aigua venen definides per  $UpPres$  a l'entrada, on és té en compte la densitat del fluid, la gravetat i la posició i alçada de columna d'aigua. I el mateix per  $UpDown$  a la sortida.

Un cop definit les condicions de treball del túnel, cal definir les funcions de les seves parets i del model dins d'aquest. Hi ha diferents tipus de superfícies a definir, en aquest cas només s'utilitzaran els següents:

- *Inlet*, totes les superfícies que siguin d'entrada al túnel.
- *Outlet*, totes les superfícies que siguin de sortida del túnel.
- *Wall*, totes les parets del túnel i de les seves parts interiors, que a més es poden diferenciar en: *No slip* o *Free slip*, en el primer cas s'entén com a sòlid i el fluid xocarà contra la superfície, i en el segon cas el fluid llisca sense interactuar-hi.

Es defineixen com a *Wall*, *Free slip*, les parets laterals del túnel, l'inferior i la superior, aquestes parets, han de deixar fluir sense intervenir en el flux.

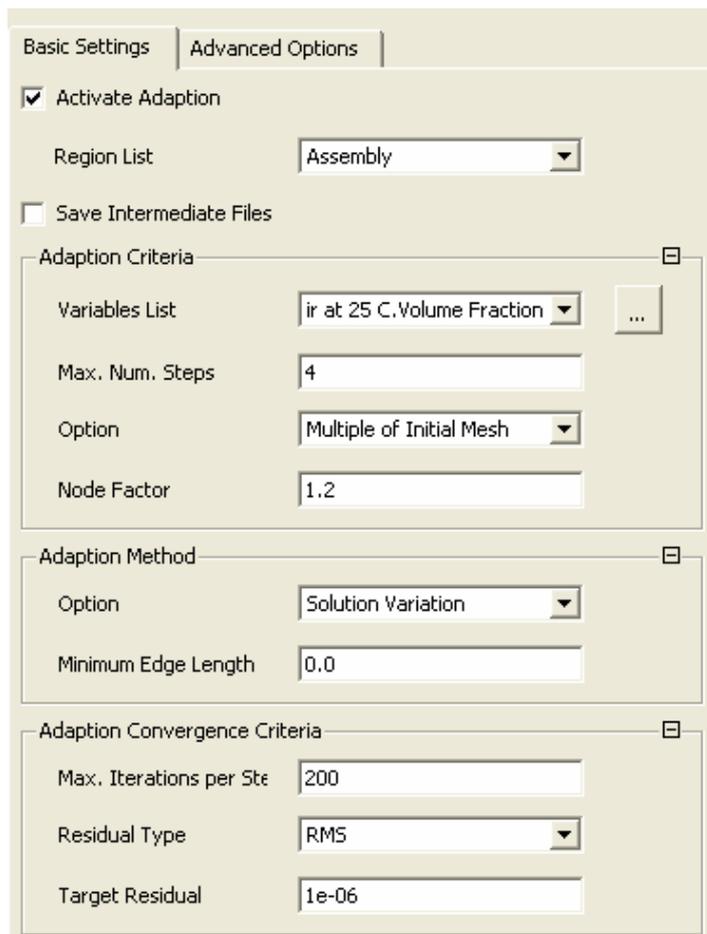
La única paret *Inlet*, serà la que s'ha definit com entrada, també cal definir la velocitat del fluid i les alçades de les dues fases ( *UpVFWater*, *UpVFAir*).

La paret de sortida, serà definida com *Outlet*, i amb la condició de pressió estàtica amb el paràmetre definit anteriorment en la fórmula *DownPres*.

El model es definirà com a tot un conjunt, d'aquesta manera més endavant permetrà treure resultats globals del model i de cadascuna de les parts que el conformen. Es defineix com a *Wall*, i *No slip*, i referent a la rugositat de les seves parets, es seleccionarà *Smooth wall*, al ser un acabat molt llis el del rem real.

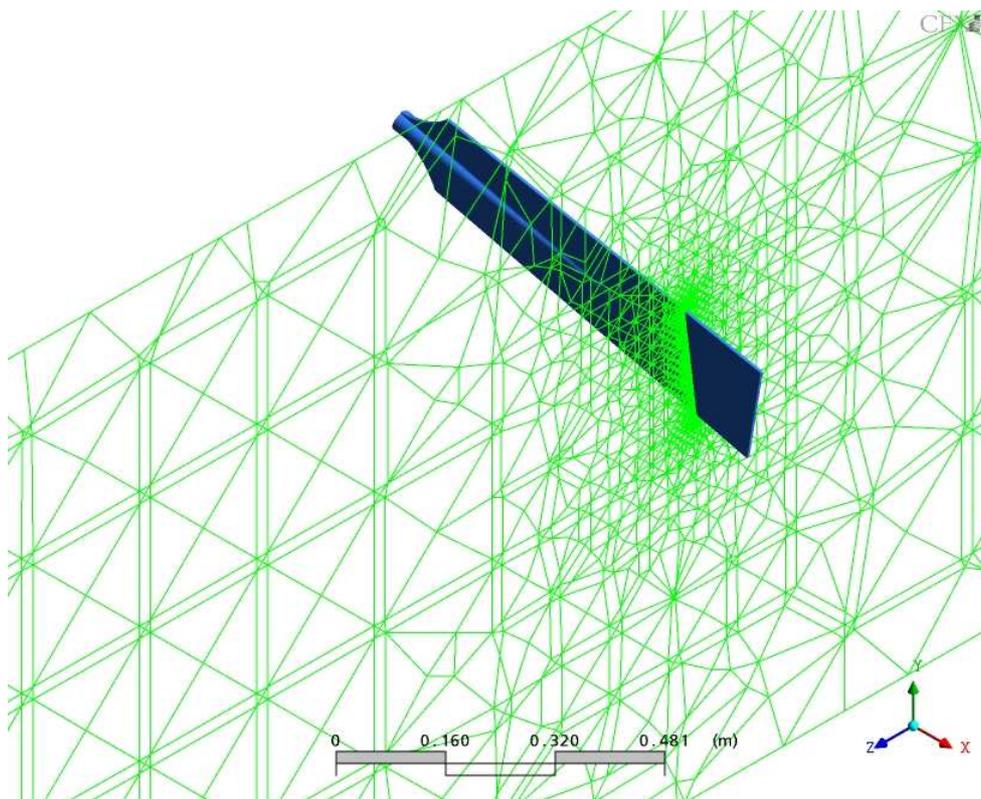
Un cop definides totes les condicions tant del fluid, com del túnel. Es defineixen un parell de condicions que marquen el procés de càlcul del programa CFX-Solver.

La primera és *Mesh Adaption*, o adaptació del mallat, tot i que s'ha intentat tenir un mallat amb la màxima precisió, el programa té la capacitat d'adaptar el mallat segons els resultats de càlcul que es vagin obtenint. D'aquesta forma els resultats obtinguts tindran més exactitud i validesa, en la Figura 22, es pot veure la finestra de treball dels paràmetres de remallat.

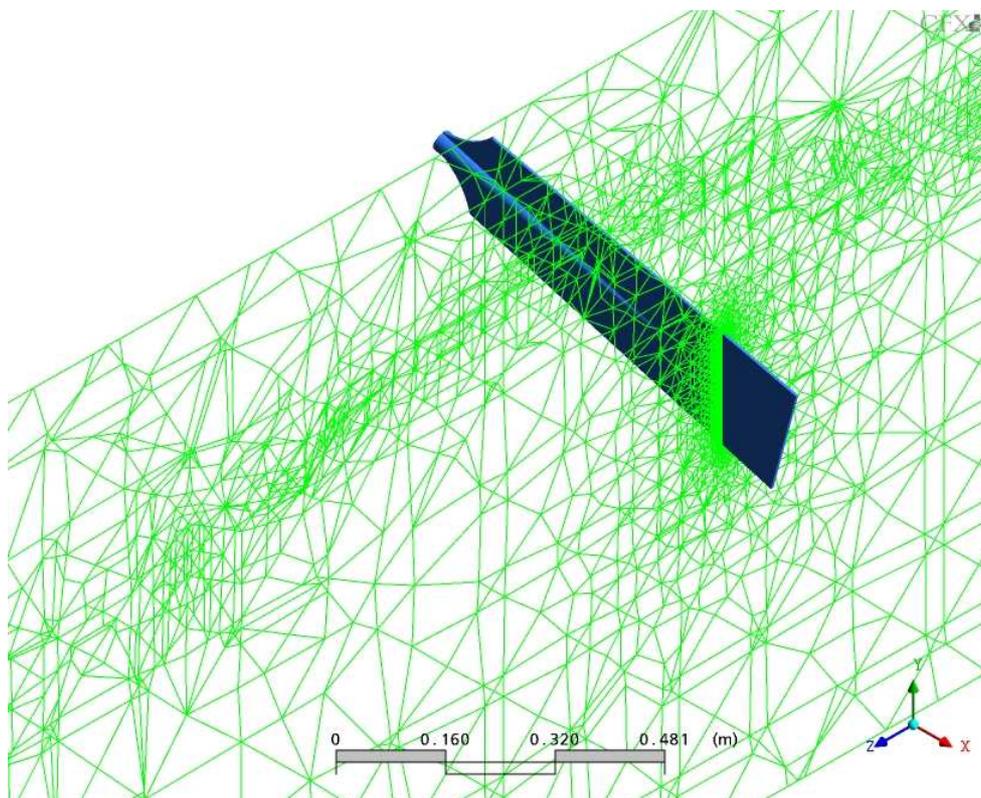


**Figura 22.** Finestra i paràmetres de l'opció de remallar.

Com a criteri d'adaptació es pren la fracció de volum d'aire, després de varies proves s'han pogut observar certs problemes amb la superfície d' aigua de la part final del túnel que augmentava al augmentar la mida dels elements que la conformaven. També en zones properes al model, la seva definició no era màxima. Tal i com es pot veure en les Figures 23 i 24, un cop s'ha remallat la zona de la superfície te una millor resolució.

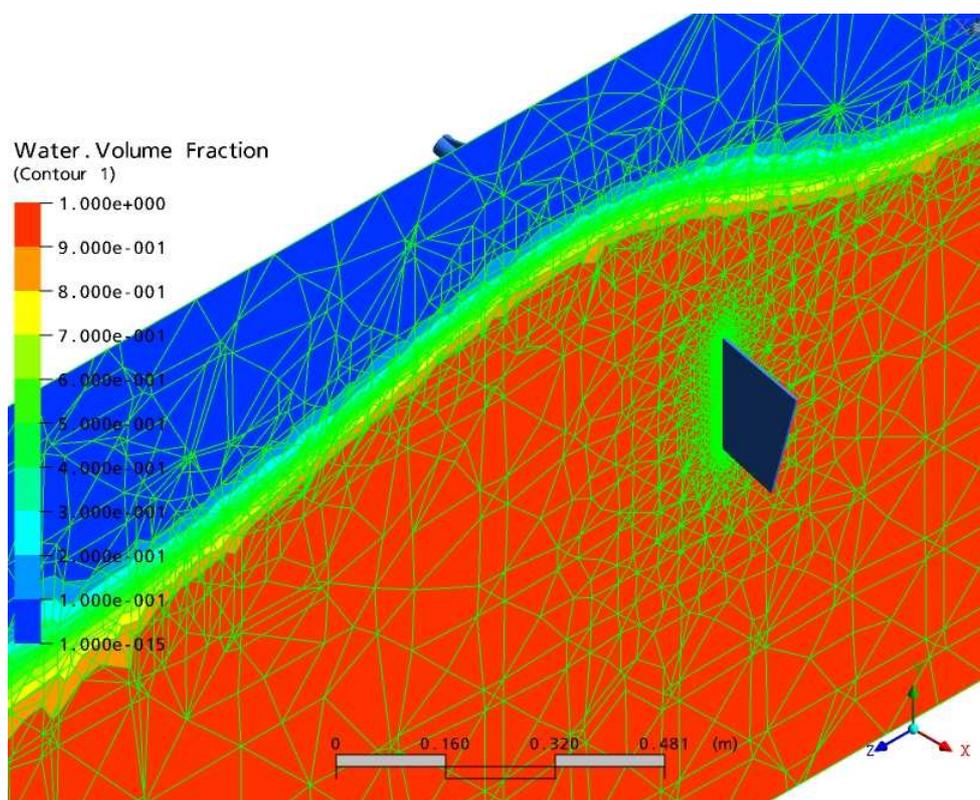


**Figura 23.** secció del mallat de partida amb poca resolució en la zona de superfície



**Figura 24.** secció del mallat , un cop remallat amb millor resolució en la zona de superfície.

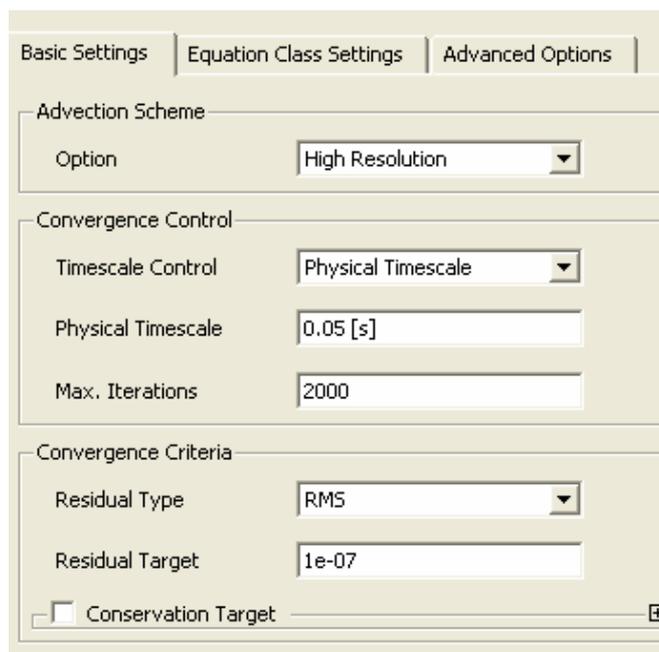
El fluid al xocar amb el model creava una petita ona que el separava allunyant-lo de la zona amb més precisió de mallat, en el moment en que es selecciona com a criteri d'adaptació la fracció de volum d'aire, tota la superfície i part immediatament superior al model, augmentaran la seva definició. Tal i com es pot veure en la Figura 25, utilitzant el mallat de la figura anterior, es veu l'adaptació que ha tingut a la zona de superfície del fluid.



**Figura 25.** secció del mallat , un cop remallat amb millor resolució en la zona de superfície, amb l'interfase entre els fluids.

El procés de remallat es repetirà fins a quatre vegades, sempre que l'error residual sigui inferior al exigít o per contra el nombre d'iteracions sigui superat.

Un cop fet el remallat la condició de càlcul vindrà marcada per les següents condicions, de la Figura 26. Es donarà com a finalitzat el càlcul, sempre i quan es superin les 2000 iteracions o tots els residus siguin inferiors a  $1,0e-07$ . Aquests valors sempre han de ser superiors als valors de remallat.



**Figura 26:** paràmetres de final de càlcul

Un cop definides totes les condicions i paràmetres de càlcul, ja es pot passar al CFX-Solver per al càlcul, les hores de càlcul vindran donades per la capacitat de l'ordinador i pels valors fixats prèviament.

S'han fet un seguit de proves per delimitar els paràmetres límits de càlcul dels models, en funció del temps de càlcul i de la precisió dels resultats obtinguts, tal i com es pot veure en la taula 4.

Nº de prova	Temps de simulació [h]	Remallat del model	Nº de remallats	Error residual màxim previ al remallat	Error residual màxim final	Desviació obtinguda
1	2	no	X	X	$1.10^{-4}$	19%
2	24	no	X	X	$1.10^{-8}$	6%
3	24	si	4	$1.10^{-6}$	$1.10^{-7}$	0,29%
4	48	si	4	$1.10^{-6}$	$1.10^{-8}$	0,22%
5	168	si	20	$1.10^{-7}$	$1.10^{-8}$	0%

**taula 4:** hores de càlcul previstes i desviació de resultats obtinguts

Un cop trobat el model correcte amb el seu corresponent mallat, i el tipus de condicions per a una correcta simulació, llavors s'ha treballat per optimitzar el model més eficient i ràpid alhora de calcular s'han simulat diferents tipus d'iteracions, amb diferents condicions de remallat.

Buscant la desviació obtinguda en cada cas en funció del nombre d'iteracions i amb diferents paràmetres d' entrada, també hi ha una previsió d' hores de càlcul ( sempre en les estacions de treball e2 i e3 del laboratori de GREFEMA, Pentium IV 2,8GHz i 3Gb memòria Ram ). Els valors obtinguts estan referenciats al valor amb més hores de càlcul i una previsible millor exactitud en els resultats.

Els residus no són res més que la suma de la diferència ponderada de les variables que hi ha entre iteració i com més alt es el valor pitjor, es a dir la simulació no seria prou precisa.

Un cop analitzats els diferents resultats obtinguts en les simulacions, es pren un simulació tipus com a correcta assumint-ne la possible desviació d'aquest. Per a tal fet es pren la simulació de temps estimat 24 hores i desviació 0,29%. Essent aquesta la més ràpida de totes amb un error més baix i per tant més fiable.

Un altre dels paràmetres que també influeix directament sobre les hores de càlcul i definició del model i túnel virtual, és el nombre d'elements del conjunt. Finalment i a l'utilitzar un únic sistema de mallat en tots els models simulats, el nombre d'elements variarà molt poc,

oscil·lant entre el 1.020.000 i 1.090.000 elements. Aquest valor sempre s'entén abans del remallat, on a partir d'aquest moment el nombre d'elements augmenta.

A partir d'aquí ja està preparat i es pot començar a córrer el programa. Mentre el programa s'està executant, a la part baixa de la pantalla es poden veure els valors en cada iteració.

Sempre que es vulgui es pot parar la iteració en qualsevol valor i veure el que s'ha executat fins aquell moment.

Aquest programa té l'avantatge que disposa d'un auto-guardat cada  $x$  iteracions, ja que aquest programa requereix, segons el que es vol simular, moltes hores de càlcul i agilitza qualsevol problema de guardat que pugui tenir l'ordinador quan està executant.

Una vegada executada tota la simulació, es poden visualitzar els vectors de velocitat, estat de pressions, línies de flux, etc, a partir de diferents pantalles.

Un cop executat, amb el valors obtinguts i la visualització de les magnituds que desitgem veure, podem arribar a treure les conclusions.

Tot i que el procés, sembla clar i concret. Cal fer-lo nombroses vegades fins a aconseguir els resultats desitjats, tant per la part de mallat com la de simulació numèrica. En la taula 5, hi ha un petit resum, de feed-backs que s'han fet amb la finalitat d'obtenir uns resultats correctes i fiables.

Estudi hidrodinàmic per elements finits de diferents pales simètriques  
per a la impulsió a rem en banc fix

Característiques del model	ANSYS-ICEM	ANSYS-CFX	Resultats
Mida túnel gran	Gran nombre d'elements amb mallat gran		Gran part del túnel sense influència del model
Mida túnel petita	Disminueix el nombre d'elements		Poca definició en el túnel per la mida de mallat
Disminució de la distància de mallat	Augment del nombre d'elements		S'aconsegueix un valor correcte entre definició i nombre d'elements
Definició dels fluids aire i aigua	Es defineixen dos fluids i dos volums diferents	Es defineix un fluid per cada volum	Els fluids no es comporten correctament
Definició d' una unitat d'interfase		Interfase sobre la superfície, coincidint amb els dos volums	Els fluids no es comporten correctament
Canviar les condicions de contorn	Es manté la definició de superfícies i volums	Canvien les condicions de les parts del túnel	Els fluids no es comporten correctament
es redefeixen les condicions de contorn	es manté la mateixa definició de superfícies i volums	S'elimina la gravetat i pressions dels fluids	El fluids segueixen un flux lògic dins el túnel, però amb deficiències
amb les condicions anteriors s'aplica només gravetat			El fluids es precipiten en el túnel
es canvia el model, partint d'un sol volum	es defineix un sol fluid	es defineixen els dos fluids segons una expressió	errors de càlcul, per una mala definició
es manté la definició d'un sol volum		es redefeix l'expressió i es simplifica	errors de càlcul, per una mala definició
es manté la definició d'un sol volum i s'afegeix una superfície d'interfase	es treballa amb un sol fluid però amb interfase		errors de càlcul, per una mala definició
es manté la definició d'un sol volum	es defineix un sol fluid	es redefeixen les condicions de les parets del túnel	El fluids segueixen un flux lògic dins el túnel, però amb deficiències
es manté la definició d'un sol volum	es redefeixen els punts d'unió de cada superfície		El fluids segueixen un flux lògic dins el túnel, però amb deficiències
es manté la definició d'un sol volum	es redefeixen els punts d'unió de cada superfície	es remalla els elements on hi ha variació del % de fluid	El fluids segueixen un flux lògic dins el túnel, però amb deficiències
es manté la definició d'un sol volum	es redefeixen els punts d'unió de cada superfície	S'ajusta el remallat, i les condicions d'aquest	Els fluids segueixen un flux lògic i coherent dins el túnel, i una correcta interacció amb el model

**taula 5:** procés d'obtenció del model de simulació

Tot aquest procés ha comportat una gran lentitud en l'evolució de l' estudi, molt marcat en la part inicial d' aquest, per problemes de definició de mallat, de condicions de contorn, errors

de càlcul i resultats no desitjats. Un cop s'ha assolit el model que treballa correctament dins el túnel virtual, amb una bona definició, i s'estudia el nombre d'hores de càlcul per obtenir uns resultats estabilitzats i correctes, llavors la resta del procés esdevé més fluida.

En la taula 6, s'esquematitza el nombre de proves i càlculs realitzats durant l'estudi per les diferents parts del procés i models simulats.

<b>Nº de proves</b>	<b>Part del procés</b>	<b>Simulació</b>
25	definició del model de treball	model de prova
6	definició de la precisió de càlcul	model 0
9	càlcul de resultats	passada i gir, model 0
2	càlcul de resultats	models de mercat
4	càlcul de resultats	models prototipus
9	càlcul de resultats	passada i gir, model T

**Taula 6:** esquema de proves i càlculs durant l'estudi

Un cop assolit aquest model acceptable, s'han dut a terme un seguit de simulacions variant temps de càlcul i condicions per buscar, el resultat que comportés menys desviació i més rapidesa de càlcul.

Cal remarcar que en una estació de treball del departament GREFEMA la simulació pot passar dies seguits calculant, fins assolir els valor preestablerts de residus. S'entendrà residu com la diferència entre un valor obtingut del càlcul i el proper.(veure Figura 27).

Estudi hidrodinàmic per elements finits de diferents pales simètriques  
per a la impulsió a rem en banc fix

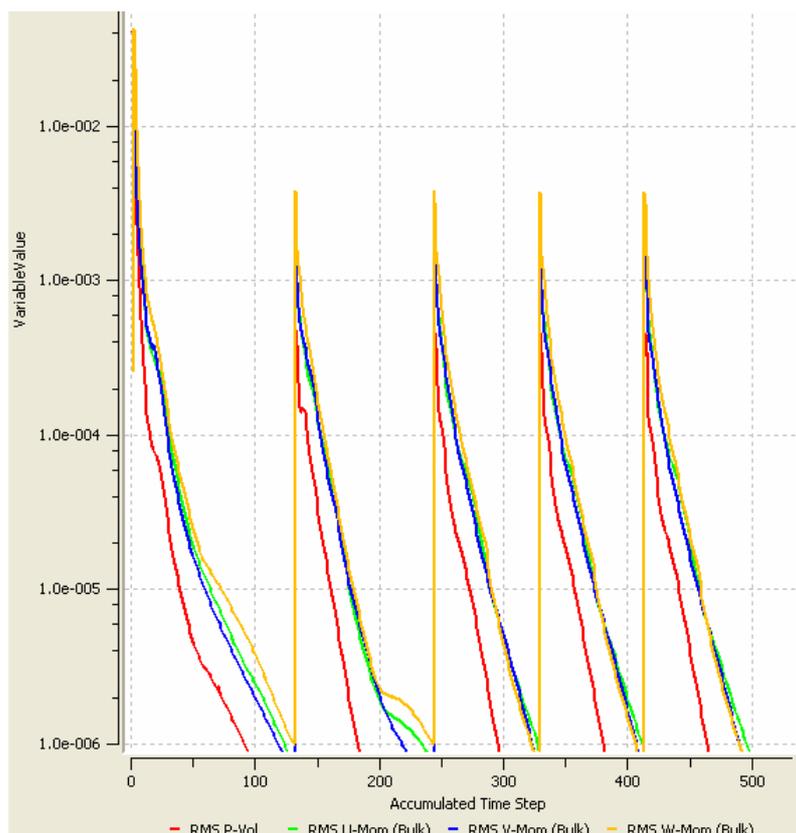
```

=====
OUTER LOOP ITERATION = 117 ( 1) CPU SECONDS = 2.380E+04 (1.948E
-----
| Equation | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solutic
-----
| U-Mom-Bulk | 0.00 | 1.3E-05 | 2.7E-03 | 2.4E-03
| V-Mom-Bulk | 0.00 | 8.5E-06 | 1.5E-03 | 2.5E-03
| W-Mom-Bulk | 0.00 | 2.1E-05 | 6.9E-03 | 1.4E-03
| P-Vol | 0.00 | 2.5E-08 | 1.2E-06 | 8.6 6.2E-03
-----
| Mass-Water | 0.00 | 2.2E-07 | 6.0E-06 | 5.5 4.4E-03
-----
| K-TurbKE-Bulk | 0.00 | 4.0E-07 | 6.4E-05 | 5.5 1.7E-04
| E-Diss_K-Bulk | 0.00 | 1.1E-07 | 6.2E-06 | 8.1 3.2E-05
-----
=====
OUTER LOOP ITERATION = 118 ( 2) CPU SECONDS = 2.402E+04 (2.391E
-----
| Equation | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solutic
-----
| U-Mom-Bulk | 1.33 | 1.8E-05 | 4.7E-03 | 2.4E-03
| V-Mom-Bulk | 0.80 | 6.8E-06 | 1.3E-03 | 2.4E-03
| W-Mom-Bulk | 0.86 | 1.8E-05 | 5.4E-03 | 1.4E-03
| P-Vol | 0.94 | 2.3E-08 | 1.1E-06 | 8.6 6.2E-03
-----
| Mass-Water | 0.94 | 2.1E-07 | 9.5E-06 | 5.5 4.2E-03
-----

```

**Figura 27:** en la imatge s'observen els residus de cada iteració

Aquest residu ha d'anar disminuint, tal i com es pot observar si es compara valor a valor el superior respecte l'inferior (excepte en el primer cas en que ha augmentat) la resta de resultats han anat disminuint, de manera que cada cop la definició sigui més precisa, tal i com indica la figura d, i es pot observar la disminució progressiva dels valors. (veure Figura 28).



**Figura 28:** gràfic dels valors de residus durant el càlcul

En el gràfic es veu les corbes de residus a mesura que augmenten les iteracions, els diferents pics que es veuen, són les puntes del remallat. Cada cop que s'inicia un remallat, al crear nous elements, l'error es torna a disparar en la propera iteració i torna a disminuir, i així successivament.

Finalment i un cop trobat el model correcte i les condicions de càlcul adequades, llavors s'han llançat a calcular tots els models previstos, que en total han estat 25 models simulats, en diferents dissenys, posicions i angulacions.

