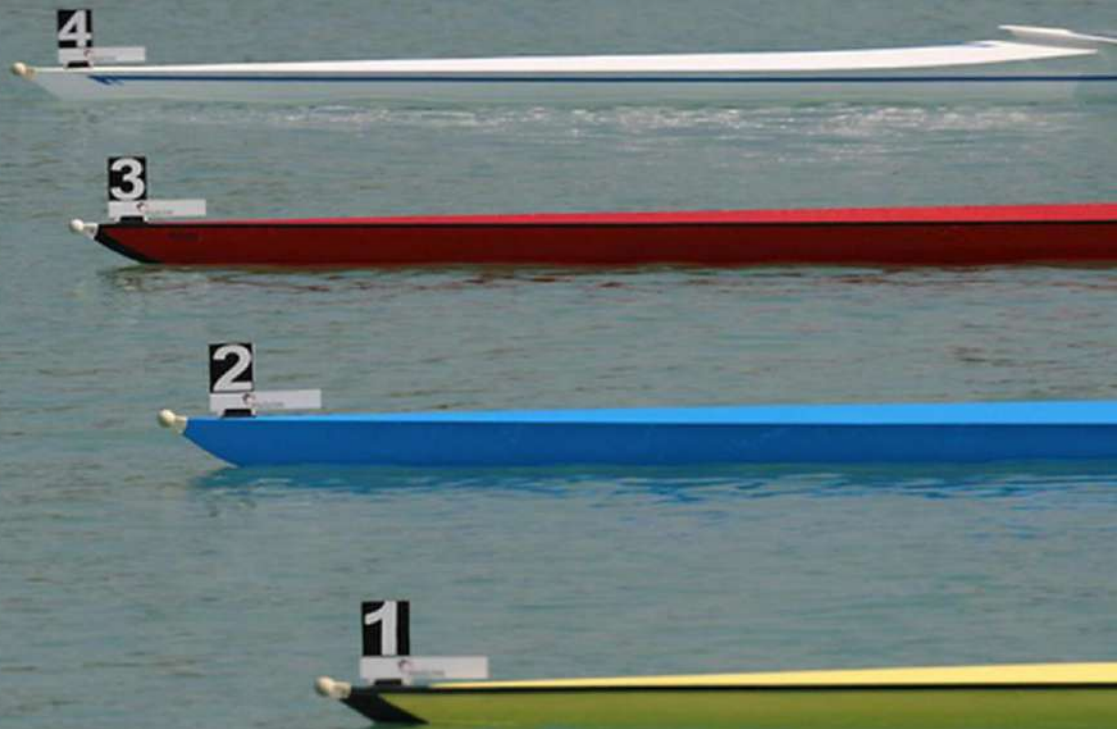


Quin serà el més ràpid?

-Estudi hidrodinàmic d'un bot de rem-



LLUC ALEMANY I CASALS

2n de Batxillerat

Tutor: Rafel Juanola i Bailina

Departament de Ciències Experimentals

INS Josep Brugulat

2 d'octubre del 2017

Estic molt agraït a tots aquells que m'han ajudat i m'han dedicat el seu temps en aquesta etapa.

Sobretot, m'agradaria donar les gràcies a en Juli Lozano, professor i fuster de l'institut, per aconsellar-me durant el llarg procés de construcció de les maquetes i posar a la meva disposició totes les eines i la maquinària necessària. Agraïxo també la implicació del constructor de bots banyolí Joan Collell, tant en la realització del marc teòric i com a la part pràctica del treball.

Li dono les gràcies també al meu tutor Rafel Juanola per haver-me guiat i aconsellat durant tots els mesos de realització del treball.

Estic també molt agraït amb el meu pare i professor de tecnologia Lluís Alemany qui m'ha acompanyat en l'execució de tots els assajos. Agraïxo a en Santi Coll, qui em va deixar el motor i el variador de freqüència. Per últim, la realització pràctica ha estat possible gràcies a la piscina que em van deixar els meus oncles Josep Alemany i Gemma Güell.

A tots, moltes gràcies.

ÍNDEX

1. Introducció	6
1.1 Objectius i hipòtesis	6
1.2 Motivació	7
1.3 Metodologia	7
2. Bots de rem	10
2.1 Parts del bot i del rem	10
2.2 Modalitats de bots de rem de banc mòbil	19
2.2.1 Rem en punta	19
2.2.2 Rem en <i>couple</i> o <i>scull</i>	20
2.3 Evolució en el procés de construcció de bots de rem	21
3. Conceptes mecànica de fluids	26
3.1 Definició i propietats dels fluids	27
3.2 Hidrodinàmica	27
3.2.1 Règims de corrent i capa límit	27
3.2.2 Nombre de Reynolds	28
4. Física del rem	30
4.1. La resistència a l'avanç	30
4.1.1. Descomposició de la resistència	31
5. Experiències hidrodinàmiques	35
5.1 Mètodes de correlació	35
5.2 Canals d'experiències hidrodinàmiques	35
5.2.1 Canal d'aigües tranquil·les	36
5.2.2 Túnel de cavitació	37
5.2.3 Laboratori de dinàmica del buc	37
6. Pràctica amb perfils	38
6.1. Introducció	38
6.1.1 Consideracions inicials	38
6.2 Fase de disseny	39
6.2.0 Bot 1	40
6.2.1 Bots 2 i 3	40
6.2.2 Bot 4	41
6.2.3 Bot 5	41

