

Treball de Fi de Grau

**GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES
INDUSTRIALS**

MEMÒRIA

**ESTUDI COMPARATIU DELS
HYDROFOILS DEL SISTEMA THRUSTER
DE QUILLES DE SURF**

Autor: Bernat Nadal i Bosch

Director: Enric Trillas Gay

Convocatòria: Gener 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

En els darrers anys, la simulació ha pres una importància incalculable en les àrees de disseny, sobretot en l'àmbit de la hidrodinàmica i la aerodinàmica, millorant els resultats obtinguts de forma molt notable en els sectors on aquestes intervenien.

En el món del surf no ha estat diferent. Tot i que la implementació de les tècniques de simulació ha tardat en arribar, en part degut a la gran cultura i dedicació de les tècniques artesanals, ha acabat intervenint pràcticament en tots els processos de disseny dels components, i les millores obtingudes han permès una evolució de caràcter exponencial en el nivell dels surfistes i el seu rendiment.

En aquest treball es realitzarà un estudi concret d'una de les parts més importants en la física del surf i que passa més desapercebuda per molts surfistes: el sistema de quilles. Aquest estudi es basarà en primer lloc en una comprensió general de la teoria darrere el disseny d'aquest sistema, entenent les diferències principals entre uns models i els altres, per acabar centrant-se i analitzant el sistema més emprat mundialment avui en dia: el sistema de tres quilles o Thruster.

Concretament s'analitzaran els diferents foils utilitzats en el sistema Thruster en la situació més crítica dins la onada, on la resposta de la taula és crucial per aconseguir la direcció i velocitats necessàries en cada circumstància.

S'analitzaran per tant la sustentació, la resistència a l'avanç i el moment resultant d'aquestes forces, així com el camp de velocitats i el camp de pressions, per arribar d'aquesta manera a unes conclusions del motiu d'ús en cada situació dels diferents foils analitzats.

Sumari

Resum	1
Sumari.....	2
1. Glossari	7
2. Introducció i objectius	8
2.1 Origen i motivació del projecte	8
2.2 Objectius del projecte	9
2.3 Abast del projecte.....	9
3. Introducció al surf	10
3.1 Història i anàlisi d'antecedents	11
3.1.1 Perú, Polinèsia i Hawaii	11
3.1.2 Califòrnia 1930 a 1960.....	13
3.1.3 Califòrnia 1960 a 1990.....	15
3.1.4 Del 1990 al present.....	17
3.2 Característiques de la taula	19
3.3 Característiques de les quilles	20
3.3.1 Propietats físiques	21
3.3.2 Característiques geomètriques	23
4. Introducció a la Dinàmica de fluids.....	27
4.1 Nombres adimensionals i forces	27
4.2 Equacions de la dinàmica de fluids.....	30
4.3 Model de la capa límit	32
4.4 Cavitació	32
4.5 Relacions teòriques amb el sistema de quilles.....	33
4.5.1 Relació entre les forces Lift, Drag, Pivot i Drive	33
4.5.2 Eficiència hidrodinàmica.....	35
4.5.3 Relació entre l'angle d'atac i el Lift.....	35
4.5.4 Creació del pivot.....	39

5. Fase de simulació	40
5.1 Presentació dels hydrofoils a estudiar	40
5.2 Condicions de contorn.....	48
5.3 Dinàmica Computacional de Fluids (CFD)	49
5.3.1 Creació de la geometria.....	50
5.3.2 Creació del mallat	51
5.3.3 Definició de la configuració	56
5.4 Anàlisi de resultats	58
5.4.1 Inside Foil.....	58
5.4.2 Flat Foil.....	61
5.4.3 80/20 Foil.....	63
5.5 Comparació dels resultats	65
5.6 Condicions òptimes de cada perfil	68
6. Planificació	69
7. Estudi econòmic.....	71
8. Impacte	73
9. Conclusions	74
Agraïments.....	76
Bibliografia	77

Sumari de figures, taules i gràfics

FIGURES

Figura 3.1.1. La quilla de Tom Blake.....	14
Figura 3.1.2. El sistema Twin Fin de Bob Simmons	15
Figura 3.1.3. George Greenough amb la seva quilla d'allargament alt.....	15
Figura 3.1.4. Simon Anderson i el primer sistema de tres quilles.....	16
Figura 3.2.1. Parts de la taula de surf.....	19
Figura 3.2.2. Tipus de bottoms.....	19
Figura 3.3.1. Fitxa d'especificacions d'una quilla	22
Figura 3.3.2. Mides de les quilles en funció dels pesos.....	23
Figura 3.3.3. Nomenclatura del foil.....	25
Figura 3.3.4. Representació de les propietats geomètriques	25
Figura 3.3.5. Esquematització del Cant.....	26
Figura 3.3.6. Esquematització del Toe	26
Figura 4.2.1. Teorema de Bernoulli entre trams d'una canonada	30
Figura 4.2.2. Flux al voltant d'un foil.....	31
Figura 4.3.1. Capa límit en una placa plana	32
Figura 4.4.1. Cavitació a una hèlix.....	32
Figura 4.5.1. Esquematització de les forces Lift, Drag, Hold i Drive.....	34
Figura 4.5.2. Angle d'atac en foils aerodinàmics.....	35
Figura 4.5.3. Flux incident al sistema de quilles.....	36
Figura 4.5.4. Representació dels dos casos.....	36
Figura 4.5.5. Esquema de forces en el drop o tram rectilini.	37
Figura 4.5.6. Bottom turn.....	37
Figura 4.5.7. Posició de les quilles en el gir	38

Figura 4.5.8. Esquema de forces en el Bottom Turn	39
Figura 5.1.1. Inside Foil AG13	41
Figura 5.1.2. Flat Foil AG11	43
Figura 5.1.3. 80/20 Foil AG03	45
Figura 5.1.4. 50/50 Foil NACA 0010	47
Figura 5.3.1. Obtenció de les coordenades del perfil	50
Figura 5.3.2. Geometria per a la simulació del foil AG03.....	50
Figura 5.3.4. Càlcul del Reynolds i la distància a la paret.....	52
Figura 5.3.5. Configuració del mallat	53
Figura 5.3.6. Definició dels paràmetres de la capa límit	53
Figura 5.3.8. Mallat final	54
Figura 5.3.9. Mínima, màxima i mitjana de Skewness	55
Figura 5.3.10. Nombre d'elements per cada Skewness	55
Figura 5.3.11. Evolució dels residus	57
Figura 5.3.12. Evolució dels coeficients Lift i Drag	57
Figura 5.4.1. Camp de velocitats de l'Inside Foil	58
Figura 5.4.2. Línies de corrent a través de l'Inside Foil	58
Figura 5.4.3. Camp de pressions de l'Inside Foil	59
Figura 5.4.4. Camp de velocitats del Flat Foil.....	61
Figura 5.4.5. Línies de corrent del Flat Foil	61
Figura 5.4.6. Camp de pressions del Flat Foil	62
Figura 5.4.7. Camp de velocitats al foil 80/20	63
Figura 5.4.8. Línies de corrent del foil 80/20	63
Figura 5.4.9. Camp de pressions pel foil 80/20	64
Figura 7.1. Diagrama dels percentatges dels diferents costos.....	72

TAULES

Taula 3.1. Tipus de foils i característiques	24
Taula 5.1.1. Coeficients AG13	42
Taula 5.1.2. Coeficients AG11	44
Taula 5.1.3. Coeficients AG03.	46
Taula 5.1.4. Coeficients NACA0010	47
Taula 5.4.1. Coeficients de l'Inside Foil.....	60
Taula 5.4.2. Coeficients del Flat Foil.....	62
Taula 5.4.3. Coeficients pel foil 80/20	64
Taula 5.5.1. Comparació dels coeficients de sustentació.	66
Taula 5.5.2. Comparació dels coeficients d'arrossegament.....	66
Taula 5.5.3. Eficiències	67
Taula 6.1. Activitats realitzades durant el treball	69
Taula 6.2. Diagrama de Gantt del Projecte	70
Taula 7.1. Cost total del projecte	71

GRÀFICS

Gràfic 5.1.1. C_D i C_L de l'AG13 envers l'angle d'atac.....	41
Gràfic 5.1.2. Eficiència de l'AG13 envers l'angle d'atac	42
Gràfic 5.1.3. C_D i C_L de l'AG11 envers l'angle d'atac.....	43
Gràfic 5.1.4. Eficiència i de l'AG11 envers l'angle d'atac	44
Gràfic 5.1.5. C_D i C_L de l'AG11 envers l'angle d'atac.....	45
Gràfic 5.1.6. Eficiència i C_M de l'AG03 envers l'angle d'atac	46
Gràfic 5.1.7. C_L , C_D i eficiència envers l'angle d'atac	47

1. Glossari

VC	Volum de control
U/v	Velocitat del fluid [m/s]
Q	Flux Volumètric o cabal [m ³ /s]
P_i	Pressió del fluid i [Pa]
ρ	Densitat del fluid [kg/m ³]
μ	Viscositat dinàmica del fluid [kg/ms]
g	Acceleració gravitatòria terrestre [m/s ²]
α	Factor corrector de l'energia cinètica
Z_i	Cota d'energia potencial [m]
FL	Força de <i>lift</i> o sustentació [N]
FD	Força de <i>drag</i> o de resistència a l'avanç [N]
C_L	Coefficient de <i>lift</i>
C_D	Coefficient de <i>drag</i>
η	Eficiència del perfil
δ	Gruix de la capa límit [m]
L	Longitud característica [m]
S	Superfície de referència [m ²]
A_i	Àrea de la superfície i [m ²]
U_0	Velocitat inicial del fluid [m/s]
$U_{màx}$	Velocitat màxima del flux [m/s]
$P_{màx}$	Pressió màxima del fluid [Pa]
$P_{mín}$	Pressió mínima del fluid [Pa]
ΔP	Diferència entre la pressió màxima i mínima [Pa]

2. Introducció i objectius

2.1 Origen i motivació del projecte

Des del primer cop que vaig provar el surf amb 12 anys a la platja de Palamós vaig quedar fascinat amb la sensació que provocava el fet d'agafar una onada. Recordo perfectament que vaig notar com l'energia de l'aigua ens propulsava a la taula i a mi cap a la platja des d'on la família m'observava, i com al principi anava agafant velocitat, a continuació notava una estrebada forta que m'indicava que era el moment de posar-me de peu i de com se'm van accelerar les pulsacions en la baixada des de la part de dalt de la onada fins la part plana. Des d'aquell dia i fins avui el surf ha estat i és la meva principal passió, i sempre la he compaginat amb els estudis de la ESO, el batxillerat, i ara el Grau en Enginyeria de Tecnologies Industrials.

Per això, al moment d'escollir el tema pel Treball de Fi de Grau vaig pensar que era la ocasió perfecta per combinar dues parts de la meva vida que fins que vaig cursar Mecànica de Fluids no pensava que estiguessin tant relacionades, i per això vaig posar-me a buscar un punt d'interès comú en els dos mons.

Després de parlar amb diferents docents de l'escola, vaig arribar a la conclusió de que un possible tema d'estudi era el sistema de quilles. Com que ja venia amb algunes idees que se m'havien acudit l'any anterior a Mecànica de Fluids al veure els perfils d'ala, molt similars als foils utilitzats per les quilles de surf, vaig decidir estudiar la repercussió dels múltiples hydrofoils utilitzats en les quilles que es trobaven en el mercat, per entendre les diferències en la resposta de cada alternativa dins l'aigua.

2.2 Objectius del projecte

La realització d'aquest estudi té una finalitat molt clara que és entendre la resposta dels tres hydrofoils més utilitzats en el sistema de tres quilles o Thruster, analitzant el comportament d'un flux d'aigua al voltant del seu perfil mitjançant la simulació a través de la Mecànica Computacional de Fluids (CFD).

Amb els resultats obtinguts, el segon objectiu és preveure quines serien les millors condicions d'ús per cada un dels tres hydrofoils.

Finalment, un tercer objectiu implícit en tots els Treballs de Fi de Grau és el de descobrir nous camins d'estudi per a futures investigacions o per a futurs treballs, enriquint així la curiositat de l'estudiant i el seu interès per la matèria.

2.3 Abast del projecte

L'abast d'aquest projecte ha estat limitat principalment per la durada establerta del projecte d'un quadrimestre. És per això que l'estudi s'ha centrat principalment en la simulació en 2D d'una secció mitjana de les quilles laterals.

Aquest fet ha provocat que els resultats obtinguts siguin simplement una aproximació que, si bé és cert que serveixen per a la comparació del rendiment dels diferents perfils, no són tant fiables com els que s'haguessin pogut obtenir amb una simulació en 3D, on els efectes de la variació gradual de la mida de la secció o els efectes de la vorticitat creada a l'extrem de la quilla s'haguessin pogut estudiar més detalladament.

No obstant, al tractar-se d'un estudi purament comparatiu el que tindrà més rellevància són les variacions entre els resultats obtinguts, més que els resultats en sí mateixos, donat que aquestes ens donaran la informació per a extreure les conclusions.

3. Introducció al surf

El surf és un esport nàutic que consisteix en aguantar-se de peu sobre una onada mitjançant una taula, intentant-ho realitzar amb la major traça i equilibri possibles, a mesura que la onada porta el surfista des del mar cap a la costa, en el sentit natural d'avanç de les onades.

Es pot practicar a qualsevol lloc on hi hagi onades que trenquin, és a dir que tinguin espuma, fet que succeeix quan l'energia que mou la massa d'aigua es troba amb un fons relativament petit. Aleshores, l'energia provinent de la onada no té més remei que projectar-se cap a dalt, fent que la massa de dalt perdi l'equilibri i caigui. Cal esmentar que per a la seva pràctica no cal vent, ja que malgrat les onades es formen gràcies a aquest, poden sobreviure sense ell (com a mar de fons), tot i que molt sovint s'associïn vent i onades ja que les onades grans les causen els temporals.

Finalment, el que garanteix que el surfista pugui agafar amb facilitat la onada i aguantar-s'hi paral·lelament són les quilles o aletes, ja que aquestes proporcionen estabilitat, control i adherència a la onada.

3.1 Història i anàlisi d'antecedents

Per estudiar el que coneixen avui en dia com a quilles és imprescindible fer una revisió a la història del surf des dels seus inicis, ja que és impossible entendre els canvis que es van produir en aquestes sense entendre la evolució que va tenir el surf i el context històric en què es va desenvolupar.

3.1.1 Perú, Polinèsia i Hawaii

La història del surf comença d'uns 1000 a 3000 anys aC, amb unes embarcacions conegudes com Cavallets de Boga, a la regió del Perú i Bolívia. En aquestes regions, els pescadors locals utilitzaven aquestes canoes de 4 a 5 metres d'alçada i de 0,6 a 1 metre d'amplada per la pesca. La seva rellevància a l'evolució del surf és el recorregut que realitzaven els pescadors per dur a terme la pesca.

Els pescadors sortien des de la platja asseguts al Cavallet i, amb l'ajuda d'un rem, creuaven la zona d'espuma de les onades fins arribar a la zona posterior on aquestes trenquen per poder pescar, coneguda com a *Line Up*. Un cop allà, pescaven fins acumular gairebé uns 50 kg de peix, que posteriorment carregaven a dins del Cavallet, que pesava també d'uns 45 a 50 kg. Per últim, havien de tornar a la platja assegurant la càrrega, ja que era el producte de tot un dia de feina. Per tornar-hi només hi havia un camí de sortida: navegant les onades en la direcció d'aquestes cap a la platja, fet que es va batejar com *surfing* en la seva llengua nativa. La importància d'aquestes embarcacions en la història de les quilles recau en el rem. A la fase de tornada, per no perdre tot el peix capturat, s'havia d'aconseguir estabilitat a la embarcació, ja que d'això depenia tot el menjar del poble. Per aconseguir-ho, el que feien era col·locar el rem amb que havien aconseguit arribar fins a la zona de pesca per la part posterior de l'embarcació fins endinsar-lo uns centímetres dins l'aigua, aconseguint d'aquesta manera garantir la direcció del Cavallet i proporcionar estabilitat.

Una pràctica similar es produïa gairebé simultàniament a la Polinèsia, sobretot a l'Oest. Allà els pescadors també *surfaven* les onades per tornar amb la seva pesca a la platja, però en aquest cas ja ho feien amb el que més endavant serien batejades com les primeres taules de surf conegudes per l'home. Tanmateix, la pesca en aquestes taules era sense rem, i per tant el que es feia per guanyar estabilitat era col·locar els peus fora

de la taula, dins l'aigua, de manera que s'aconseguia el mateix efecte però en menor proporció que amb el rem.

Com que els polinesis eren grans navegants, entre el 300 i el 600 dC es van produir diverses migracions per a descobrir noves illes, d'entre elles Hawaii, que avui en dia es coneix com el centre mundial d'aquest esport. Aquests desplaçaments van fer que es traslladessin moltes de les seves tradicions i costums a la illa, incloent també la pràctica del surf.

No va ser fins al 1778 quan la tripulació del Capità Cook, en una de les seves tres expedicions per l'oceà pacífic tractant de descobrir el passatge del Nord-est, va trobar les illes Hawaii, batejades en aquell moment com illes Sandwich. El capità va observar a Hawaii el que la gent d'allà anomenava el *he'enalu*, l'art de lliscar sobre les onades. *He'e* feia referència al canvi de la forma sòlida a líquida i *nalu* al moviment de la onada. Cook també va adonar-se que el surf que practicaven els hawaiians era una qüestió de jerarquia social. La noblesa duia taules de materials més bons i feia surf a unes platges determinades, reservades únicament per la gent de sang reial, mentre que la resta del poble surfejava on podia i amb taules de qualitat més baixa, molt pesades.

Amb l'arribada dels H'aole, *homes blancs* o missioners protestants al 1820 Hawaii va començar a ser una societat cristiana colonitzada. Els nadius hawaiians es van haver de vestir, aprendre a llegir i escriure a les escoles que es van fundar, i es van suprimir i prohibir moltes tradicions, entre elles el surf, ja que era immoral que es practiqués amb el cos pràcticament nuu. El surf va sobreviure només en un grup reduït de nadius que vivien al marge de la legalitat a O'ahu i seguien fent les seves pròpies taules i surfejant onades que els missioners no coneixien.

En tot aquest temps, els hawaiians ja surfejaven de peu amb taules que encara no portaven quilles, havent de controlar a la perfecció l'equilibri i els moviments necessaris per realitzar maniobres, ja que sense les quilles les taules eren molt inestables i derrapaven amb facilitat.

No va ser fins pocs anys després del 1900 que el surf va reaparèixer, gràcies en part a un grup de nadius entre els quals es trobava Duke Kahanamoku, també conegut com el

pare del surf modern o *El gran Kahuna* (Kahuna era el títol que es donava als experts o mestres d'alguna matèria).

Aquest grup de nadius va fundar al 1905 a la platja de Waikiki el *Hui Nalu*, un club de surf que, juntament amb el Outrigger Canoa Club fundat el 1907 per tres occidentals també apassionats de l'antic esport dels reis polinesis, van revivir l'esport a base de competicions i exhibicions a la platja de Waikiki.

Gràcies a aquestes influències occidentals i tenint en compte que Duke era també campió olímpic de Natació, quan viatjava pel món per les competicions de natació i trobava onades realitzava exhibicions de surf, les quals van dotar de gran popularitat a l'esport a llocs com Califòrnia, on més endavant va viure-hi, i Austràlia. Aquest fet és dels més importants en aquesta història ja que mentre vivia allà va realitzar múltiples viatges al nord i al sud, escampant la imatge del que més endavant seria conegut com l'estereotip de *beach boy*, ja que a banda de ser un gran surfista i nadador, també era un excel·lent socorrista i un apassionat de la canoa a rem, i per tant es passava tot el dia a la platja.

3.1.2 Califòrnia 1930 a 1960

Arrel d'això, la cultura del surf a Califòrnia va créixer exponencialment entre els anys 1930 i 1950. La competència que hi havia entre les diferents platges i els diversos clubs de surf que s'acabaven de fundar a l'estat Americà va fer que es comencessin a produir taules menys pesades i buscar millors materials, i en aquest moment va ser on realment la tecnologia del surf va començar a créixer exponencialment, en part gràcies a pioners com Tom Blake.

Blake va aconseguir canviar el disseny de taula que s'havia utilitzat fins ara, de fusta massissa, pràcticament sense curvatura longitudinal i sense quilla; a una taula que es trobava buida per l'interior, més curta en alguns casos i la meitat de lleugera que les que s'havien vist fins aquell moment. Va ser un revolucionari de la tecnologia del surf, el catalitzador de moltes idees que s'havien comentat però que ningú havia realitzat, sense ell la evolució de la indústria hagués estat molt més lenta.