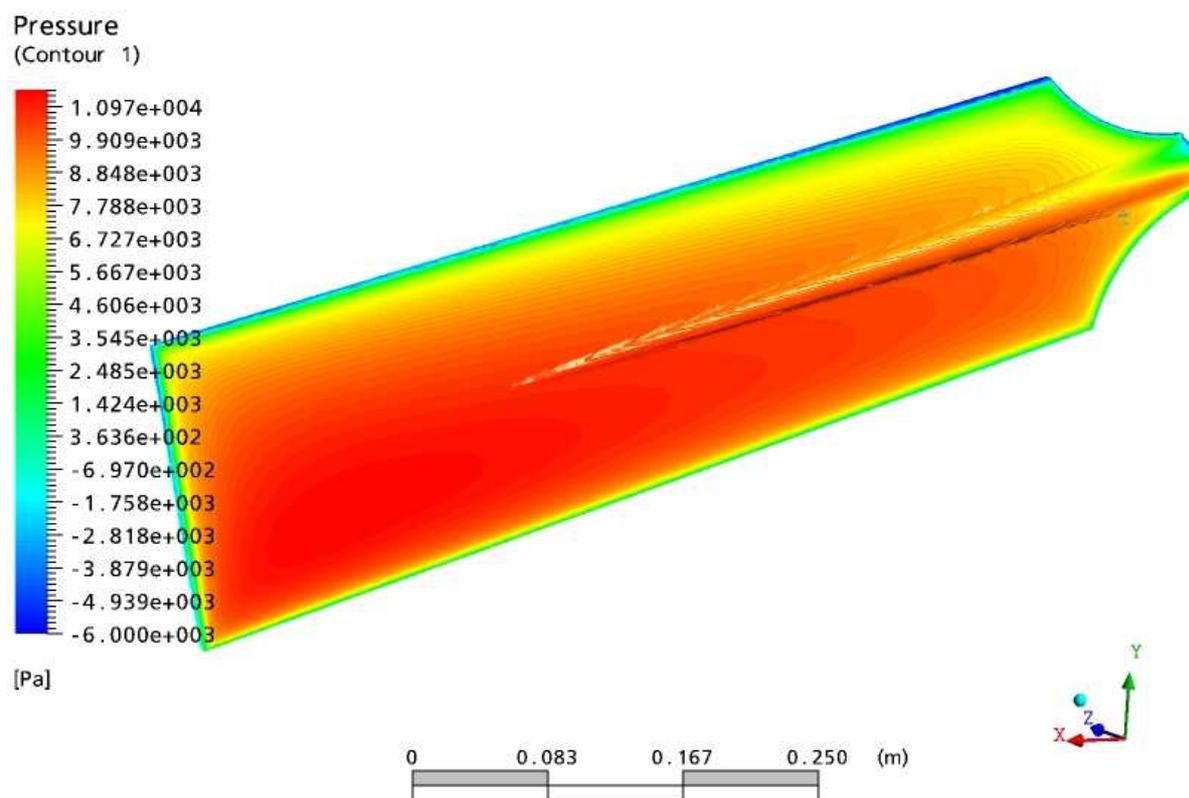
Totes les simulacions realitzades, es faran amb les mateixes condicions de definició de túnel virtual, les mateixes condicions de contorn, un mateix tipus de mallat i amb un nombre d'element molt similar, amb la finalitat d'aconseguir uns resultats comparables entre ells i fiables al mateix temps.

## 2.5- Resultats.

El programa CFX-Post permet disposar d'un gran nombre de dades i solucions gràfiques referents al càlcul executat sobre la simulació. De tots els valors disponibles, es treballarà amb els més adequats en cada cas, amb la finalitat de demostrar el rendiment de cada model simulat.

Primerament s'observarà en el model de referència ( col·locat a  $0^\circ$ ) l'afectació del flux al xocar amb el model i les pressions que rep (veure Figura 29).

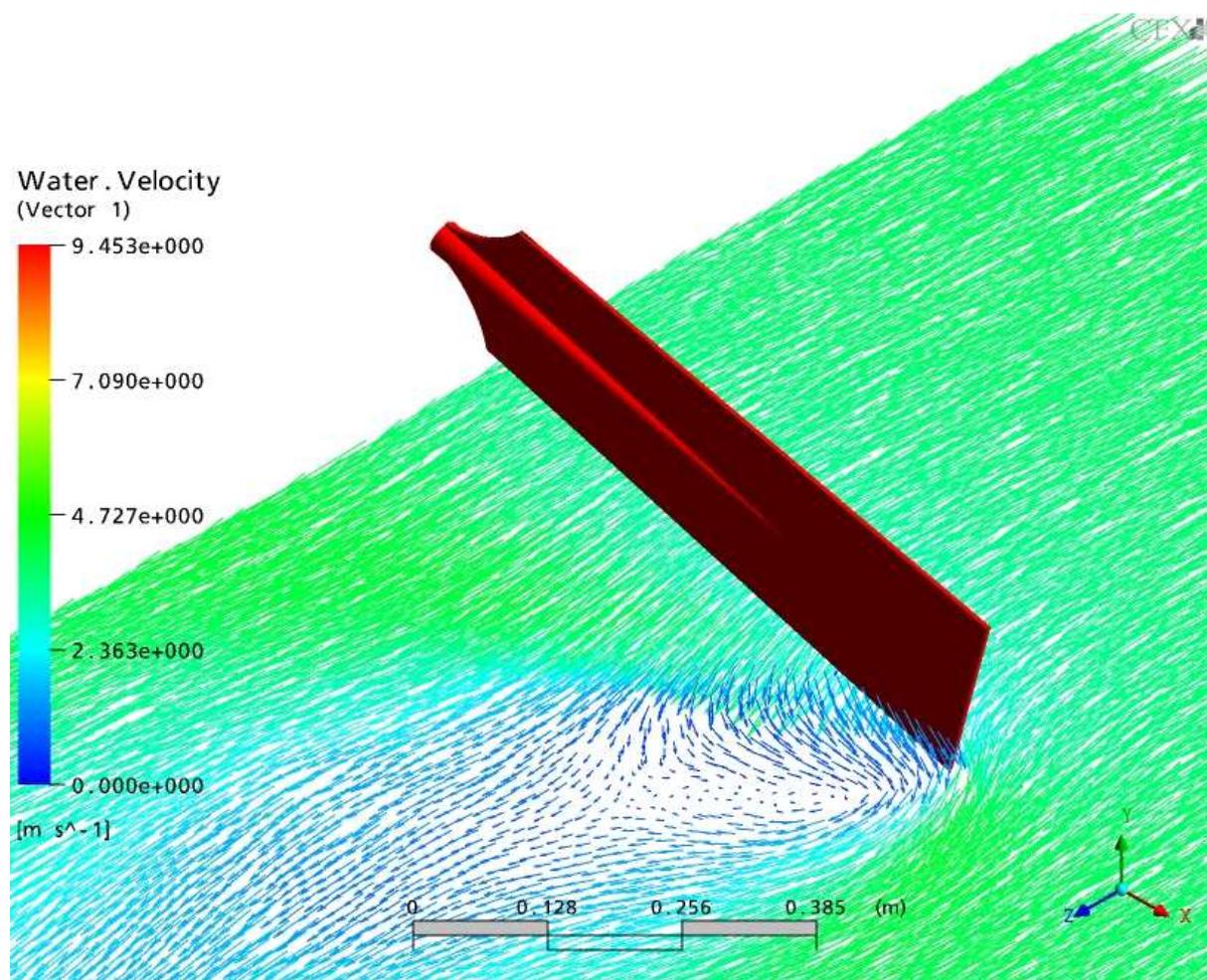
CFX



**Figura 29:** distribució de les pressions en la superfície del model, part davantera.

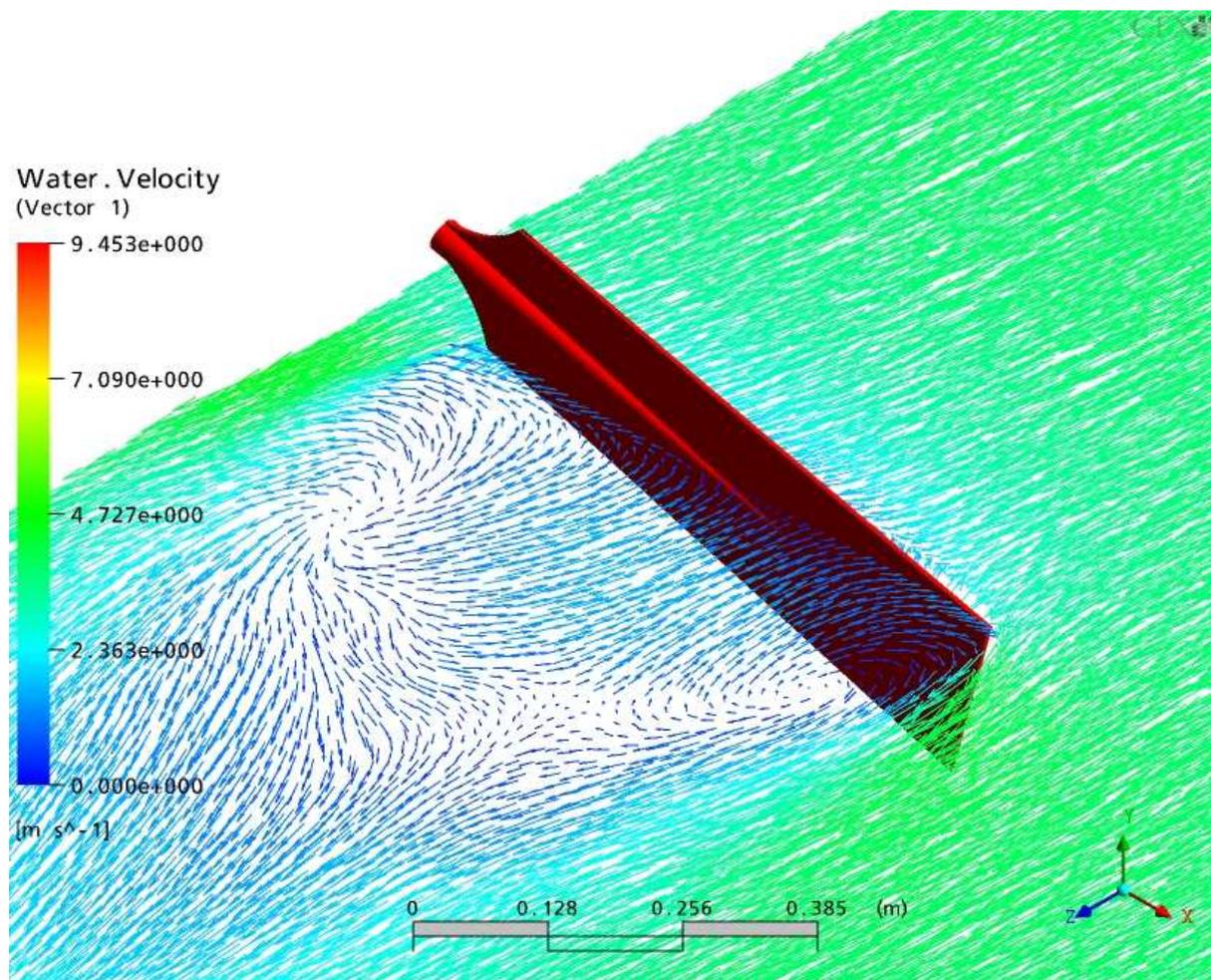
En la figura es pot observar la distribució de pressions en tota la part davantera del model a simular, tot el contorn del model està sotmès a pressions inferiors, debut a la circulació del flux en aquesta part. També es denota una major pressió en la zona més profunda del model , i en la zona més propera a la superfície uns valors de pressió inferiors

Per poder-ho veure correctament s'han simulat diferents plans paral·lels a la superfície, per poder observar mitjançant vectors la variació del sentit i intensitat de la velocitat,(veure Figures 30 a 32).



**Figura 30:** pla paral·lel a la superfície en la zona inferior del model

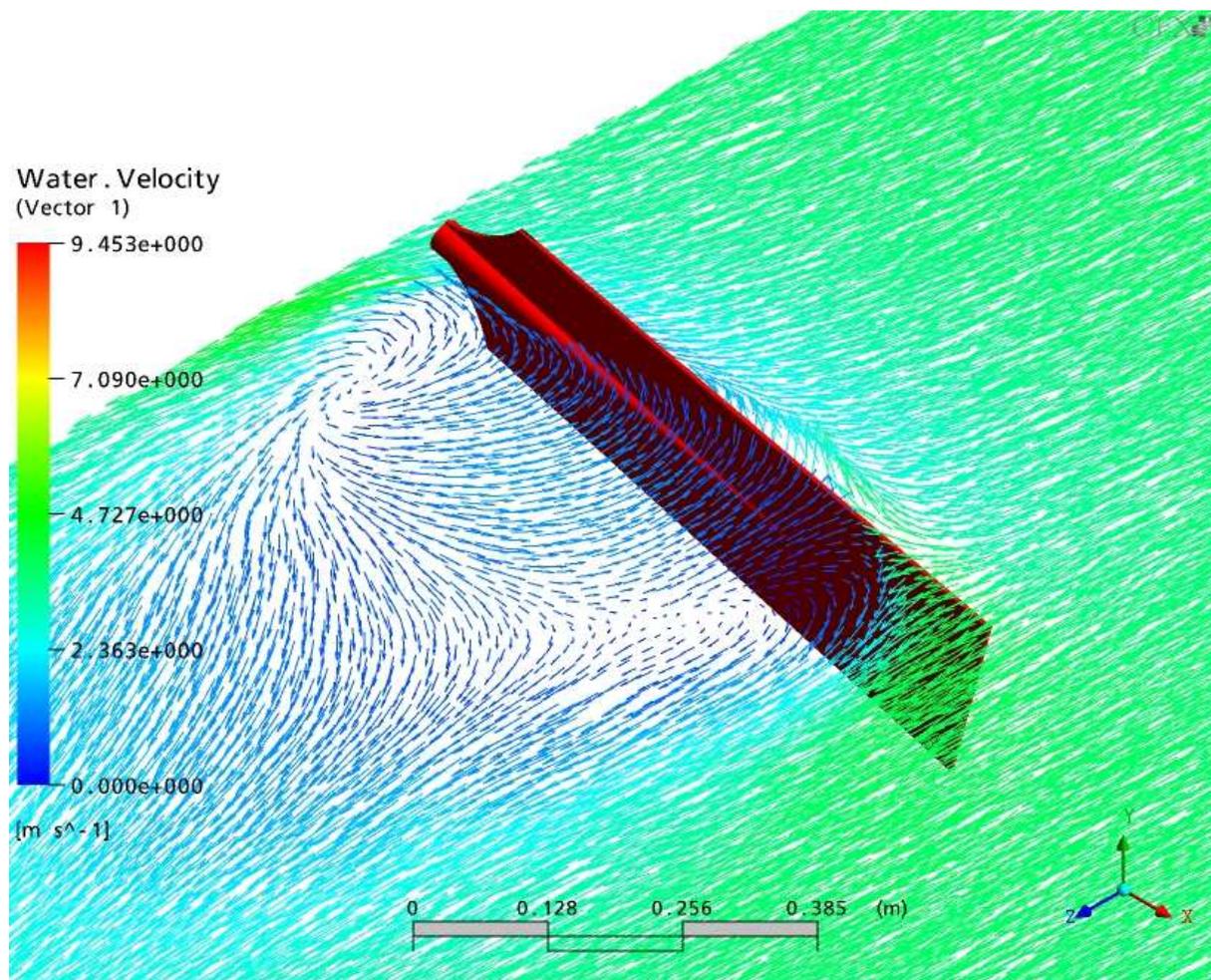
En la part inferior aquest flux ocasiona una turbulència en la part més profunda del model i l'afectació que rep el flux proper disminuint la seva velocitat tot i no haver estat en contacte amb el model.



**Figura 31:** pla paral·lel a la superfície en la zona mitja del model

En la part mitja es poden observar dos turbulències, una ocasionada per la zona que s'ha anomenat *canto final* i l'altre en la part anomenada *corba inferior* essent major la del canto final al tenir en la seva part inferior una secció major de superfície.

Les dos turbulències generades, creen una succió en la part de la pala posterior, a més de generar tota una zona d'afectació posterior al model molt gran, variant-ne la velocitat i sentit d'aquesta.

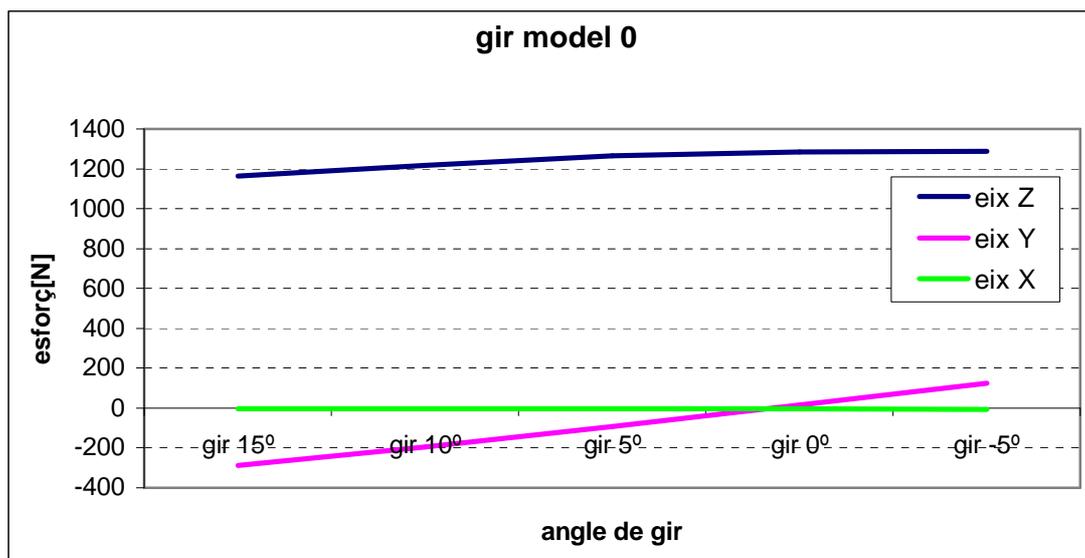


**Figura 32:** pla paral·lel a la superfície en la zona superior del model

En la part superior, l'afectació disminueix respecte la part mitja, i pren major intensitat la turbulència propera a la zona de la corba inferior, però allunyant-se més de la superfície de la pala posterior. La succió sobre la pala posterior, també es veu afectada i el fluxe a continuació del model no es veu tant afectat com en la part mitja, més en velocitat que en sentit.

Un cop visualitzats les diferents seccions del model de referència, cal estudiar les variacions en funció de les diferents posicions del model durant el gir.

Primerament s'obté un gràfic sobre esforços en el gir sobre els tres eixos, amb la finalitat de veure la distribució dels esforços en cada eix i en funció de l'angle de gir. Tal com mostra la Figura 33.



**Figura 33:** gràfic d'esforços sobre els tres eixos durant el gir del model 0

Clarament l'eix sotmès a més esforç és el Z, molt per sobre de X i Y. En canvi Y tot i treballar en valors inferiors i molt propers a 0, té un rang de treball més ampli, fluctuant molt més. I l'eix X, es podria considerar negligible, doncs els seus valors no varien i tenen valors molt baixos.

Separant els resultats obtinguts, tal i com es detalla a continuació, són per conjunt i per les parts que tenen major pes sobre el total del rem, desestimant així parts que les forces resultants sobre aquestes no afecten el resultat del conjunt.

Aquests resultats s'han separat en funció dels dos eixos de treball que intervenen en el cas del gir, que serien l'eix Z o perpendicular al rem i paral·lel a les línees de flux i l'eix Y, perpendicular a la superfície, provocant esforços per enfonsar més o menys el rem, generats pel gir aplicat sobre aquest.

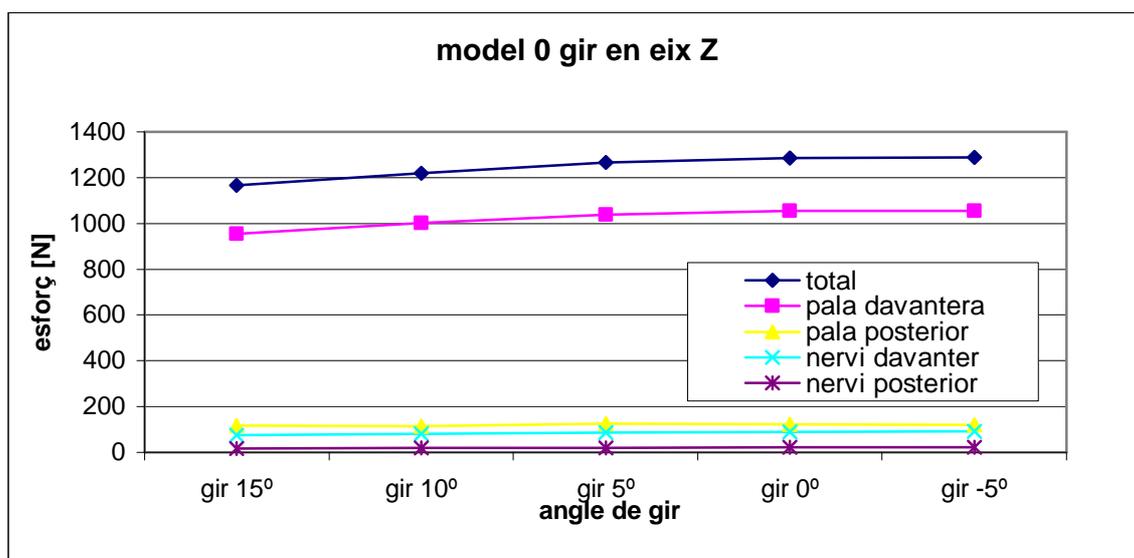
Els valors obtinguts en l'eix Z, són els que es detallen en la taula 8:

	gir 15°	gir 10°	gir 5°	gir 0°	gir -5°
<b>total [N]</b>	1165	1219	1267	1286	1288
<b>pala davantera[N]</b>	955	1002	1038	1054	1056
<b>pala posterior[N]</b>	116	115	124	123	119
<b>nervi davanter[N]</b>	74	80	86	89	92
<b>nervi posterior[N]</b>	18	19	20	21	21

**Taula 8:** valors obtinguts en l'eix Z, sobre el model en diferents posicions de gir

De les dades observades del conjunt, només es tenen en compte les referents al total (s'entendrà total com al conjunt del rem, format per totes les seves parts), a les pales posterior i davantera i als nervis, posterior i davanter. La resta de parts tenen uns valors negligibles per aquestes posicions d'estudi.

El valor que realment ens marcarà és el que fa referència al total, així doncs la previsió que s'havia fet en la posició 0, al disposar d'una major superfície exposada al flux, si que obté un dels valors més elevats, però es veu superada per molt poc, en la posició de gir -5°. La resta de valors són inferiors, gradualment. Si els valors obtinguts s'exposen sobre un gràfic (veure Figura 34) seran més entenedors.



**Figura 34:** gràfic esforços sobre l'eix X, en diferents posicions de gir del model

Es pot observar unes corbes molt planes pel que fa al total, com a la pala davantera. Tal i com s'ha observat a les taules, el total en la posició de gir  $-5^\circ$  obté un valor lleugerament superior al de la posició de referència 0, possiblement marcat per la turbulència, tot i això la diferència és mínima, i no es veu cap desigualtat en la corba obtinguda en el gràfic adjunt.

Les altres parts que conformen el rem, tenen uns valors molt inferiors i molt constants, que no influeixen en gran manera en el conjunt del rem.

Si aquests resultats s'analitzen de forma percentual, segons el gràfic adjunt (veure Figura 35)

S'observa que per angles allunyats la variació és major, i s'acosta progressivament al punt 0, i en el cas del gir negatiu, es manté, tot i que les corbes corresponents als nervis posterior i davanter segueixen la tendència que tenien en el gràfic.

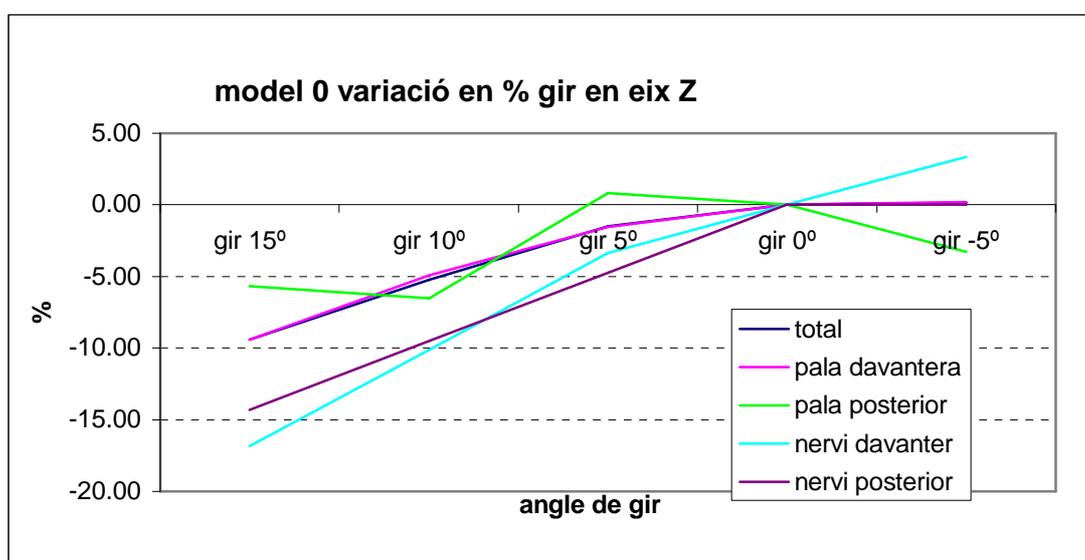
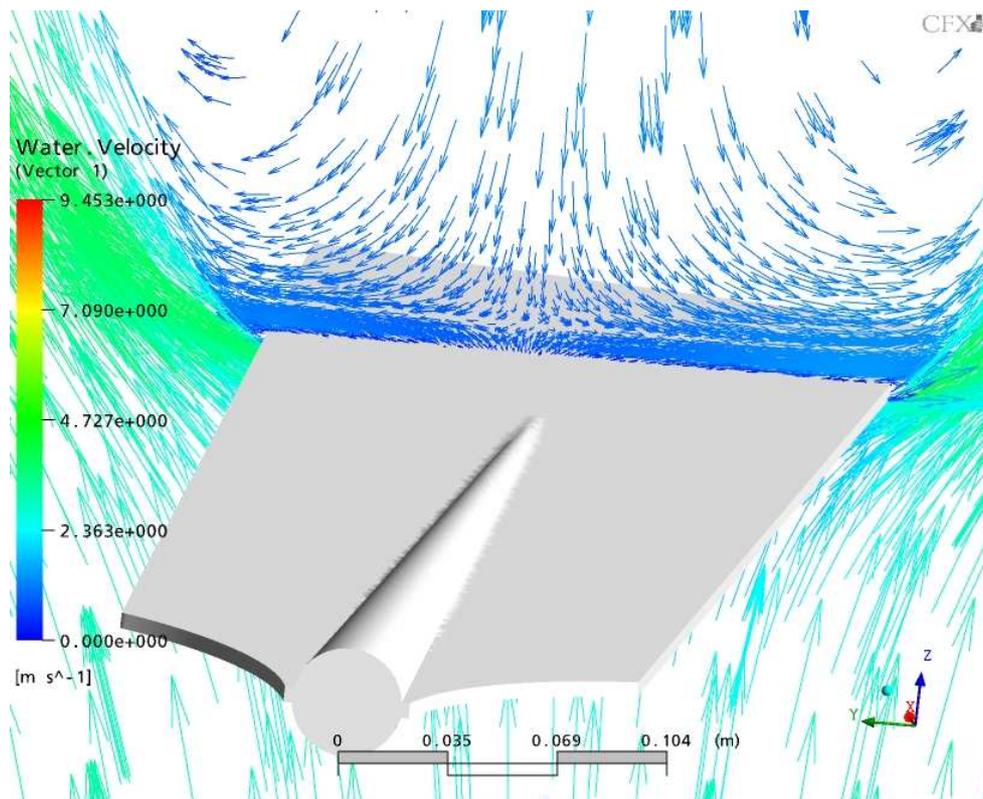


Figura 35: gràfic variació percentual dels esforços en el gir sobre l'eix Z

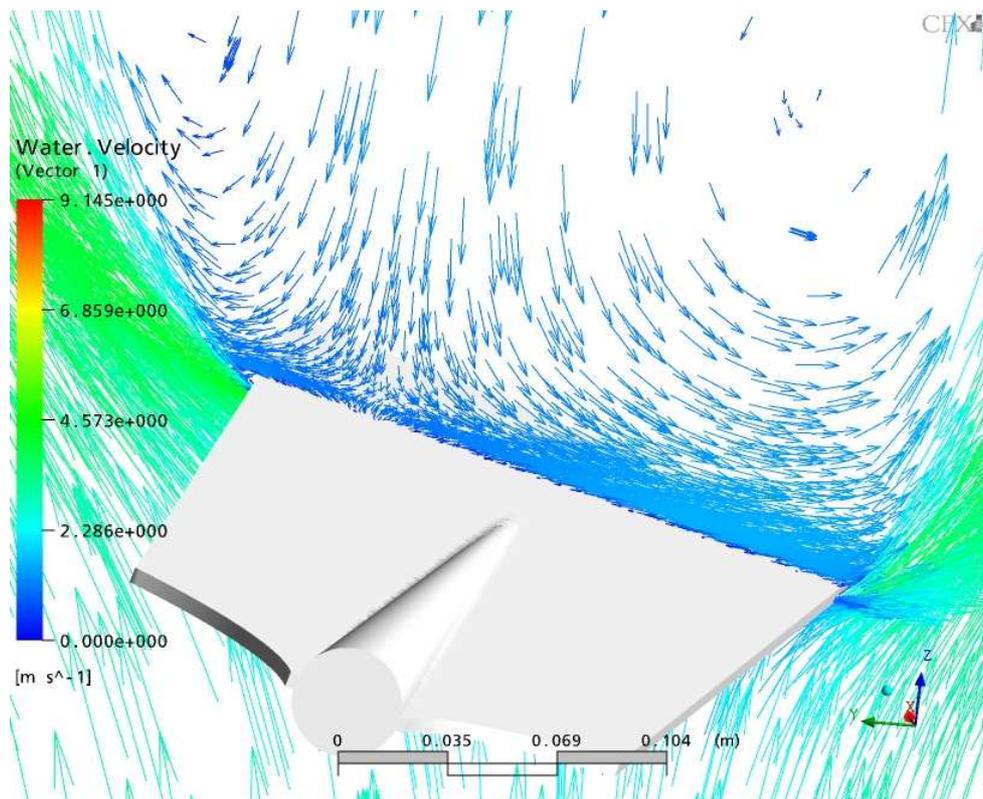
Per un millor anàlisi, s'analitzen diferents seccions fetes sobre el flux del fluid pels diferents angles de gir en que han estat simulats ( veure Figura 36).



**Figura 36:** simulació de flux sobre el model amb un gir de  $0^\circ$ , vista posterior del model

En la imatge obtinguda de la simulació (posició gir  $0^\circ$ ) es pot observar la direcció del flux, sobre la part posterior del model, es veu com es distribueix aquest uniformement sobre tota la superfície posterior de la pala, repartint per igual els esforços sobre la superfície.

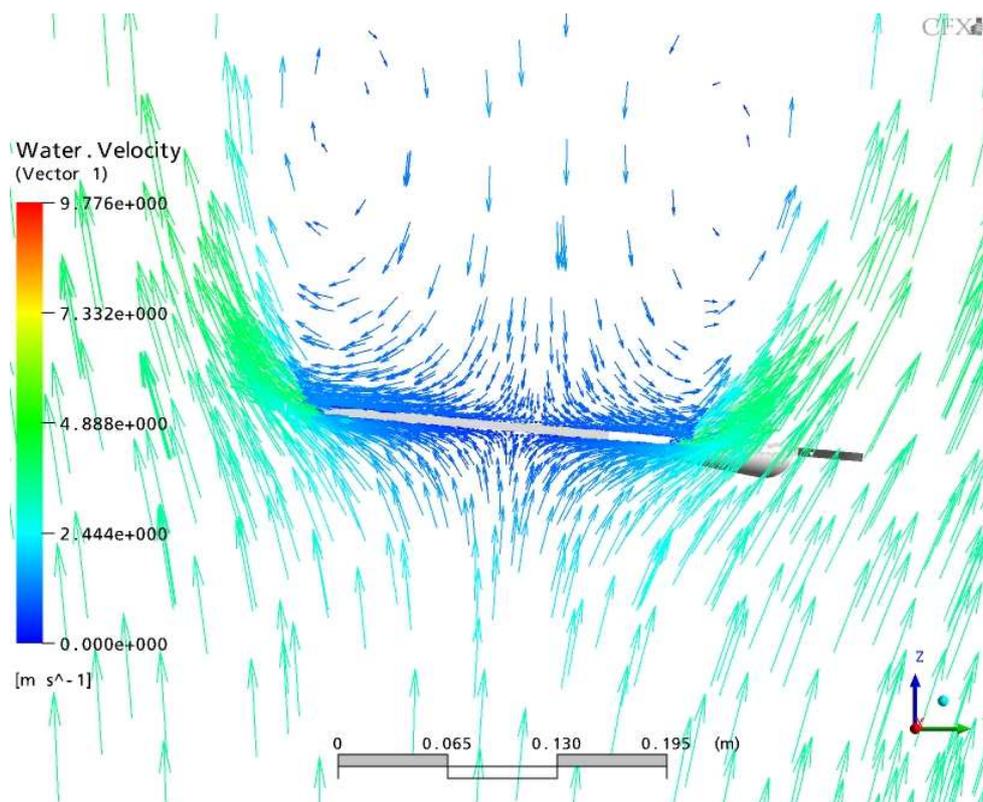
Per poder observar diferències s'observa una altra posició de gir amb major angle d'incidència (veure Figura 37)



**Figura 37:** simulació de flux sobre el model amb un gir de 15°, vista posterior del model

En aquest cas, es veu clarament la desviació del flux, ocasionat per la inclinació del model, sobre la perpendicular de la superfície, creant d'aquesta manera una turbulència més concentrada i a més velocitat sobre la part esquerra de la imatge i una turbulència de més amplitud en la part dreta, que gira a menys velocitat.

També es pot observar en la part dreta de l'imatge el xoc del flux a la part davantera i la disminució de velocitat que això comporta (canvi de color), en canvi en la part esquerra aquest fet no s'observa, veient-se un flux, seguit i homogeni. (veure Figura 38)



**Figura 38:** simulació de flux en el model amb un gir de  $-5^\circ$ , vista sobre eix X, en la part final del model

En aquesta imatge, amb una angulació de  $-5^\circ$ , en la part posterior s'observa un major flux en la part esquerra, marcat amb més línees de flux, al tenir  $5^\circ$  menys de gir que en la part dreta, on el flux passa amb més velocitat i més separat del canto.

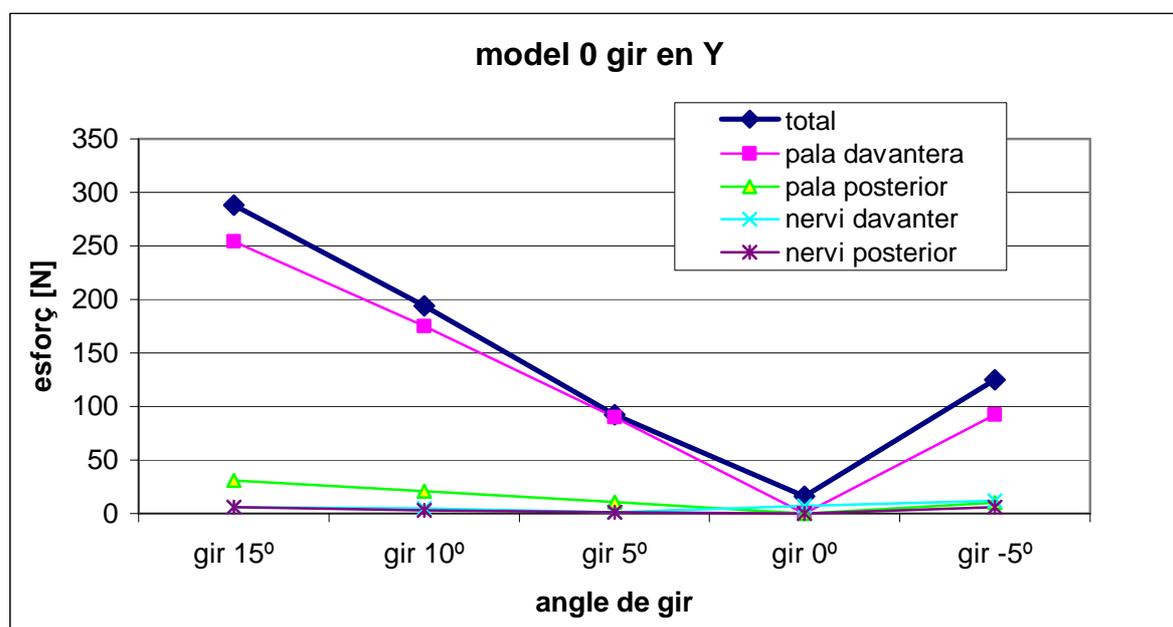
Les variacions de flux observades en les anteriors imatges, generen un moment sobre l'eix del rem, aquest fet es veurà reflectit sobre els valors d'esforç obtinguts sobre l'eix Y, tal i com es pot veure en la taula 9:

	<b>gir <math>15^\circ</math></b>	<b>gir <math>10^\circ</math></b>	<b>gir <math>5^\circ</math></b>	<b>gir <math>0^\circ</math></b>	<b>gir <math>-5^\circ</math></b>
total[N]	-288	-194	-92	16	125
pala davantera[N]	-254	-175	-90	0	92
pala posterior[N]	-31	-21	-11	0	10
nervi davant[er][N]	-6	-5	-1	7	12
nervi posterior[N]	-6	-3	-1	0	6

**Taula 9:** valors d'esforç obtinguts en cadascuna de les posicions de gir sobre l'eix Y

Tot i que els valors obtinguts estan per sota dels valors observats en l'eix Z, l'esforç que aquests ocasionen, es podria arribar a considerar nociu doncs empenyen la superfície del model fent que aquesta s'enfonsi més, provocant un esforça per evitar aquest enfonsament.

A diferència del cas anterior, en aquests valors es pot observar que com més s'allunya el valor del punt de 0° més augmenten aquests esforços, i en el cas d'angle negatiu, aquest augmenta encara més que el seu homònim positiu. Si s'observen sobre un gràfic ( veure Figura 39), es pot veure més clarament el seu comportament.

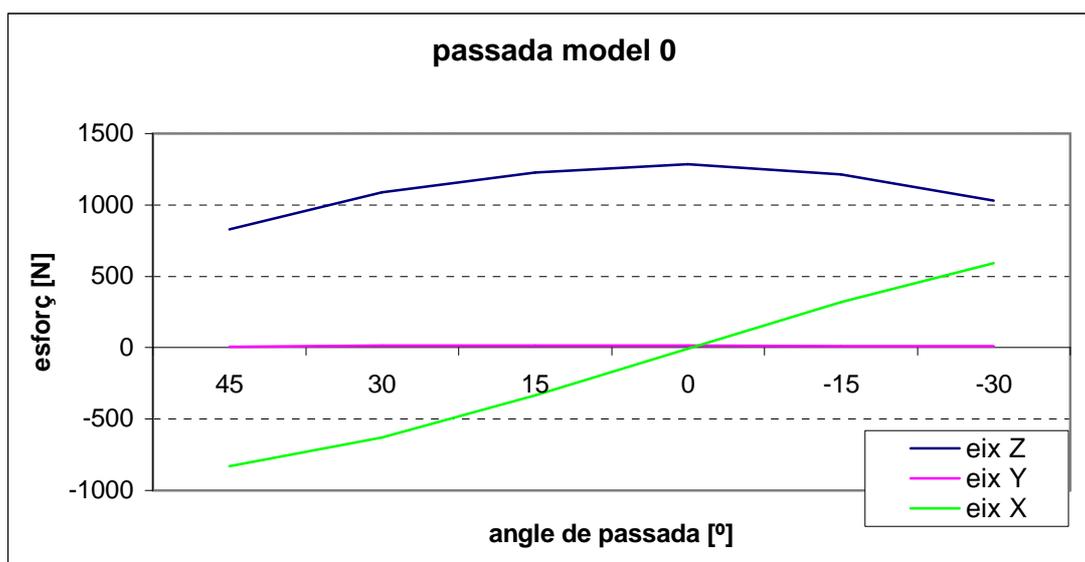


**Figura 39:** gràfic esforços sobre les diferents posicions de gir, sobre l'eix Y, expressats en valor absolut

A diferència del valors observats sobre l'eix Z, en l'eix Y el comportament es totalment lineal, el fet d'estar expressats en valor absolut no permet veure la totalitat de la linealitat, però per contra permet comparar els valors obtinguts en les posicions de +5° i -5°. Essent major el cas de -5°, si es recorda els valors obtinguts sobre l'eix Z, també superaven els valors obtinguts en el mateix angle positiu.

A diferència de l'eix Z, on aquest fet millorava el rendiment del rem, al obtenir un esforç positiu per al desplaçament en aquest cas l'esforç desenvolupat pel model, tot i ser major no ajuda al desplaçament si no que genera una força en direcció a la superfície, desplaçant el model cap a la superfície.

Referent als valors observats en el moviment de passada, es recorda que era l'escombrat que realitza el rem, desplaçant-se des de l'angle de més amplitud de valor positiu al de més amplitud en valor negatiu. En la figura Y següent es pot veure un gràfic on es poden veure els valors obtinguts sobre els 3 eixos. (veure Figura 40)



**Figura 40:** diagrama d'esforços en els 3 eixos de coordenades per l'angle de passada

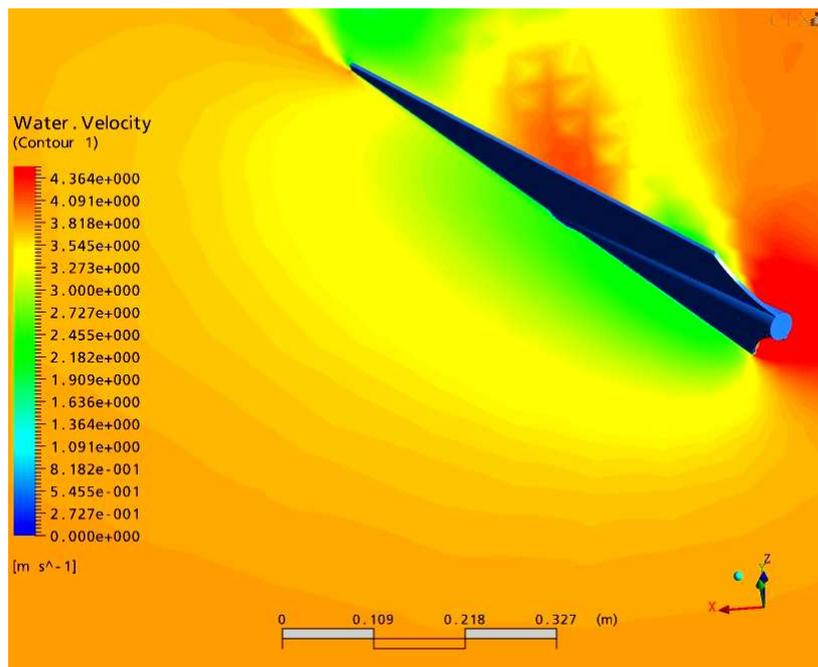
Clarament i com era previsible, l'eix Z seguit del Y, són els que tenen una càrrega de treball important per contra l'eix X, en aquest moviment (tal i com passava en el gir amb l'eix Y) no suporta cap càrrega o càrregues ínfimes.

El comportament que es podria preveure sobre el comportament dels eixos en aquesta simulació, on l'eix Z els valors han d'augmentar fins arribar al punt 0 o de referència i anar disminuint paulatinament, a mesura que es separa d'aquest.

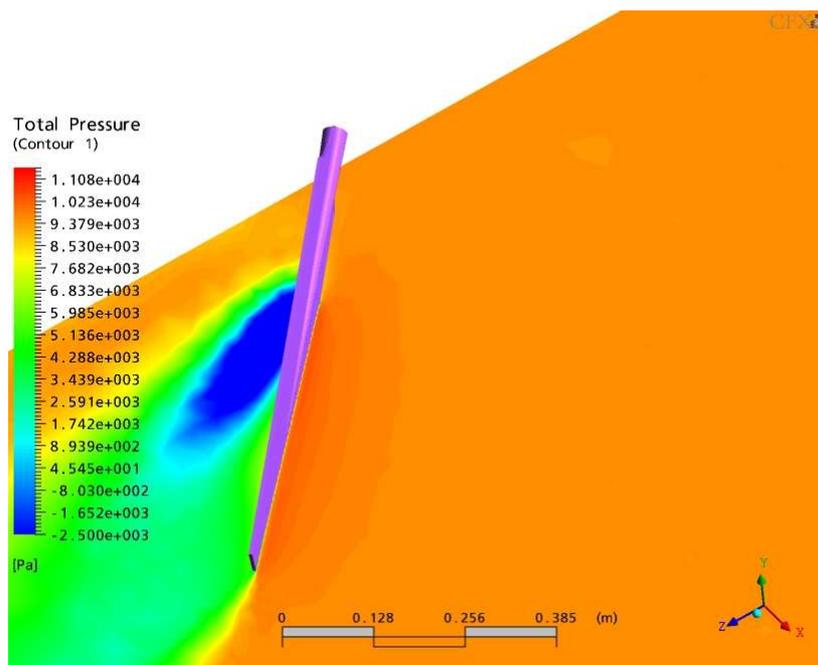
Sobre l'eix X els valors haurien de disminuir fins arribar al punt 0 on teòricament s'haurien d'anul·lar i augmentar a mesura que s'allunyen d'aquest punt, tant per angles positius com negatius. S'assimila a les corbes obtingudes en el gràfic.

Amb la finalitat de poder observar l'acció del flux sobre el rem, s'han realitzat un seguit de talls dins el fluid, i observant la fluctuació de les velocitats per les diferents posicions del rem.

A destacar que totes les figures estan obtingudes des de la mateixa posició d'observació i amb una mateix rang de velocitats i pressions, per tant el contrast de colors entre posicions és el mateix en tots els cassos. (veure Figures 41 a 53).

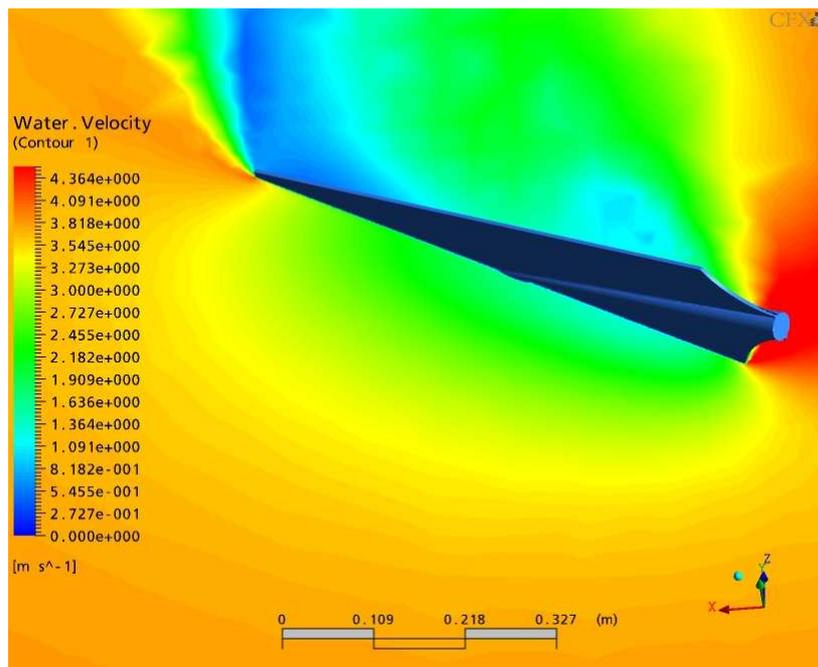


**Figura 41:** gràfic de velocitats del fluid, en un pla paral·lel al XZ a 220mm de la superfície, angle 45°

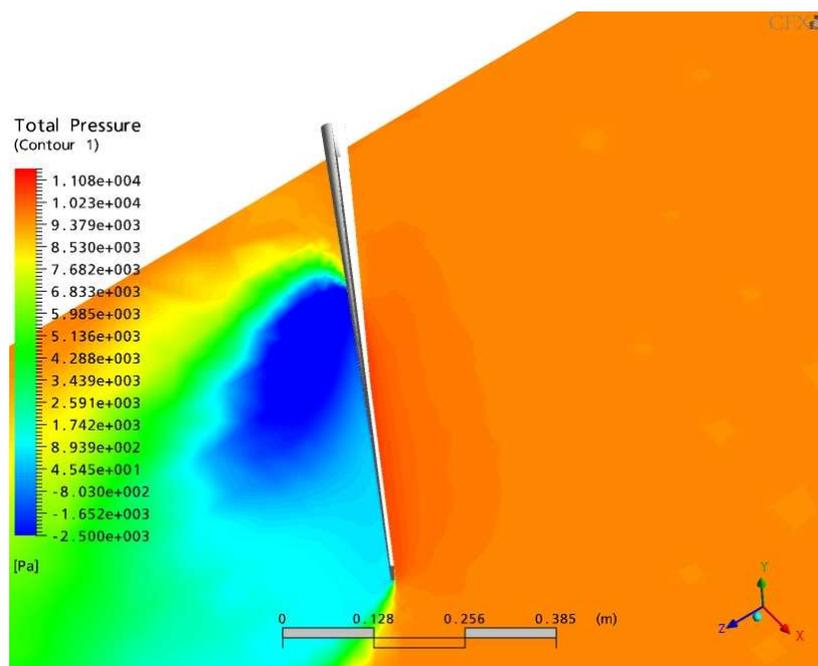


**Figura 42:** gràfic de pressions absolutes del fluid, en un pla paral·lel a XZ a 220mm de la superfície, angle 45°

En les figures es pot veure la distribució de velocitats i pressions per un angle de passada a 45°, en un pla intermig del model. Es pot observar la disminució de velocitat en la part davantera de la pala, que fa augmentar lleugerament la pressió. En canvi en la part posterior es veu un augment de la velocitat en la part posterior provocada per la turbulència formada al xocar amb el model, que es converteix en una forta depressió en aquesta zona.



**Figura 43:** gràfic de velocitats del fluid, en un pla paral·lel a XZ a 220mm de la superfície, i angle 30°



**Figura 44:** gràfic de pressions absolutes del fluid, en un pla paral·lel a XZ a 220mm de la superfície, angle 30°.

Sobre el pla a 30° es pot observar una seqüència similar a l'anterior, però la distribució de pressions de la part davantera és més ampla afectant tot el llarg de la pala, tot i disminuir molt la velocitat en la part posterior, la depressió creada afecta una major superfície posterior del model.

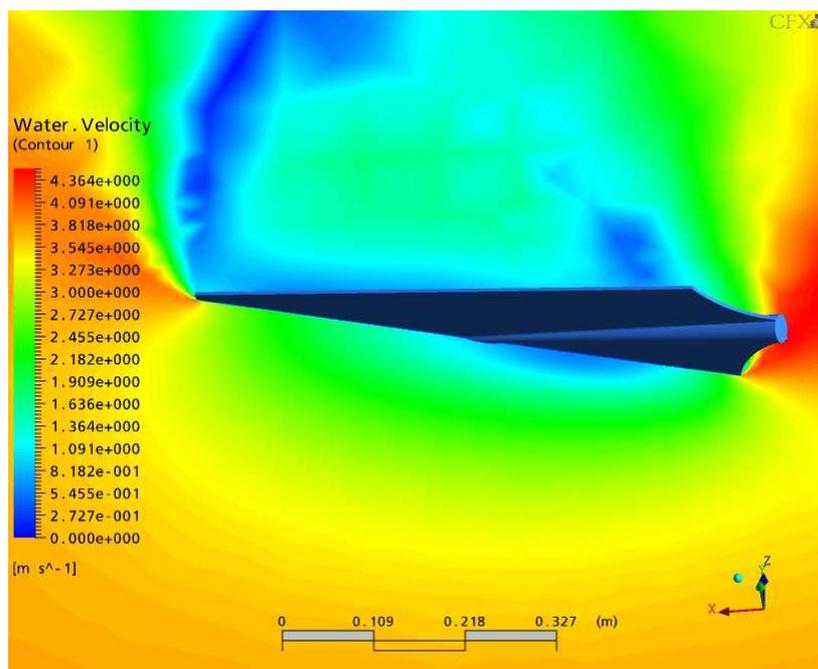


Figura 45: gràfic de velocitats del fluid, en un pla paral·lel a XZ a 220mm de la superfície, i angle 15°

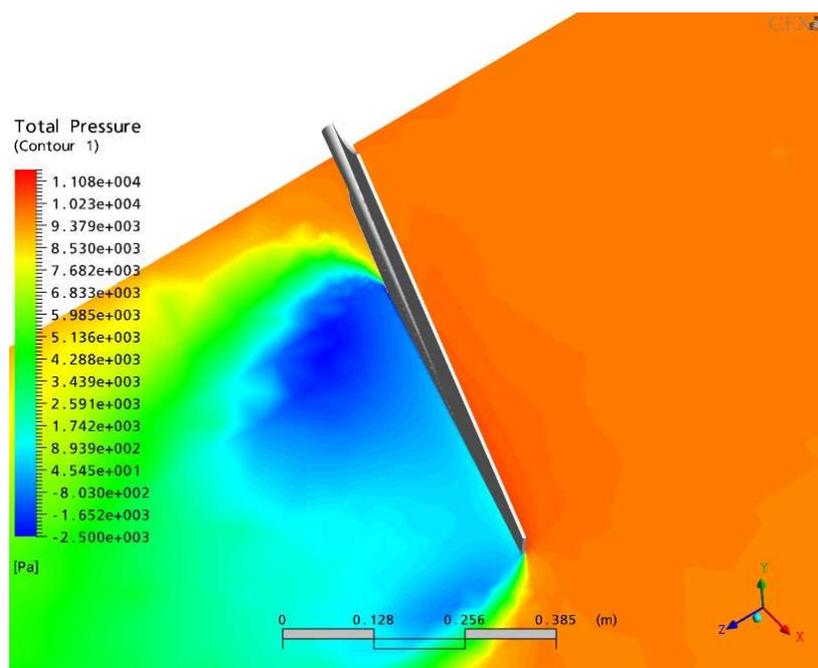
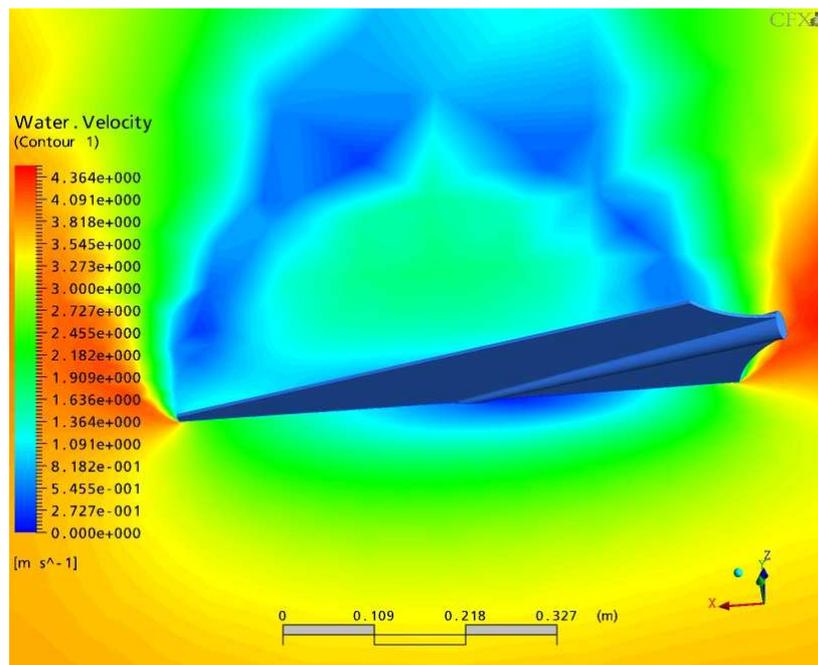
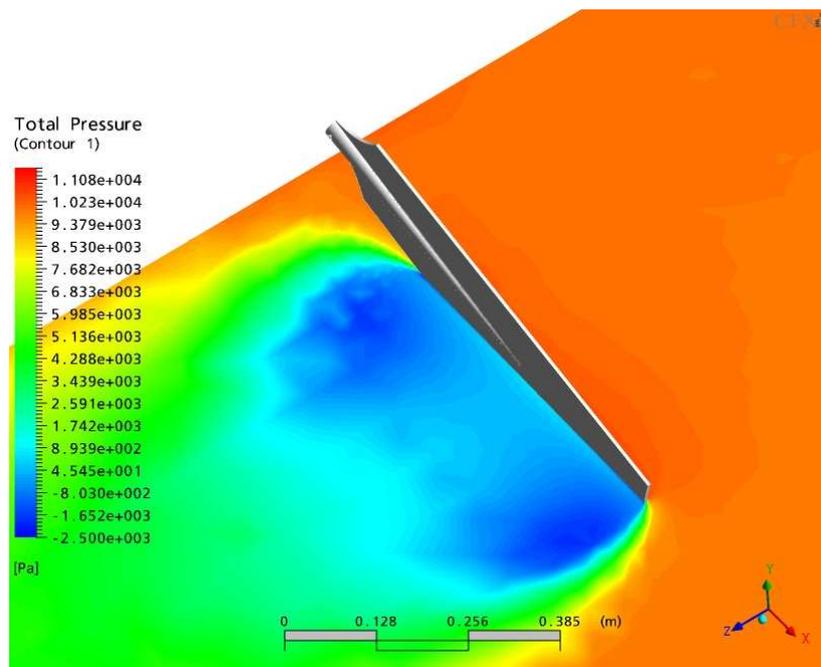


Figura 46: gràfic de pressions absolutes del fluid, en un pla paral·lel a XZ a 220mm de la superfície, angle 15°, vista posterior

en aquest secció del fluid, i amb un angle de passada de 15°, es pot veure una clara disminució de la velocitat en la part davantera del model (color blau) al mateix temps, en la part posterior es pot observar un creixement de la turbulència formada en la part posterior, arribant aquesta al canto final del model, el que repercuteix en una disminució de les velocitats i pressions sobre aquesta zona.