Una de les contribucions més importants de Blake probablement va sorgir degut a un accident que va tenir on es va fer mal al braç. Com que volia seguir surfejant, havia de

buscar la manera de proporcionar més estabilitat i control a la taula. Blake en aquell moment ja era un expert en aerodinàmica i hidrodinàmica que treballava a CalTech. Es va posar a investigar i a buscar solucions fins que va arribar a la primera quilla del surf modern, que havia extret d'un vaixell. La va enganxar a la taula amb claus i al provar-la va quedar fascinat amb els resultats, arribant a dir que s'havia transportat a una nova realitat i a unes sensacions completament diferents a les que havia experimentat fins al moment.

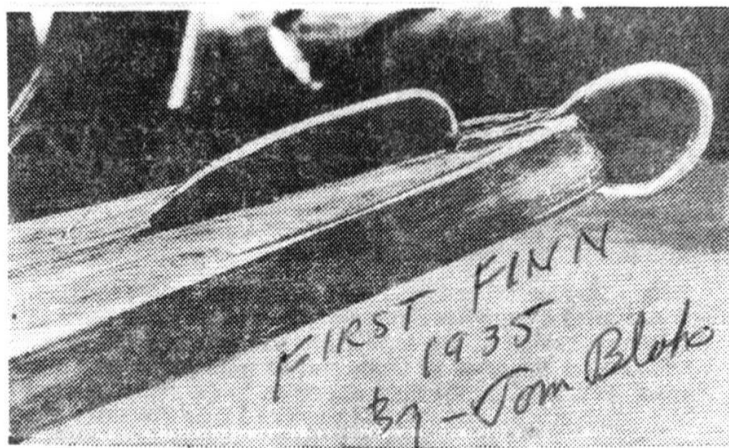


Figura 3.1.1. La quilla de Tom Blake

Tanmateix, la quilla va tardar uns deu anys a agafar popularitat. Durant els anys posteriors al 1940 alguns surfistes van començar a tallar ells mateixos quilles de fusta per afegir-les a les seves taules, seguint el disseny que havia utilitzat Blake. També durant aquests anys Bob Simmons, el qual va estudiar la hidrodinàmica de les taules i materials que s'havien utilitzat a la Segona Guerra Mundial com la fibra de vidre i la resina, va començar a construir les primeres taules fetes de espuma, amb guies de fusta i recobertes de fibra de vidre i resina, molt similars a la manera en que es fan les taules avui en dia.

Per la part de les quilles, Simmons és conegut per utilitzar-ne per primer cop dues a una taula, sistema conegut com a *Twin Fin*, i també per fer-les de la forma que tenen avui en dia: de aleta dorsal de dofí. Les va separar del centre, col·locades gairebé als costats de la taula, i els hi va donar una obertura de 10°. Aquest sistema va resultar en unes taules amb molta més velocitat dins l'aigua.

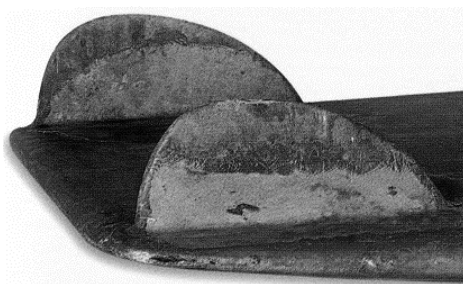


Figura 3.1.2. El sistema Twin Fin de Bob Simmons

Després del *Twin Fin* també es va inventar la primera caixa de quilles o *Fin Box* per part de George Downing, que cansat de trencar la fibra amb la que enganxava la quilla a la taula cada cop que volia provar una posició nova d'aquesta, va decidir inventar un sistema que permetés separar la quilla de la taula i col·locar-la en la posició desitjada, tot i que en moltes taules es va seguir utilitzant el sistema de quilla fixada amb resina ja que el sistema inventat per Downing no havia donat gaire bons resultats.

3.1.3 Califòrnia 1960 a 1990

Cap al 1960 a Califòrnia es va començar a potenciar la quilla de fibra de vidre, la qual era més profunda i més estreta que les que s'havien fet fins al moment de fusta, per poder seguir i permetre els moviments que feien els surfistes sobre les taules llargues. Molts surfistes van optar pel seu propi disseny, resultant en una gran diversitat de formes i contorns. La que més va triomfar va ser la del surfista George Greenough, inspirada en la cua d'una tonyina, coneguda com a *high aspect ratio fiberglass foiled fin*, és a dir, una quilla de fibra de vidre amb allargament alt (l'allargament alt és un terme d'aerodinàmica que vol dir que té l'ala llarga i estreta).



Figura 3.1.3. George Greenough amb la seva quilla d'allargament alt

Aquest tipus de quilla es va implementar a la taula del competidor Nat Young, que al concurs de surf de San Diego de 1966 va realitzar una actuació espectacular amb la quilla de Greenough i una taula més curta. Aquesta exhibició va obrir els ulls a tothom pel nou tipus de quilla i la taula curta, i així va començar la revolució de les taules curtes.

Els anys següents es va experimentar amb dissenys diferents de quilles i variacions del sistema *Twin Fin*, es volia aconseguir un sistema que aportés més velocitat i aguantés més en les onades grans i potents que s'estaven tot just començant a surfejar. Van sorgir diferents dissenys d'entre els quals destacaven el que incorporava una quilla petita al mig de les dues del *Twin Fin*, o també el que n'afegia dues de petites al costat de la quilla central gran.

Posteriorment, al 1980 el surfista professional australià Simon Anderson no sabia quin model triar per les competicions d'onades petites, i anava variant entre el *Twin Fin* i el *Single Fin* (quilla central única). Un dia, quan va adonar-se que tots els experiments que s'havien fet implicaven tres quilles però de diferents mides, va decidir provar de fer-les totes de la mateixa mida i perfil similar.



Figura 3.1.4. Simon Anderson i el primer sistema de tres quilles

Va utilitzar la mateixa taula a les competicions de Bells Beach i Sydney (Austràlia) i més tard a Pipeline (Hawaii), i les va guanyar totes tres. Al cap d'uns anys el sistema de tres quilles o *Thruster* s'havia convertit en el sistema més popular i des d'aquell moment ha dominat el mercat, essent utilitzat per tot tipus de surfistes en tot tipus de condicions.

3.1.4 Del 1990 al present

Si bé és cert que durant aquests anys han sorgit altres sistemes de quilles i n'hi ha algun de molt interessant, la indústria del surf en el sector de les quilles ha apostat gairebé en la seva totalitat pel sistema *Thruster* i el seu desenvolupament.

Al 1990 es va tornar a aplicar a les taules el *Fin Box* que havia dissenyat Downing. Aquest cop s'havia millorat i s'havia adaptat per a les tres quilles, a càrrec de l'empresa FCS (Fin Control System). Aquesta invenció va ser crucial per a la revolució de la indústria de les quilles, les quals passar de ser un element més de la taula, l'objecte principal, a un producte totalment separat de la taula, amb el qual es podia experimentar i aconseguir sensacions diferents amb una mateixa taula.

Ben aviat van sorgir múltiples empreses que, fins a dia d'avui, s'han dedicat al desenvolupament, investigació i millora d'aquestes. En els últims anys s'han modificat molts aspectes com els materials de construcció, la forma, el contorn, la posició a la taula o bé la orientació.

Tanmateix, els canvis realitzats tant en la indústria de les taules de surf com de les quilles en els últims anys són avaluats després de la seva implementació per surfistes que intenten experimentar les diferències en condicions molt variades, donat que les condicions del mar són constantment canviants. És el que es coneix com la metodologia d'assaig i error: s'introdueix un canvi en el disseny inicial, es fabrica i posteriorment s'assaja. Si el canvi és positiu, s'obté un nou disseny i s'avalua el perquè de la millora. Si no ho és, es canvia el disseny cap a una altra via de desenvolupament.

Aquest mètode té dos problemes principals molt importants pel futur de la indústria del sector. Per una banda, com ja s'ha comentat, està molt influenciat per les condicions del mar que el surfista es troba, així com de les condicions climàtiques. Si bé es cert que s'intenten assajar en diferents condicions i escenaris, hi ha una gran part del sector que no està d'acord amb els resultats que s'aconsegueixen, ja que fa que el *feedback* que es rep no sigui totalment clar i objectiu. D'altra banda hi ha el problema dels costos de fabricació. Cada experimentació i canvis en els dissenys tenen un preu elevat si s'han de construir a mà i com a peces úniques.

És per això que en la última dècada el que s'ha fet és implementar la tecnologia de simulació per CFD al procés de construcció de taules i quilles. Amb els resultats obtinguts s'han pogut verificar numèricament moltes teories que, malgrat molts surfistes ja les donaven per vàlides, hi havia una gran part del sector que no n'estava convençuda. A més a més, s'han pogut provar per ordinador molts dissenys nous que no s'havien construït pels costos de fabricació i que han resultat ser exitosos, arribant també en la última dècada a sensacions molt diferents a l'aigua deguts a aquestes noves formes. Finalment, també s'han establert unes bases de coneixement objectiu pel que fa al món de la construcció.

La etapa que s'està vivint els darrers anys és una gran fase d'expansió, on s'estan descobrint i ampliant els límits de tot el que s'havia realitzat fins ara i excel·lent per a la indústria del surf i el seu desenvolupament, en aquest món cada cop més influït però també millorat gràcies a la potència de les noves tecnologies.

3.2 Característiques de la taula

A continuació es mostren les parts més importants de la taula de surf a les quals es farà referència durant el treball. El sistema de quilles actua directament i també es veu afectat per moltes d'aquestes parts.

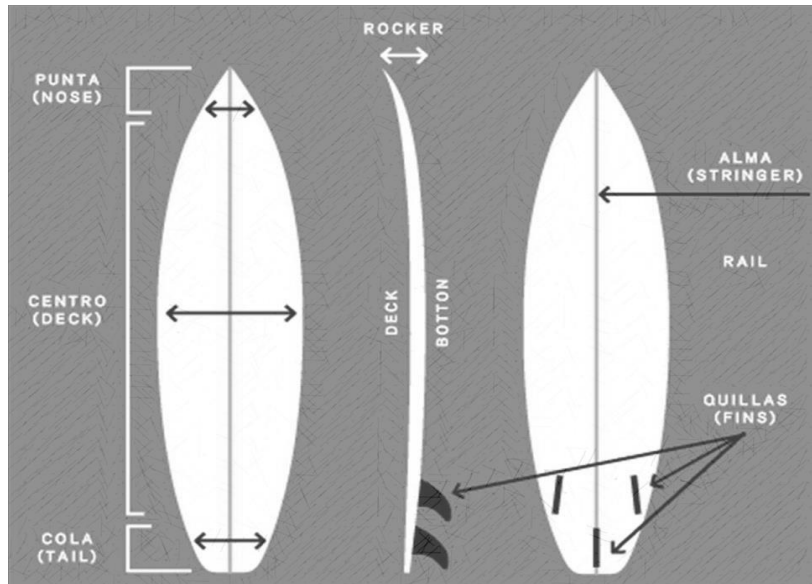


Figura 3.2.1. Parts de la taula de surf

D'aquestes, se'n destaquen la punta o *nose*; la cua o *tail* (on se situen les quilles per la part inferior); el *rocker*, que és la curvatura longitudinal de la taula i finalment el *bottom*, la superfície inferior en contacte amb l'aigua.

Cal tenir en compte que el *bottom* no és completament pla. Usualment, entre *rails* o bé entre l'*stringer* i el *rail* hi ha una certa curvatura de la superfície, que es modela de diferents formes per realitzar una conducció del flux d'aigua entrant pel *nose*, diferent en cada cas. Els *bottoms* més típics són els següents.

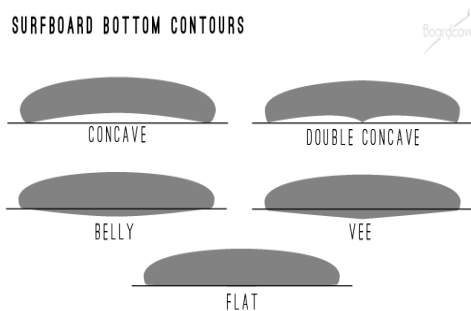


Figura 3.2.2. Tipus de bottoms

Aquestes variacions en la geometria també afectaran en la manera en que el flux incidirà al sistema de quilles, donat que no són constants sinó que varien en tot l'eix longitudinal.

3.3 Característiques de les quilles

La elecció de les quilles segons el tipus de condicions del mar que ens trobem és un tema que molt poca gent té en compte i que tanmateix és molt important, ja que pot arribar a influir fins a un 40% al nostre rendiment i execució.

Les possibilitats en quant al disseny i experimentació amb les quilles són gairebé il·limitades, i cada possibilitat afecta de manera diferent a les sensacions que tenim al mar. Per això és molt important experimentar i informar-se dels diferents tipus de quilles abans de realitzar una elecció precipitada, ja que com ja s'ha comentat aquestes poden millorar la forma de surfejar molt significativament.

El que succeeix a molts surfistes a l'hora d'evolucionar és que es centren únicament en canviar de taula, fixant-se en si la llargada, amplada o els costats són els adequats pel seu nivell o si porten el volum correcte, oblidant-se molt sovint de les quilles que duen, que com ja s'ha comentat afecta notablement al rendiment.

Com és lògic, cal aleshores tenir una taula adequada pel nostre pes, dimensions i nivell, però també unes quilles correctes pels aspectes anteriors i a més a més que funcionin correctament amb l'objectiu de la taula. Si tenim una taula per onades on l'important és la velocitat i casi no hi ha temps de fer girs, les quilles no poden ser les millors per girar, sinó les més ràpides, passant així la importància de les altres característiques en segon pla. La comparació més adequada per entendre aquesta situació probablement seria la d'un cotxe i les seves rodes. No posarem unes rodes per turisme a un Formula 1 ni tampoc unes rodes de Formula 1 a un turisme. Cada cotxe té la seva finalitat i necessita unes rodes en sintonia amb aquesta.

Al mercat el que trobem són diferents models estandarditzats, entre els quals el que varia són d'una banda les seves característiques geomètriques, és a dir les dimensions i formes, i de l'altra els materials amb els que estan construïdes.

Els canvis en la geometria provoquen unes forces i pressions diferents en cada model que comporten sensacions i comportaments a la onada també distintes. La geometria i de quina manera afecta al comportament és el que s'estudiarà principalment en aquest treball, deixant de banda els materials i l'estudi de rigidesa o flexibilitat.

Al tenir tantes possibilitats a l'hora d'escollir el sistema de quilles s'ha decidit centrar l'estudi en el sistema més comú aquí a Europa i Amèrica: el sistema de tres quilles o *Thruster*.

Com s'ha vist a l'apartat d'història, el sistema *Thruster* o de tres quilles és el més usual en taules curtes o *shortboards* (en contraposició a les taules llargues o longobards i el seu sistema de quilla única o *single fin*). És el més emprat ja que les taules curtes, les quals es van convertir en les més populars en la revolució al surf modern, permeten girs més radicals i una major resposta de la taula.

3.3.1 Propietats físiques

Abans de començar a estudiar la geometria de les quilles i com aquesta afecta al seu comportament cal saber primer què es vol dir quan es parla de comportament de les quilles i com es classifica oficialment en termes tècnics a la indústria del surf.

Els comportaments de les quilles es poden traduir a les sensacions que el surfista experimenta dins l'aigua, i per tant són la essència del treball. Abans de passar a la fase de simulació cal tenir molt clares les propietats físiques existents i els tecnicismes per no cometre errors de nomenclatura o identificació.

Quan es parla de propietats d'un model de quilles determinat es parla típicament del *hold*, del *drive* i del *pivot*. Al dissenyar unes quilles s'atorga un valor en una escala de l'1 al 5 a cada una d'aquestes tres característiques perquè el comprador sàpiga quina resposta obtindrà a l'aigua.

A banda d'això, també es classifiquen la talla, les dimensions, el material i la flexibilitat de les quals se'n parlarà més endavant.

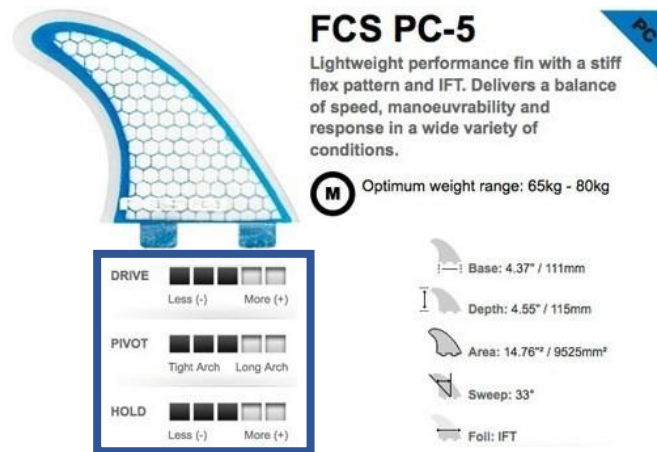


Figura 3.3.1. Fitxa d'especificacions d'una quilla

- i. **Hold.** En primer lloc, el *hold* fa referència a la capacitat que tenen les quilles d'aguantar el moviment transversal, és a dir, el *hold* és la força transversal que garanteix que la taula mantingui la seva direcció sense derrapar. Generalment, sabem que les quilles grans, degut que tenen més superfície, tenen més *hold*. Si la anem disminuint podem mantenir el *hold* que necessitem i a més a més guanyar velocitat, ja que estem reduint la fricció. Podem reduir-la fins al punt que la superfície és tant petita que al rebre la pressió que exercim amb el peu posterior en un gir, per exemple, la quilla és incapaç d'aguantar aquesta força i per tant derrapem.
- ii. **Drive.** D'altra banda, el *drive* és la habilitat d'accelerar o bé de mantenir la velocitat durant els girs, i si és possible augmentar-la. Les quilles amb poc drive perden molta velocitat durant els girs, i per tant seran una bona opció en onades amb prou potència com per proporcionar ja la velocitat necessària per surfejar. Per contra, es buscaran quilles amb més drive quan generar velocitat sigui un problema, és a dir amb onades de poca qualitat o petites.
- iii. **Pivot.** Per últim, el pivot fa referència a la longitud de l'arc de gir en realitzar una maniobra. Com més pivot tenim, més curt és l'arc que tracem amb el gir. Com menys pivot tenim, més ample és el gir que realitzem.

3.3.2 Propietats geomètriques

Ara bé, aquestes propietats físiques no apareixen per art de màgia. Les principals causants de tenir un cert *hold*, *drive* i *pivot* són les propietats geomètriques. Se'n destaquen les següents.

i. Mida. La mida d'una quilla és una manera de classificar la superfície total d'aquesta. És molt important ja que quant més pes té el surfista, més mida de quilla necessita perquè aguanti bé els seus moviments. Tanmateix, a l'hora de triar no es parla de cm^2 , sinó que el que s'ha fet és classificar en grups els diferents rangs de pes del surfista.



Figura 3.3.2. Mides de les quilles en funció dels pesos






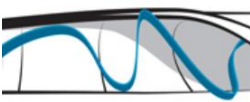
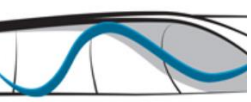
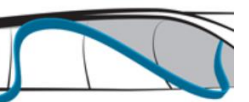
Com es pot observar, els rangs de pesos se solapen entre sí. Això és perquè el surfista pot decidir en cada tipus de condicions si vol que les quilles aguantin més els moviments, escollint així la mida més gran; o bé que derrapin més fàcilment, decantant-se aleshores per la mida inferior.

ii. Base. La base és la distància que hi ha entre la vora anterior i la vora posterior de la quilla, mesurada on aquesta es troba en contacte amb la taula de surf. Com més base té la quilla, més *drive* i acceleració tenim.

iii. Profunditat. La profunditat és la distància des de la base fins al punt més submergit de la quilla, és a dir, quant se submergeix aquesta. La profunditat està lligada amb la adherència o *hold*. Com més profunditat, més adherència; i com menys profunditat, la quilla tindrà més tendència a derrapar.

iv. Foil. El foil és el perfil aerodinàmic que resulta de fer un tall paral·lel a la base, i per tant és la característica principal d'aquest estudi.