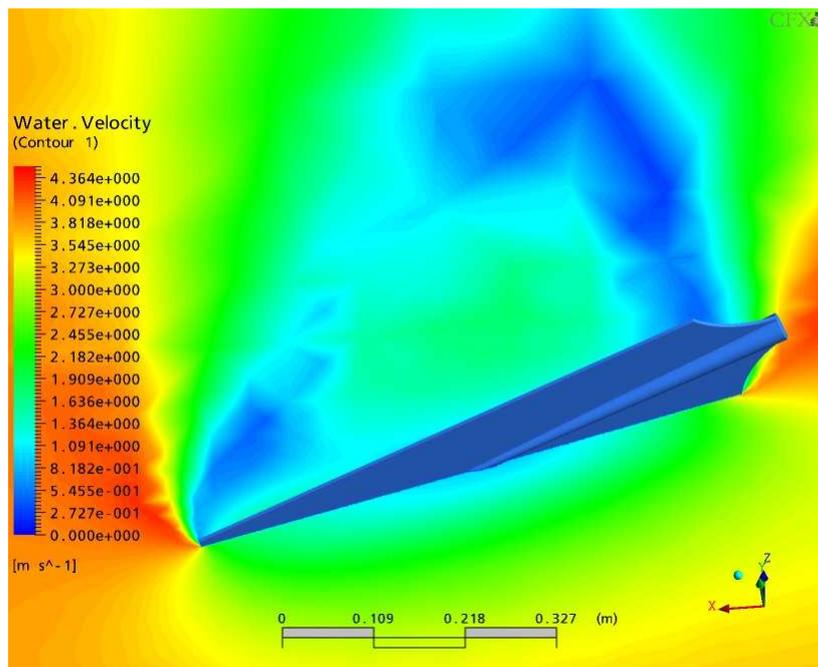


**Figura 47:** gràfic de velocitats del fluid, en un pla paral·lel a XZ a 220mm de la superfície, angle 0°.

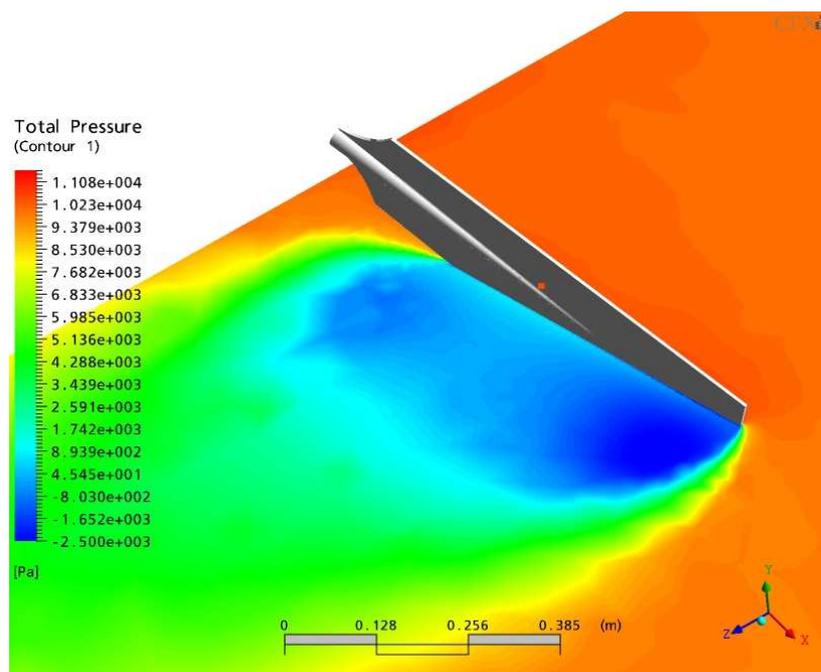


**Figura 48:** gràfic de pressions absolutes del fluid, en un pla paral·lel a XZ a 220mm de la superfície, angle 0°, vista posterior

En la posició de referència o 0°, el model té la màxima superfície exposada al flux, el que fa generar en la seva part posterior una turbulència elevada, distribuïda equitativament sobre la superfície posterior. En la zona davantera, la disminució de velocitat repercutirà en un augment de les pressions.

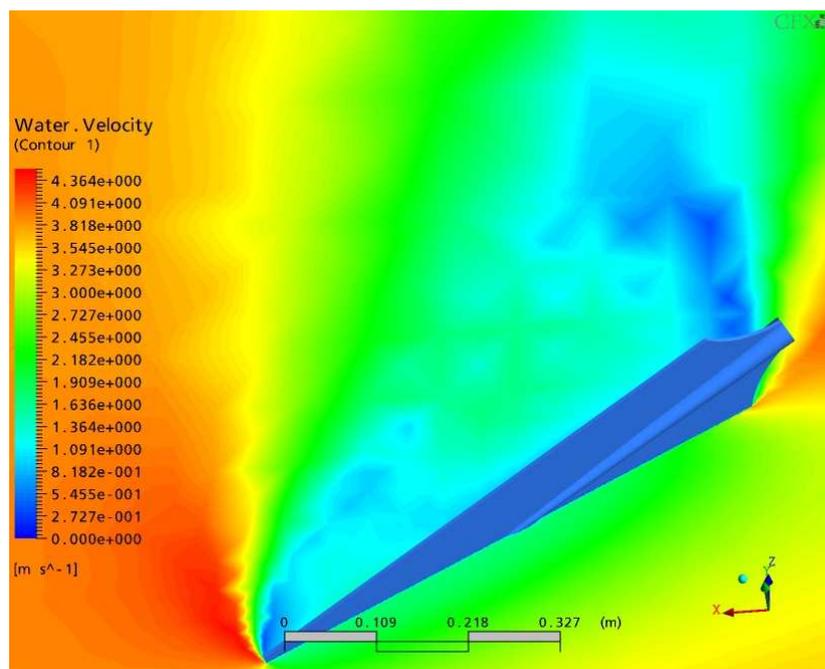


**Figura 49:** gràfic de velocitats del fluid, en un pla paral·lel a XZ a 220mm de la superfície, i angle -15°

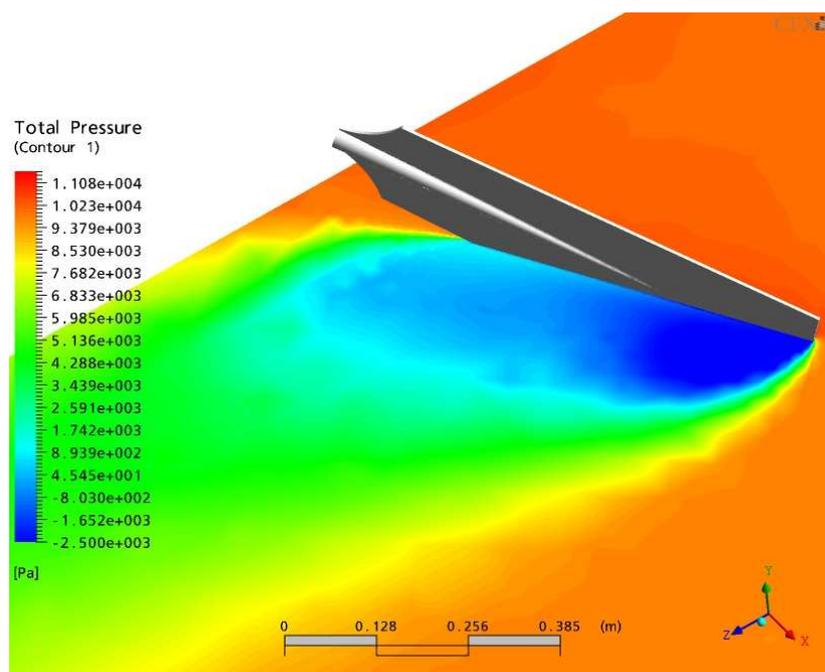


**Figura 50:** gràfic de pressions absolutes del fluid, en un pla paral·lel a XZ a 220mm de la superfície, i angle -15°, vista posterior

El diagrama de pressions de la part posterior del model es desplaça clarament cap a la part final del model, tot i que com es pot observar en el diagrama de velocitats, no marca una clara diferència, aquest fet ve donat per el vòrtex generat en aquesta zona.



**Figura 51:** gràfic de velocitats del fluid, en un pla paral·lel a XZ a 220mm de la superfície, i angle -30°



**Figura 52:** gràfic de pressions absolutes del fluid, en un pla paral·lel a XZ a 220mm de la superfície, i angle -30°, vista posterior

En la posició de -30°, es pot observar que tota la depressió s'ha desplaçat a l'extrem posterior del model, fet que ve donat per una forta turbulència en aquesta zona. En la part davantera, al no haver-hi una posició tan perpendicular al flux, no es percep una disminució tan brusca de velocitats.

S'analitzen els esforços obtinguts en el conjunt del rem, i es desglossen per les diferents parts amb valors més destacables, deixant de banda algunes parts, ja que el seu pes dins el total del conjunt és poc significatiu. Els primers valors obtinguts ( veure taula 10) són per diferents angles de palada en l'eix Z, o direcció d'avanç de l'embarcació.

	<b>45°</b>	<b>30°</b>	<b>15°</b>	<b>0°</b>	<b>-15°</b>	<b>-30°</b>
<b>Total [N]</b>	828	1087	1226	1286	1212	1030
<b>pala post. [N]</b>	249	224	145	122	117	150
<b>pala dav. [N]</b>	484	745	962	1053	1004	814
<b>nervi post.[N]</b>	44	42	33	20	7	1
<b>nervi dav.[N]</b>	54	69	86	89	81	65

**taula 10:** valors d' esforç obtinguts en l'eix Z, en el rem i algunes de les seves parts, expressats en N.

**Total** s'entendrà el conjunt del rem, conformat per totes les parts del rem.

**Pala davantera** : serà la part davantera de pala que xoca directament al flux.

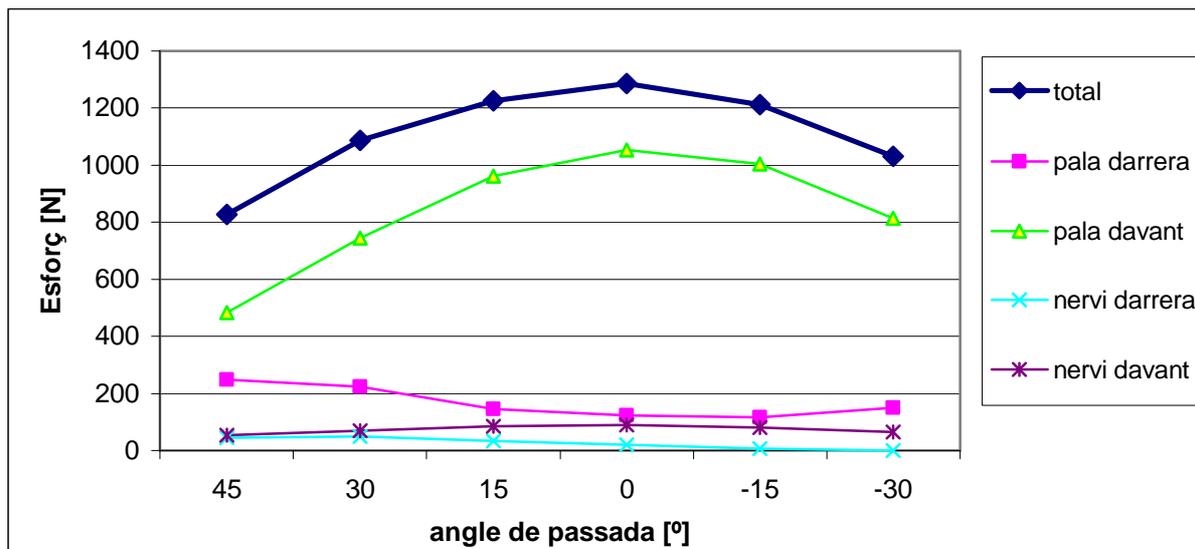
**Pala posterior:** serà la part posterior de la pala que rep tot el flux turbulent.

**Nervi davanter:** és la part davantera cònica que dona rigidesa al conjunt del rem.

**Nervi posterior:** és la part posterior cònica que dona rigidesa al conjunt del rem.

Les altres parts que conformen el rem, no s'han col·locat a la taula pel poc pes dels seus valors en el conjunt del rem.

Clarament la part que més influeix en el rem, i la que s'emporta un major esforç és la pala davantera, assumint valors entre el 58 al 83% en funció de l'angle de passada. La variació obtinguda en funció de la passada es gran, tal i com es pot observar en la Figura 53



**Figura 53:** gràfic d'esforços en l'eix Z en funció de l'angle de passada en la posició de referència.

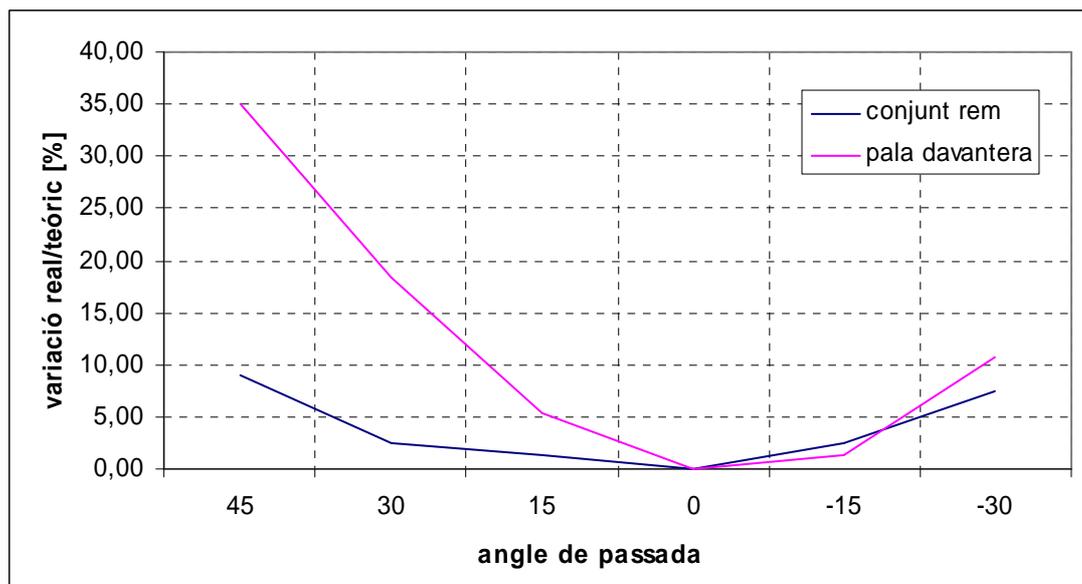
Els dos nervis tenen una influència mínima en el conjunt, a destacar que el nervi davanter disminueix pel fet d'allunyar-se de la posició 0. En canvi el nervi posterior, disminueix a mesura que avança la passada.

La pala posterior té un comportament invers al total, disminueix el seu valor a mesura que augmenta el total.

Això és debut al flux turbulent que s'accentua pel fet d'allunyar-se del punt 0, al ser més accentuat els angles entre la pala i el flux de sortida de la pala davantera.

Els dos valors més destacats i similars són el total i la pala davantera, que semblen seguir una tendència sinusoidal, arribant al punt màxim en l'angle 0.

Per contrastar aquest fet, es prendrà el valor 0 com a valor de referència i es buscaran els valors teòrics en funció de l'angle de passada. Tant pel total del rem i per la pala davantera, es contrastaran respecte els valors obtinguts del càlcul en % , en la Figura 54.

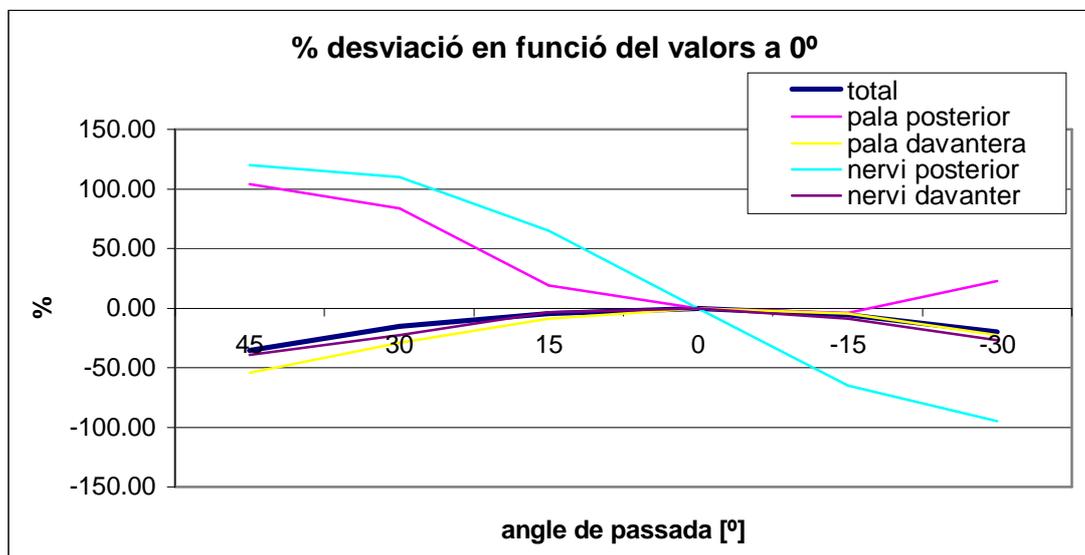


**Figura 54:** Percentatge de variació de les corbes d'esforços de conjunt rem i pala davantera obtingudes en l'eix Z, respecte a una corba teòrica sinusoidal, angles en [°] .

La variació del conjunt del rem, s'assimila molt a una corba sinusoidal. A mesura que augmenta l'angle, s'accentua la variació i més en angles negatius, aquest fet pot venir donat pels efectes turbulents a la pala posterior en aquests angles.

La pala davantera, la variació és molt més gran respecte al teòric, disparant-se molt en els angles d'inici de la passada.

Per poder observar amb més claredat la variació del valors observats sobre l'eix Z, es fa un gràfic, treballant en % de variació respecte el punt 0 o punt previst com de major càrrega, (veure Figura 55).



**Figura 55:** gràfic en % de desviació respecte el valors obtinguts a 0°

El total del conjunt, la pala davantera i el nervi davanter tenen una pèrdua, quasi bé paral·lela entre ells, essent les 3 corbes molt semblants.

En canvi, la part posterior té un comportament totalment diferent, tot i que les seves càrregues són molt diferents i en valors de rang més baix, En angles positius aquests valors són molt superiors al valor obtingut en el punt 0.

Tant la pala, com el nervi decreixen fins a arribar a l'angle 0, i llavors la pala torna a créixer més suaument, i en canvi el nervi té un decreixement del mateix ordre que en angles positius.

Cal comentar aquest comportament tant diferent d'aquesta part del model, tal com s'ha vist en les imatges de velocitats i pressions extrems per cada posició de passada, en les posicions més extremes, es creava un vòrtex a les cantonades.

En angles positius aquest vòrtex es generava en la part més propera a la canya del rem i sobre el nervi, en angles negatius es generava sobre la part final de la pala i allunyada del nervi.

Aquest fet és el generador d'aquests valors en la part posterior del rem, afectant la pala posterior en més o menys incidència en funció de l'amplitud de l'angle. I per la part del nervi, es veu afectada per si els angles són positius i el vòrtex generat proper al nervi o negatius i el vòrtex allunyat del nervi.

En els dos altres eixos de coordenades, els valors obtinguts sobre l'eix Y ( perpendicular a la superfície), són ínfims, al tenir una mínima superfície respecte aquest eix, per tant només , es contemplarà la variació que pateix en funció de la palada sobre l'eix X, perpendicular a l'embarcació. Primerament s'observen els valors obtinguts en el càlculs de la simulació (veure taula 11)

	45°	30°	15°	0°	-15°	-30°
Total [N]	-828	-631	-333	-5	319	591
pala posterior[N]	-244	-129	-39	0	32	88
pala davantera [N]	-480	-427	-256	0	267	467
Nervi posterior [N]	-45	-27	-7	0	2	1
Nervi davanter [N]	-53	-41	-24	-2	19	34

taula 11: valors d'esforç obtinguts en el model sobre l'eix X, per les diferents posicions de passada

Els esforços generats són elevats i no ajuden a l'avanç de l'embarcació, augmenten com més separats estan de l'angle 0° i arriben a valors pròxims o iguals als observats en l'eix Z. En el gràfic següent (veure Figura 56), es mostren els valors obtinguts.

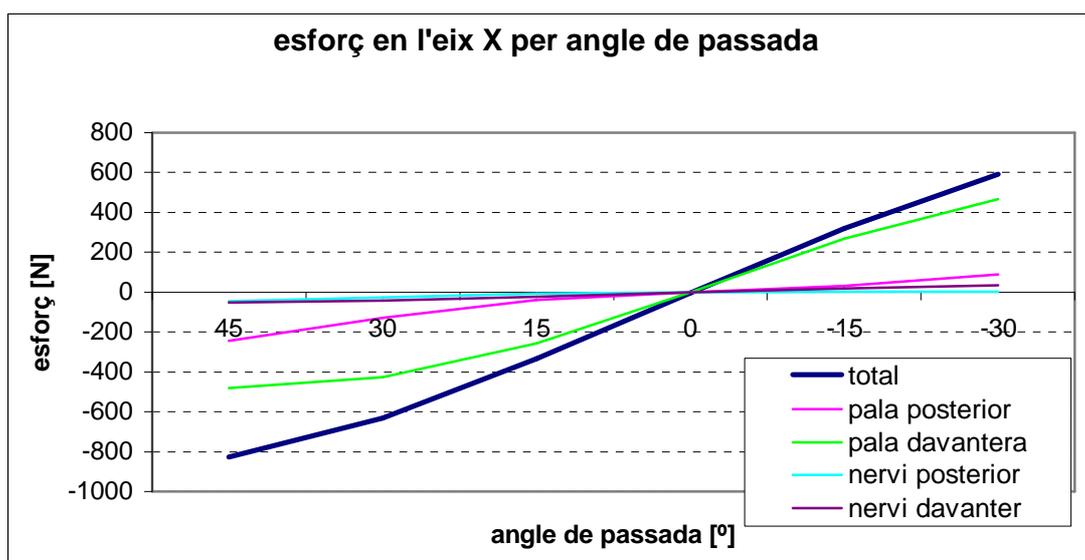


Figura 56: Gràfic d'esforços obtinguts en l'eix X, pels diferents angles de passada.

El comportament dels esforços en l'eix X, s'assimila al comportament observat en el gir sobre l'eix Y, on el seu comportament no seguia una corba, si no que tenia un comportament lineal i augmentava com més s'allunyava de l'angle 0°.

En tots els cassos en l'angle 0°, els valors arriben a 0. El comportament del conjunt es quasi lineal, en canvi les dos pales posterior i davantera, que són les dues parts que suporten més esforç, generen una lleugera corba inversa en els dos cassos.

Aquest esforç tot i no ser positiu per l'avanç del l'embarcació, es interessant alhora de fer maniobres de gir, doncs al generar esforços perpendiculars a l'eix de l'embarcació aquests influeixen directament sobre el rumb d'aquesta. Tot i disposar d' un sistema de direcció en forma de timó o similar, la repercussió d'aquests esforços sobre el conjunt embarcació/rem/timó, pot ajudar en els girs.

Doncs en la maniobra de ciavoga o gir mitjançant la remada normal per un lateral de tripulació i el moviment invers (ciar) en l'altre, si l'augment de l' esforç observat en angles positius s'aprofita i s' intenta potenciar aquesta part de la passada treballant més en la zona positiva , els esforços obtinguts obligaran a empènyer la part davantera de l'embarcació (proa) ajudant d'aquesta manera al gir.

### 3.- ESTUDI HIDRODINÀMIC DE MODELS DE MERCAT

#### 3.1- Introducció

Un cop estudiat el model de referència en diferents posicions i angles. Es simularan dos models diferents disponibles al mercat.

Tal i com s'ha esmentat anteriorment i com indica la normativa, qualsevol modificació del rem, obliga que aquest sigui simètric respecte els dos eixos de tall longitudinals.

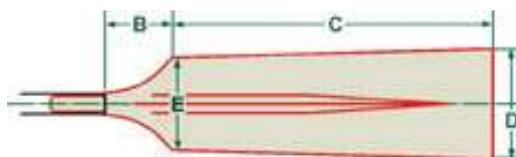
El model de referència simulat fins ara és un model que es podria considerar mig en les mides que posen a la disposició dels clients, i és el model aconsellat pels fabricants per la seva teòrica polivalència.

Antigament quan el material de construcció de remos era la fusta, s'utilitzaven remos més estilitzats, més estrets i llargs, aquest fet venia donat per tenir un rendiment teòricament millor, aquests remos, tenien certs problemes de flexió al tenir el seu centre de masses lleugerament desplaçat a més de ser tècnicament més complexos en el seu ús, per aquest fet han anat caient en desús amb l'entrada dels materials compostos en la fabricació de remos.

El cas contrari és el d'escurçar la llargada de la pala, i fent-la més ampla, d'aquesta manera la forma, quasi no varia respecte el model simulat anteriorment, però aquest escurçament no va lligat a una millora clara de les prestacions, al perdre la forma estilitzada de la pala.

### 3.2- Simulació dels models

Per part dels diferents fabricants de rem, permeten escollir unes diferents mides de pala al client, tot i que la majoria utilitza el model assajat anteriorment. Aquesta possibilitat no es gaire utilitzada entre els consumidors d'aquest tipus d'articles. Aquestes són les mides, segons es mostra en la Figura 57



**Figura 57:** denota les cotes importants de la pala del rem.

Les mides de pala que el fabricant deixa triar al client són C i D.

Per trobar diferències respecte altres models que es poden comprar es simularan dos models que seran, les dos mides més extremes en llargada i ampla. Al no variar la zona corbada propera al nervi, ni el mateix nervi i al mantenir en els dos casos la superfície total de les pales, els resultats obtinguts seran directament comparables amb el que ja es disposa del model assajat anteriorment.

La posició d'assaig serà la de  $0^\circ$ , tal i com s'ha pogut veure en la simulació prèvia al ser aquesta la que està sotmesa a una major càrrega de flux, i també segons estudis previs (Caplan & Gardner, 2007 i Macrossan, 2008) aquest angle és el de màxima sol·licitud sobre els models a simular (veure taula 12).

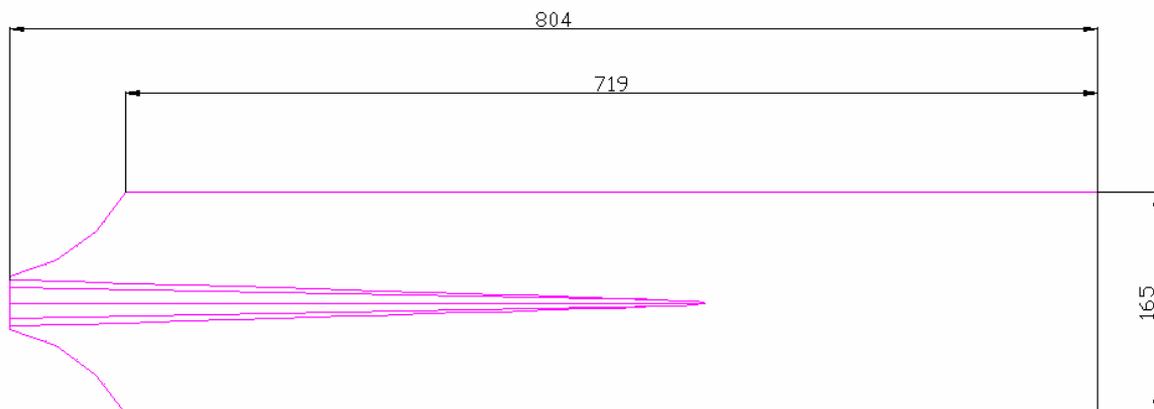
	Cota E [mm]	Cota C [mm]	Cota D [mm]	Superfície [mm <sup>2</sup> ]
Model referència	165	650	200	118.625
Model curt	165	616	220	118.580
Model llarg	165	719	165	118.635

**taula 12:** valors de variació en els diferents models de mercat

La generació del mallat en aquests models serà exactament el mateix que l' emprat anteriorment, al disposar de les mateixes superfícies, únicament variaran lleugerament les seves mides, el mallat serà molt similar fins i tot molt proper en nombre d'elements. Es farà el planxat amb les mateixes condicions amb la finalitat d'aconseguir una definició igual o molt similar a l'anterior.

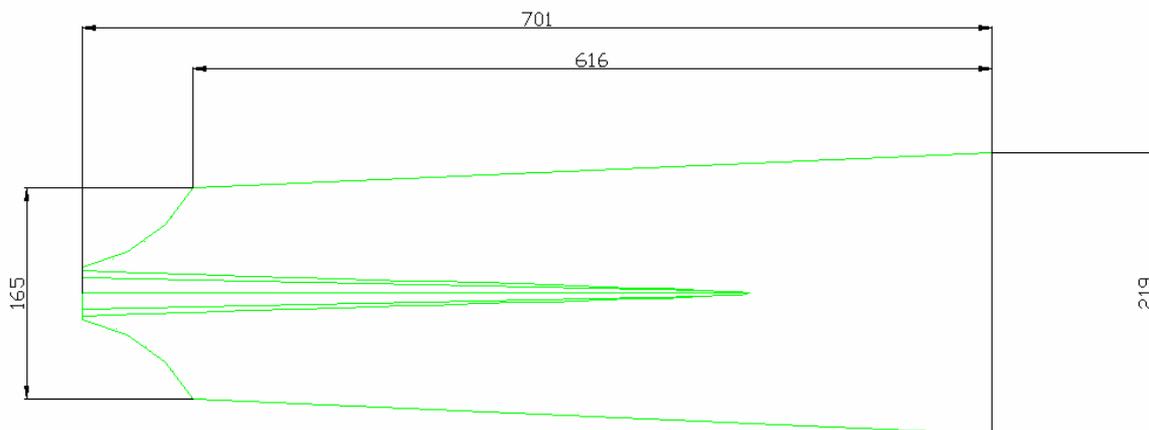
Pel que fa a les condicions de contorn en la simulació numèrica, també seran les mateixes, simulant els models sota la mateixa posició i les mateixes pressions i velocitats.

- model llarg: aquest model manté l'amplada a tot el llarg de la pala, essent per tant més llarga i entrant a més profunditat dins l'aigua. És manté la mateixa superfície, que en el model simulat anteriorment, a efectes de poder comparar els resultats directament. En la Figura 58, es poden veure les cotes més destacades d'aquest model.



**figura 58:** disseny model llarg, cotes en mm.

- Model curt: aquest model té la màxima amplada en la zona final de la pala, disponible pel proveïdor. Al mantenir la mateixa superfície total de pala, això implica que la llargada es veurà retallada essent aquest model més curt. En la Figura 59, es poden veure les cotes més destacades d'aquest model.



**figura 59:** disseny model curt, cotes en mm.

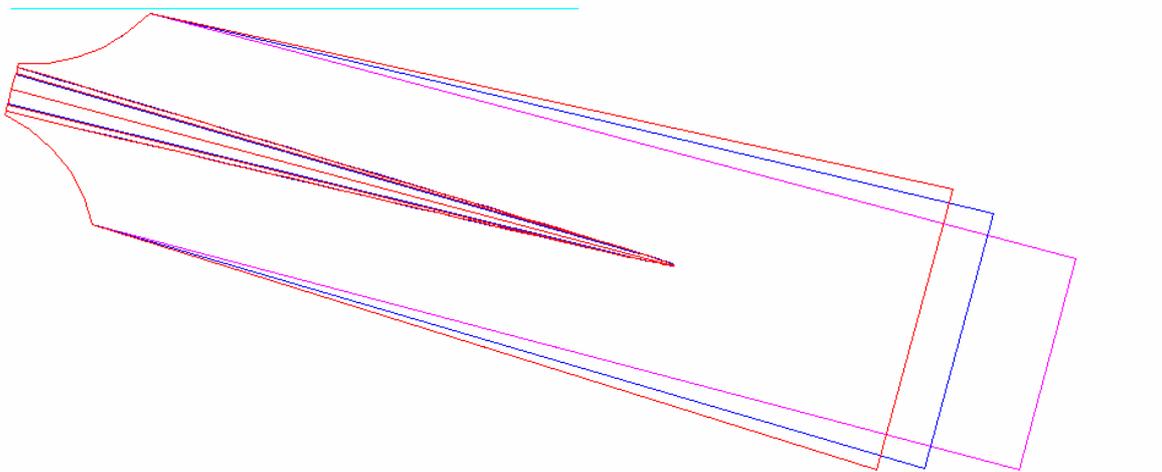
Possibles inconvenients d'aquest models, referents a la tècnica de remada.

Hi ha l'opinió generalitzada que un rem més llarg ha de variar l'angle d' entrada a l'aigua, precisament per la seva llargada.

A més de la dificultat que aquest suposa en la tècnica de la remada, que s'enfonsarà molt més, dificultant la passada en condicions d'onatge i al mateix temps en la part de recuperació aèria del rem, al haver de treballar amb angles més grans.

En l'altre cas el model curt, teòricament té uns angles de treball molt pròxims al model ja simulat, fins i tot millors, però en contra la seva figura poc estilitzada i l'opinió generalitzada comenta que en aquest tipus de models, el fet de que la seva part superior queda en una posició més propera a la superfície, els esforços exercits són menors.

Es fa un muntatge dels tres remos (veure Figura 60), sobre l'angle que s'ha estudiat prèviament, comparant així les possibles diferències existents entre els tres models. A partir d'ara al referir-se al model estudiat prèviament s'anomenarà model 0 o model de referència.



**figura 60:** muntatge superposant els tres dissenys de remos, i comparant les seves superfícies

Pel que fa a diferències d'angles, aquestes no existeixen doncs tots tres models s'enfonsen a la mateixa profunditat i per tant els angles dels tres cassos seran els mateixos.

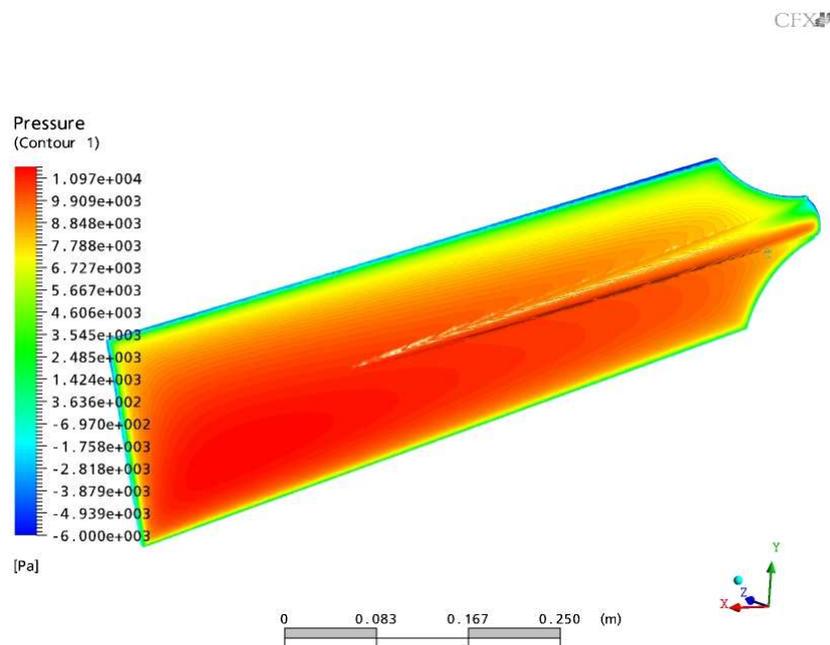
L'opinió referent a una major exposició a la superfície per part d'un rem curt, es podria qualificar d'ínfima, l'únic factor que podria arribar a influir seria la llargada, que en condicions d'onatge al estar lleugerament més allunyat, podria tenir més dificultats tècniques en condicions adverses.

El model curt a priori no tindria cap inconvenient doncs la seva proximitat amb la superfície és mínima respecte el model simulat anteriorment, i no fa preveure cap perjudici per aquest fet.

Així doncs sense cap desavantatge clar es procedeix a la simulació dels models en la posició de referència i es contrastaran amb els resultats obtinguts prèviament.

### 3.3- Resultats

Primerament s' observen els gràfics de pressions obtinguts del model 0 que s' utilitzarà com a referència i dels models curt i llarg. Aquests estan tretts de la part davantera dels diferents models amb la finalitat de contrastar la pressió exercida pel flux sobre la superfície, s'han mantingut les mateixes vistes i el mateix escalat de pressions (veure Figures 61 a 63).



**Figura 61:** diagrama de pressions sobre la superfície davantera del model 0 o model de referència.

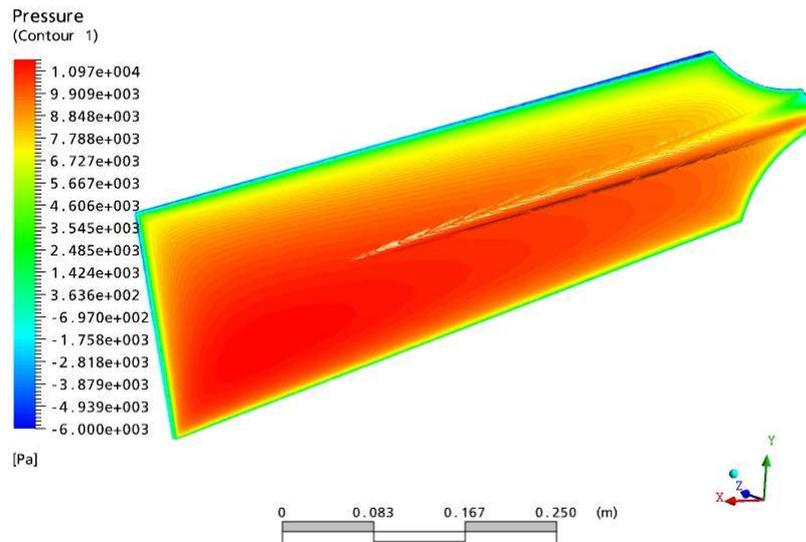


Figura 62: diagrama de pressions sobre la superfície davantera del model curt

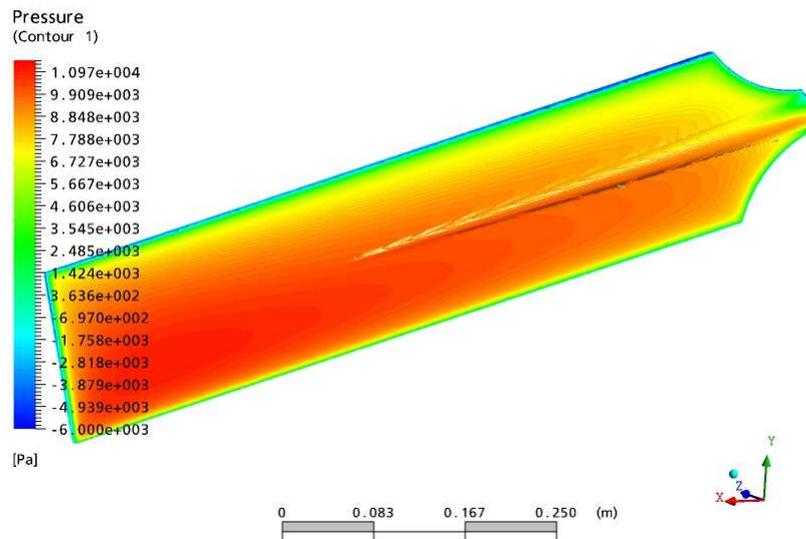


Figura 63: diagrama de pressions sobre la superfície davantera del model llarg

En tots tres cassos, la distribució de pressions sobre la superfície és molt similar, augmenta a mesura que el rem adopta més profunditat i en el canto superior és la zona sotmesa a menys pressió, es denota la diferència que aporta el nervi a ambdós laterals de la pala.

A priori i per la coloració dels diagrames semblaria que el rem curt té menys pressió en la part davantera, o almenys tindria una diferència més marcada entre la part superior i inferior de la cara davantera.

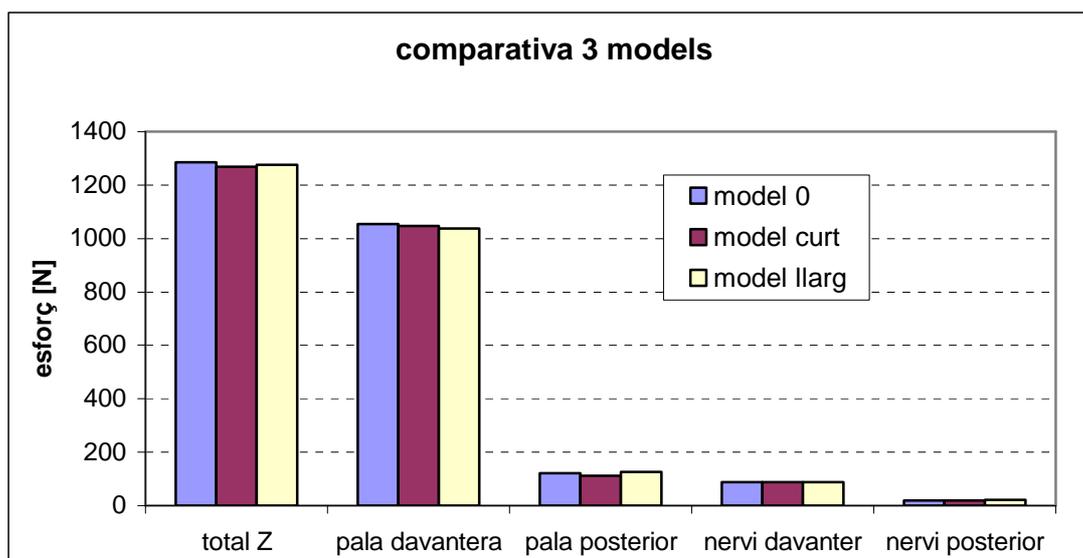
En la taula 13, es mostren els valors obtinguts d'esforços sobre l' eix Z, essent aquest el de màxima càrrega al disposar d'una major superfície d'exposició al flux.

	Total [N]	pala dav.[N]	pala post. [N]	nervi dav. [N]	nervi post. [N]
model 0	1286	1053	122	89	20
model curt	1270	1048	113	89	19
model llarg	1275	1038	127	89	21

**Taula 13:** Esforços obtinguts en els diferents models sobre l'eix Z

Primerament destacar la poca diferència entre tots tres models, tot i que a priori semblava que el model curt tenia menys pressió en la part davantera resulta que supera el model llarg en aquest camp, però resulta ser el de menor càrrega total.

A destacar del model llarg tot i tenir menys càrrega total que el model 0 o de referència, la seva pala posterior té una força d'arrossegament superior a totes les altres, al igual que el seu nervi. En canvi la seva pala davantera té un rendiment inferior. ( veure Figura 64)

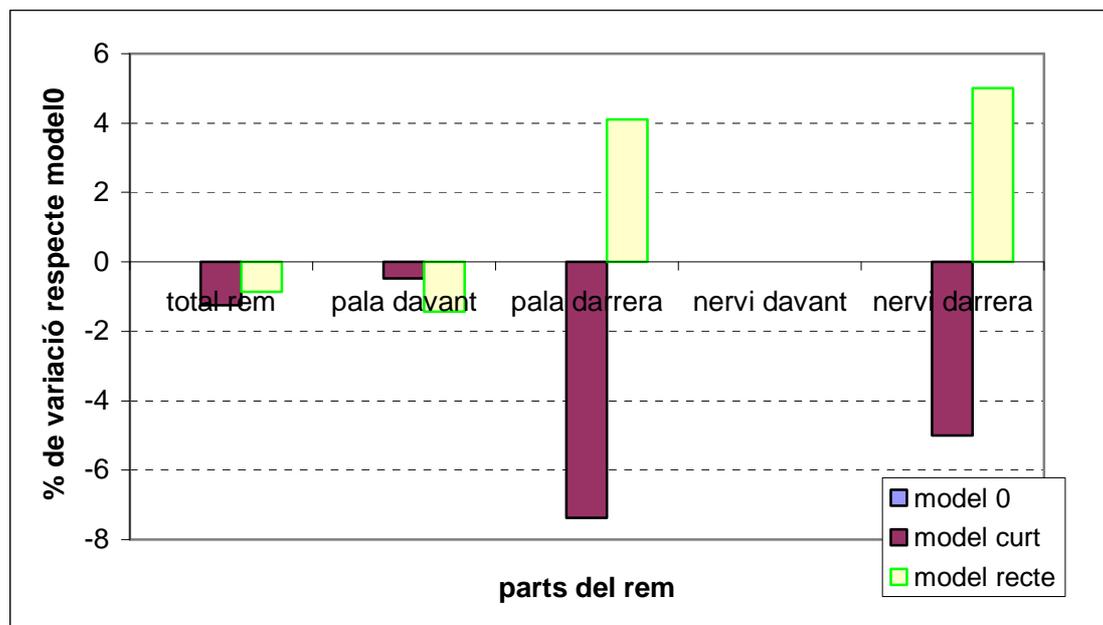


**Figura 64:** gràfic d'esforços obtinguts en l'eix Z, sobre les diferents parts dels models

En el gràfic no s'observen grans diferències entre els models estudiats, per a una millor visió de les dades obtingudes es procedeix a treure una taula ( veure taula 14) i un gràfic (veure Figura 65) en funció del % amb la finalitat de poder observar més clarament les diferències observades entre els models, aquestes variacions es prendran en referència respecte el model 0.

	total rem	pala davant	pala darrera	nervi davant	nervi darrera
model 0	0	0	0	0	0
model curt	-1,24	-0,47	-7,38	0,00	-5,00
model recte	-0,86	-1,42	4,10	0,00	5,00

**taula 14:** comparativa en % de les càrregues dels diferents models i parts, respecte el model 0 o de referència.



**Figura 65:** gràfic comparatiu en % sobre l'esforç en cada part dels models respecte el model 0.

En aquest gràfic es pot observar el rendiment inferior en el rem curt i llarg enfront el model 0 o de referència. Tot i que el model curt és el que té un rendiment més baix, la seva pala davantera treballa a més pressió que el model recte. En canvi la seva part posterior, té un -7% de rendiment enfront de la millora del 4% del model llarg, aquest fet es repeteix en valors aproximats per la part del nervi posterior.

Amb les dades obtingudes es pot dir que el model llarg té un millor rendiment respecte el model curt, aquest fet pot venir donat per una major superfície de treball, més allunyada de la superfície de l'aigua. Tot i que en cap dels dos cassos es supera el model de referència.

Anteriorment en la fabricació de remos (Francisco, J.M. 1996) es comenta que la tendència havia estat a fer-los més llargs i estrets amb una superfície de pala molt més gran i estilitzada, el que obligava a enfonsar una part més gran de rem. La tendència mica en mica ha estat d'escurçar-los, fins i tot a fer-los molt més petits, tendint cap a una forma molt més quadrada, per concentrar molt més els esforços i disminuir la distància de qualsevol punt de la pala al centre de d'aquesta, i evitar així flexions indesitjables.

La tendència actual és a treballar amb pales com la simulada en primer lloc, o amb pocs mil·límetres de variació respecte aquest model, les diferències obtingudes demostren la poca variació de cada cas.

Possiblement les diferències més importants entre els dos models estudiats serien els seus avantatges o inconvenients en l'apartat de tècnica.

Punts que facin referència a la comoditat de la palada, temps de cicle, resposta de la canya, estabilitat de la pala, però per la part hidrodinàmica les diferències són ínfimes.

Amb els resultats obtinguts, es pot afirmar que el model estàndard té un funcionament lleugerament millors als altres models. I que els canvis de forma, provocats per un escurçament o allargament de la superfície de la pala, no milloren el rendiment d'aquesta.

## **4.- ESTUDI HIDRODINÀMIC DE MODELS PROTOTIPS**

### **4.1- Introducció**

Un cop obtinguts els resultats dels models disponibles al mercat, i en veure que les diferències obtingudes al variar la llargada o amplada de la pala dins les mides permeses pels fabricants, no suposa una diferència en l'apartat hidrodinàmic, es passa a fer simulacions amb diferents dissenys.

Aquests dissenys es consideraran prototips, doncs no estan disponibles al mercat, i només pretenen, trobar un comportament millor que els models simulats anteriorment, amb unes mateixes condicions.

En tots els cassos a simular és mantindrà la simetria del model i la superfície de la pala. Amb la finalitat de la millora s'incidirà en dissenys alternatius, aprofitant els resultats obtinguts fins el moment i un cop observat el comportament dels models simulats.

Els models a simular, estan concebuts amb la finalitat d'aprofitar formes o conceptes d'altres esports o medis. No s'esperen uns grans resultats, doncs estudis previs de banc mòbil així ho demostren (Macrossan M. 2008)( Caplan & Gardner, 2007), les millores observades en altres cassos són de percentatges molt petits.

Però al mateix temps cal comentar que les diferències en aquest esport són mínimes, per tant qual aprofitar qualsevol millora per petita que sigui.

## 4.2- Simulació dels models

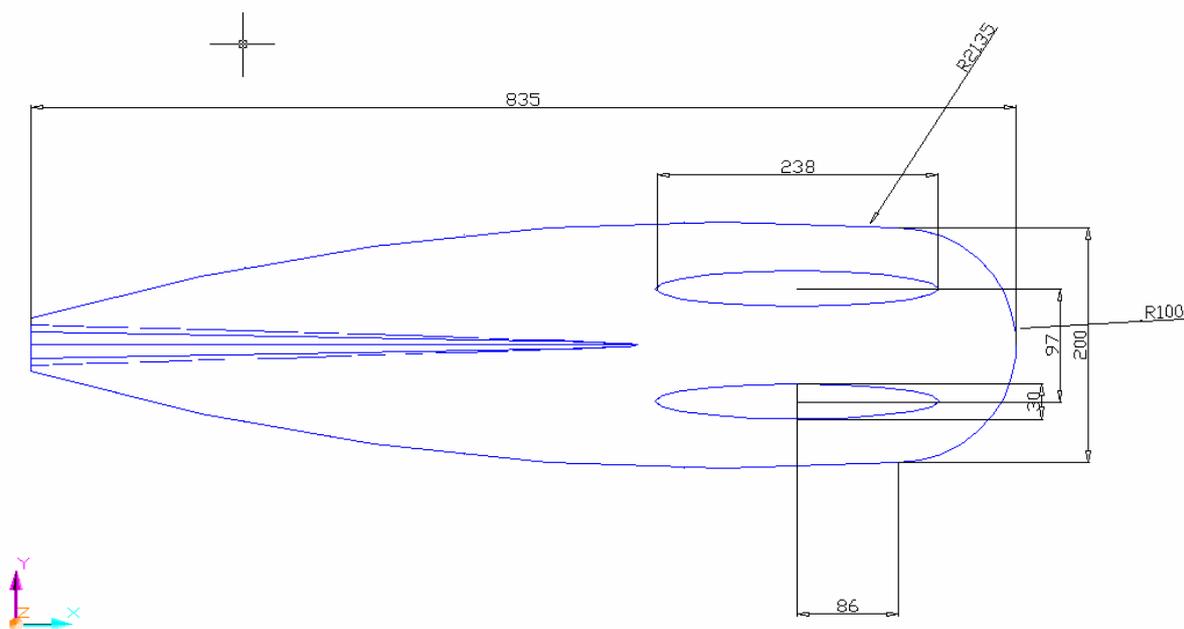
Després d'haver observat que les diferències per llargada i amplada del models són mínimes, es buscaran dissenys alternatius en la forma del model esperant un augment de les distribucions de pressions sobre la superfície del rem. Els propers models a estudiar són els següents:

- model rugós: model igual al model 0, amb la diferència de l'acabat superficial. En submarinisme i natació s'està treballant amb equipacions de neoprè amb acabat "shark skin" o *pell de tauró*, es caracteritza per no ser llis, si no que té una petita rugositat que millora, que fa que aquest millori en el lliscament dins l'aigua.

Les millores d'aquests vestits queda validada per l'ús en competició per nedadors d'alt nivell que rebaixen les seves marques, gràcies a la millora aportada per aquests vestits.

D'aquesta manera el model rugós, variarà respecte el model 0 en el seu acabat superficial passant de 0,05 mm en el model normal a 0,5 mm en el model rugós. S'espera obtenir alguna variació amb aquest acabat superficial. En aquest model no s'adjunta plànol específic, doncs és igual en totes les cotes al model de referència, únicament variant el seu acabat superficial.

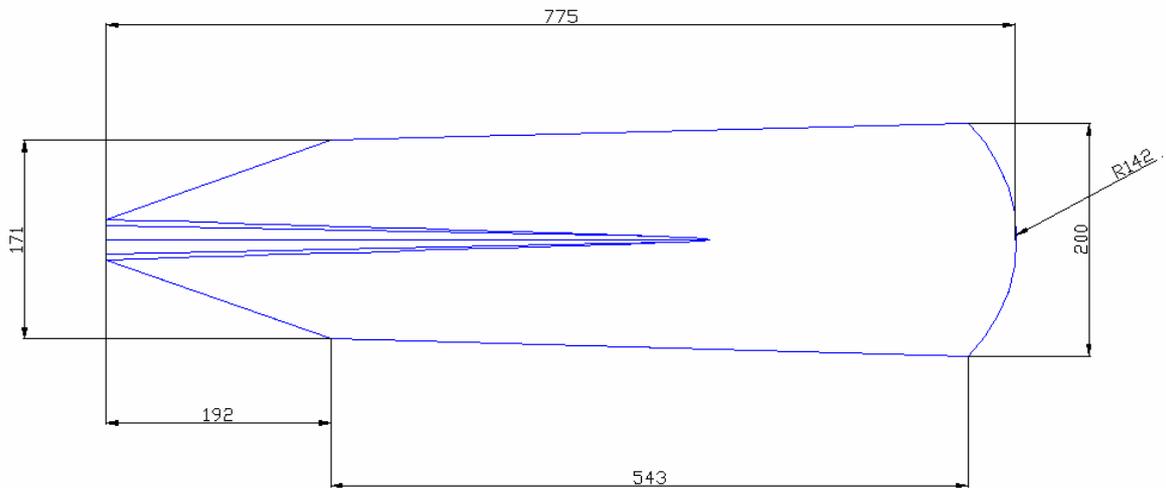
- model amb forats: model inspirat en un peu d'ànec de busseig. En els últims temps estan sorgint al mercat molts models de peus d'ànec pensats per a la impulsió mitjançant el moviment pels peus amb forats el·líptics que optimitzen l'esforç en el moviment d'aleteig, tot i ser un moviment diferent al exercit pel rem, podria aportar alguna dada interessant. Mantenint aquesta forma i adaptant-la a la superfície de treball, es simula un model, tal i com es mostra en la figura 66.