Generalment, el perfil parteix de la vora anterior, es fa ample cap al centre de la quilla i a la vora posterior torna a ser estret. La forma d'aquest perfil és el que més afecta al comportament de la quilla, ja que determina com l'aigua flueix a través d'aquesta i això afecta directament a la velocitat, l'adherència o la derrapada. A més a més, el foil és el major responsable de la força aerodinàmica coneguda com a *lift*, que més endavant s'estudiarà com es relaciona amb les sensacions que s'obtenen a l'aigua.

Tipus	Inside	Flat	50/50	80/20
Característiques	<ul style="list-style-type: none"> ·Part interior còncava ·Lift + Adherència ·Flux eficient ·Girs sense perdre velocitat 	<ul style="list-style-type: none"> ·Drive, pivot i adherència ·Canvis de direcció ràpids 	<ul style="list-style-type: none"> ·Perfil típic de les quilles centrals ·Estabilitat i control 	<ul style="list-style-type: none"> ·Perfil asimètric poc utilitzat ·Velocitat amb estabilitat i control
Perfil				
Comportament				

Taula 3.1. Tipus de foils i característiques

Per a la nomenclatura de les parts del perfil es farà servir la mateixa que en aerodinàmica. La nomenclatura per a la definició d'un foil qualsevol és la següent:

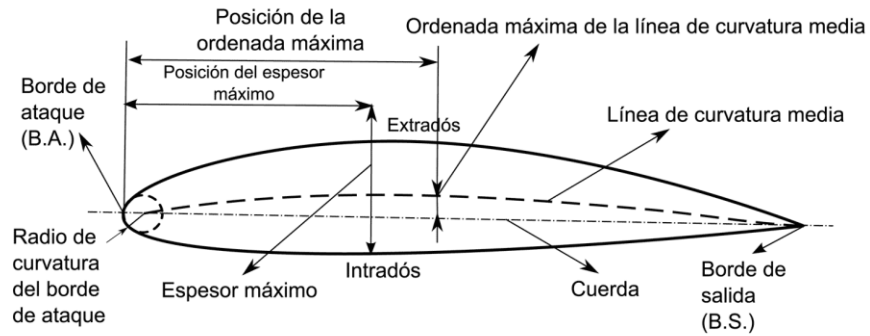


Figura 3.3.3. Nomenclatura del foil

v. Sweep. És l'angle que forma el punt de més profunditat de la quilla amb la perpendicular al punt mig de la base de la quilla. El sweep té a veure amb la capacitat de canviar de direcció o *pivot*. A menys sweep, la quilla és més vertical i el *pivot* és major. Per contra, si el sweep és elevat vol dir que la quilla és molt allargada, fet que implica girs més amplis i, per tant, canvis de direcció més lents. El *pivot* també es pot mesurar amb el Rake, distància des del final de la base fins el final de la quilla.

Totes les propietats mencionades fins al moment queden representades a la següent figura. A més a més, també s'hi pot trobar la representació del *Leading edge* i del *Trailing edge* als quals se'n farà referència més endavant.

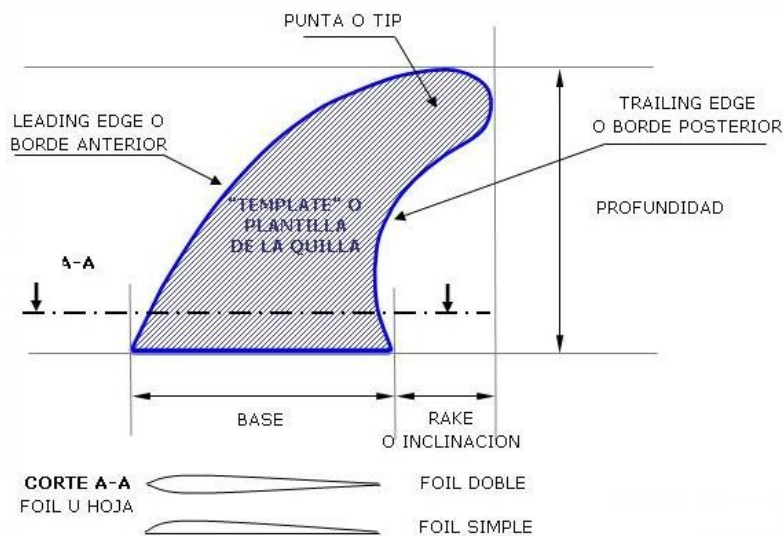


Figura 3.3.4. Representació de les propietats geomètriques

Per últim, tenim tres característiques que són especialment importants als sistemes *Thruster*.

vii. Cant. El cant és l'angle d'inclinació de les quilles laterals respecte la vertical de la quilla central. Una quilla sense *cant* és una quilla completament vertical respecte la superfície de la taula que ajuda a mantenir la direcció i aporta velocitat, donat que presenta poc *drag* i per tant més *drive*. D'altra banda, si la quilla és inclinada, i per tant amb *cant*, respondrà millor als girs però no tindrà tanta velocitat en línia recta, ja que té un *drag* més elevat.

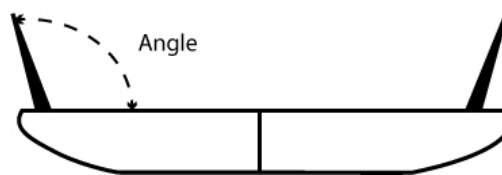


Figura 3.3.5. Esquematzació del Cant

viii. Toe. El *Toe* de les quilles laterals és l'angle que formen aquestes amb l'eix longitudinal de la taula i de la quilla central. Generalment, les quilles laterals s'orienten cap a l'interior per aconseguir una major pressió als foils exteriors i, per tant, un major control de la taula.

L'efecte és similar al del cant però en el pla perpendicular. Com més toe, més *drag* té la taula, i per tant més capacitat de gir renunciant certa velocitat. D'altra banda, si tenim un toe poc pronunciat, això resulta en un bon pas del flux en línia recta que es tradueix a molta velocitat però menys capacitat de gir.

El toe es mesura en angles respecte l'*string*, l'eix de simetria longitudinal. Aquest angles poden variar de 0º a 4º aproximadament.

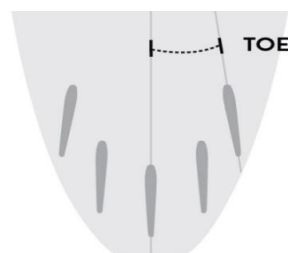


Figura 3.3.6. Esquematzació del Toe

4. Introducció a la Dinàmica de fluids

Les propietats del sistema de quilles estudiades anteriorment no tindrien cap tipus de rellevància sense un medi que notés les seves propietats geomètriques. El medi que amb el que interactua el sistema de quilles és l'aigua.

A través de les seves propietats com per exemple la densitat o la viscositat, l'aigua és capaç de transmetre unes forces i moments que es tradueixen a les propietats físiques que sent el surfista a l'onada. L'encarregada d'estudiar aquesta interacció és la dinàmica de fluids. En aquest cas també es parlarà sovint d'hidrodinàmica, donat que es tracta d'un estudi de moviment de fluids; en contraposició al cas de gasos en moviment, on es parla d'aerodinàmica.

A continuació es realitzarà una breu presentació de les nocions més importants de cara a aquest treball per entendre més endavant els resultats obtinguts i poder entendre els raonaments i conclusions extretes.

4.1 Nombres adimensionals i forces

Un nombre adimensional és un nombre que no té unitats físiques i que en Mecànica de Fluids s'utilitza per representar resultats experimentals de forma molt simplificada i genèrica gràcies a l'anàlisi dimensional.

L'anàlisi dimensional és una eina que permet reduir el nombre de variables que intervenen en un fenomen físic, agrupant-les en forma de nombres adimensionals. D'aquesta manera, s'aconsegueix reduir el nombre d'experiments a realitzar i per tant el cost de la fase d'experimentació. A més a més, també s'obtenen les anomenades *lleis d'escala*, les quals permeten extrapolar resultats obtinguts en models a petita escala a models a gran escala.

De nombres adimensionals n'existeixen una gran quantitat, i depenent del problema se n'utilitzen uns o altres. Els que s'utilitzaran en aquest estudi són els següents:

i. Nombre de Reynolds (Re)

El nombre de Reynolds és el nombre més utilitzat en Mecànica de Fluids i relaciona les forces inercials i les forces viscoses presents en un fluid. La seva formula és la següent:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu}$$

On ρ : densitat del fluid

U : velocitat del fluid

L : longitud característica del sistema

μ : viscositat del fluid

Un nombre de Reynolds elevat suposa un flux poc viscós o a altes velocitats, al qual anomenem *flux turbulent*, i un Reynolds baix significa un flux viscós o de velocitat baixa, el qual s'anomena *flux laminar*.

ii. Nombre de Mach

El nombre de Mach s'utilitza en fluxos de gasos a altes velocitats on hi ha canvis significatius de pressió, velocitat i temperatura; per a determinar els efectes de compressibilitat del flux.

$$Ma = \frac{U}{a}$$

On a : velocitat del so al medi

U : velocitat del fluid

Es diu que un flux és compressible si el Ma és superior a 0,3. Contràriament es diu que el flux és incompressible. Malgrat en aerodinàmica s'utilitza molt degut a les altes velocitats, en aquest treball se suposarà un flux incompressible degut que el Mach és en tot moment inferior a 0,3.

iii. Coeficient de Sustentació

El coeficient de sustentació relaciona la força de sustentació amb la densitat del fluid, la seva velocitat i la superfície que intervé. És funció de l'angle d'atac, el nombre de Reynolds i el nombre de Mach.

$$CL = \frac{2 \cdot FL}{\rho \cdot u^2 \cdot S}$$

On ρ : densitat del fluid

U : velocitat del fluid

FL : força de sustentació

S : superfície característica

És un indicatiu de la força perpendicular al sentit d'avanç del fluid que es crea causada per la diferència de pressions.

iv. Coeficient de Resistència a l'avanç

El coeficient de resistència a l'avanç quantifica la resistència que experimenta un cos al sentit d'avanç del flux. S'expressa com:

$$CD = \frac{2 \cdot FD}{\rho \cdot u^2 \cdot S}$$

On ρ : densitat del fluid

U : velocitat del fluid

FD : força d'arrossegament

S : superfície característica

En general, l'objectiu és reduir al màxim aquest coeficient per tal de tenir la menor fricció possible, però això pot fer reduir el coeficient de sustentació, i per tant s'ha d'arribar a l'òptim per les dues bandes.

4.2 Equacions de la dinàmica de fluids

Per tal de modelitzar el comportament d'un fluid, la dinàmica de fluids utilitza les lleis físiques següents:

i. Equació de Bernoulli

L'equació o teorema de Bernoulli és una equació altament relacionada amb la equació d'energia per un flux estacionari, que expressa que l'energia en un flux sense fricció es conserva al llarg de una línia de corrent.

L'energia que té el flux al començament pot ser en forma de pressió, de velocitat en forma d'energia cinètica o bé d'alçada en forma d'energia potencial. Per tant, l'equació en una línia de corrent entre un tram 1 i un tram 2 resulta com:

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 + P_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + P_2$$

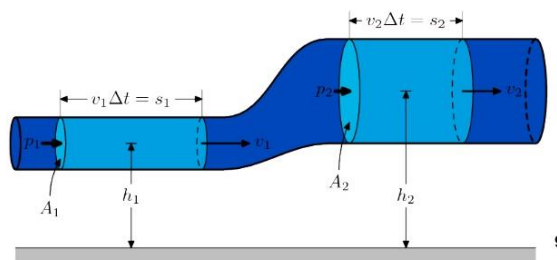


Figura 4.2.1. Teorema de Bernoulli entre trams d'una canonada

Si a més a més es volguessin modelitzar les pèrdues per fricció o els guanys causats per una bomba hidràulica, per exemple, s'afegirien els dos següents termes, obtenint així una equació per un flux amb pèrdues per fricció. Cal denotar que per resoldre l'equació tots els termes han de tenir les mateixes unitats, en aquest cas s'han deixat els termes en [m].

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} \pm h_s = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_{f1-2}$$

Equació 4.2.1. Teorema general de Bernoulli

El terme h_s correspon a l'energia subministrada i el terme h_{f1-2} a les pèrdues per fricció entre el tram 1 i el tram 2.

ii. Llei de continuïtat o conservació de la massa.

L'altra teorema vital per a la comprensió de l'estudi a realitzar és el teorema de conservació de la massa, que estableix que en règim estacionari els fluxos màssics que entren i surten d'un volum de control han de ser iguals. S'expressa com:

$$\sum_i (\rho_i \cdot A_i \cdot V_i)_{entrades} = \sum_i (\rho_i \cdot A_i \cdot V_i)_{sortides}$$

Que es pot reescriure com la següent igualtat entre els cabals d'entrada i de sortida sempre i quan el flux sigui incompressible i per tant les variacions en la densitat siguin menyspreables.

$$\sum A \cdot v_{entrada} = \sum A \cdot v_{sortida}$$

Equació 4.2.2. Llei de Conservació de la massa

Les dues lleis anteriors són suficients i serveixen per explicar el que succeeix amb un foil en incidir amb un flux d'un fluid qualsevol. L'exemple més adient per imaginar-se el que succeeix és el d'una ala d'avió a l'enlairar-se.

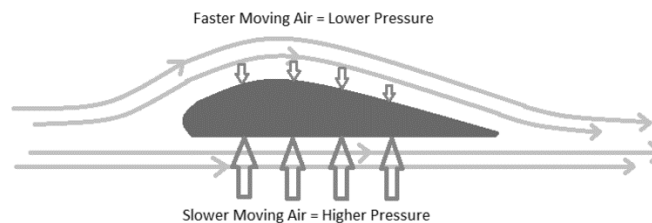


Figura 4.2.2. Flux al voltant d'un foil

Quan el flux topa amb el foil, es redueix l'àrea per on pot passar el fluid (cal imaginar un volum de control finit) i per tant augmenta la velocitat per la llei de la conservació. A més a més, a la part superior el fluid ha de recórrer més distància i per tant té més velocitat que a la part inferior. Si s'aplica l'equació de Bernoulli s'observa que al augmentar la velocitat, augmenta l'energia cinètica i per tant perquè l'energia es conservi s'ha de reduir la pressió, resultant així en una pressió baixa a la part superior i una pressió alta a la inferior.

En l'exemple esmentat, si aquesta diferència de pressions és suficientment elevada, es compensa el pes de l'avió i aquest s'enlaira. Aquest fenomen es coneix com sustentació.

4.3 Model de la capa límit

Quan una corrent fluida incideix sobre un cos es forma sobre la seva superfície una regió de l'espai on la velocitat no és uniforme: la capa límit.

Aquest fenomen es produeix degut a la condició de no lliscament que hi ha sobre la superfície del cos. Les partícules que es troben en contacte directe amb aquesta han de tenir forçosament velocitat relativa zero amb el cos, mentre que les partícules que estan suficientment allunyades d'aquest no es veuen afectades pel cos i per tant mantenen la velocitat que tenien U_0 . D'aquesta manera, es crea un gradient de velocitats degut als esforços tallants entre les capes de fluid properes al cos i les més allunyades.

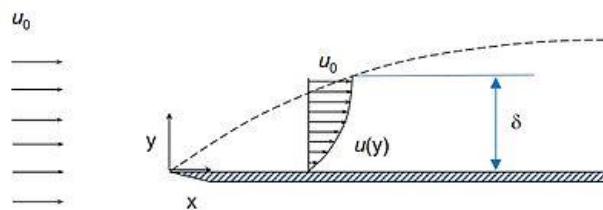


Figura 4.3.1. Capa límit en una placa plana

Així mateix, la distància que separa la superfície amb la primera capa de fluid que es troba a U_0 s'anomena gruix de la capa límit, i es denomina com δ . Aquest gruix s'ha de tenir especialment en compte en l'estudi de perfils aerodinàmics, donat que afecta molt significativament al comportament del flux al voltant del cos.

4.4 Cavitació

La cavitació és un fenomen hidrodinàmic que es produeix quan la pressió de l'aigua o disminueix per sota de la pressió de vapor P_v degut a l'augment brusc de la velocitat en passar per una superfície, donada la conservació de l'energia. Aquest fenomen produeix la formació de bombolles (estat vapor) que, al moure's cap a zones de major pressió tornen a l'estat líquid provocant així un desprendiment d'energia sobre la superfície, la qual es pot veure afectada per aquest alliberament. La pressió de vapor a 17°C és de 1938,4 Pa.



Figura 4.4.1. Cavitació a una hèlix

4.5 Relacions teòriques amb el sistema de quilles

4.5.1 Relació entre les forces Lift, Drag, Pivot i Drive

Com s'ha pogut anar deduint durant la part teòrica, el *hold* i el *drive* estan altament relacionats amb el *lift* i el *drag*, que són les dues forces de les quals es parla típicament en anàlisi de perfils aerodinàmics. D'altra banda, el *pivot* té a veure amb els moments experimentats per la quilla que en part també estan relacionats amb les forces *lift* i *drag* com es veurà a continuació.

Com a recordatori, el *lift* es coneix també com a força de sustentació i actua en la direcció perpendicular a la del moviment del fluid, en el pla del perfil aerodinàmic; mentre que el *drag* és la força de resistència a l'avanç o d'arrossegament que experimenta un perfil sotmès a un corrent de fluid, en la direcció d'aquest. En aquest apartat s'analitzarà a fons la relació que tenen aquestes quatre forces i les seves aplicacions en la física del surf.

Si bé és cert que en els apartats anteriors molts cops s'han pres perfils d'ala per explicar certes qüestions, cal fer un recordatori del cas concret del sistema de quilles. La diferència fonamental al estudiar les quilles radica en que en el cas d'aquestes el perfil no el tenim en un pla vertical sinó en un pla horitzontal, donat que les quilles es col·loquen a la superfície inferior de la taula i a la part posterior, també anomenat *tail*, com s'ha vist a l'apartat 3.2. A tal efecte, mentre el *drag* segueix essent una força horitzontal que mesura la resistència que oposen les quilles al flux de corrent d'aigua, el *lift* passa a ser una força horitzontal cap a l'exterior del perfil a en comptes de vertical.

Per tant ambdues forces es troben en un pla horitzontal paral·lel a la superfície del mar i a la superfície de la taula.

Per analitzar millor la força de sustentació, si separem el *lift* en les components longitudinal i transversal s'obté l'esquema de forces de la figura 4.5.1.

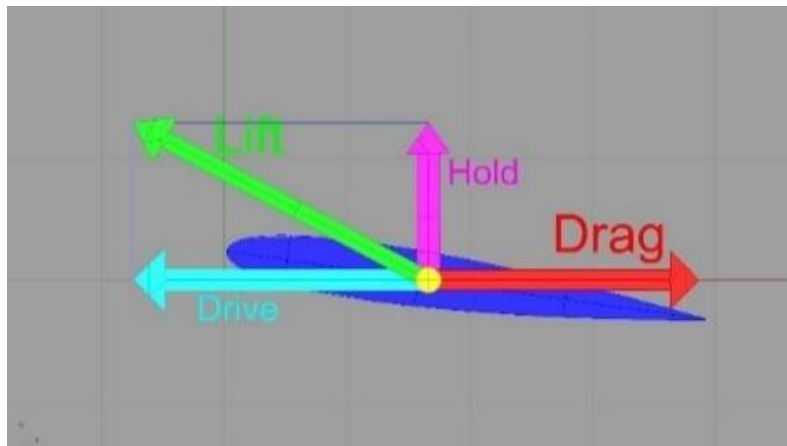


Figura 4.5.1. Esquematzació de les forces Lift, Drag, Hold i Drive

Com es pot observar, el que es definia com a *hold* i *drive* és simplement la projecció del *lift* en els eixos longitudinal i transversal en el sentit d'avançament. Evidentment, el diagrama és una simplificació però capta la idea general del que succeeix.

A la realitat, el *hold* és la component més gran i pràcticament igual al *lift*. Tanmateix, el fet que hi hagi la component del *drive* és d'una gran importància, ja que és una força que succiona endavant la taula i per tant aporta velocitat a aquesta. Per entendre bé el que succeeix es pot observar el que passa amb els vaixells de vela navegant pràcticament contra el vent. En un instant qualsevol, la component de succió o *drive* fa que el vaixell es mogui més ràpid endavant. Com a conseqüència, el vent aparent que experimenta la vela és major (el vent aparent s'entén com la suma vectorial de la velocitat del vent real i la velocitat del vaixell). Això fa que el vaixell acceleri, adquireixi més velocitat i per tant encara experimenti més vent aparent, resultant en un procés de realimentació positiva. Aquest procés permet que el vaixell navegui a una velocitat superior a la del vent en contra d'aquest. En el cas de les quilles passarà exactament el mateix.