**Figura 66:** plànol cotes destacables model amb forats, cotes en mm.

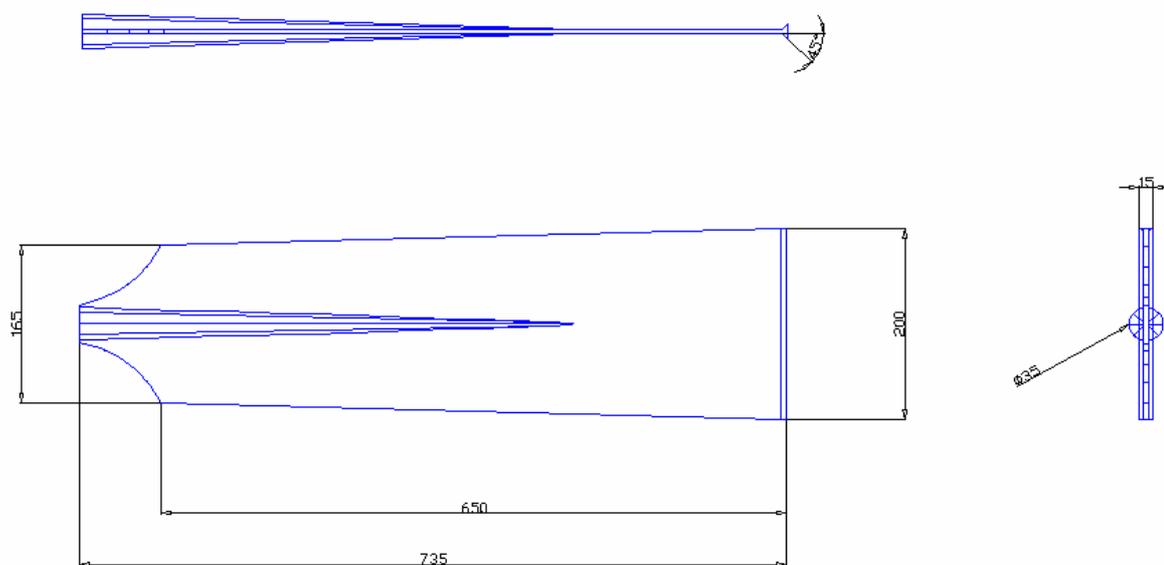
D'entrada en aquest model, no s'espera cap millora doncs es suposa una pèrdua de rendiment al preveure una possible recirculació entre les dues cares de les pales, i perdent pressió per aquest fet. Per contra aquest recirculació podria ser interessant pel fet que aportés una sobrepressió a la part posterior del model.

- model rodó: Hi ha altres tipus de rem, com els de caiac i piragua, on tot i tenir una forma de cullera, la seva forma és molt diferent a la resta de rem. El seu disseny és molt diferent, i és caracteritzen per tenir unes formes molt suaus i arrodonides. Buscant aquest concepte i retallant les zones amb més aresta del model simulat anteriorment, i distribuint-ne la superfície amb la finalitat d'arrodonir-lo. (veure Figura 67)

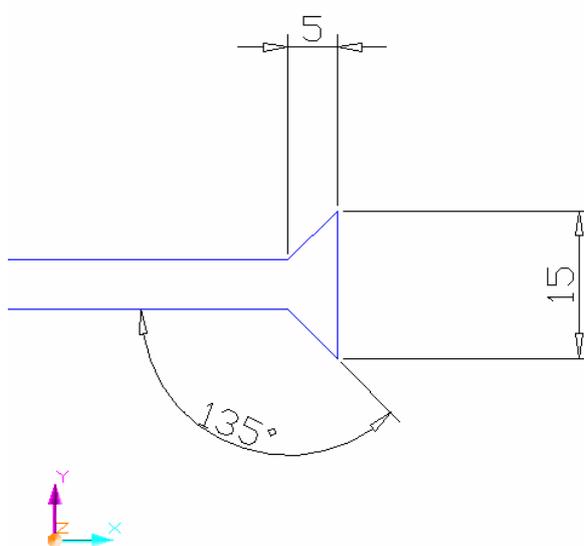


**Figura 67:** plànol amb cotes destacables del model arrodonit, cotes en mm.

- model T: partint del model 0 i adaptant uns petits apèndixs al final de la pala. Aquests petits apèndixs de forma triangular, es col·loquen amb la finalitat de modificar l'acció del flux sobre la pala. Tot i que suposen un petit augment de la superfície total del model, en la posició de prova, aquests no augmentaran la superfície d'exposició, per tant els valors obtinguts seran contrastables. En les Figures 68 i 69 es poden observar les modificacions que impliquen aquests apèndixs.



**Figura 68:** plànol amb vistes i cotes destacables del model T, cotes en mm.



**Figura 69:** plànol detall del canto final del model T, cotes en mm.

La generació del mallat en aquests models serà exactament el mateix que l' emprat anteriorment, al disposar de les mateixes superfícies, únicament variaran lleugerament les seves mides, el mallat serà molt similar fins i tot molt proper en nombre d'elements. Es farà el planxat amb les mateixes condicions amb la finalitat d'aconseguir una definició igual o molt similar al model 0.

Pel que fa a les condicions de contorn en la simulació numèrica, també seran les mateixes, simulant els models sota la mateixa posició i les mateixes pressions i velocitats.

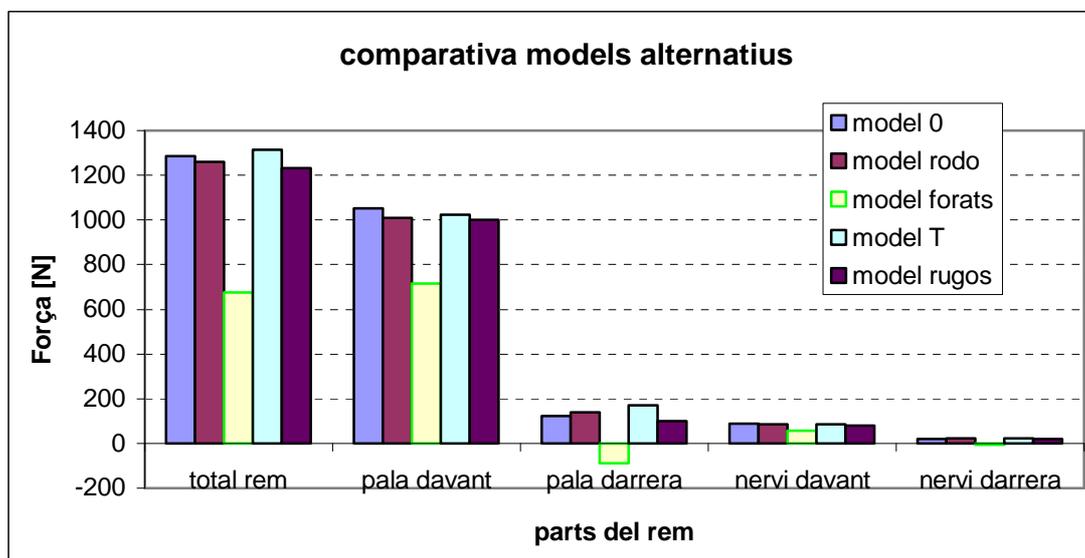
### 4.3- Resultats

Els resultats obtinguts en els models prototips, es comparen entre ells i respecte el model simulat anteriorment, model 0 o de referència. Els resultats són els referents a l'eix Z, eix més sol·licitat tal i com ha quedat demostrat en simulacions anteriors, es mostren en la taula 15, afegir que han estat simulats en la posició de 0°, màxima superfície d'exposició.

	total [N]	pala davantera [N]	pala posterior [N]	nervi davanter [N]	nervi posterior [N]
model 0	1286	1053	122	89	20
model rodó	1259	1010	140	84	23
model forats	675	715	-90	57	-6
model T	1302	1023	132	85	21
model rugós	1279	1050	120	85	24

**taula 15:** comparativa d'esforços obtinguts sobre l'eix Z, dels diferents models simulats, [N].

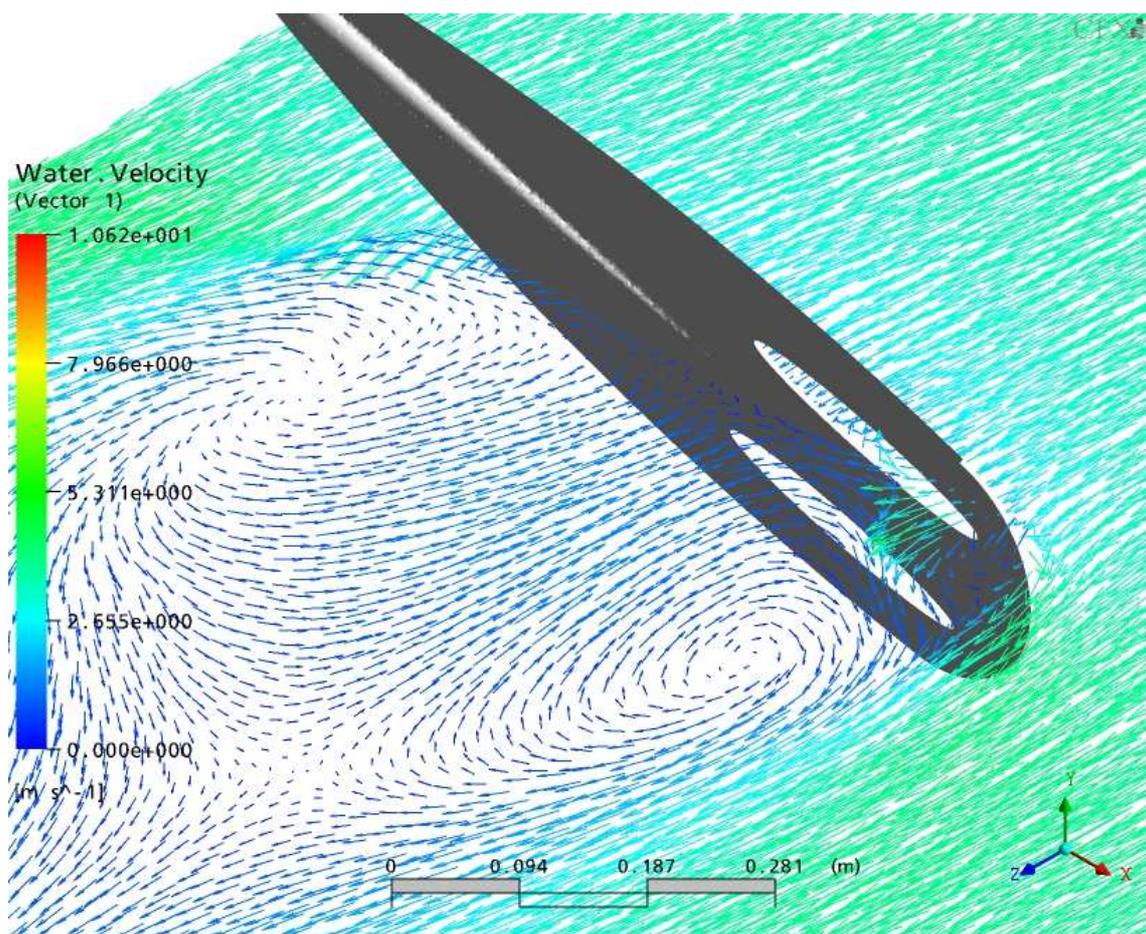
Per poder contrastar més ràpidament i visualment els resultats, es realitza un gràfic de barres amb els valors (veure Figura 70).



**Figura 70:** comparativa models prototips esforços sobre l'eix Z

A primera vista es pot descartar directament el model amb forats, ja que el seu rendiment està molt per sota de tota la resta de models, tant en conjunt com cadascuna de les seves parts tenen un rendiment molt inferior a la resta.

Per comprovar-ho es visualitza en la Figura 71 la circulació del fluid al seu entorn mitjançant vectors que componen d'aquest flux. Es pot afirmar que el valor de les pressions tenen un rendiment inferior al permetre la circulació per dins els forats de la seva superfície,



**Figura 71:** gràfic de circulació de flux, en un pla paral·lel a la superfície.

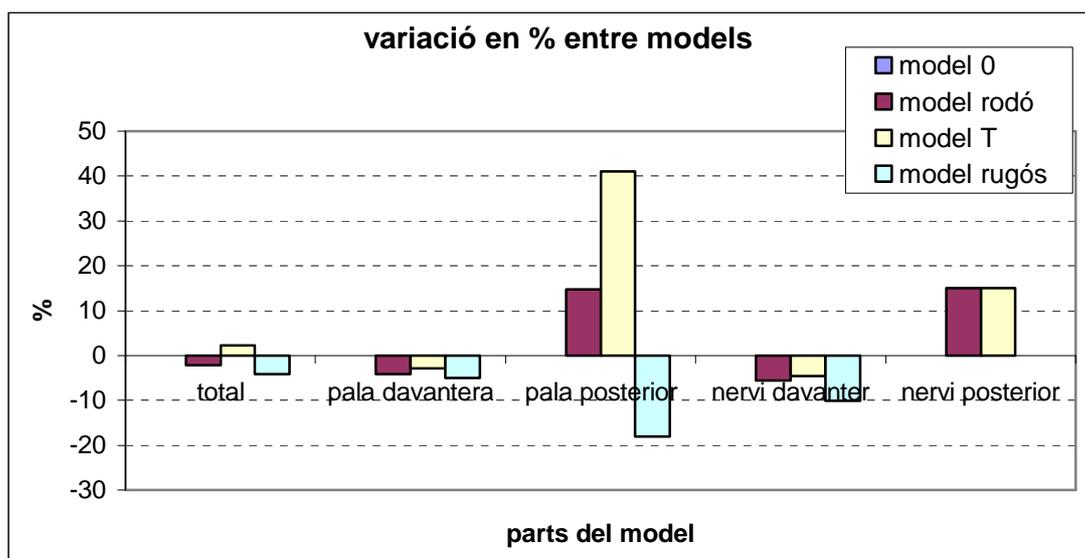
Al comparar-lo amb altres gràfics vistos prèviament, el model amb forats, tot i que genera una influència sobre el flux del túnel de la mateixa magnitud (amplitud de l'estela que deixa darrera seu), no n'aprofita el rendiment, doncs, part de la pressió de la part davantera no es pot assolir, al passar el flux a través dels forats. I per un altre banda la força d'arrossegament que s'hauria d'assolir per la succió d' aquest fluid no s'aconsegueix al passar el fluid directament des de la part davantera.

La resta de models no tenen unes variacions molt grans, només a destacar que un model sembla tenir un rendiment superior al de referència i per la resta, el seu rendiment és lleugerament inferior.

Per a una millor comprensió i avaluació dels resultats obtinguts, es crea una taula en % de variació respecte el model de referència, en aquesta taula ja no es treballarà el model amb forats desestimant els seus resultats. (veure taula 16 i Figura 72)

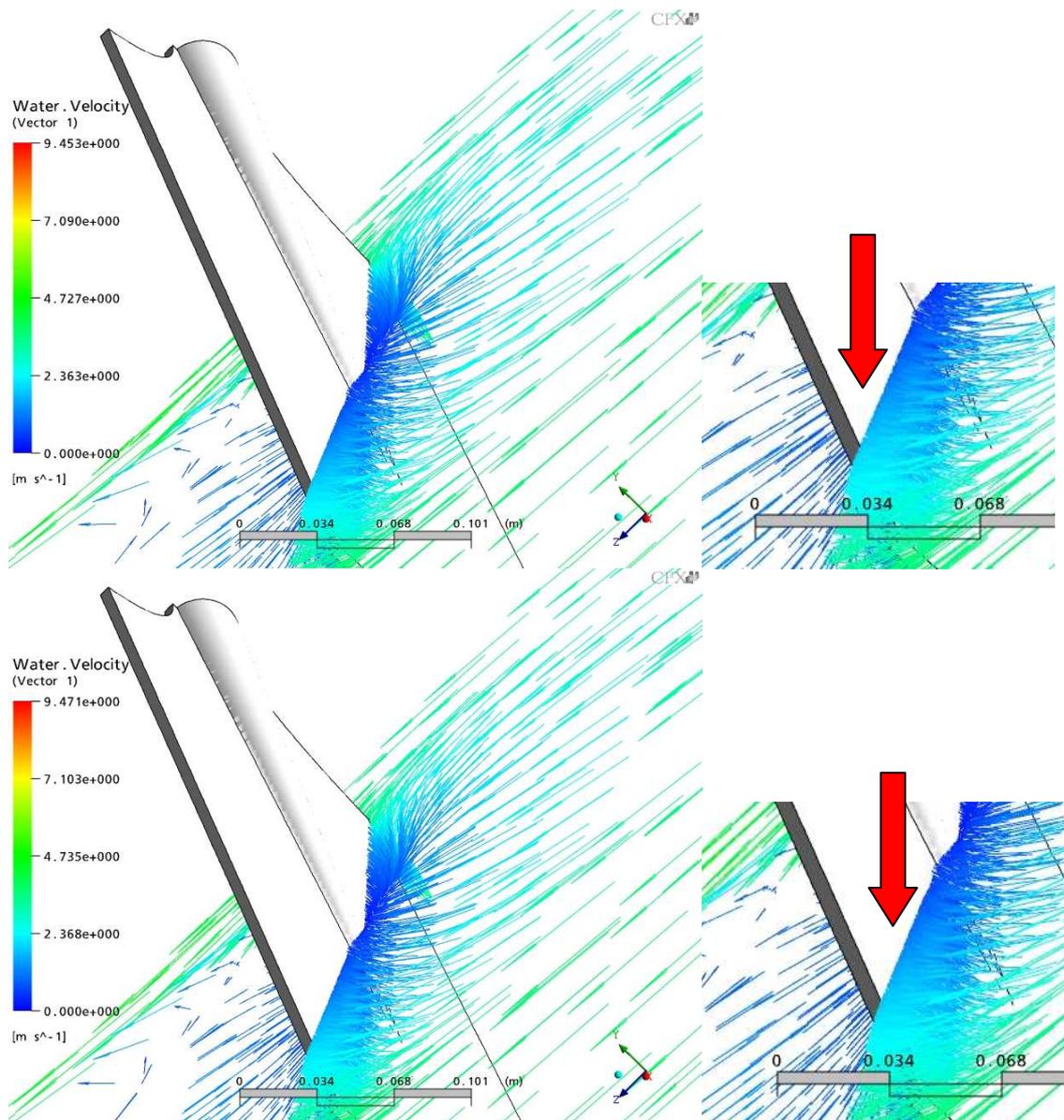
	total	pala davantera	pala posterior	nervi davanter	nervi posterior
model rodó	-2,10	-4,08	14,75	-5,62	15,00
model T	1,24	-2,85	8,20	-4,49	5,00
model rugós	-0,54	-0,28	-1,64	1,12	0,00

**taula 16:** comparativa d'esforços en l'eix Z, expressat en % respecte el model 0



**Figura 72:** gràfic comparatiu percentual entre models prototips

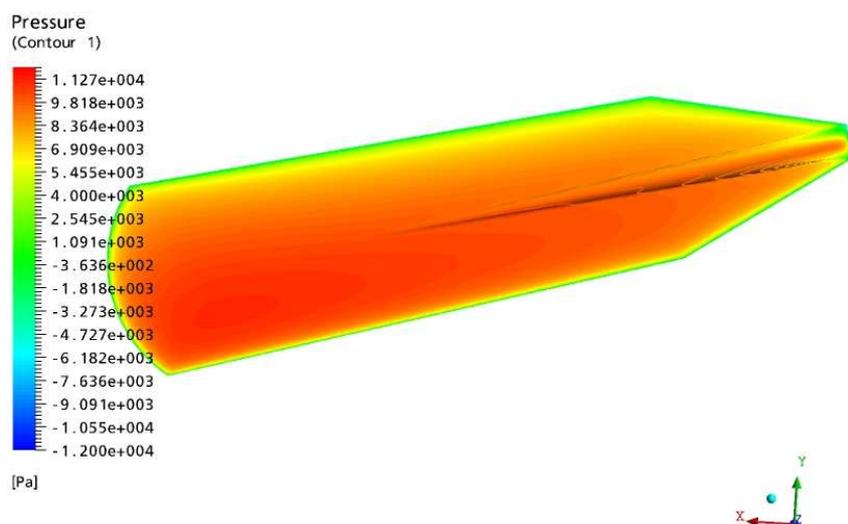
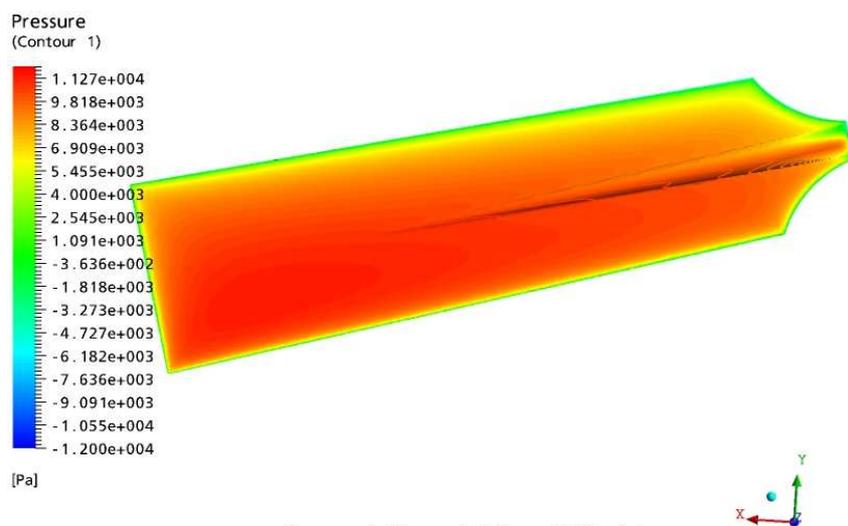
El model rugós, amb la única variació de l'acabat superficial de totes les seves parts, treballa en conjunt lleugerament per sota. Perdent càrrega en les dues pales i mantenint o millorant en els nervis. Per tant es pot afirmar que la rugositat enlloc de millorar el rendiment, l'empitjora. Es comparen les Figures 73 i 74 es mostra el comportament del flux en el model 0 i el model 0 rugós.



**figures 73 i 74:** en el muntatge es pot observar a dalt el model 0 ( acabat superficial 0,05mm) i el seu detall corresponent, a sota el model 0 rugós ( acabat superficial 0,5mm) i el seu detall corresponent.

Tot i que les diferències són mínimes, en el detall del model 0 (llis) (figura superior) i el model 0 rugós (figura inferior), es pot observar un petit canvi de color ( indicador de velocitat) entre els dos models, provocat pel millor lliscament de la superfície rugosa davant la llisa. Aquest fet implicaria el rendiment lleugerament inferior del model rugós davant el model llis, marcat pel fet de lliscar millor dins el fluid, i no “arrossegar” tanta aigua.

A destacar en el model rodó, en la seva part posterior, que té una força d'arrossegament molt superior a la resta, tant per la pala com pel nervi. Però en canvi la seva part davantera, treballa a pressions inferiors. Observant un diagrama de pressions sobre la part davantera de la pala, i contrastant-la respecte el model 0. En les Figures 75 i 76, es pot veure el comportament d'aquests dos models davant el flux.



**Figures 75 i 76:** diagrama de pressions en la part davantera del model 0 (dalt) i model rodó(baix)

Es pot observar per la coloració, que el model 0 té una major pressió sobre la superfície davantera, al ser aquesta part del model la que aporta el percentatge més elevat amb diferència d'esforços respecte el total del model. Suposa un descens en el valor global d'esforç, tot i que el model rodó ha demostrat tenir una clara millora (de l'ordre del 15%) en la pala i el nervi posteriors.

Per últim comentar el prototipus model T, aquest model sembla ser l'únic amb un rendiment superior al model 0 o de referència, fins ara el que havia assolit uns valors més elevats, tot i no tenir un gran rendiment en la pala davantera, els valors obtinguts en la seva pala i nervi posteriors, demostren un millor rendiment que el model 0.

Amb la finalitat d'estudiar més correctament aquest model i ja que en estudis previs (Concept2) es trobava una millora mitjançant l'aplicació d'apèndixs en el rem (però en remes asimètrics i apèndix en la pala davantera) i només en certs angles de passada. Per a comprovar-ho, es simularà el model T, en totes les posicions de passada i gir per les quals ha estat simulat el model 0.

La generació del mallat en aquests models serà exactament el mateix que l'emprat anteriorment, al disposar de les mateixes superfícies, únicament variaran lleugerament les seves mides, el mallat serà molt similar fins i tot molt proper en nombre d'elements.

Al variar l'angle d'atac, a través de l'apèndix augmentarà molt lleugerament la superfície del model en angles grans. Calculant el creixement d'aquest valor arriba a l'ordre màxim 70mm quadrats d'increment de superfície, que sobre el valor de la superfície del model, suposa un increment del 0,059%. Tot i que com augment de la superfície, cal tenir-lo en compte alhora de justificar possibles resultats.

Es farà el planxat amb les mateixes condicions amb la finalitat d'aconseguir una definició igual o molt similar al model 0.

Pel que fa a les condicions de contorn en la simulació numèrica, també seran les mateixes, simulant els models sota la mateixa posició i les mateixes pressions i velocitats.

Primerament es valora el gràfic d'esforços obtingut en els 3 eixos, pels diferents angles de passada, (veure Figura 77)

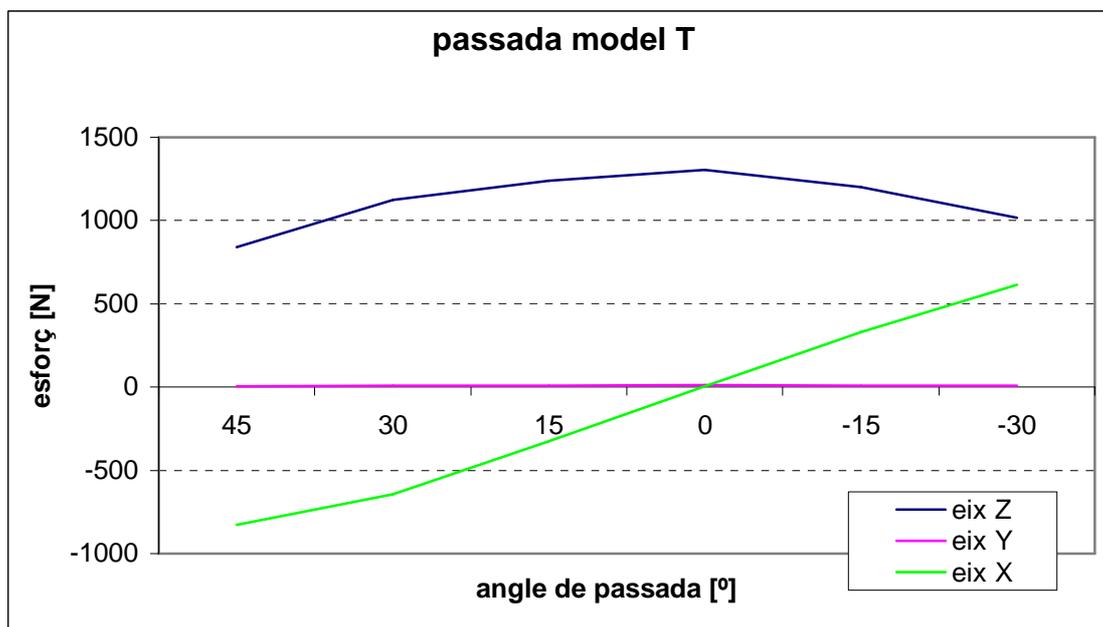


Figura 77: diagrama d'esforços en el model T, en funció d'angle de passada.

El gràfic obtingut mostra gran similitud amb el model 0, amb corbes similars en tots els casos, per tant es podria dir que tenen un comportament similar, per contrastar-ho millor es solapen les corbes dels dos models, en la Figura 78.