Per altra banda, el *drag* també és una força que caldrà mesurar molt detalladament a la fase de simulació. Com menys *drag* té la quilla més ràpid rema el surfista, més ràpid accelera i per tant abans agafa la onada. És possible que trobem un *drag* diferent per diferents velocitats, podent passar per exemple que tinguem un *drag* molt baix al anar recte i molt elevat al girar, o viceversa. Tot dependrà del contorn de la quilla que simulem.

4.5.2 Eficiència hidrodinàmica

En l'aspecte global, doncs, caldrà tenir una bona relació entre *lift* i *drag* en les condicions concretes que vulguem optimitzar, potenciant sempre el *lift* elevat ja que també crea *drive* elevat, i un *drag* el més petit possible. En aquest sentit parlarem doncs en termes d'eficiència. Definim l'eficiència hidrodinàmica com el quocient entre el C_L i el C_D .

$$\eta = \frac{C_L}{C_D}$$

4.5.3 Relació entre l'angle d'atac i el Lift

La manera en que evolucionen les forces també està molt relacionada amb l'angle d'atac d'un perfil aerodinàmic. Com ja s'ha vist anteriorment, l'angle d'atac és l'angle entre la corda del perfil i la direcció del flux, és a dir la direcció relativa a la que incideix el fluid al perfil. D'altra banda, a l'apartat 3.3.2 es va veure que el Toe era la orientació de les quilles laterals cap al centre de la taula.

Com es pot observar, el Toe és una manera diferent de anomenar a l'angle d'atac de les quilles laterals. Ara bé, segons els esquemes que hem estat veient, aquest angle podria sorprendre a primera vista donat que no és l'habitual. Així doncs, és correcta orientació del perfil al sistema de quilles respecte la direcció del flux?

En un foil d'ala d'avió, per exemple, el perfil es col·loca de la següent manera respecte l'angle d'atac. L'intradós o superfície inferior és la més exposada al flux mentre que l'extradós, la superfície cònca, és la superior.

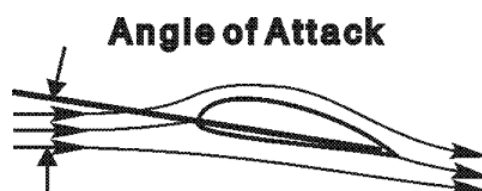


Figura 4.5.2. Angle d'atac en foils aerodinàmics

En el cas del sistema de quilles tenim la situació contrària, donat que el flux té la direcció de l'eix longitudinal de la taula. L'intradós en aquest cas és la part cònca, i l'extradós la part plana, com es pot apreciar a la següent figura.

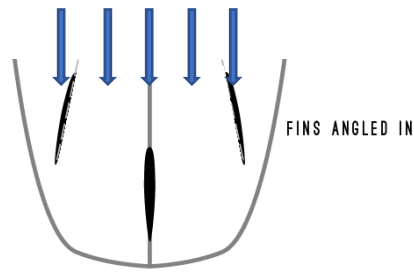


Figura 4.5.3. Flux incident al sistema de quilles

Les dues situacions queden perfectament representades a la figura 4.5.4. El perfil superior representa el cas de les ales d'avió i la inferior, el sistema de quilles.

El que és comú en ambdós casos és que s'aconsegueix una força perpendicular al flux i cap a dalt, donada la orientació dels dos perfils, malgrat ser una força molt més elevada en el primer cas que en el segon.

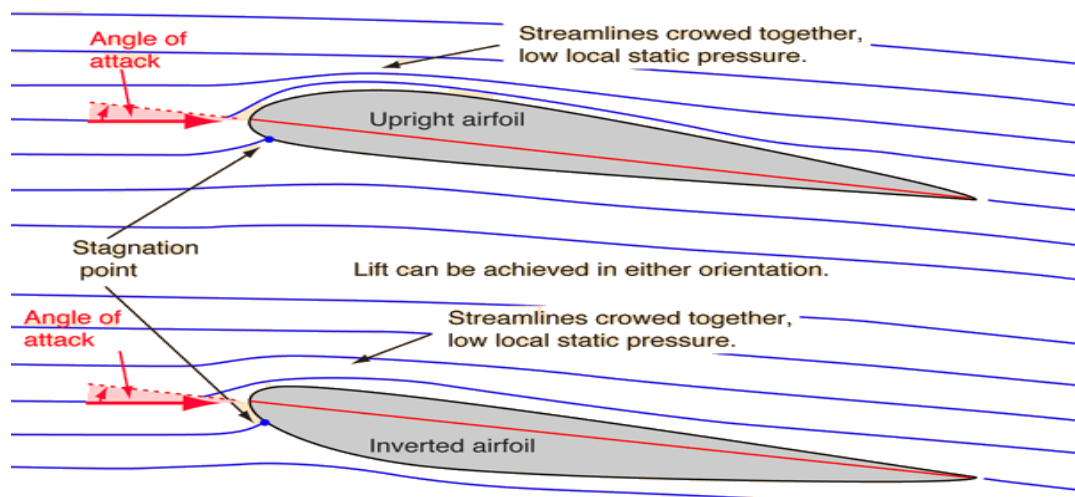
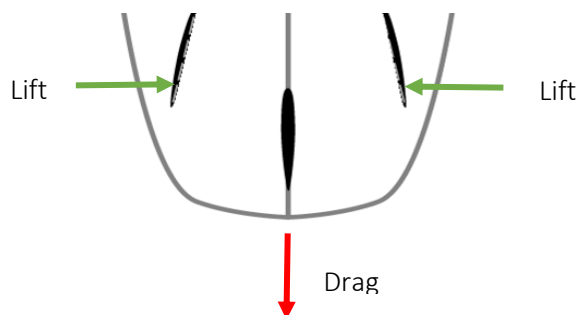


Figura 4.5.4. Representació dels dos casos

La orientació del foil en el cas del perfil de quilles té una explicació. Cal pensar en el sistema de quilles com una direcció assistida.

Es distingeixen dues situacions molt diferenciades en referència al comportament de les quilles en la onada. La primera és el *drop*, descens o la fase d'agafar velocitat; on el surfista va recte, i la segona inclou dues situacions similars en termes de comportament de les quilles: el *bottom*, gir a la base de la onada per començar l'ascensió, i el gir a la cresta de la onada per tornar a descendre.

- i. **Drop.** En el moment que el surfista remant entra a l'onada comença el descens o *drop*. La taula agafa una direcció recta i les tres quilles es troben dins l'aigua. El perfil de la quilla central, al ser simètric, no crea cap força lateral, i les forces creades a les quilles laterals, que són les dues cap a l'interior de la taula, es cancel·len l'una a l'altra.



Imatge 4.5.5. Esquema de forces en el drop o tram rectilini

És evident que en aquest tram el coeficient més important a tenir en compte és el coeficient d'arrossegament. Un coeficient elevat significa una resistència elevada i per tant una velocitat inferior al cas de un coeficient baix, on la taula tindrà una velocitat més elevada.

- ii. **Bottom turn.** Seguidament, quan el surfista arriba a la part inferior de l'onada, s'inicia la segona maniobra, que es coneix com a *bottom turn*, gir de baix, on el surfista ha de reorientar la taula cap a l'onada i, aprofitant la velocitat guanyada en el descens, iniciar l'ascensió.



Figura 4.5.6. Bottom turn

En aquest moment, com es pot apreciar a la figura 4.5.7, la quilla lateral exterior no toca a l'aigua. Només ho fan la quilla central i la quilla lateral. La visió des de la part posterior de la taula seria la següent:



Figura 4.5.7. Posició de les quilles en el gir

Com es pot observar, l'efecte del cant i del còncav de la taula són d'una importància vital. La quilla central, malgrat trobar-se inclinada, al ser un perfil simètric no produeix cap força vertical, només arrossegament. En aquesta situació la protagonista és la quilla lateral.

Gràcies al cant (inclinació respecte el pla de simetria longitudinal de la taula), a la convexitat de la part inferior i al Toe, aquesta és troba completament submergida a l'aigua, totalment vertical i amb un angle d'atac adequat per projectar la taula cap a la direcció que es vol prendre.

Tanmateix, en funció del Toe que s'hagi decidit al construir la taula, l'angle d'atac del flux incident a la quilla en aquesta situació variarà des dels 0 graus, cas on el perfil és completament paral·lel al sentit del flux, fins als 4 graus.

Aquest rang d'angles permetrà al surfista obtenir una resposta de la taula diferent per cada valor. Aquest angle d'atac en diferents perfils serà un dels paràmetres a tenir en compte en la fase d'experimentació.

4.5.4 Creació del pivot

La última força que s'havia comentat a l'apartat 3.3.1 és el Pivot. Aquest és una mesura de la longitud de l'arc que es realitza durant el gir, o el que és el mateix, la capacitat de tancar en una major o menor quantitat el gir.

El pivot és un fenomen molt simple, conseqüència directa dels apartats anteriors. És el moment que experimentarà la taula en conseqüència amb el *Lift* experimentat, respecte un eix vertical que es veurà a continuació.

Quan el surfista es troba a la fase del bottom turn, només toquen a l'aigua la quilla central i la quilla lateral com s'ha vist amb anterioritat. En aquest moment, l'esquema de forces és el següent:

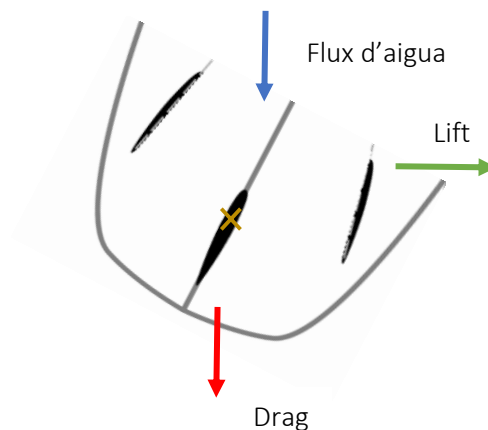


Figura 4.5.8. Esquema de forces en el Bottom Turn

En aquesta situació, la quilla lateral (més a la dreta) crea un *Lift* que, combinat amb l'efecte de pivot de la quilla central representat per la creu groga, crea un moment que ajuda a la taula a tancar el gir més o menys cap a la part frontal de la onada.

Aquest moment és el pivot, i passa tant en la situació d'un gir a la part baixa de la onada o *bottom turn* com en un gir a la cresta de la onada. Quan més moment experimentem, més fàcil li resulta a la taula realitzar un gir més tancat.

5. Fase de Simulació

5.1 Presentació dels hydrofoils a estudiar

Els elements que s'estudiaran en aquesta fase de simulació són els diferents foils que presenten les diferents quilles del mercat.

Com ja es va comentar a l'apartat 3.3.2 els diferents tipus de foil afecten de manera molt significativa al comportament de la taula a la onada, i per tant cal entendre què succeeix a nivell físic amb cada tipus de foil per aconseguir millorar-ne les prestacions durant el seu disseny.

Cal mencionar, tanmateix, que dels quatre perfils explicats a l'apartat 3.3.2 el 50/50 és un perfil típic de les quilles centrals i per tant és simètric, de no massa interès en aquest estudi, mentre que els altres tres són foils de quilles laterals, per tant asimètrics i de molt més interès en aquest estudi.

Els diferents perfils exteriors han estat escollits des del recurs online www.airfoiltools.com d'entre centenars de candidats, escollint per a cada tipus de foil existent el perfil més ajustat als emprats en la indústria. Un cop decidits els perfils, s'han descarregat els fitxers de coordenades i s'han modelitzat a escala fixant una corda de 116mm per a tots ells, amb la finalitat d'aconseguir homogeneïtat a l'estudi. S'ha escollit una corda de 116mm donat que és una corda representativa de la secció mitjana d'una quilla i per tant els resultats obtinguts s'ajustaran més a la realitat.

Paral·lelament, amb l'ajuda del recurs online AirFoilTools i el seu software de simulació de perfils XFOIL 6.99 s'ha realitzat un estudi previ dels valors de Cd i Cl a obtenir en funció de l'angle d'atac de cada perfil.

A continuació es mostren els perfils escollits per l'estudi, conjuntament amb les seves característiques geomètriques i els gràfics comparatius de *Lift* i *Drag* envers l'angle d'atac així com la eficiència, tots per a un Reynolds de 1.000.000 que era el més ajustat al de les condicions de l'estudi.

- i. **Inside.** El perfil escollit per l'inside foil és l'AG13. Es reconeix que és un inside foil donat que a la seva aresta interior creua la corda en el tram posterior creant així una superfície imaginària interior entre la corda i el perfil del foil.

·AG13

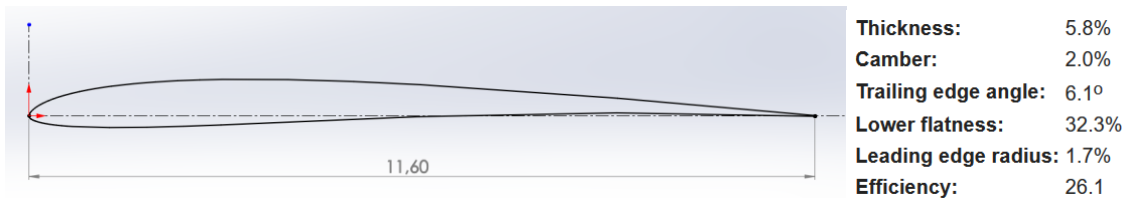
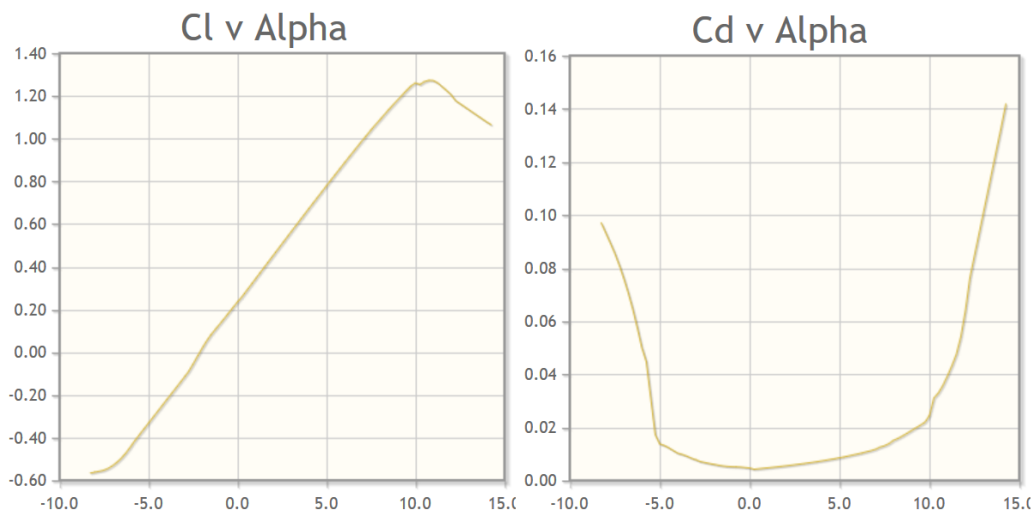


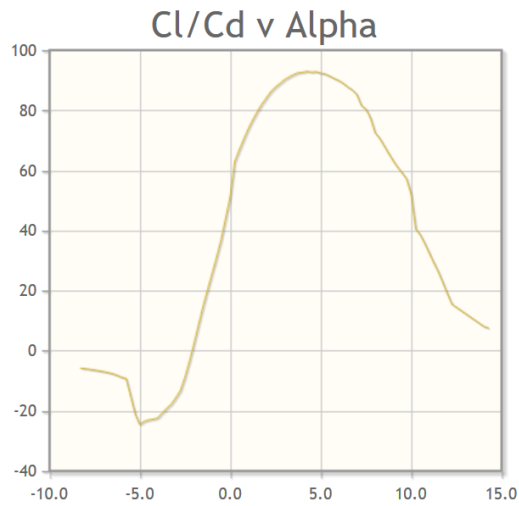
Figura 5.1.1. Inside Foil AG13

Els seus coeficients C_d i C_l augmenten en el rang d'angles que s'estudiarà (de 0° a 4°) tal i com es prediu a la següent figura. Cal destacar també que pel tram recte on l'angle d'atac és negatiu, s'observa que s'obtenen C_l negatius tal com s'havia previst a la part teòrica.



Gràfic 5.1.1. C_d i C_l de l'AG13 envers l'angle d'atac

Els dos gràfics anteriors es troben combinats en el següent gràfic: el de l'eficiència. Aquest mostra per quin angle d'atac s'obté la màxima relació entre el coeficient de sustentació i el coeficient d'arrossegament. Per al cas de l'AG13, aquest angle és aproximadament de 4° .



Gràfic 5.1.2. Eficiència de l'AG13 envers l'angle d'atac

En el rang d'angles d'estudi, es recullen les dades corresponents al C_D , C_L i eficiència a la taula següent, obtinguda mitjançant el software de simulació XFOIL 6.99 imposant un Reynolds de $1,1e+6$ i deixant el Mach a 0 donat que el flux és incompressible.

Angle d'atac (°)	C_L	C_D	C_L / C_D
0	0.2329	0.00459	50.74074
1	0.3396	0.00462	73.50649
2	0.4502	0.00536	83.99254
3	0.5603	0.00623	89.93579
4	0.6831	0.00717	95.27197

Taula 5.1.1. Coeficients AG13

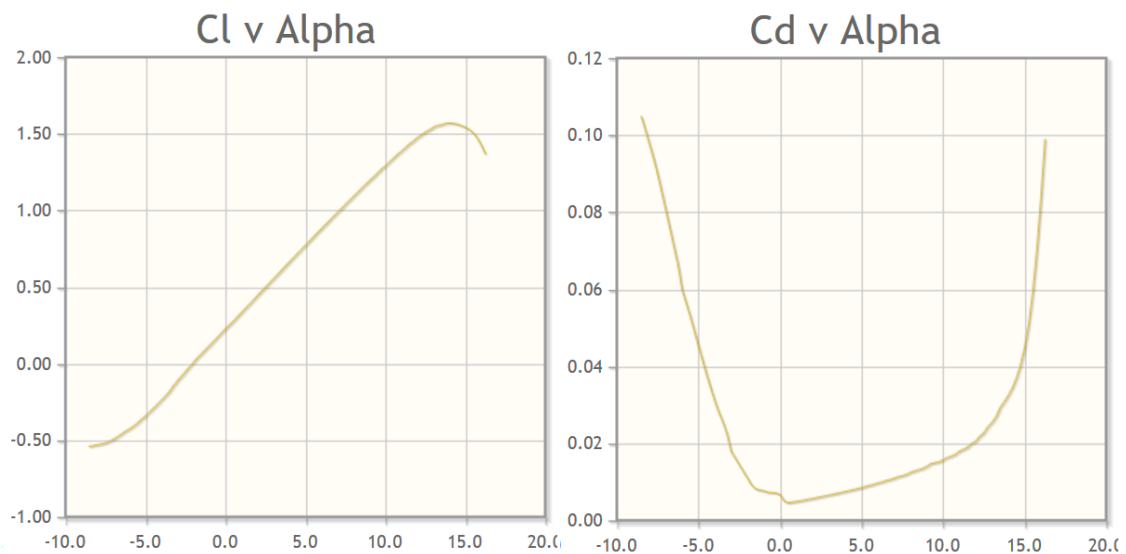
- ii. **Flat.** Per al flat foil s'ha escollit el perfil AG11, també de la família dels perfils primers AG, donat que la seva base era plana pràcticament en tota la seva extensió.

·AG11



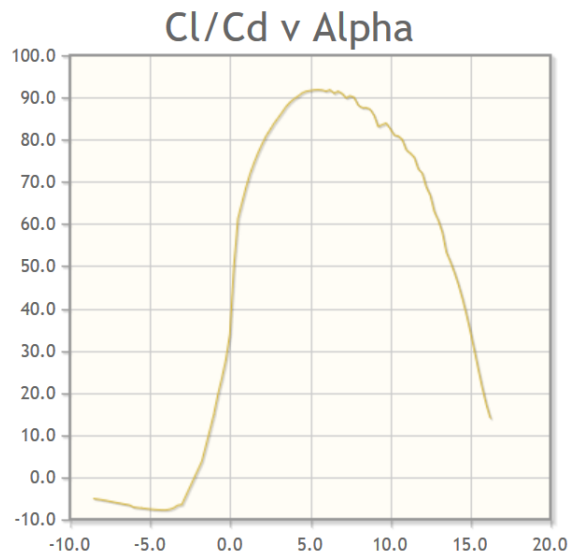
Figura 5.1.2. Flat Foil AG11

Com es pot apreciar, en aquest cas l'intradós és molt més pla que en el cas de l'AG13. L'evolució dels coeficients envers l'angle d'atac és la que es mostra a continuació.