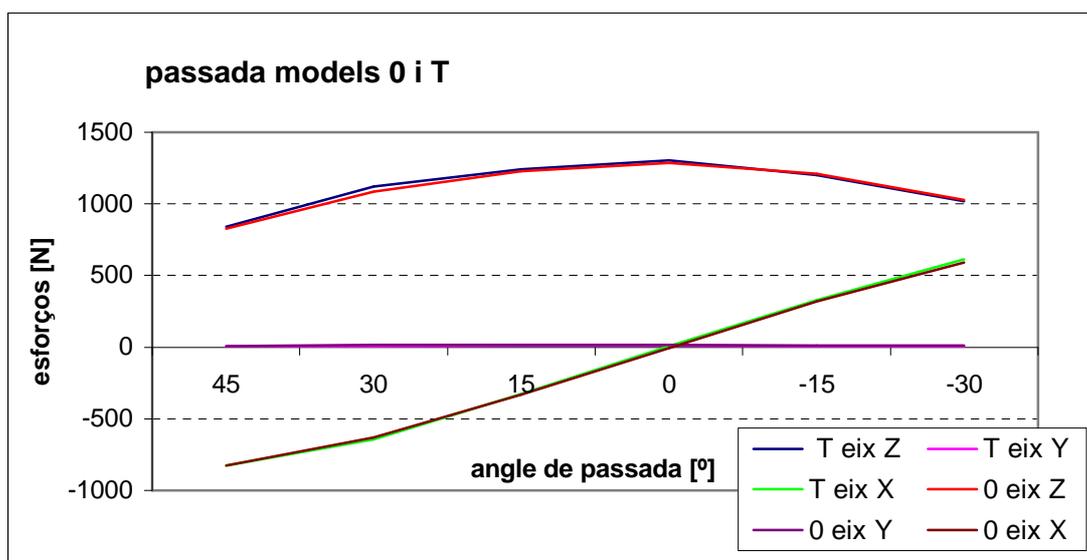


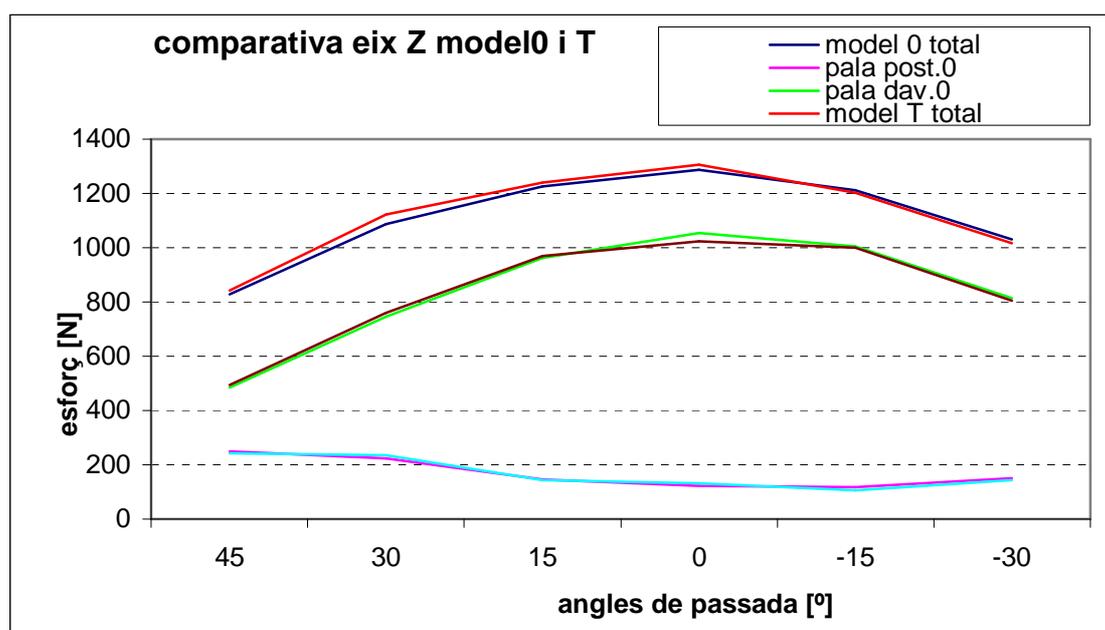
Figura 78: gràfic comparatiu models 0 i T en funció de l'angle de passada

Tot i ser corbes molt similars en tots els cassos, es pot observar una lleugera diferència en el cas de l' eix Z, el model T es superior en valors, en angles positius, i en angles negatius es superat pel model 0.

En l'eix X, el model T, està per sobre excepte en angles grans positius on el model 0 el supera. Sobre l'eix Y, tots dos marquen valors molt iguals i molt propers a 0, per aquest motiu es desestimaran els resultats obtinguts sobre aquest eix, per angles de passada.

Primerament es valorarà l'eix Z, i es compararan els valors amb els obtinguts en l'eix Z, del model 0.

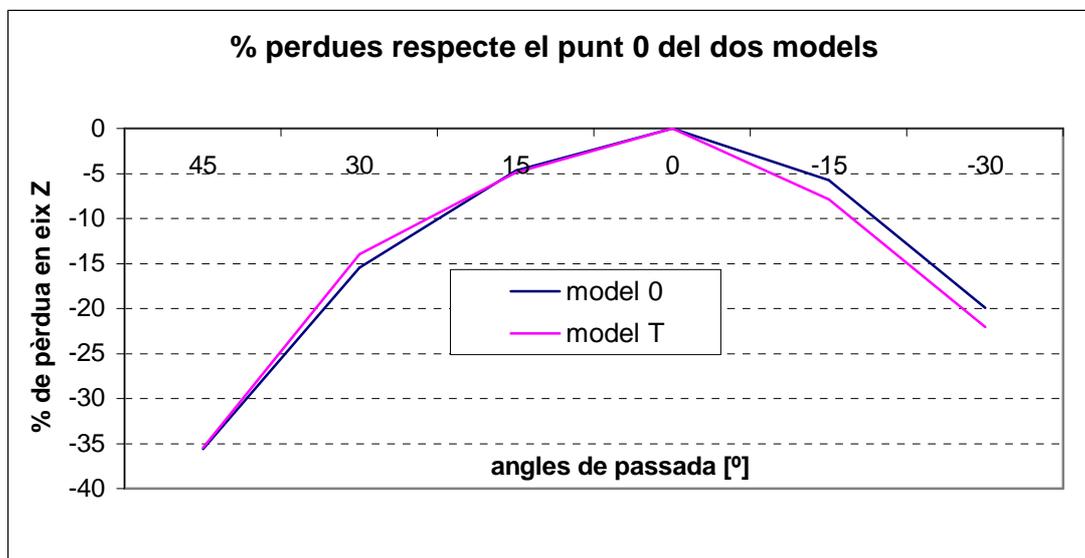
En la Figura 79, es poden veure únicament les corbes del total i de les pales posterior i davantera, comparades respecte el model 0. En el gràfic sols s'han presentat aquestes, pel pes específic dels valors de les diferents parts.



**Figura 79:** comparativa esforços sobre eix Z, en models 0 i T.

En el gràfic obtingut mostra una lleugera diferència entre el model 0 i el model T, amb valors superiors pel model T, per angles positius. En canvi en angles negatius el model 0 supera al T. Gran similitud entre les corbes de les pales davantera i posterior, únicament en la posició de 0° el model 0 supera al T, i en la mateixa posició T supera a 0 en la pala posterior.

Es crea un gràfic de % de variació entre els diferents valors obtinguts en el model 0 i T, respecte el punt T, (veure Figura 80) per poder observar, amb més definició les corbes en cada cas.



**Figura 80:** gràfic comparatiu de % variació respecte el punt 0 del dos models 0 i T.

En aquesta gràfica s'observa amb més claredat les corbes generades en cada cas, cal tenir en compte que el punt 0 per cada corba, és el seu valor en aquest punt, per tant només es valora la variació percentual respecte el seu propi 0 i la seva evolució, no en valors absoluts.

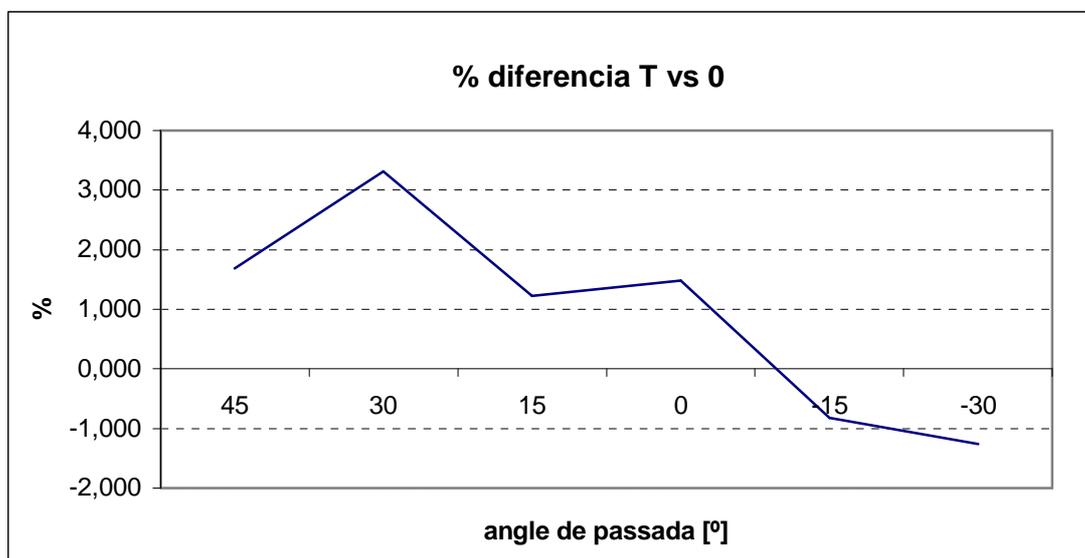
Per les parts positives són quasi simètriques, on el model en 30°, té un rendiment superior. En canvi en tots els valors negatius, el model T es inferior al model 0.

En el gràfic d'estudi d'esforços sobre la passada en l'eix Z, s'observa un comportament molt similar al model provat anteriorment, model 0. Per a treure un valors comparables es fa una taula en variació al model 0, per cada angle de passada i part del model. Els valors es poden veure en la taula 17

	45°	30°	15°	0°	-15°	-30°
<b>total[N]</b>	1,69	1,47	1,22	1,24	-0,83	-1,26
<b>pala posterior[N]</b>	-2,41	-0,89	-1,38	8,20	-9,40	-467
<b>pala davantera[N]</b>	2,07	0,67	0,73	-2,85	-0,40	-1,11
<b>nervi posterior[N]</b>	2,27	0,00	0,00	5,00	-7,14	0,00
<b>nervi davanter[N]</b>	0,00	1,45	-1,16	-4,49	1,23	0,00

**taula 17:** : valors en % d'esforç del model T, respecte model 0, pels diferents angles de passada

Per trobar diferències més clares de la millora del rendiment en cada punt, es crea un gràfic de desviacions percentuals, on es prenen les diferències obtingudes punt a punt del model T, respecte el model 0, per cadascuna de les mostres. En el gràfic següent es mostren els resultants obtinguts.(veure Figura 81)



**Figura 81:** diferència en % del model T, respecte model 0, pels diferents angles de passada

L'àrea generada en la zona positiva és superior a l'àrea negativa, calculant les superfícies en cada zona, i restant la zona negativa a la part positiva. El rendiment sobre l'eix Z del model T respecte el model 0, en el rang de passada utilitzat resulta una millora del 1,08%. Si es té en compte que en alguns punts com +45° es creava un augment de superfície de un 0,059%. Per tant es podria dir que el rendiment és aproximadament d'un 1%.

Si es valoren els esforços sobre l'eix X, ja que a semblança amb el model 0, els resultats obtinguts també prenen un valor elevat. Absorbint per tant una elevada càrrega de treball, en certs angles de passada. Tal com es mostra en la taula 18

	45°	30°	15°	0°	-15°	-30°
Total [N]	-827	-644	-327	6	330	615
pala davantera [N]	-489	-435	-258	0	266	462
pala posterior [N]	-238	-136	-39	0	29	96
nervi davanter [N]	-53	-41	-24	1	19	1
nervi posterior [N]	-45	-29	-7	-2	2	34

**taula 18:** valors d'esforç en l'eix X, per diferents angles de passada.

Aquests valors s'observen sobre una gràfica, per veure el seu comportament, en la Figura 82.

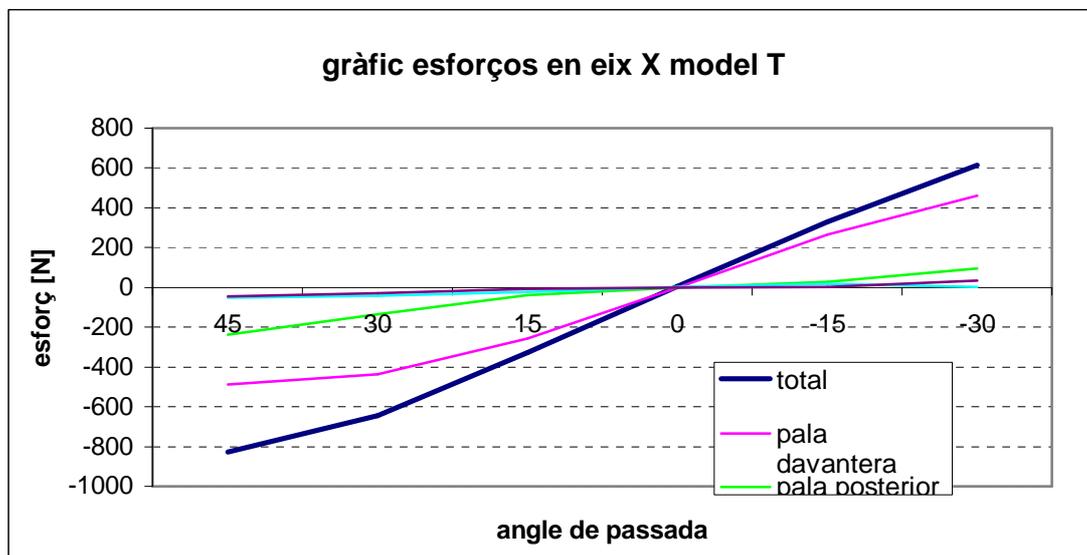


Figura 82: gràfic esforços per l'eix X, per diferents angles de passada

Els valors observats tenen un comportament lineal molt semblant al observat en el model 0. Per a una millor comparació s'obvien els valors referents als nervis pel seu poc pes específic en el total del conjunt, i es simulen la resta de les parts dels dos models conjuntament (veure Figura 83).

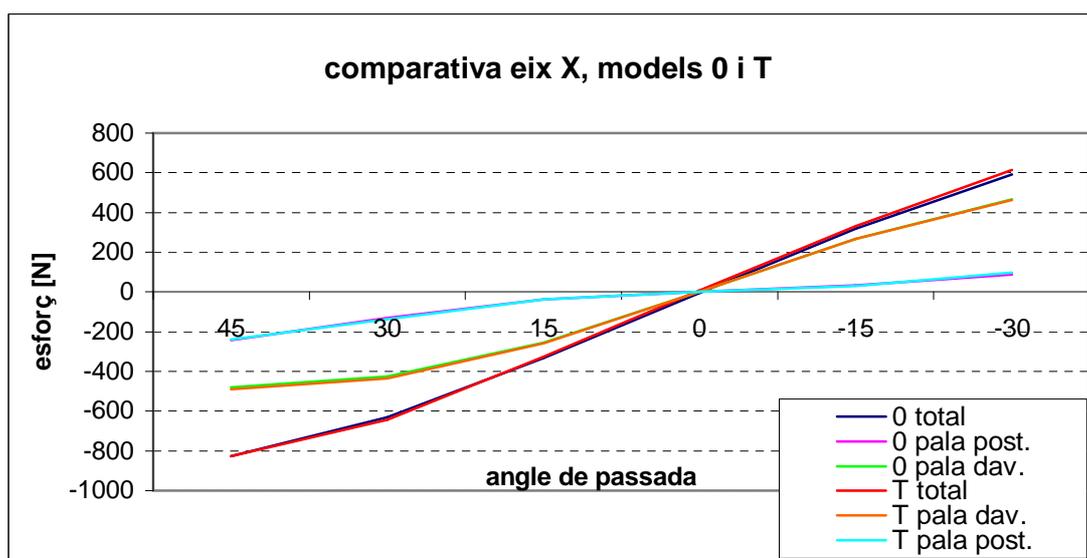


Figura 83: gràfic comparatiu en l'eix X, dels models 0 i T

La majoria de valors observats, són molt iguals, no mostren cap diferència apreciable en cap punt, ni cap tendència per part de les corbes. Es podria afirmar que el comportament en els dos models sobre l'eix X, és pràcticament igual.

El percentatge de variació del model T, respecte el model 0 és ínfim i es pot considerar que en aquest cas, no hi ha cap tipus d'afectació per part dels apèndixs sobre l'eix X.

Aquest fet, ve marcat per la poca o quasi bé nul·la implicació dels apèndixs sobre aquest eix, ja que la posició dels apèndixs influeix en el flux que llisca sobre la pala influint directament sobre les resultants en l' eix Z o perpendicular, però no interacciona amb el flux que genera les forces sobre X.

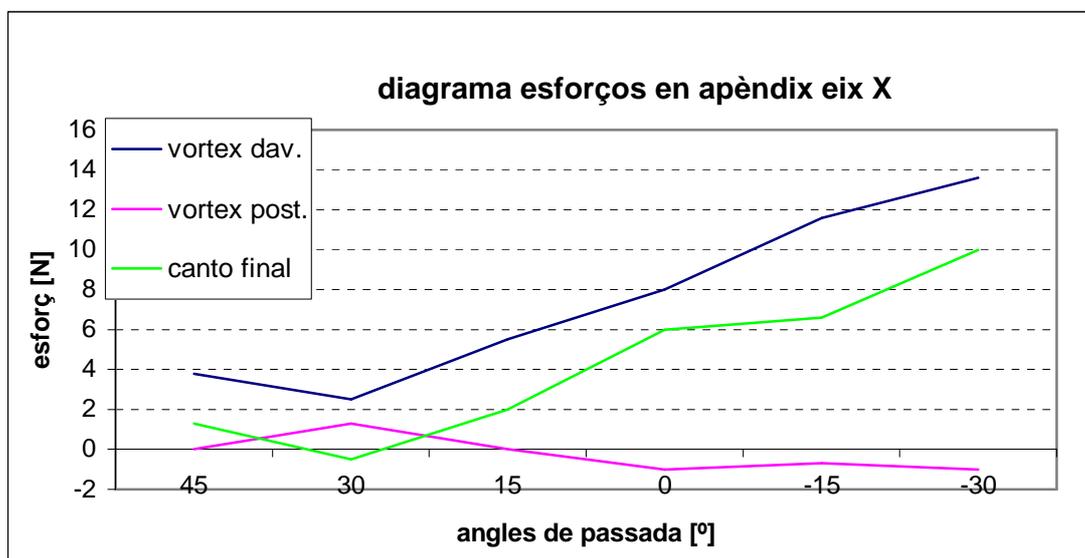
A continuació s'adjunten les càrregues sotmeses en aquest eix, als apèndixs. (veure taula 19).

	45°	30°	15°	0°	-15°	-30°
<b>vortex dav. [N]</b>	3,8	2,5	5,5	8	11,6	13,6
<b>vortex post.[N]</b>	0,0	1,3	0	-1	-0,7	-1
<b>canto final [N]</b>	1,3	-0,5	2	6	6,6	10

**taula 19:** valors obtinguts en els apèndixs i canto final en l'eix X, per diferents angles de passada

Tot i ser valors baixos, comparats amb els treballats fins el moment, la seva funció és molt important, i les seves càrregues influeixen directament sobre el comportament del flux en el total del model simulat.

Els valors es mostren en forma de gràfic tal i com es pot observar en el diagrama d'esforços de l'eix X dels apèndixs, (veure Figura 84).



**Figura 84:** diagrama d'esforços sobre l'eix X en els apèndixs i canto final, per diferents angles de passada

La càrrega observada en la part posterior és molt baixa, tant per angles positius com negatius, es recorda que el comportament de tota la part posterior del model, era pràcticament simètric a aquesta corba.

Pel que fa a l'apèndix davanter i al canto final el comportament es també totalment simètric amb el conjunt total de la pala i la part davantera del model. Per tant l' influència dels apèndixs sobre aquest eix, es podria qualificar de ínfima o nul·la.

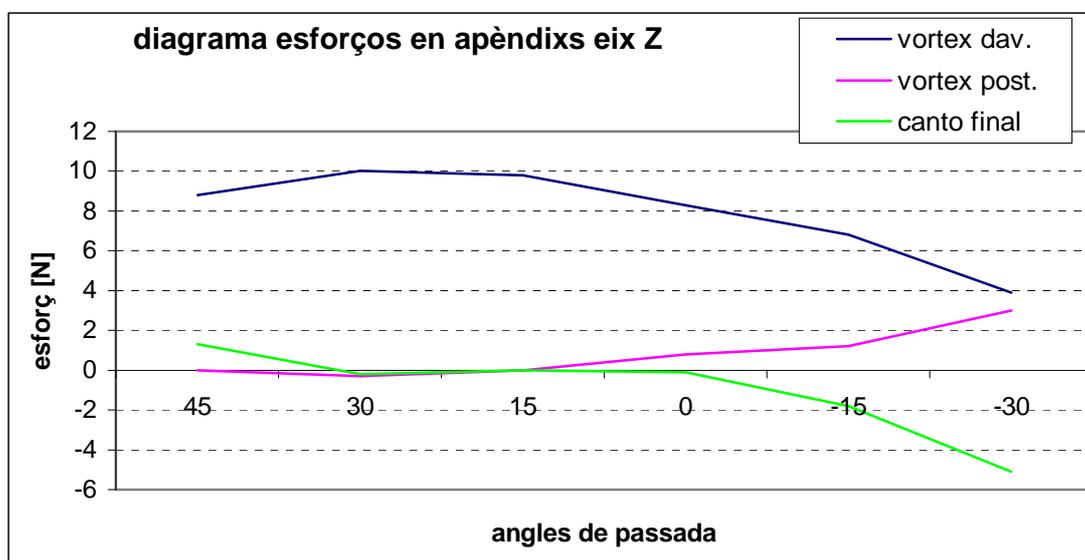
En canvi i tal com s'ha vist, sobre l'eix Z, part de la millora observada en el model T, ve donada per l'incorporació dels dos apèndixs sobre la superfície final de les dues pales posterior i davantera.

A continuació es poden veure els valors obtinguts en la zona dels apèndixs sobre l'eix Z, en la taula 20, igual que en el cas anterior els valors són baixos, però aquest fet no descarta la funció generada en el conjunt.

	45°	30°	15°	0°	-15°	-30°
<b>apèndix dav. [N]</b>	8,8	10,0	9,8	8,3	6,8	3,9
<b>apèndix post. [N]</b>	0,0	-0,3	0,0	0,8	1,2	3,0
<b>canto final [N]</b>	1,3	-0,2	0,0	-0,1	-1,8	-5,1

**taula 20:** valors d'esforços en els apèndixs i canto final per diferents angles de passada

Els valors de la taula anterior es poden observar millor en el següent gràfic es pot observar els esforços en funció de l'angle de passada. (veure Figura 85)



**Figura 85:** diagrama d'esforços en els apèndixs i canto final per diferents angles de passada

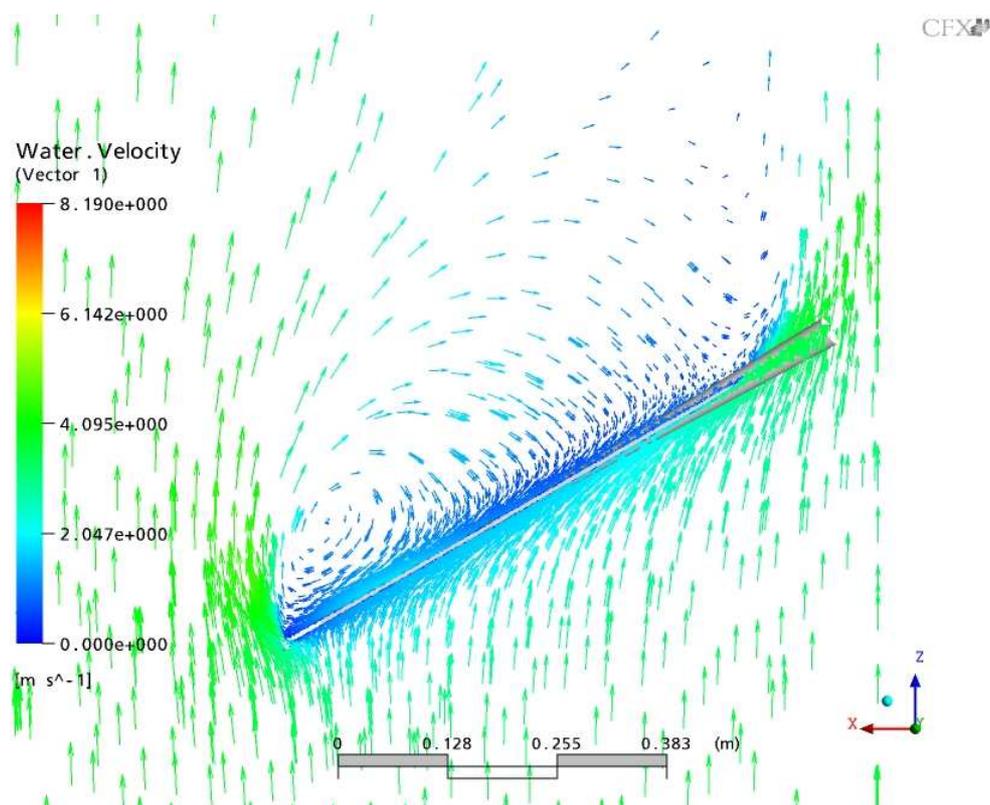
Els esforços obtinguts tenen un valor no molt gran, la seva funció principal és la de desviar el flux que circula paral·lel a la pala posterior conformant la capa límit. Es pot observar en el cas de l'angle de passada, els valors més grans d'esforç per l'apèndix estan ubicats en la zona compresa entre 30° i 15°, coincidint amb els valors de major rendiment del model T.

Si pel mateix rang, s'observen els valors per l'apèndix posterior, aquest obté els valors més baixos de tot el cicle, aquest fet pot venir donat, per la circulació del flux per sobre de l'apèndix sense provocar una càrrega directa sobre aquest.

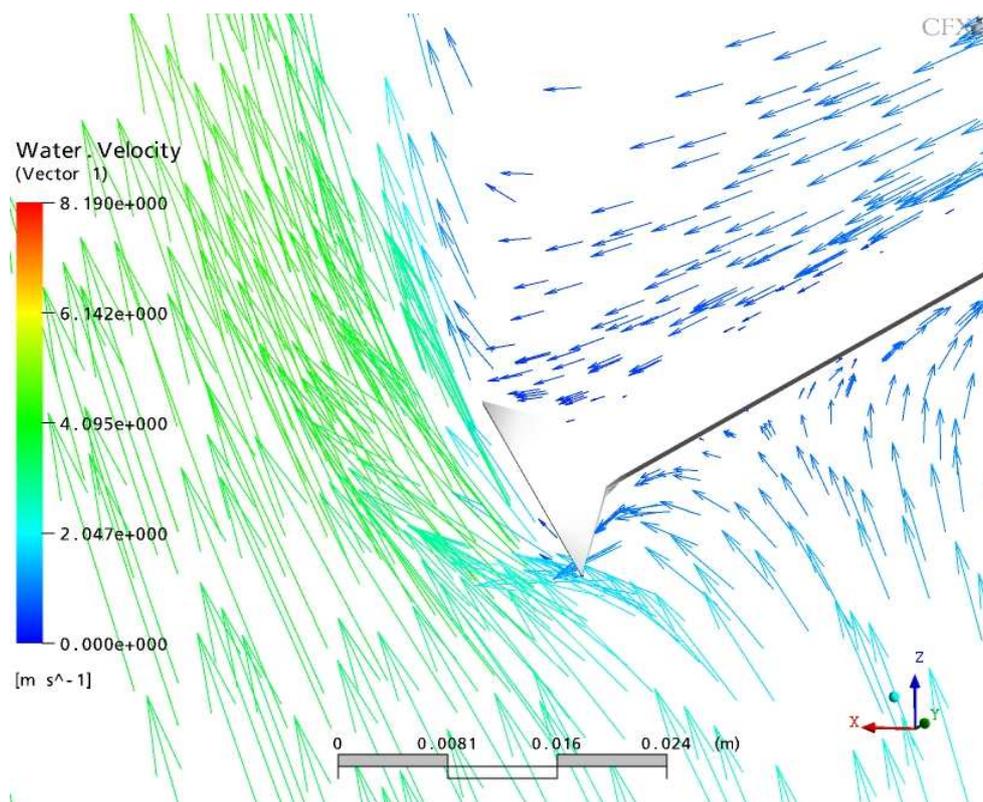
També cal observar que en els angles de treball on el model T, ha disminuït el seu rendiment respecte el model 0 o de referència, ha estat en angles negatius ( $-15^\circ$  i  $-30^\circ$ ) si s'observa el gràfic que la càrrega en l'apèndix davanter el seu valor disminueix clarament, obtenint un disminució de treball d'aquest el que marca una variació del flux en aquest punt.

Per part de l'apèndix posterior, aquest augmenta, el que representa que té una càrrega més directa de flux, al mateix temps també s'observa una menor càrrega de la pala posterior en aquests angles negatius respecte el model de referència.