Gràfic 5.1.3. C_D i C_L de l'AG11 envers l'angle d'atac

En aquest perfil, l'eficiència màxima s'obté per un angle d'atac d'uns 5,5° aproximadament, el qual es troba fora del rang d'angles d'atac normalment emprats en el disseny de sistemes de quilles.



Gràfic 5.1.4. Eficiència i de l'AG11 envers l'angle d'atac

Degut a aquest canvi de geometria, la conducció d'aigua no és tant bona i s'obtenen per una banda uns coeficients teòrics de sustentació menors que en el cas de l'AG13 i uns coeficients d'arrossegament superiors. Evidentment, la eficiència disminueix respecte l'AG13. Els coeficients teòrics de l'AG11 es classifiquen a la taula següent.

Angle d'atac (º)	C_L	C_D	C_L / C_D
0	0.2232	0.00651	34.28571
1	0.3289	0.00480	68.52083
2	0.4396	0.00557	78.92280
3	0.5501	0.00645	85.28682
4	0.6601	0.00736	89.68750

Taula 5.1.2. Coeficients AG11

- iii. **80/20.** Per al foil 80/20 s'ha buscat un perfil que no fos completament pla i que no presentés inside foil, sinó que tingués la vora inferior còncava al llarg de tota la corda. El foil AG03 és l'escollit donat que compleix aquests requisits.

·AG03

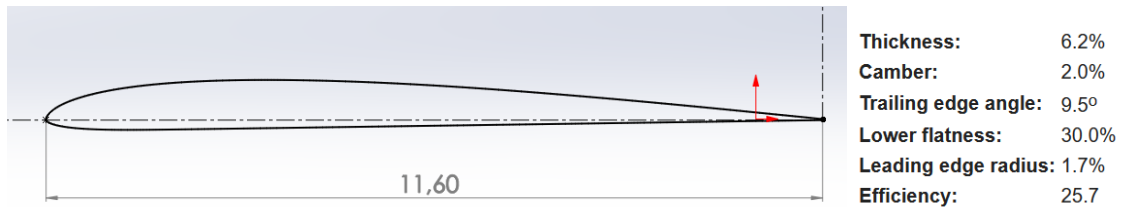
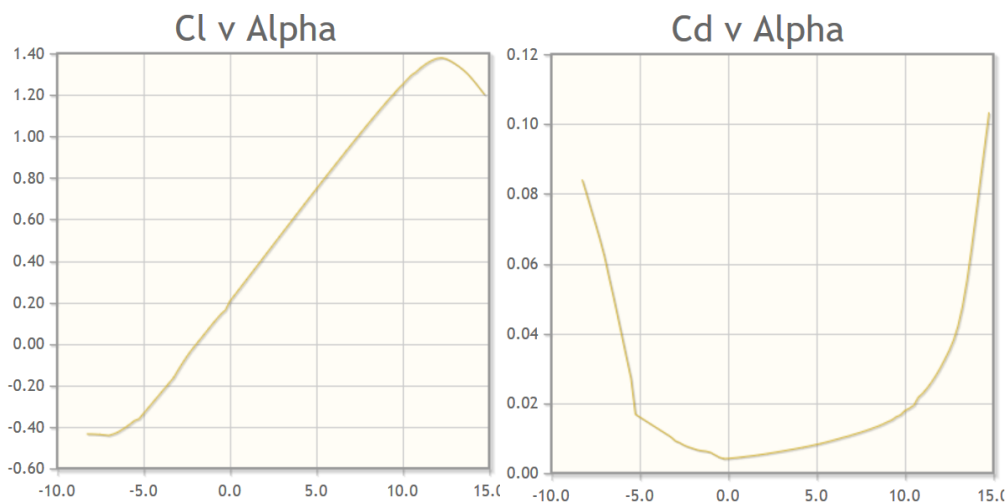


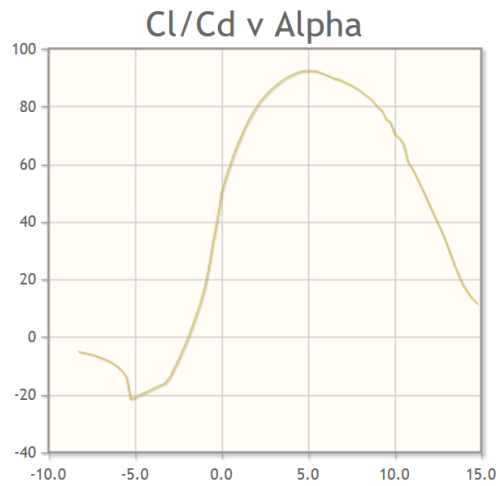
Figura 5.1.3. 80/20 Foil AG03

Per a l'últim perfil a analitzar, els gràfics dels coeficients de sustentació i arrossegament envers l'angle d'atac són els següents.



Gràfic 5.1.5. C_D i C_L de l'AG11 envers l'angle d'atac

En aquest darrer cas, l'eficiència màxima s'assoleix per un angle d'atac de 5° i té un valor d'unes 93 unitats. Veiem que tanmateix per angles de 3° o 4° l'eficiència ja és molt elevada a la figura següent.



Gràfic 5.1.6. Eficiència i C_M de l'AG03 envers l'angle d'atac

En analitzar el foil AG03 al XFOIL 6.99 s'observa que tant el C_L i el C_D obtinguts són menors que en els dos casos anteriors, mentre que el drag és menor. Aquest fet fa que l'eficiència es mantingui similar a la de l'AG13.

Angle d'atac (°)	C_L	C_D	C_L / C_D
0	0.2006	0.00401	50.0249377
1	0.3108	0.00456	68.1578947
2	0.4198	0.00524	80.1145038
3	0.5288	0.00606	87.2607261
4	0.6374	0.00696	91.5804598

Taula 5.1.3. Coeficients AG03

iv. **50/50.** Per al foil 50/50 s'ha buscat un perfil simètric ja que com ja s'ha comentat és el perfil típic de les quilles centrals. Realitzant diverses recerques s'ha trobat que els perfils més emprats són els NACA 00, perfils simètrics que eviten el desprendiment per rangs d'atac majors que altres perfils simètriques. El perfil escollit ha estat el NACA 0010. Aquest perfil només s'analitzarà de forma teòrica donat que al ser simètric no és rellevant en l'estudi.

·NACA 0010

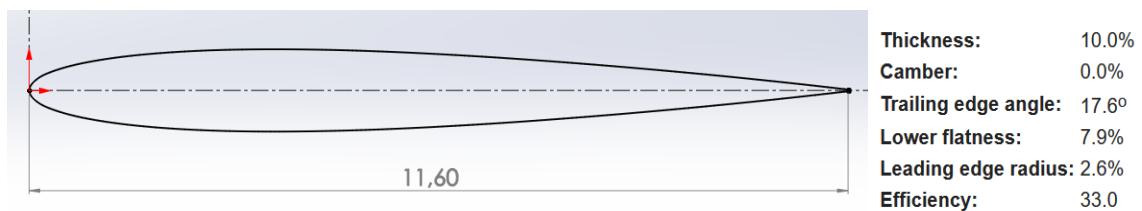
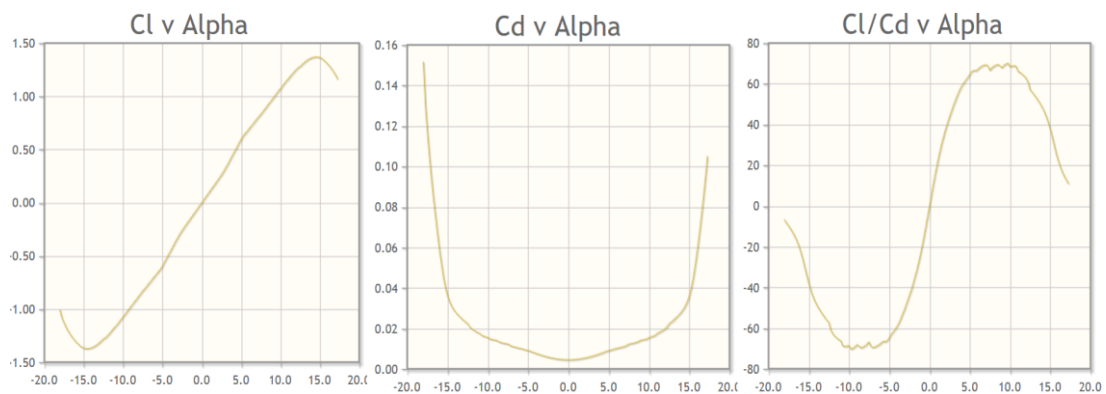


Figura 5.1.4. 50/50 Foil NACA 0010



Gràfic 5.1.7. C_L , C_D i eficiència envers l'angle d'atac

Angle d'atac ($^\circ$)	C_L	C_D	C_L / C_D
0	0	0.008	0
1	0.116	0.008	14.500
2	0.232	0.008	29.000
3	0.347	0.009	38.556
4	0.462	0.011	42.000

Taula 5.1.4. Coeficients NACA0010

5.2 Condicions de Contorn

Per començar amb la experimentació es fixaran unes condicions de contorn específiques que es consideraran constants al llarg de tot el procés.

- i. La velocitat s'ha escollit en base a la velocitat d'un surfista de nivell avançat en una onada amb força potència, ja que és on el rendiment de les quilles resulta més crític, fixant-la en 10 m/s.
- ii. La temperatura de l'aigua, segons l'*Institut d'Estadística de Catalunya* és de 17,7 °C.
- iii. Per a la pressió es negligeix l'efecte de la profunditat, suposant-la així d'una atmosfera.
- iv. Pel que fa a la densitat escollim la del Mar Mediterrani que és de 1038 kg/m³, calculada a partir de la seva temperatura i salinitat.
- v. La viscositat es calcula a partir de la densitat. Se suposarà una viscositat de 1,138e-3 kg/m·s, que equival a una viscositat cinemàtica de 1,096e-6 m²/s.
- vi. Es considera el fluid incompressible degut que clarament es troba en un règim subsònic.
- vii. El règim és estacionari ja que s'estudia el comportament de manera invariable en el temps i no en el moment de l'arrancada, per exemple.
- viii. El flux és turbulent i el model emprat és el de K-Epsilon, donat que proporcionava uns resultats similars als obtinguts mitjançant el model *SST (Shear Stress Transport)* però amb menor temps de càlcul. Altres models a contemplar podrien ser el K-Omega o Spalart-Allmaras.

5.3 Dinàmica Computacional de Fluids (CFD)

Per comparar els efectes dels canvis geomètrics en el rendiment de les quilles es realitzarà una simulació mitjançant el software de simulació Ansys FLUENT, que utilitza les tècniques de CFD, per a determinar els coeficients de *lift* i *drag* i analitzar els camps de pressions i velocitats. La Dinàmica Computacional de Fluids o CFD és una branca de la mecànica de fluids que a través dels mètodes numèrics i la discretització del domini utilitza algorismes per a simular problemes relacionats amb el moviment de diferents fluids. Per a dur a terme aquestes simulacions sempre cal seguir un procediment estricte en el qual es distingeixen 3 etapes.

Per començar, es durà a terme el *Pre-procés*, on es crea la geometria del problema. D'una banda s'ha de crear la geometria que interactua amb el fluid i de l'altra el volum de control, que estableix els límits de la regió de l'espai on es realitzarà la simulació. Seguidament en aquesta fase s'ha de dur a terme el mallat, que consisteix en la discretització de la geometria en elements i nodes. És un pas molt important ja que la solució serà més precisa com més fi sigui el mallat, però això també pot portar a temps de càlcul molt elevats. El *Pre-procés* acaba amb la elecció del tipus de simulació que es durà a terme i la especificació de les condicions de contorn.

A continuació es resol el problema mitjançant l'aplicació de les equacions de la dinàmica de fluids, que s'han escollit al definir el tipus de simulació. El programa realitza un procés iteratiu per a calcular les solucions de cada node, partint d'uns valors inicials. Quan les diferències entre dues solucions, també anomenades residus, són suficientment petites es considera que la solució ha convergit i que per tant s'ha arribat a la solució final.

Per últim cal analitzar els resultats obtinguts mitjançant la simulació a la fase del *Post-procés*. És en aquesta fase on s'anoten els coeficients obtinguts i es poden visualitzar les distribucions de velocitats, pressions i línies de corrent.

Seguidament s'explicarà amb detall el procediment seguit a cada etapa. Com que totes les simulacions es realitzen de la mateixa manera, només es mostraran els passos corresponents a la simulació d'un foil, el 80/20.

5.3.1 Creació de la geometria

Per a la creació de la geometria dels diferents foils esmentats a l'apartat 3.3.2 el primer que s'ha d'obtenir són els fitxers de coordenades dels diferents foils. A través de la pàgina web www.airfoiltools.com es poden descarregar els fitxers amb les coordenades de centenars de perfils aerodinàmics.

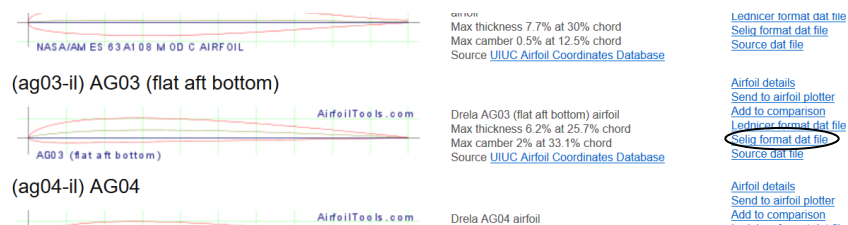


Figura 5.3.1. Obtenció de les coordenades del perfil

D'aquestes coordenades es crea la geometria del foil en *SolidWorks* i es trasllada al Design Modeler, el creador de geometria de l'Ansys, on s'afegirà el volum de control. Mitjançant un booleà s'ha d'obtenir el negatiu de l'objecte, ja que és per on circularà el fluid d'estudi i per on el software de simulació calcularà les velocitats i pressions. Cal que el volum de control sigui suficientment gran per tal que no afecti el comportament del flux. S'han decidit unes dimensions D1 i H2 de 0,3m, corresponents al diàmetre de la circumferència i a la llargada del VC.

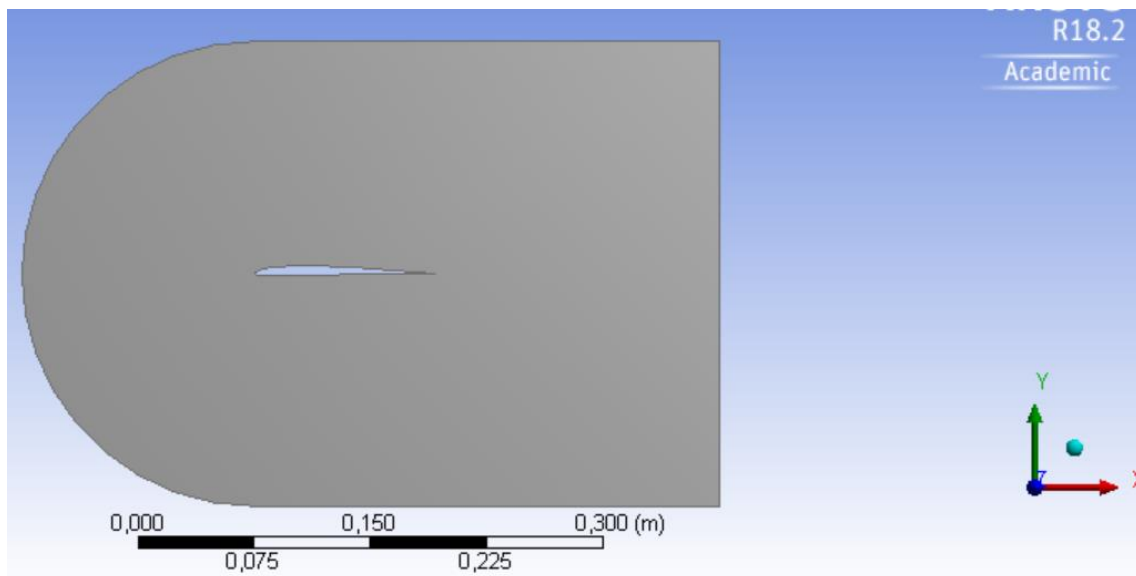


Figura 5.3.2. Geometria per a la simulació del foil AG03

5.3.2 Creació del mallat

El primer pas a realitzar a la fase de mallat és posar nom a les superfícies creades per tal que el software de simulació les reconegui. A tal fet, definim una superfície *velocity_inlet* a la superfície per on entrarà el fluid i *pressure_outlet* per on sortirà.

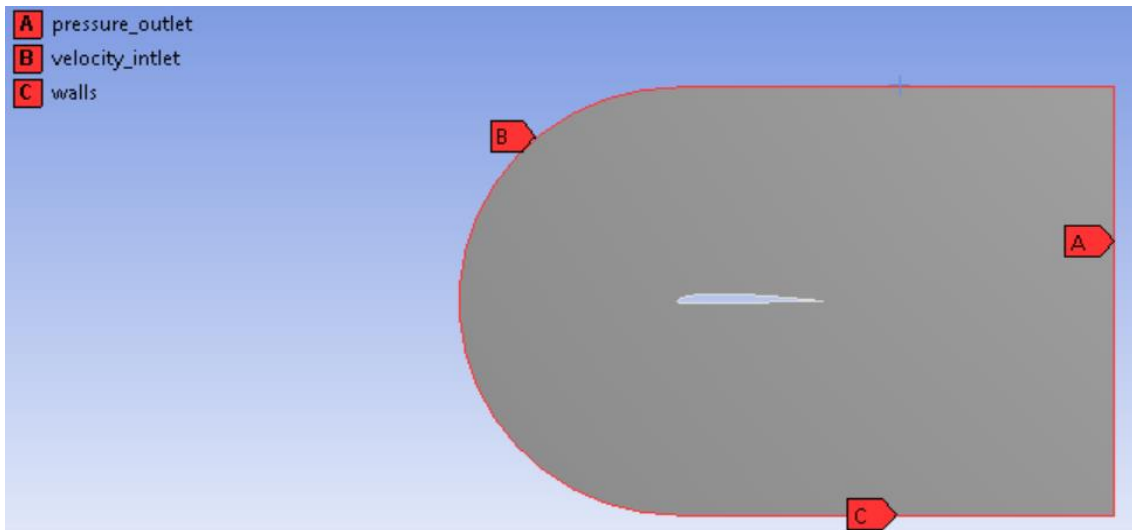


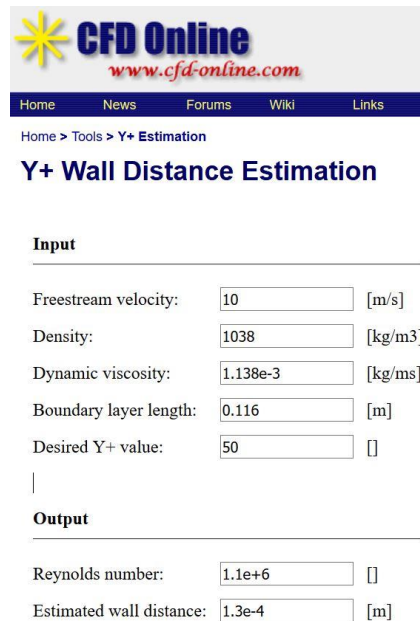
Figure 5.3.3. Definició de la geometria del foil

Un cop definides les superfícies, es procedeix a la creació del mallat. Com ja s'ha comentat és el pas més crític ja que el temps de simulació i la precisió dels resultats depenen d'aquest procés.

Per aconseguir una bona malla s'ha de disminuir la mida d'aquesta prop del cos, ja que és on el flux tindrà més fluctuació en la pressió i velocitat, i per tant interessa precisió, i fer-la més gran a mesura que ens allunyem ja que no hi ha tanta variació. A tal efecte ens cal saber el gruix que tindrà la capa límit per així definir la mida de l'element prop del cos.

Emprant el recurs online a www.cfd-online.com, introduïm la velocitat del flux, la densitat, la viscositat, la longitud característica d'estudi i el valor de Y^+ desitjat i el output ens retorna el Nombre de Reynolds i la distància estimada a la paret.

El valor de Y^+ introduït s'ha fixat a 50 per garantir la turbulència i com a longitud característica s'ha establert la corda del perfil, de 116mm.



CFD Online
www.cfd-online.com

Home News Forums Wiki Links

Home > Tools > Y+ Estimation

Y+ Wall Distance Estimation

Input

Freestream velocity: [m/s]
 Density: [kg/m3]
 Dynamic viscosity: [kg/ms]
 Boundary layer length: [m]
 Desired Y+ value: []

Output

Reynolds number: []
 Estimated wall distance: [m]

Figura 5.3.4. Càlcul del Reynolds i la distància a la paret

Sota aquestes condicions, com es pot observar a la figura X s'han obtingut un nombre de Reynolds de $1.1 \cdot 10^6$ i una mida de la primera cel·la al voltant del perfil de 0.13mm. Per saber quantes cel·les hem de considerar, calculem el gruix de la capa límit mitjançant l'equació següent.

$$\delta \approx \frac{0,382 \cdot L}{Re^{\frac{1}{5}}}$$

Si el gruix de la capa límit és de 2.74mm i les cel·les augmenten amb un ratio de 1.2, partint d'un gruix de 0.13mm es necessiten 9 capes per abastir el gruix de la capa límit.

Seguidament, es procedeix a aplicar tot l'esmentat anteriorment a l'Ansys Meshing. Per fer-ho, el primer que es realitza mitjançant Mesh Control – Method és definir que s'empraran elements triangulars en comptes de rectangulars, donat que s'ajusten millor a geometries irregulars.

Tot seguit, cal ajustar la mida de la malla i la qualitat d'aquesta per tal d'obtenir un mallat més precís. A la figura següent s'observa com s'han de modificar els apartats de Sizing i Quality per aconseguir els resultats desitjats.

Details of "Mesh"	
[-] Sizing	
Size Function	Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (5,857e-003 m)
Mesh Defeaturing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (5,857e-005 m)
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (5,857e-005 m)
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (3)
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
Bounding Box Diagonal	0,40120 m
Minimum Edge Length	1,4036e-004 m
[-] Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	High
Mesh Metric	None

Figura 5.3.5. Configuració del mallat

En aquest punt ja es té una malla triangular i ajustada pel que fa a precisió general, però cal especificar-li que prop de l'objecte la precisió ha de ser més elevada ja que les variacions en les magnituds també ho són. Cal doncs refinar la malla.

Amb els resultats obtinguts anteriorment es procedeix a definir en primer lloc les característiques de la capa límit amb l'eina *Mesh Control - Inflation*. Definim una mida de primer element de 0.13mm (1,3e-4 m) i un total de 9 capes per abastir tot el gruix de la capa límit calculat.

Details of "Inflation" - Inflation	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	1 Edge
Inflation Option	First Layer Thickness
<input type="checkbox"/> First Layer Height	1,3e-004 m
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	9
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre

Figura 5.3.6. Definició dels paràmetres de la capa límit

A continuació s'han d'ajustar les mides d'element a la superfície i al perfil del foil. Per fer-ho s'empren les eines *Face Sizing* per a la superfície, i *Edge Sizing* per al contorn. Amb una mida d'element de $3 \cdot 10^{-3}$ a la superfície i $3 \cdot 10^{-4}$ al contorn s'obté el següent mallat.

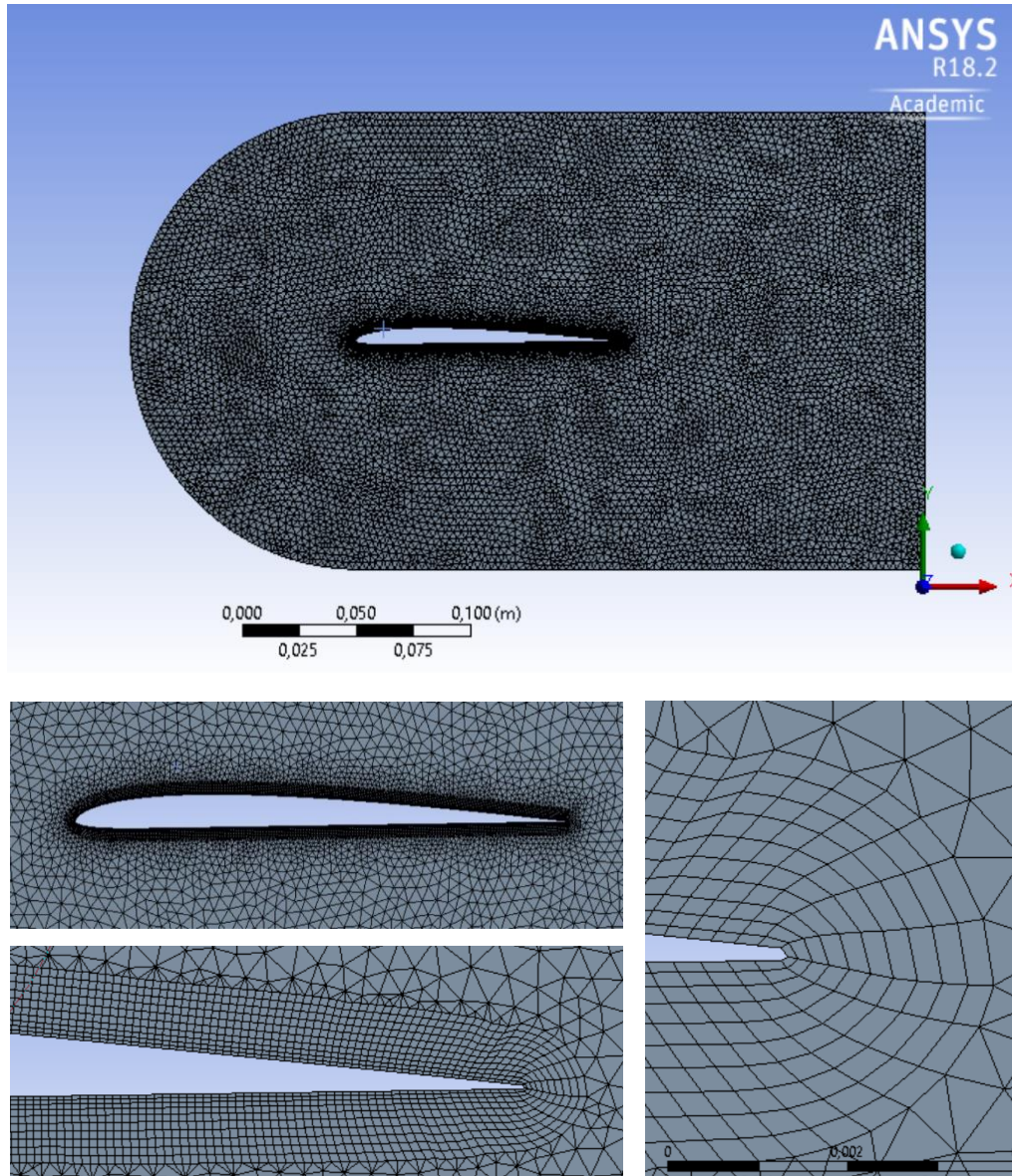


Figura 5.3.8. Mallat final

Com es pot apreciar, el mallat prop de la superfície del foil és més petit i per tant més precís, perfectament ajustat a tot el contorn. Com més s'allunya de la superfície es va fent més gran donat que els resultats en zones allunyades del perfil no cal que siguin tant precisos. El mallat final té 24.711 nodes i 40.011 elements.

Finalment, un cop es té el mallat totalment definit només cal realitzar la comprovació de la Qualitat del mallat. Per fer-ho hi ha moltes tècniques diferents, però una de les més emprades és la Skewness, que determina la proximitat a l'ideal de cada un dels elements del mallat atorgant un valor al mallat entre 0 i 1. Una Skewness baixa vol dir un mallat molt ajustat i per tant bo, i una Skewness elevada significa un mallat molt dolent o fins i tot degenerat.

Per comprovar la Qualitat, cal dirigir-se a *Mesh – Quality* i seleccionar *Skewness a Mesh Metric*. Els resultats són els que es mostren a les figures 5.3.9 i 5.3.10.

Details of "Mesh"	
+ Sizing	
- Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness ▾
<input type="checkbox"/> Min	2,0483e-009
<input type="checkbox"/> Max	0,85554
<input type="checkbox"/> Average	5,5669e-002

Figura 5.3.9. Mínima, màxima i mitjana de Skewness

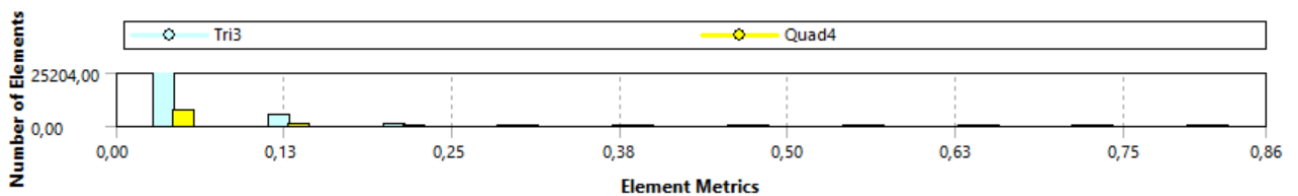


Figura 5.3.10. Nombre d'elements per cada Skewness

Com es pot observar, la mitjana d'Skewness a tota la malla és molt baixa, de l'ordre de 10^{-2} i la majoria d'elements tenen el mínim valor d'Skewness.

5.3.3 Definició de la configuració

La següent de les etapes és la definició de la configuració del problema, que ja es realitza dins l'Ansys Fluent, on també es calcularà la solució i s'analitzaran els resultats.

La configuració emprada per la simulació ha estat la següent:

-General: S'ha realitzat un estudi en 2D planar, en Estat Estacionari i amb una formulació de velocitat absoluta i no relativa.

-Models: D'entre els models proposats s'ha escollit el model de turbulència *k-epsilon*. Cal assegurar-se de que la opció *Standard Wall Functions* estigui marcada al model, donat que és el corresponent a un $y^+=50$.

-Materials: El fluid d'estudi és l'aigua de mar a la temperatura, densitat i viscositat imposades a l'apartat 5.2. Cal afegir-lo al llistat de materials per utilitzar-lo posteriorment.

-Cell Conditions: Cal modificar el fluid de la superfície d'aire a l'aigua de mar que s'ha definit a l'apartat anterior.

-Boundary Conditions: En aquest apartat s'ha definit la velocitat del flux d'aigua a velocity inlet de 10m/s i a pressure outlet s'ha establert la pressió de sortida de 0 Pa. Les superfícies restants s'han considerat parets immòbils.

-Reference Values: S'imposa que la referència sigui *velocity_inlet*, s'introdueix l'àrea que és la longitud característica del perfil i es comproven la temperatura, la viscositat, la densitat i la velocitat imposades anteriorment.

-Monitors: S'introdueixen els monitors dels coeficients de *Lift i Drag* per al seu posterior càlcul.

-Initialization: Es realitza una inicialització de tipus Standard. Cal comentar que les diferències amb la inicialització Híbrida són mínimes.

-Run calculation: Finalment, es defineixen 300 iteracions, s'estableix un *reporting interval* de 1 i es procedeix al càlcul de la solució. Durant el càlcul, s'observen en diferents pestanyes la evolució dels residus i dels coeficients *Lift i Drag*, fins que s'arriba a la convergència de la solució.

Al cap de 190 iteracions, en aquest cas, la solució convergeix. Observant les pestanyes una a una s'observa en primer lloc a la figura 5.3.11 l'evolució dels residus. Aquests disminueixen en tot moment fins arribar al valor imposat prèviament de 10^{-3} . L'indicatiu de que la solució ha convergit és quan tots els residus es troben per sota d'aquest valor.

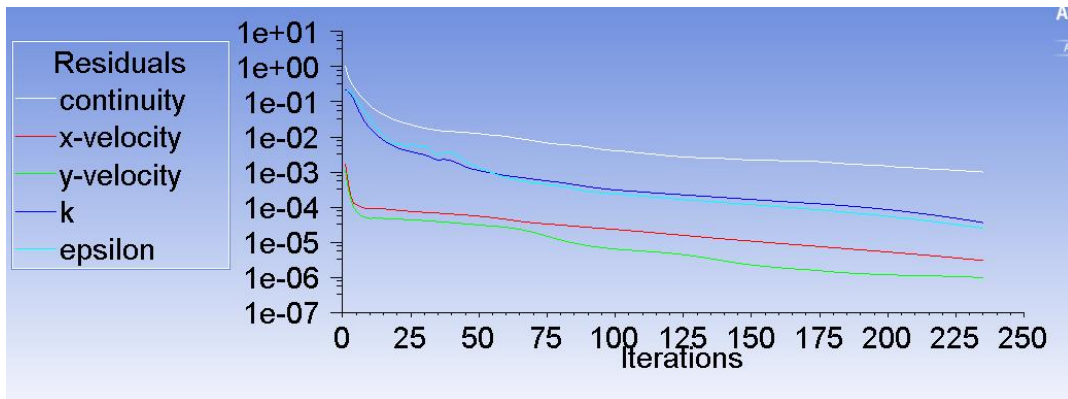
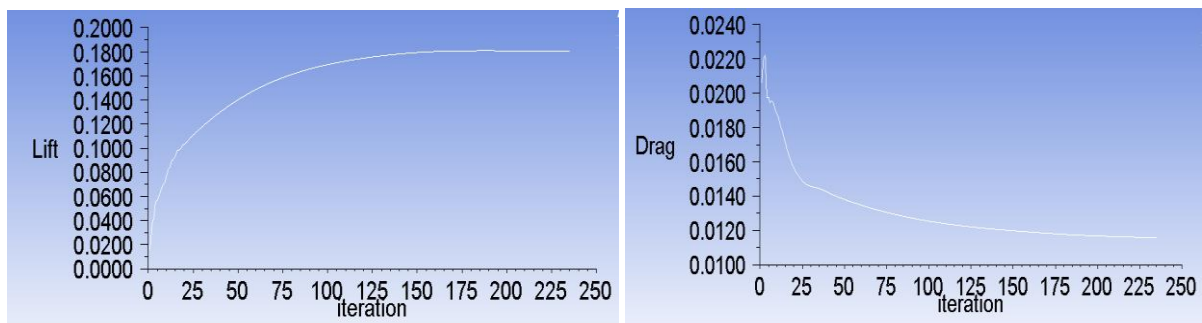


Figura 5.3.11. Evolució dels residus

En segon lloc, s'observa a la figura 5.3.12 l'evolució dels coeficients de *Lift* i *Drag*. El valor d'aquests és millor llegir-lo a la consola amb la comanda *Print to Console*.



drag	lift	moment	time/iter
1.1582e-02	1.8057e-01	3.2460e-02	0:03:47 768
1.1581e-02	1.8059e-01	3.2455e-02	0:03:01 767
1.1579e-02	1.8060e-01	3.2451e-02	0:02:25 766

Figura 5.3.12. Evolució dels coeficients *Lift* i *Drag*

En el següent apartat els mostren els resultats obtinguts de la simulació dels diferents perfils per a diferents angles d'atac.

5.4 Anàlisi de resultats

Per comparar la resposta dels diferents foils s'ha decidit realitzar un estudi dels 3 hydrofoils utilitzats per separat. Per cada hydrofoil s'han estudiat els 5 possibles angles d'incidència del flux, de 0° a 4° , i els seus corresponents coeficients de sustentació, coeficients d'arrossegament i eficiències. A més a més, s'il·lustren per cada hydrofoil els camps de velocitat i pressió de la secció més eficient.

Posteriorment, es realitzarà una comparativa dels resultats obtinguts i un apartat d'anàlisi d'aquests.

5.4.1 Inside foil

El perfil utilitzat com a representant de l'inside foil és el del foil AG13.

·Camp de velocitats

Com es pot observar a la figura 5.4.1, la velocitat augmenta notablement en passar per l'extradós del perfil o part superior, i per la part inferior disminueix però no en tanta quantitat comparativament. Aquesta diferència de velocitats és la que donarà lloc també a una diferència de pressions més endavant per a la creació de la força de sustentació. La velocitat màxima mesurada és de 12,57 m/s.

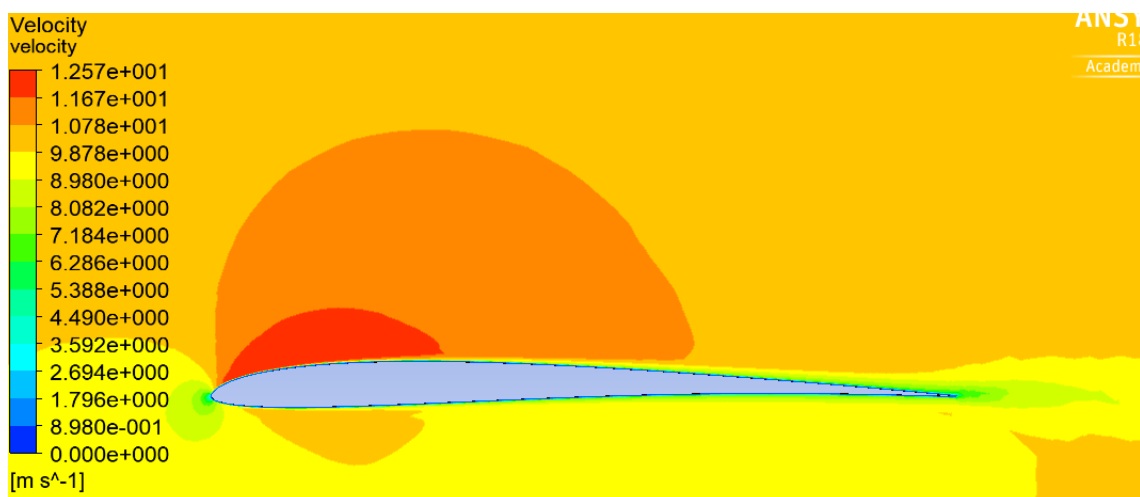


Figura 5.4.1. Camp de velocitats de l'Inside Foil

Les línies de corrent al passar a través del volum de control especificat tenen l'aparença mostrada a la figura 5.4.2. Evidentment, el punt frontal del perfil és un punt

d'estancament, és a dir de velocitat zero, i per tant no hi ha cap línia de corrent dibuixada.

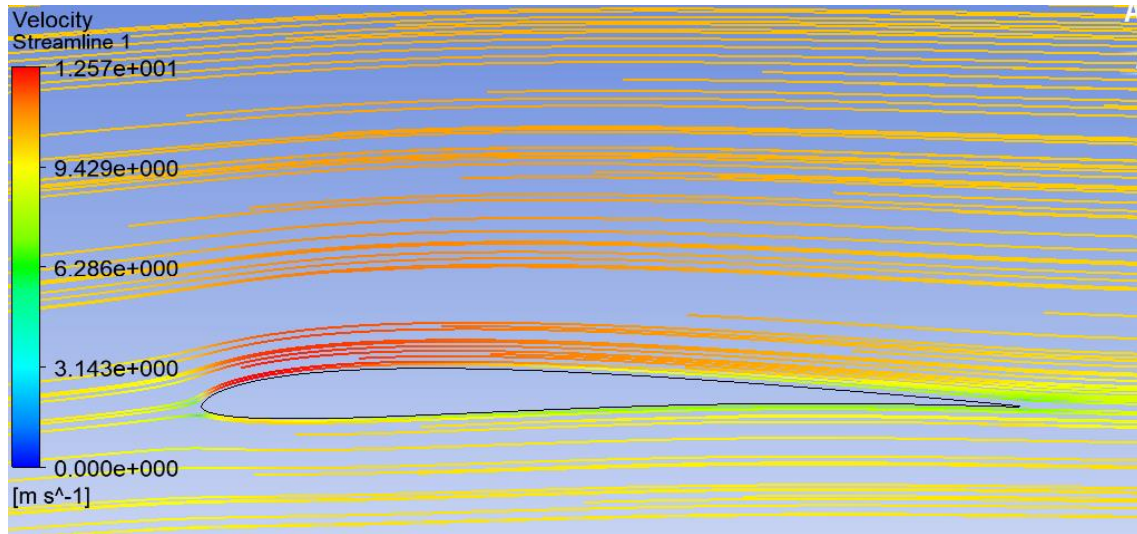


Figura 5.4.2. Línies de corrent a través de l'Inside Foil

·Camp de pressions

Pel que fa al camp de pressions, s'observa principalment que el punt d'estancament és el punt de màxima pressió, evidentment, donat que la velocitat és nul·la i l'energia s'ha de conservar en una línia de corrent qualsevol pel teorema de Bernoulli. A més a més, la part superior té una pressió més baixa que la inferior fet que provocarà la força de sustentació.