Pel que fa referència al canto final, aquest té una càrrega mínima o nul·la en angles positius, en canvi en angles negatius, la càrrega pren valors negatius, i segueix la mateixa corba que l'apèndix de la cara davantera, en els mateixos valors de càrrega, essent les dues corbes totalment paral·leles. Es pot observar una imatge (veure Figura 86 i 87) presa en detall de les dues parts en un angle de passada negatiu.



**Figura 86:** diagrama de vectors en la posició de  $-30^\circ$ , en una secció a 220mm de la superfície.

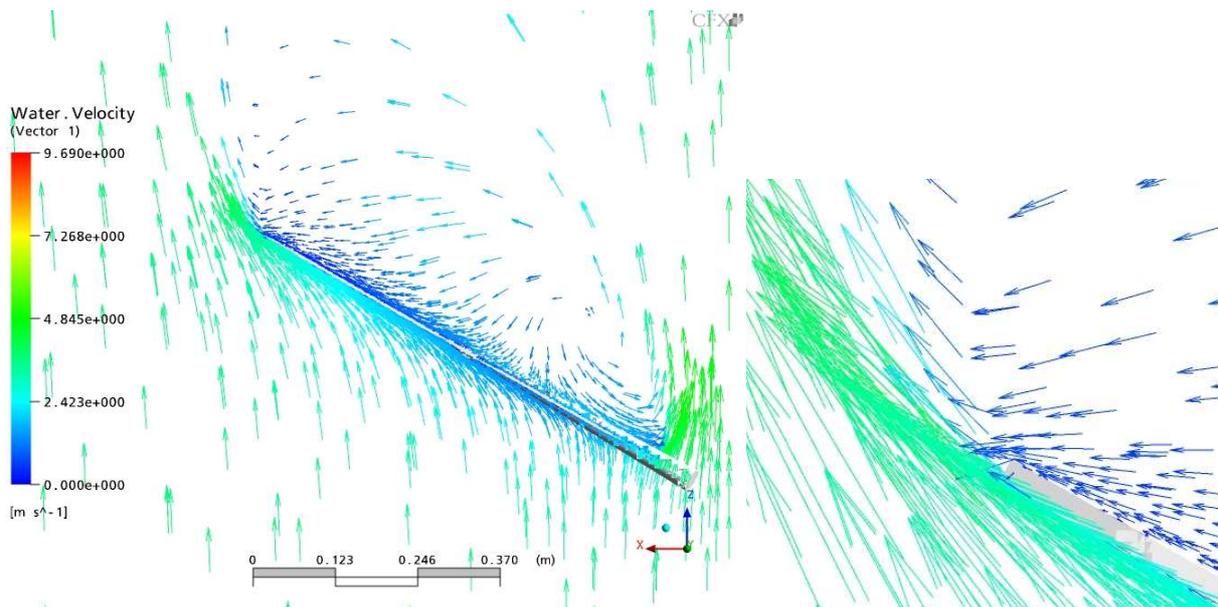


**Figura 87:** detall de flux de vectors simulant el corrent sobre la zona dels apèndixs en un angle de passada de  $-30^\circ$ .

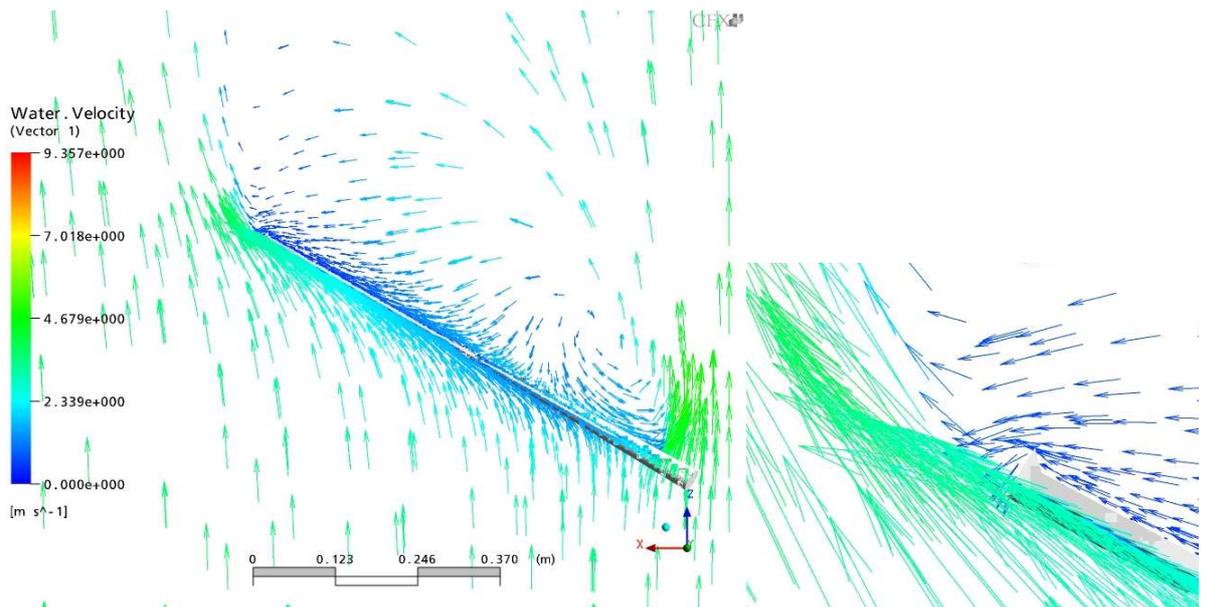
Es pot observar que el flux que discorre paral·lel a la pala posterior és lleugerament major que el que corre en la davantera, per contra l'apèndix davanter rep el xoc del flux que xoca directament contra aquest, però a mesura que augmenta l'angle en valors negatius, disminueix la secció d'exposició a aquest flux, per aquest motiu disminueixen els valors observats.

El canto final rep part del xoc directe del flux, per aquest fet rep una càrrega que augmenta a mesura que augmenta l'angle.

En angles positius l'aportació dels apèndixs resulta positiva al conjunt, mitjançant unes imatges generades per línies de flux, per diferents angles positius es pot observar la diferència entre disposar o no dels apèndixs (veure Figures 88 i 89).

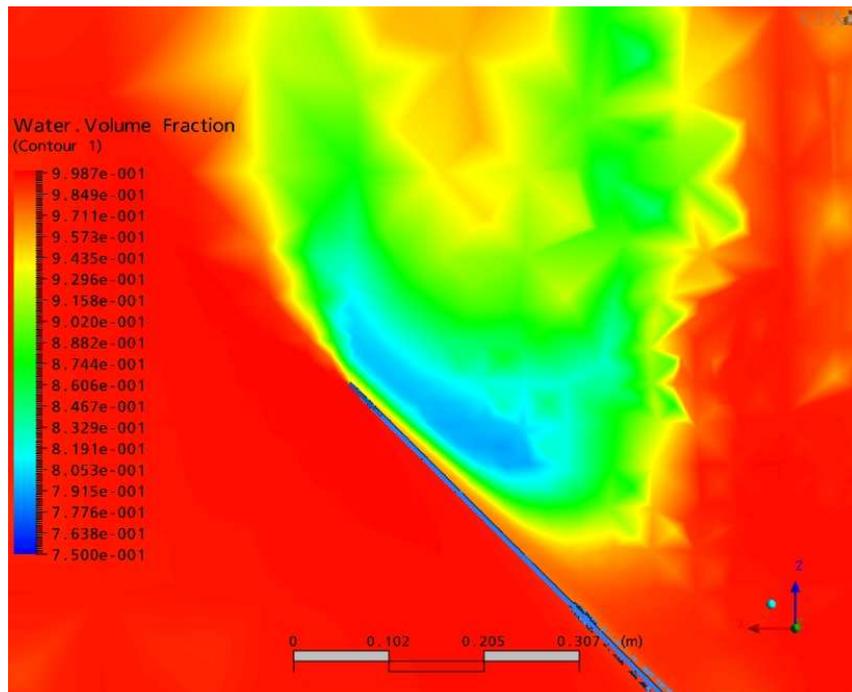


**Figura 88:** imatge de vectors, a 220mm de la superfície sobre el model 0, i detall del final del model

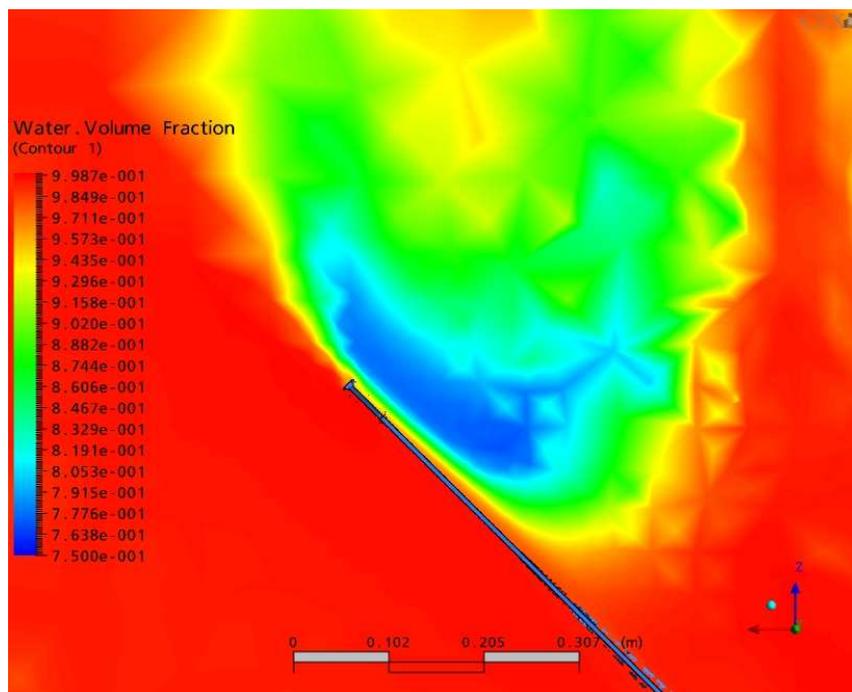


**Figura 89:** imatge de vectors, a 220mm de la superfície sobre el model T, i detall del final del model

En aquestes imatges de conjunt es pot observar la distribució del flux en tota la superfície de les pales i l'efecte que generen i reben els dos apèndixs en el detall. En les imatges següents es pot veure un altre detall generat per l'efecte dels apèndixs (veure Figures 90 i 91)



**Figura 90:** detall fracció de volum d'aigua en pla paral·lel a XZ, a 220mm de la superfície, pel model 0

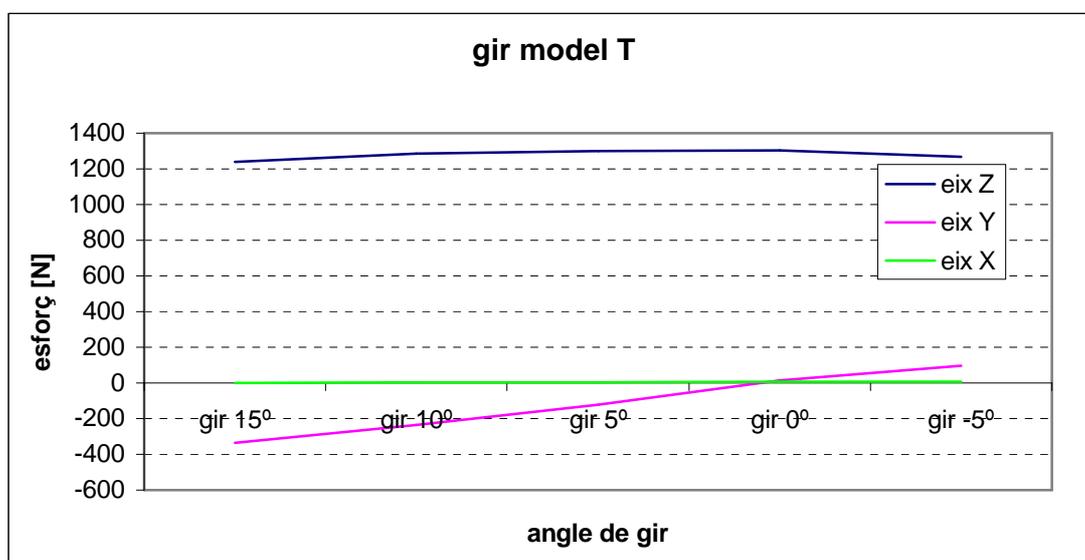


**Figura 91:** detall fracció de volum d'aigua en pla paral·lel a XZ, a 220mm de la superfície, pel model T

En les figures es pot veure la diferència causada pels apèndixs a la proporció volum d'aigua del fluid, a una distància de 220mm de la superfície.

Al estar tots dos a la mateixa escala, es pot observar una major depressió en la part posterior del model T, respecte el model 0, marcat per una menor proporció de volum d'aigua, en el total del fluid.

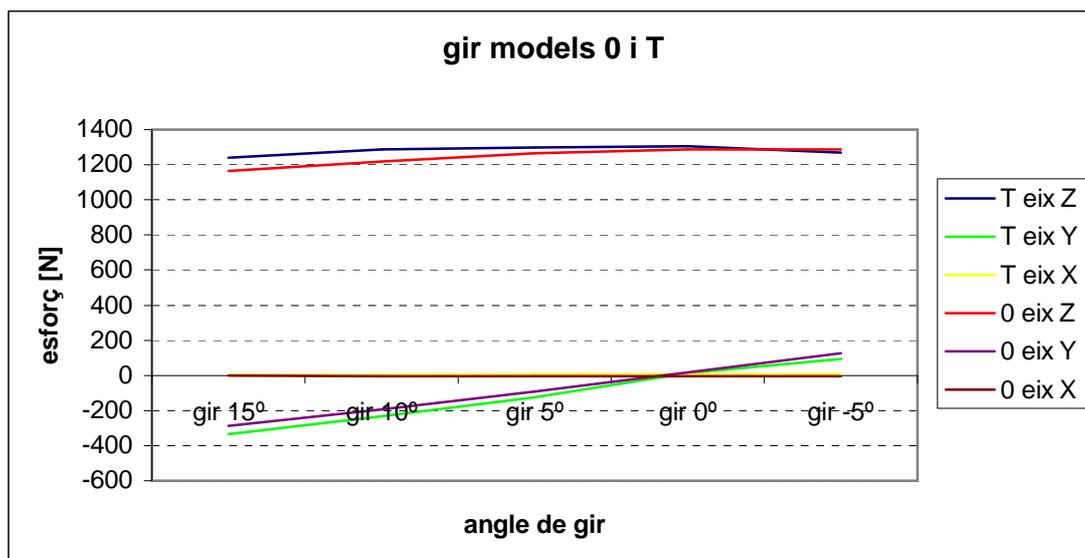
Un cop observats tots els valors referents als diferents angles de passada, cal comprovar l'efecte que pot ocasionar els apèndixs en el moviment del gir. Un cop simulat en les diferents posicions, els valors obtinguts són els següents, els valors són els del conjunt pels diferents eixos, (veure Figura 92).



**Figura 92:** diagrama d'esforços sobre el model T, per diferents angles de gir

Es pot observar que en l'eix X, els esforços són pràcticament nuls, al tenir una mínima superfície d'exposició. En l'eix Z, la càrrega és elevada, però al mateix temps molt lineal, formant una corba semblant a la del model 0, el mateix passa amb l'eix Y, on el seu valor és creixent però molt similar al model 0.

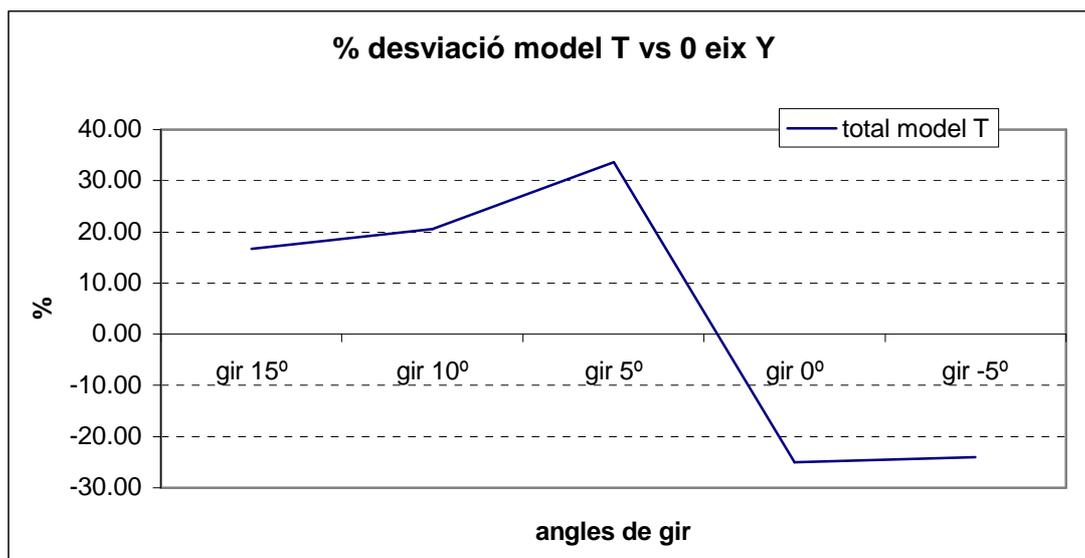
Es contrasten directament els valors obtinguts, per veure el comportament en els dos cassos (veure Figura 93).



**Figura 93:** comparativa d'esforços entre el model 0 i T, per diferents angles de gir

En la comparativa es pot observar que sobre l'eix X, els dos tenen un comportament molt similar, sense afectar el conjunt del model. Respecte l'eix Y el model T té un rendiment millor, sempre amb valors superiors al model 0, excepte en angles negatius. I en l'eix Z, on els valors són més importants i al mateix temps són els que influeixen directament en l'avanç de l'embarcació, el model T es clarament superior en angles positius, i inferior en angles negatius.

Cal comentar que aquest fet ja havia ocorregut en l'anàlisi anterior sobre l'angle de passada, on per valors d' angles positius el rendiment del model T, era superior, en canvi aquest influïa negativament en angles negatius. Es valora directament el comportament del model punt a punt respecte el model 0, amb la finalitat de comprovar quina millora o pèrdua té en cada angle de gir, (veure Figura 94).



**Figura 94:** gràfic comparatiu percentual del model T respecte model 0 sobre eix Y

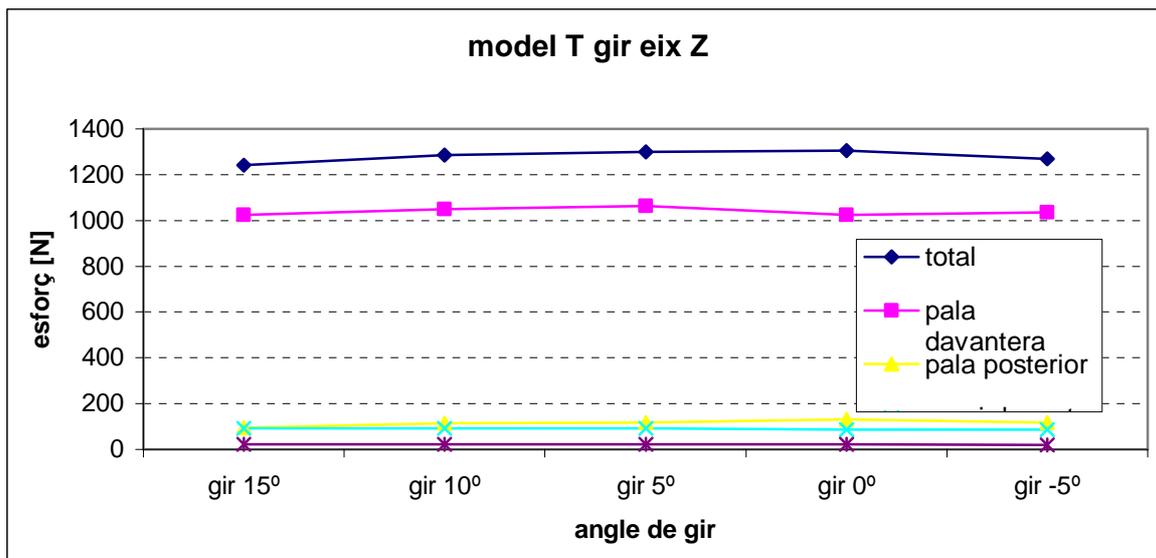
El gràfic resultant resulta molt similar a l'anterior, en l'angle de passada respecte l'eix Z. Amb tendències positives en angles positius i a l'inversa, en aquest cas els valors són molt més elevats pel que fa a millora i a pèrdua, però el comportament és simètric.

Tot i que sembla ser que l'augment es clar, concretament en un 5,13% en l'eix Y, i pels valors d'angle de gir estudiats, no es tracta d'una dada favorable, doncs els esforços sobre aquest eix, només ajuden a enfonsar més el rem dins l'aigua o a empènyer cap a la superfície, per tant interessa disposar de valors més baixos en aquest eix de treball.

Per últims queda comparar la variació sobre l'eix Z, a continuació es mostra la taula 21, amb els valors d'esforç sobre les diferents parts del model pels diferents angles de gir, i s'expressen de forma gràfica per comprovar el seu comportament durant el gir (veure Figura 95).

	gir 15°	gir 10°	gir 5°	gir 0°	gir -5°
Total [N]	1241	1287	1299	1305	1268
pala davantera [N]	1024	1049	1062	1023	1036
pala posterior [N]	96	115	116	132	117
nervi davanter [N]	91	92	92	85	85
nervi posterior [N]	22	22	21	21	19

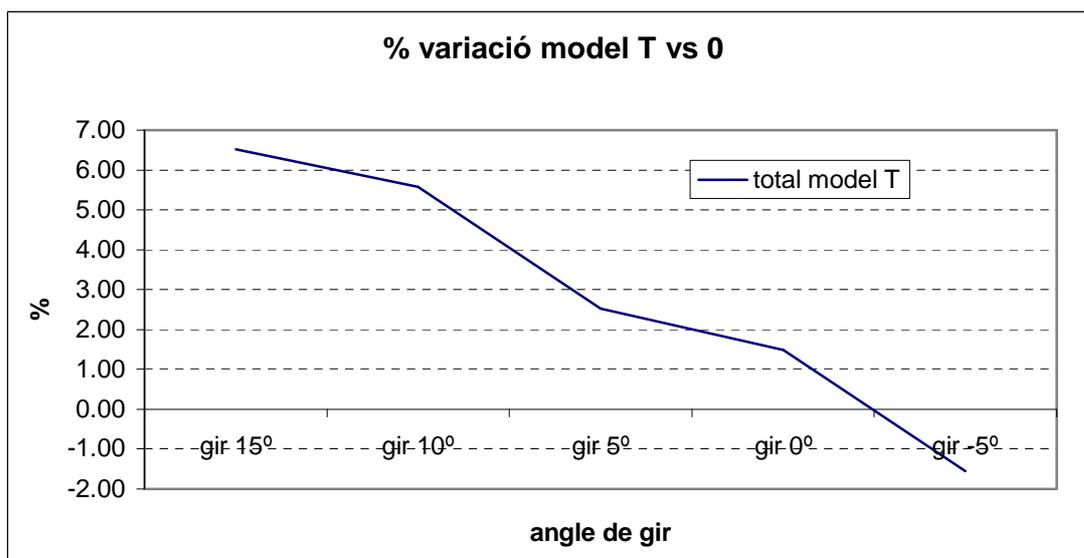
**taula 21:** valors d'esforç en l'eix Z, sobre model T, per diferents angles de gir



**Figura 95:** gràfic d'esforços del model T, sobre l'eix Z per diferents angles de gir

Molt lineals i constants, sense gaires canvis, i molt similars als observats en el model 0, només a destacar una baixada en el punt de gir 0, en la pala davantera, però dins una certa linealitat.

Per últim es comparen directament amb els valors obtingut en els mateixos punts pel model 0, en % per tal de tenir un millor contrast. (veure Figura 96)



**Figura 96:** variació percentual del model T respecte el model 0, per angle de gir

Altres cops per valors positius torna a donar un rendiment per sobre del model 0, en canvi en angles negatius, el rendiment és inferior. En aquest cas, els rendiments positius són favorables per al desplaçament, doncs ajuda a l'avanç de l'embarcació al estar situat sobre l'eix Z.

El valor calculat aquest cop per l'eix Z, i amb el rang d'angles de gir estudiat és d'un 2,41% de millora del model T, respecte el model 0.

## 5.- CONCLUSIONS

La simulació virtual mitjançant elements finits, permet una gran potència de càlcul i obtenir gran quantitat de resultats en les simulacions. És l'eina adequada per estudis d'aquests tipus, on es precisa una gran capacitat d'anàlisi de dades, i l'obtenció de resultats fiables i contrastables.

La part més laboriosa de l'estudi ha estat adequar un model de treball per al medi bifàsic necessari degut als inconvenients que aquest comportava: el fet d'haver d'interactuar amb aigua i aire al mateix temps.

Per aconseguir el model de càlcul adequat, s'ha seguit un procés lògic, en el qual s'avançava a mesura dels resultats obtinguts en les proves anteriors. De forma que cada cop el model virtual, s'assimilava més a la realitat, en resposta i comportament.

Un cop el model ha funcionat de forma correcta s'ha buscat una màxima definició i correcció en els resultats, aleshores l'estudi ha pres una dinàmica molt més àgil.

El nombre de simulacions total ha estat elevat amb la finalitat de poder aconseguir uns resultats contrastables. Els quals han permès avaluar el comportament del model més utilitzat actualment en competició i estudiar punts positius i negatius d'aquest, observant-ne un comportament molt correcte.

Al contrastar-lo amb dos models diferents de mercat, el model de referència s'ha mostrat lleugerament superior i per tant justifica la seva geometria.

En l'assaig de diferents prototips, hi ha algun model que no ha aportat res, com seria el cas del model amb forats.

D'altres, com el model rugós o rodó, han mostrat un comportament lleugerament inferior, però mitjançant les capacitats del programa es podia veure i justificar, el perquè d'aquest comportament.

El model T ha mostrat tenir un rendiment lleugerament millor que la resta. Un cop simulat en totes les posicions d' estudi i havent-ne demostrat i avaluat les millores i l'abast d'aquestes, pot resultar com un nou producte de mercat.

Un cop arribats a aquest punt, caldria dir que, els canvis en la forma de la pala no milloren el seu rendiment, ans al contrari, el disseny actual de mercat sembla tenir un dels millors rendiments pel que fa a la forma. Per a millorar-ne el seu rendiment cal treballar en d'altres aspectes, com podria ser el cas de l'aplicació d'apèndixs.

Per a possibles propers estudis sobre aquest tema, mitjançant la simulació amb CFD, seria interessant avaluar l'afectació de petits canvis en els apèndixs i la sol·licitació mecànica del model.

## **6.- RELACIÓ DE DOCUMENTS DEL PROJECTE**

- **Document 1**      **Memòria**
- **Document 2**      **Pressupost**

## 7.- BIBLIOGRAFIA

- Caplan N. & Gardner T. (2007) 'Optimization of oar blade design for improved performance in rowing'. Journal of sports sciences, 25:13, 1472-1478.
- Caplan N. & Gardner T. (2007) 'A mathematical model of the oar blade-water interaction in rowing', Journal of sports sciences, 25:9 , 1025-1034.
- Macrossan M.N. (2008) 'The direction of the water force on a rowing blade and this effect on efficiency' University of Queensland, Mechanical Engineering Report nº 2008/03.
- Davidson L.& Krajinovic S. (1999) 'Large eddy simulation of the flow around a surface-mounted a cube using a dynamic one-equation subgrid model', TSFP-1 741-746 Ed. S.Banerjee & J.K.Eaton, begell house.
- Francisco J.M. (1996) 'Remo do banco fixo' Ediciones Lea
- Dudhia A. (2008) 'The physics of rowing' <http://www.atm.ox.ac.uk/rowing/physics/> (visitat 26-08-08)
- Atkinson,W.C. (2001) 'Modeling the dynamics of rowing' <http://www.atkinsoph.com/row/rowrpage.htm>(visitat 26-08-08)
- [http://www.concept2.com/us/oars/pursuit/oar\\_testing.aspC2](http://www.concept2.com/us/oars/pursuit/oar_testing.aspC2) ' Oar on-water testing results' (visitat 26-08-08)
- Mataix, Claudio. (2005) 'Mecanica de fluidos y maquinas hidraulicas' Ediciones Computec.