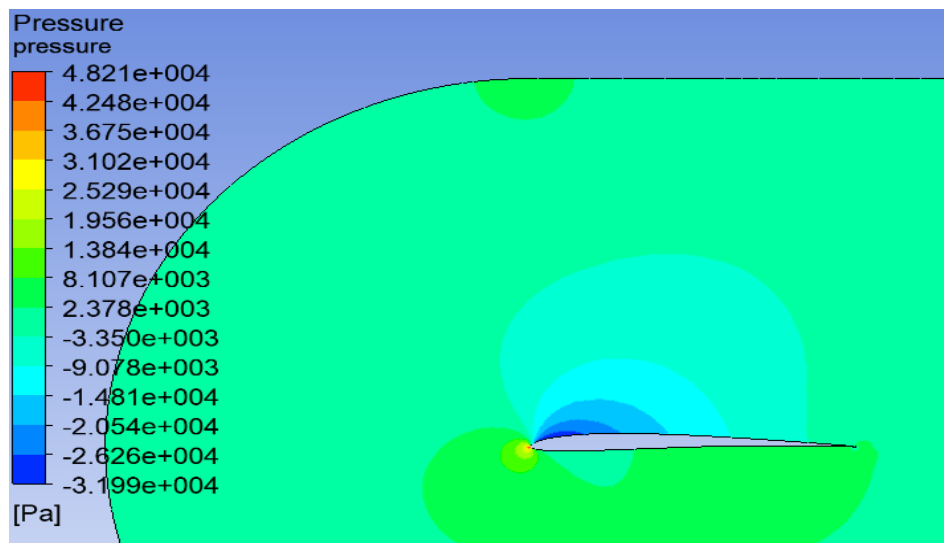


Figura 5.4.3. Camp de pressions de l'Inside Foil

La pressió màxima mesurada és de 48.210 Pa i la pressió mínima de -31990 Pa. Al estar les dues en termes relatius, això suposa unes pressions absolutes de 149.535 Pa i 69.335 Pa. Com que la mínima és superior a la Pressió de vapor de 1938,4 Pa podem afirmar que efectivament no hi haurà cavitació, donat que la velocitat relativa entre el cos i el fluid no és suficientment elevada.

A continuació es recullen a la taula 5.4.1 els diferents valors de C_L i C_D obtinguts per a l'inside foil mitjançant simulació, així com els de l'eficiència del perfil, per a les 5 simulacions amb angles d'atac diferents.

Angle d'atac (°)	C_L	C_D	C_L / C_D
0	0.24307	0.011211	21.68138
1	0.35897	0.013857	25.90532
2	0.47334	0.017095	27.68878
3	0.58748	0.020979	28.00324
4	0.70176	0.025476	27.54593

Taula 5.4.1. Coeficients de l'Inside Foil

5.4.2 Flat foil

·Camp de velocitats

De forma anàloga al que succeeix amb l'inside foil, la velocitat a la part superior d'aquest és major que la velocitat en la part inferior. En aquest cas, la velocitat màxima mesurada per al perfil de l'AG11, el corresponent al Flat foil, és de 12,73 m/s.

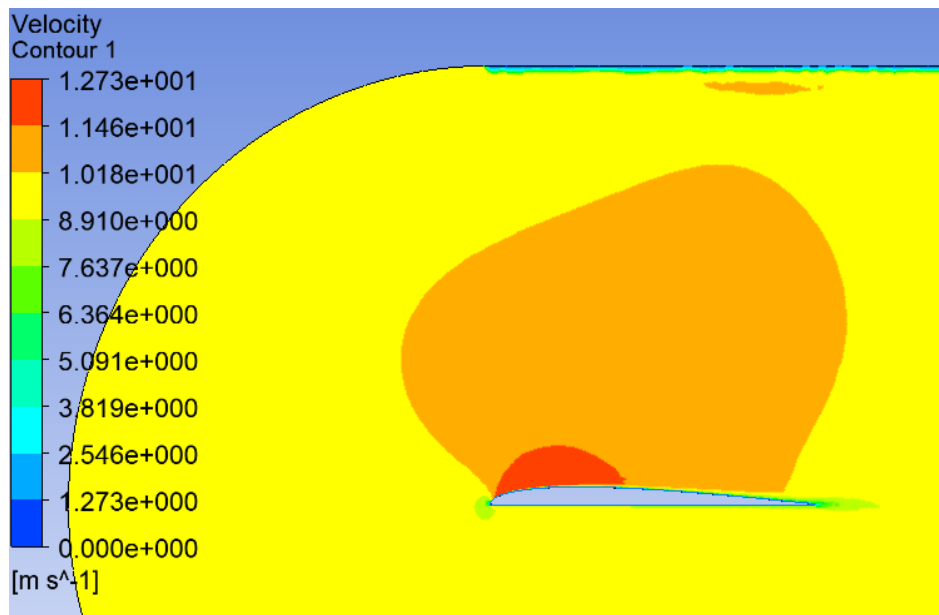


Figura 5.4.4. Camp de velocitats del Flat Foil

Les línies de corrent en aquest cas són les de la figura 5.4.5, també molt similars a les de l'Inside Foil.

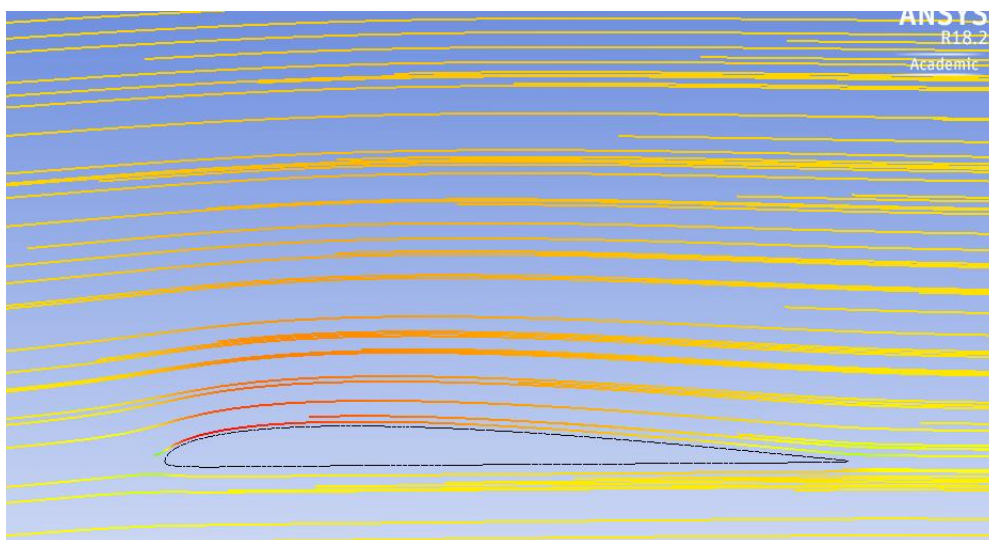


Figura 5.4.5. Línies de corrent del Flat Foil

·Camp de pressions

Pel que fa al camp de pressions en aquest cas es té una pressió màxima de 47870 Pa en referència relativa, que és el mateix que 149.195 Pa en termes absoluts i una pressió mínima de -34.240 Pa o bé 67.085 Pa.

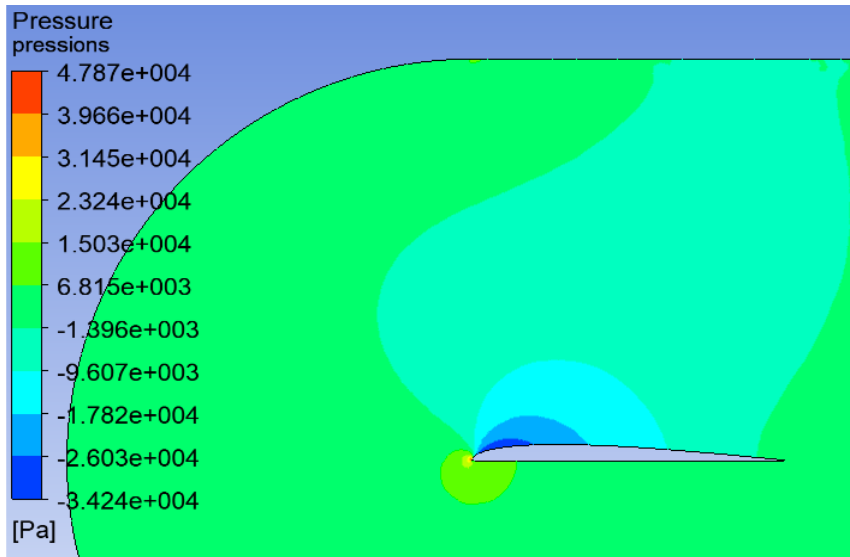


Figura 5.4.6. Camp de pressions del Flat Foil

Finalment els valors obtinguts en aquest cas pels coeficients de les forces de sustentació i arrossegament i la seva eficiència són els recollits a la Taula 5.4.2.

Angle d'atac (°)	C_L	C_D	C_L / C_D
0	0.22578	0.013719	16.45767
1	0.34168	0.015852	21.55438
2	0.45692	0.018920	24.15011
3	0.57162	0.022596	25.29738
4	0.68503	0.027026	25.34703

Taula 5.4.2. Coeficients del Flat Foil

5.4.3 80/20 foil

·Camp de velocitats

Per últim, el camp de velocitats del 80/20 foil revela una velocitat màxima de 12,55 m/s a la part superior de l'hydrofoil. Es pot veure també que a la part posterior del perfil sembla que hi ha una mica de fluctuació.

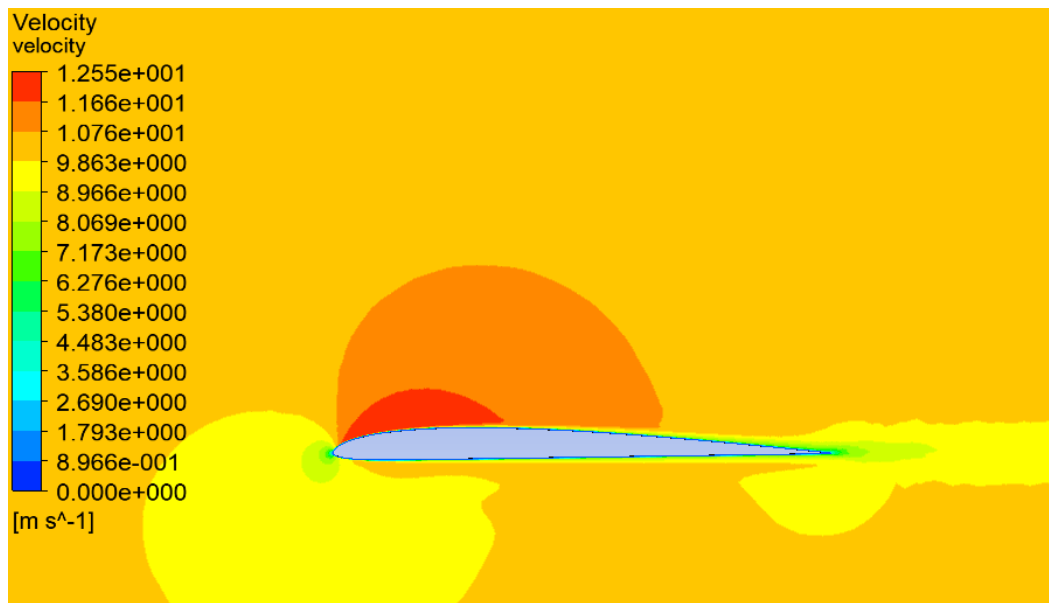


Figura 5.4.7. Camp de velocitats al foil 80/20

En aquesta situació, les línies de corrent que travessen el perfil són les dibuixades a la Figura 5.4.8.

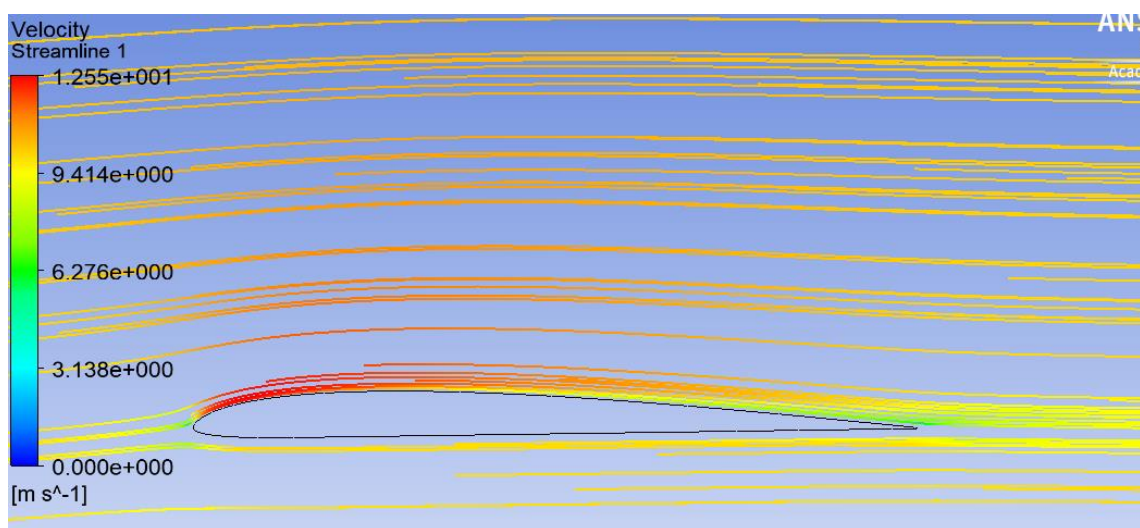


Figura 5.4.8. Línies de corrent del foil 80/20

·Camp de pressions

Finalment, el camp de pressions revela una pressió màxima relativa de 50.410 Pa, que és el mateix que 151.735 Pa en termes absoluts. Pel que fa a la mínima, la relativa és de -31.800 Pa i la absoluta de 69.525 Pa. Per tant, com en els dos casos anteriors, no es produeix cavitació.

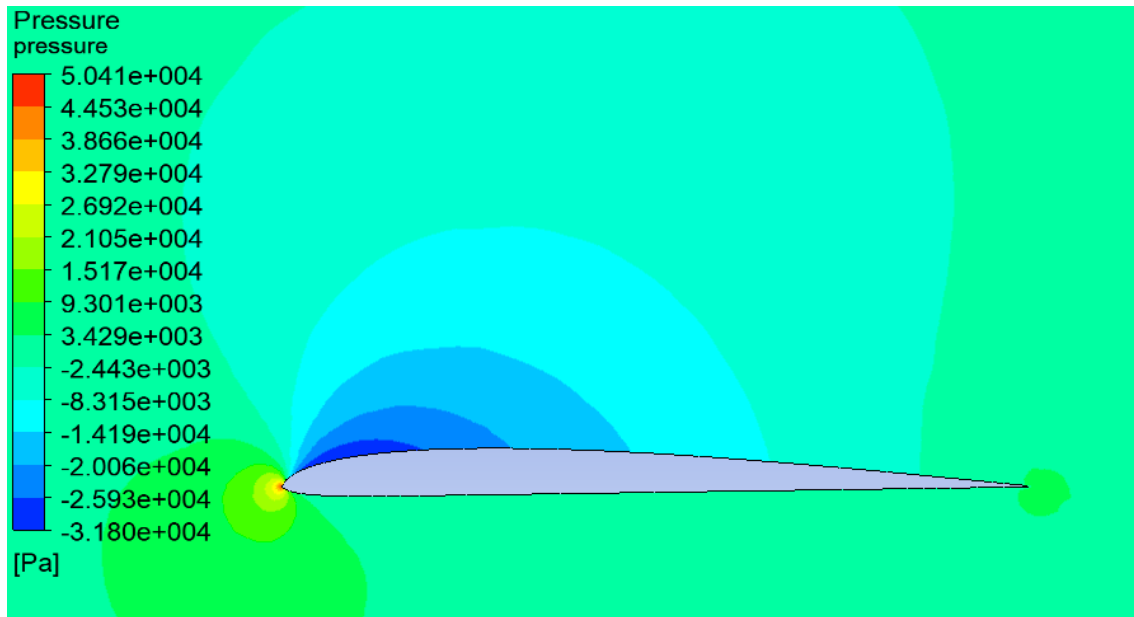


Figura 5.4.9. Camp de pressions pel foil 80/20

Ja per acabar, els resultats dels coeficients per l'últim foil s'agrupen a la Taula 5.4.3

Angle d'atac (°)	C_L	C_D	C_L / C_D
0	0.21418	0.011551	18.54212
1	0.33623	0.012088	27.81519
2	0.45340	0.013138	34.51058
3	0.58035	0.014649	39.61704
4	0.69839	0.017035	40.99739

Taula 5.4.3. Coeficients pel foil 80/20

5.5 Comparació dels resultats

L'últim que cal fer en aquesta fase de simulació és l'anàlisi comparatiu dels resultats obtinguts i recollits a les taules en funció dels angles d'atac. S'estudiaran per separats els tres paràmetres C_L , C_D i Eficiència.

Per tal de poder comparar les respostes dels tres hydrofoils, el que s'ha fet és realitzar per cada angle la mitjana del paràmetre analitzat en cada cas per tenir un valor significatiu de la resposta dels tres perfils. Posteriorment, s'han analitzat les diferències de cada alternativa respecte el valor mitjà en percentatge per poder extreure conclusions de la resposta de cada hydrofoil.

En l'àmbit global, tanmateix, cal destacar que si bé és cert que els valors obtinguts pel Coeficient de Sustentació s'aproximen molt als valors previstos a l'estudi teòric previ dels perfils realitzat a l'apartat 5.1, els valors obtinguts del Coeficient de resistència a l'avanç són més grans que els esperats.

Una possible explicació a aquest fet és que la malla del programa emprat per fer l'estudi teòric previ fos diferent a la que s'ha utilitzat en aquest estudi, és a dir a la malla de l'Ansys Meshing. En aquest cas, com que el Coeficient de Resistència a l'avanç és un valor molt influenciat per aquestes variacions, podria ser que s'haguessin causat aquestes diferències notables en els resultats.

Amb els Coeficients de Sustentació ben calculats però els Coeficients de Resistència a l'Avanç diferents, evidentment s'han obtingut uns valors per les eficiències que no eren els esperats. Tanmateix, el que sí que es podrà afirmar en cas que s'hagin mantingut les relacions és l'angle on es produeix l'eficiència màxima.

·Coeficient de Sustentació C_L

Els resultats obtinguts pel coeficient de sustentació i pels tres perfils estudiats són els que mostra la Taula 5.5.1.

Angle (°)	Inside Foil	Flat Foil	80/20 Foil	Mitjana	Millora Inside Foil (%)	Millora Flat Foil (%)	Millora 80/20 Foil (%)
0	0.24307	0.22578	0.21418	0.2277	6.32	-0.85	-6.31
1	0.35897	0.34168	0.33623	0.3456	3.72	-1.15	-2.79
2	0.47334	0.45692	0.45340	0.4612	2.56	-0.94	-1.72
3	0.58748	0.57162	0.58035	0.5798	1.31	-1.43	0.09
4	0.70176	0.68503	0.69839	0.6951	0.95	-1.47	0.47

Taula 5.5.1. Comparació dels coeficients de sustentació

En vista dels resultats obtinguts pel coeficient de sustentació, podem afirmar que el perfil que presenta un coeficient de sustentació més elevat és l'inside foil. D'altra banda, el Flat Foil es troba lleugerament per sota la mitjana en tots els angles d'atac mentre que el 80/20 comença molt per sota d'aquesta i s'acaba recuperant als angles de 3° i 4°.

·Coeficient d'arrossegament C_D

En segon lloc s'analitzen els resultats del coeficient d'arrossegament pels tres perfils a la Taula 5.5.2.

Angle (°)	Inside Foil	Flat Foil	80/20 Foil	Mitjana	Millora Inside Foil (%)	Millora Flat Foil (%)	Millora 80/20 Foil (%)
0	0.011211	0.013719	0.011551	0.0122	8.82	-11.07	5.62
1	0.013857	0.015852	0.012088	0.0139	0.31	-12.31	14.99
2	0.017095	0.01892	0.013138	0.0164	-4.07	-13.32	24.83
3	0.020979	0.022596	0.014649	0.0194	-7.53	-14.14	32.43
4	0.025476	0.027026	0.017035	0.0232	-8.93	-14.16	36.19

Taula 5.5.2. Comparació dels coeficients d'arrossegament

En aquest cas, com que l'interès radica en tenir coeficients d'arrossegaments baixos, el foil que ha obtingut un millor coeficient d'arrossegament respecte la mitjana global és en tot moment el 80/20. Clarament el que pitjor es comporta de cara a la resistència a l'avanç és el Flat Foil, donat que sempre es troba per sobre de la mitjana. El foil restant, l'Inside foil, té una resposta molt correcte per angles d'atac baixos però el seu C_D augmenta de forma molt notable al incrementar l'angle d'atac.

·Eficiència

Per acabar, l'últim que queda per estudiar és l'eficiència en cadascun dels tres foils. El que es va preveure a l'estudi teòric previ a la simulació va ser que per l'Inside Foil, l'eficiència òptima s'assolia per un angle d'atac de 4º; pel Flat Foil, als 5,5º i per el foil 80/20 als 5º. Les eficiències en els 3 casos i les seves variacions respecte la mitjana global s'especifiquen a la Taula 5.5.3.

Angle (º)	Inside Foil	Flat Foil	80/20 Foil	Mitjana	Millora Inside Foil	Millora Flat Foil	Millora 80/20 Foil
0	21.68138	16.45767	18.54212	18.8937	12.86	-14.80	-1.90
1	25.90532	21.55438	27.81519	25.0916	3.14	-16.41	9.79
2	27.68878	24.15011	34.51058	28.7832	-3.95	-19.18	16.60
3	28.00324	25.29738	39.61704	30.9726	-10.60	-22.43	21.82
4	27.54593	25.34703	40.99739	31.2968	-13.62	-23.47	23.66

Taula 5.5.3. Eficiències

Com es pot observar, les millors eficiències s'obtenen amb el foil de 80/20, donat que el seu C_D és molt baix i arriba a compensar el defecte de C_L respecte els altres foils. D'altra banda, en el cas de l'Inside Foil es té una eficiència en tot cas superior a la del Flat Foil, i hi ha una possible eficiència màxima en 3º d'angle d'atac, però podria ser causada per errors experimentals. Per últim, el Flat Foil és el candidat amb menor eficiència donats els seus elevats C_D i els C_L sobre la mitjana.

5.6 Condicions òptimes de cada perfil

En vista dels resultats obtinguts, en aquest apartat s'explicarà per a cada perfil estudiat les condicions òptimes de funcionament.

Pel que fa a l'Inside Foil, els resultats més destacats són els coeficients de lift que presenta, els quals superen amb una gran diferència als dels altres dos perfils. D'altra banda, els coeficients de resistència a l'avanç veiem que són semblants als del foil 80/20 per angles d'incidència baixos però que a mesura que augmenta l'angle augmenten molt.

Aquests dos fets converteixen l'Inside foil en un candidat que presenta una gran adherència a la onada, donat que l'adherència es mesura amb el *hold*; i també una opció molt adequada per a mantenir la velocitat durant el gir, tal i com es va predir a la fase teòrica, donat que al gir els angles d'incidència són baixos i per tant els C_D en aquests casos són baixos. A més a més, els Inside foils són els que crearan més *pivot*, donat que un major *Lift* crea un major moment respecte la quilla central, aconseguint així girs més tancats.

En segon lloc, el Flat foil presenta uns coeficients de sustentació sobre la mitjana, més baixos que en el cas de l'Inside foil però millors que els del foil 80/20. D'altra banda, els coeficients d'arrossegament són els més elevats de les tres opcions. És per aquests motius pels quals el Flat foil és un molt bon candidat en onades de potència més elevada, on la velocitat no és tant necessària donat que ja la aporta la energia de la onada. En aquest cas, el flat foil al presentar més C_D ajuda al surfista a reduir la velocitat en la fase del gir, donat que una velocitat massa elevada podria resultar en la pèrdua del control de la taula. A més a més, el lift sobre la mitjana revela que també és un bon candidat per als girs tancats, però no tant com en el cas de l'Inside.

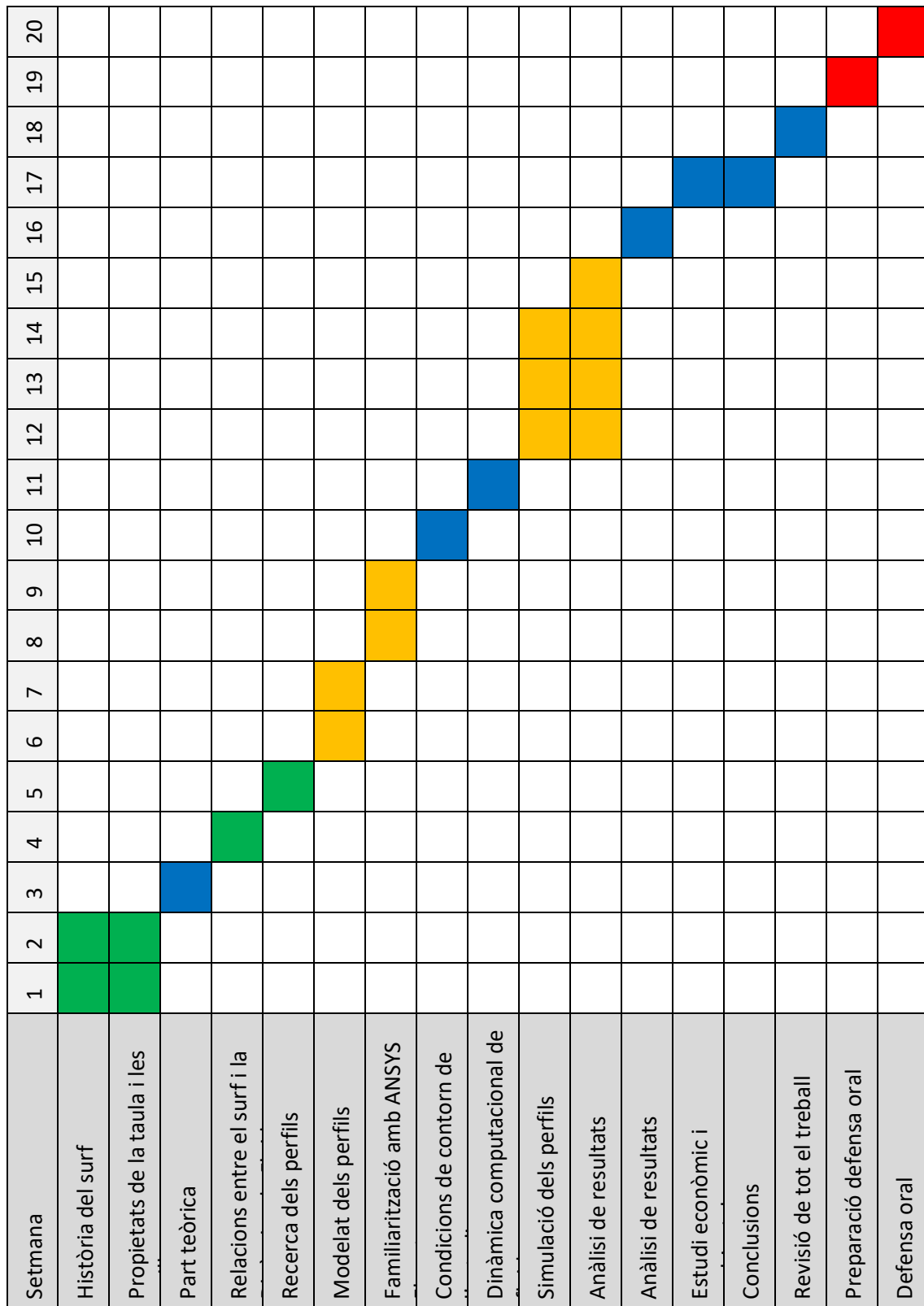
Per últim, els resultats del foil 80/20 són els millors en quant a resistència a l'avanç però els menors pel que fa a la sustentació. Això fa que aquest tipus de foil s'utilitzi sobretot en condicions de necessitat de velocitat. Tanmateix, al no presentar tant *Lift* com les dues altres alternatives el problema d'aquest perfil és el *hold* (Adherència) i el *pivot*, que es veuen molt reduïts per aquest fet.

6. Planificació

Aquest treball ha estat realitzat durant el quadrimestre de tardor de 2017-2018. El seu inici és el corresponent a la data de registre del treball, el dia 18 de Setembre de 2017; i el seu final és la data de presentació el dia 2 de Febrer de 2018, per la qual cosa s'ha establert una durada de 20 setmanes. En el diagrama de Gantt següent s'estructuren les activitats dutes a terme en aquest període de temps, així com la seva duració i ordre.

TASCA	TIPUS	INICI	DURADA
Història del surf	Recerca	1	2
Propietats de la taula i les quilles	Recerca	1	2
Part teòrica	Redacció	3	1
Relacions entre el surf i la Dinàmica de Fluids	Recerca	4	1
Recerca dels perfils	Recerca	5	1
Modelat dels perfils	Fase de simulació	6	2
Familiarització amb ANSYS Fluent	Fase de simulació	8	2
Condicions de contorn de l'estudi	Redacció	10	1
Dinàmica computacional de fluids	Redacció	11	1
Simulació dels perfils	Fase de simulació	12	3
Anàlisi de resultats	Fase de simulació	12	4
Anàlisi de resultats	Redacció	16	1
Estudi econòmic i ambiental	Redacció	17	1
Conclusions	Redacció	17	1
Revisió de tot el treball	Redacció	18	1
Preparació defensa oral	Defensa oral	19	1
Defensa oral	Defensa oral	20	1

Taula 6.1. Activitats realitzades durant el treball



Taula 6.2. Diagrama de Gantt del Projecte

7. Estudi econòmic

Pel que fa a l'estudi econòmic del projecte, s'ha realitzat un càlcul global del seu cost total tenint en compte totes les despeses, realitzant una aproximació a un encàrrec d'un client a una empresa d'enginyeria.

Donat que l'estudi ha estat de caire purament teòric, no s'han hagut de considerar despeses en materials i construcció, sinó que les principals despeses que s'han considerat són les hores de feina de l'enginyer, el cost de les llicències del programari i el lloguer d'una instal·lació o despatx per a la seva realització, entre d'altres.

En primer lloc, per al càlcul de la despesa corresponent a les hores de feina de l'enginyer, s'han considerat 300 hores de feina, que és l'equivalent en hores dels 12 crèdits ECTS que té el projecte, més 100 hores d'imprevistos que s'han anat produint durant la seva realització.

Seguidament, donat que s'han utilitzat els programes *Solidworks*, *Ansys* i *Microsoft Office*, s'han inclòs els preus de les seves llicències al cost total. També s'ha afegit el preu de l'ordinador en aquest sector.

A més a més, s'ha considerat que per a la realització del projecte s'ha llogat un estudi per 1000 €/mes i una potència contractada de 3 KW, establint un cost del KWh de 0,15 €. Finalment, s'ha afegit un 5% del cost total del projecte per la possibilitat d'imprevistos.

El cost total estimat del projecte és el que es mostra a la Taula 7.1.

Concepte	Preu unitari	Temps invertit	Total
Enginyer	25 €/h	400 hores	10000 €
<i>Solidworks 2017</i>	6,600.00 €		6600 €
<i>Llicència SW</i>	125 €/mes	4 mesos	500 €
<i>Ansys 18.2</i>	10,000 €		10000 €
<i>Microsoft Office</i>	10 €/mes	4 mesos	40 €
Ordinador	900 €		900 €
Oficina	1000 €/mes	4 mesos	4000 €
Consum	0,15 €/KWh	400 hores	180 €
Cost total			32220 €
Imprevistos			1611 €
Total sense impostos			33831 €
Total amb IVA (21%)			40935.51 €

Taula 7.1. Cost total del projecte

Aquest cost desglossat en percentatges sobre el total és el que es mostra a la Figura 7.1.

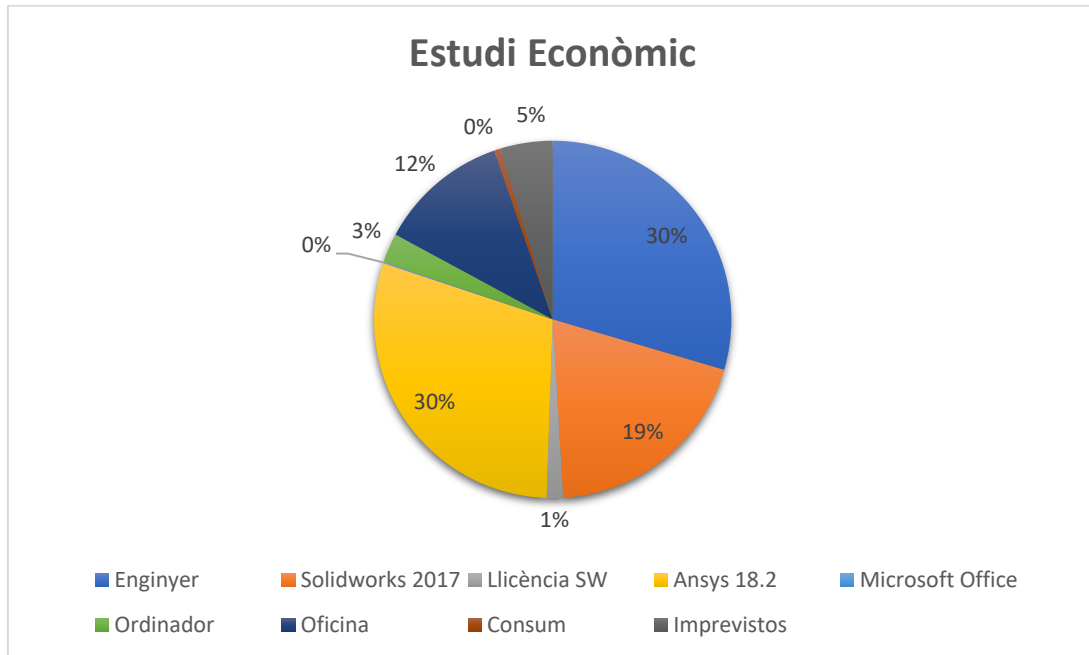


Figura 7.1. Diagrama dels percentatges dels diferents costs

8. Impacte ambiental

Donat que aquest treball ha estat de caire teòric, l'impacte que ha tingut la seva realització sobre el medi ambient ha estat molt inferior al dels experiments duts a terme, per exemple, en túnels de vent, tant en estalvi d'energia com en estalvi de temps i de costos.

I és que la simulació té aquest gran avantatge respecte la experimentació real, donat que en aquesta última cada mostra a assajar implica la seva prèvia construcció, i això implica unes conseqüències de cara al medi ambient més rellevants que en el cas de la simulació, tot i que també cal dir que els resultats que s'obtenen amb la experimentació real són molt més fiables que amb la simulació.

L'ordinador ha estat l'eina fonamental per a la realització de l'estudi. La quantitat d'hores invertides ha suposat un desgast dels components així com un elevat consum d'electricitat deguda a l'alimentació de la bateria. En aquest àmbit cal tenir en compte la normativa europea que regula el reciclatge dels residus electrònics, la Directiva 2002/96/CE (RAEE), la qual estipula que la recollida, transport, emmagatzematge i extracció de components i substàncies ha de ser realitzada per una empresa autoritzada.

Per últim, cal mencionar que el surf és un esport caracteritzat per l'aprofitament de l'energia provinent de les onades, és a dir que es basa en l'ús d'una energia renovable per a l'entreteniment i per tant no té cap repercussió a nivell mediambiental. A més a més, les grans empreses del sector estan totes controlades per tal de causar el menor risc i impacte a l'entorn on s'estableixen.

9. Conclusions

Després de tota la feina realitzada, de tot el coneixement adquirit de Mecànica de Fluids i de la comprensió de la física darrere el surf s'han pogut extreure unes conclusions determinades de la realització del present estudi.

Pel que fa al primer objectiu, la finalitat del qual era entendre la resposta dels diferents hydrofoils a través de l'estudi del flux d'aigua entorn el cos, es pot afirmar que s'ha assolit amb èxit. Tot i haver realitzat l'estudi en 2D i d'una forma simplificada preparada purament per a la comparativa, s'han aconseguit uns resultats intel·ligibles, lògics i que concorden de manera general amb les sensacions a la realitat.

En referència al segon objectiu, i molt lligat amb el que s'ha comentat del primer objectiu, s'ha pogut comprovar que efectivament l'elecció de foils que es fa a la realitat concorda amb l'anàlisi realitzat de l'ús dels diferents hydrofoils per a diferents condicions.

Donades les condicions del mediterrani, on les onades són escasses i sovint no tenen prou potència, un cop analitzats els resultats obtinguts la quilla més adient a escollir seria la que presenta Inside Foil, donat que garanteix velocitat, adherència i girs tancats (quan les onades són petites no hi ha espai per fer girs amples).

Aquesta elecció, tanmateix, és deguda als resultats d'aquest anàlisi en concret. És a dir, seria la elecció correcta si totes les altres característiques geomètriques de la quilla fossin constants. No s'ha pogut arribar a un disseny òptim de la quilla en general com s'esperava inicialment, donat que el nombre de variables geomètriques i el rang de valors que aquestes podien prendre feien que el nombre d'experiments a realitzar per trobar un model òptim fos massa elevat.

Amb més temps disponible, hagués estat molt interessant realitzar un experiment ben dissenyat aprofitant les tècniques estadístiques apreses durant el Grau i amb simulacions en 3D que revelés com afecten totes les característiques geomètriques al rendiment i resposta de les quilles.

Cal mencionar també el tercer objectiu, que feia referència al descobriment de possibles nous camins d'investigació per a futurs treballs o estudis. Aquest treball ha estat una enorme expansió de la visió molt reduïda que es tenia de la part tecnològica del surf, que ha resultat ser molt més elevada del que s'esperava. Ha estat realment sorprenent descobrir una comunitat de surfistes físics i enginyers que han dedicat gran part del seu temps a entendre la física darrere totes les components del món del surf i a explicar-la a través de les xarxes.

Com a conclusió general, es creu que s'ha realitzat una bona feina i que s'han assolit els objectius principals del projecte. Per tal d'obtenir resultats més fiables en futurs estudis, el millor seria efectuar la simulació en 3D, i fins i tot realitzar alguns experiments amb models reals en túnels de vent.

Agraïments

En primer lloc, agrair al professor Enric Trillas i Gay la seva direcció d'aquest Projecte de Fi de Grau. Sempre s'ha mostrat molt accessible per a les consultes i dubtes que m'han anat sorgint i m'ha aportat punts de vista molt interessants i solucions per a seguir endavant quan estava encallat.

Agrair també a tots els amics, coneguts i experts del sector amb qui he comentat el projecte i que, ja sigui amb e-mails o tertúlies, m'han resolt els dubtes que m'anaven sorgint en el desenvolupament del projecte.

Finalment, agrair també el suport i els ànims aportats pels amics i familiars en el dia a dia de la realització d'aquest treball.

Bibliografia

·Referències Bibliogràfiques

- [1] ANDERSON, J. *Fundamentals of Aerodynamics*, (3ª Edició) NEW YORK, 2001.
- [2] MESSEGUER, J. SANZ, A. *Aerodinámica Básica*. (2ª Edició) SPAIN, 2010.
- [3] STREETER, V.L. *Mecánica de Fluidos* (9ª Edició) MEXICO, Mc Graw-Hill
- [4] WHITE, F.M. *Mecánica de Fluidos* (6ª Edició) MADRID, Mc Graw-Hill

·Bibliografia Complementària

- [1] Història del surf, <http://iml.jou.ufl.edu/projects/spring04/britton/history.htm>
- [2] Història de la quilla, <http://www.thefinbox.com/history/history-of-the-fin/>
- [3] Característiques de les quilles, http://www.boardcave.com/the-surfers-corner/the-surfboard-fin-guide/#fin_size
- [4] Característiques de les quilles FCS, <https://www.surffcs.com/community-story/community-blog/2013/03/01/a-guide-to-fcs-fins>
- [5] Relacions entre la Mecànica de Fluids i la ciència darrere les quilles, <http://finsciences.com/surfboard-fin-science/>
- [6] Velocitat del surfista a la onada, <https://www.surfertoday.com/surfing/5126-top-surfers-check-speed-and-distance-in-a-wave>
- [7] Temperatura de l'aigua al Mediterrani, <https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=218&lang=es>
- [8] Propietats de l'aigua, http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/maru_j_ms/apendiceA.pdf
- [9] Teoria del sistema de quilles <https://greenlightsurfsupply.com/pages/surfboard-fin-design-greenlight-surfboard-design-guide>
- [10] Estudis de la física darrere el surf <http://www.rodndtube.com/surf/info/Hydrodynamics.shtml>