6.2.4 Bot 6	41
6.2.5 Batanga o pontó estabilitzador	42
6.3 Fase de construcció.....	42
6.4 El canal d'aigua.....	51
6.5 Fase d'assaig	57
6.5.1 Dades.....	58
6.7 Càlcul de l'exponent de la velocitat (n).....	67
6.8 Càlcul de la resistència K	68
6.9 Comparació i discussió dels resultats	70
7. Conclusions	71
7.1 Conclusions personals:.....	74
Llista de referències	75
Bibliografia	75
Webgrafia.....	75

1. Introducció

Aquest Treball de Recerca està relacionat amb el món del rem, la física i els fluids. En concret, pretén estudiar la força de resistència a l'avanç en els bots de rem de competició. Aquest aspecte és molt importat, no només en el rem, sinó també en altres àmbits com l'aviació o la fórmula 1, ja que s'ha de tenir molt en compte i és crucial a l'hora de dissenyar qualsevol vehicle, i més si és de competició.

Decidir el tema del meu Treball de Recerca no va ser gens fàcil, em varen caldre hores de reflexió i diverses reunions amb el meu tutor per decidir-lo. La idea que tenia inicialment era intentar optimitzar la forma dels bots que utilitzem els remers, de manera que aquests ofereixin menys resistència i es requereixi menys esforç per part de l'esportista. Després d'intercanviar correus amb en Toni Pujol, professor del Departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial de la Universitat de Girona i especialista en mecànica de fluids, demanant-li consell, vaig adonar-me que no havia tingut en compte que aquest àmbit ja ha estat molt treballat per a enginyers amb més experiència i estudis que jo i que, per tant, seria improbable poder millorar la seva feina. És per això que, finalment, vaig decidir reorientar el meu treball i dedicar-lo a construir diferents maquetes de bots per tal de poder-ne fer un estudi hidrodinàmic, deduir-ne la força de resistència a l'avanç i comparar-la entre els diferents models.

1.1 Objectius i hipòtesis

L'objectiu inicial d'aquest treball de recerca és **identificar i descriure les forces de resistència que actuen en un bot de rem i el motiu pel qual s'originen**. D'aquest objectiu se'n deriven els següents objectius secundaris:

Adquirir els coneixements necessaris per ser capaç de **dissenyar i construir diferents perfils o maquetes de bots de rem a l'escala adient** per poder-ne fer l'estudi hidrodinàmic corresponent.

Conèixer el funcionament d'un canal d'experiències hidrodinàmiques, els assajos que s'hi realitzen i els resultats que se'n poden extreure.

Intentar **reproduir amb els perfils construïts els assajos experimentals** que es duen a terme en un canal d'aquestes característiques.

Mesurar experimentalment la força de resistència a l'avanç que presenten els diferents perfils i estudiar com varia en funció de la forma del casc.

Establir la relació existent entre la velocitat i força de resistència. La meua hipòtesi en relació a aquest objectiu és que aquesta força variarà de manera proporcional a la velocitat elevada a un exponent. Per fer aquesta afirmació em baso en altres casos similars de fluids com l'aire on succeeix així. Per tant, un altre objectiu serà **determinar quin és aquest exponent**.

Una altra hipòtesi inicial és que, si la forma posterior d'un bot és recta, es crearà un règim turbulent a la popa que pot ajudar a impulsar el bot i conseqüentment a contrarestar la resistència.

1.2 Motivació

La principal motivació que m'ha portat a escollir un tema relacionat amb el món del rem és el fet que jo practico aquest esport d'ençà que tenia deu anys. Al llarg de tot el temps que he estat remant he après molt sobre aquesta disciplina i en tinc un ampli ventall d'experiències. Per tant no parteixo de zero, ja que estic familiaritzat amb el tema.

M'agradava la idea de tenir l'oportunitat d'aprofundir en el meu esport, però el que per mi era més interessant era treballar aquest tema des d'un punt de vista que no fos el que estic acostumat com a esportista. Com que m'agrada la física i l'experimentació vaig decidir que investigaria quelcom relacionat amb la hidrodinàmica i realment em va cridar l'atenció poder calcular la força que he de vèncer quan remo.

1.3 Metodologia

Per confeccionar el marc teòric del treball, m'han calgut mesos de recerca. Els apartats que apareixen en aquesta part han estat escollits d'acord amb els conceptes necessaris que caldria entendre a l'hora de desenvolupar la pràctica.

Per una banda s'ha realitzat recerca bibliogràfica consultant llibres que tracten la mecànica de fluids o temes relacionats amb el rem. També m'he llegit tesis i altres estudis vinculats amb la temàtica del meu treball. A més, he trobat conceptes que m'han sigut de gran utilitat a diferents pàgines web.

D'altra banda, molta informació ha estat obtinguda de primera mà, tant duent a terme entrevistes, com demanant consell a professors i/o experts. També he utilitzat coneixements que ja tenia gràcies a la meva experiència com a remer.

Sobretot ha estat de gran ajuda la implicació d'en Joan Collell¹, que m'ha proporcionat un munt de llibres, informació i una rèplica exacta d'un esquif a escala 1:10 que ell mateix va construir.

Vaig anar a l'hangar² de rem del Club Natació Banyoles a prendre mides dels bots i a fer fotografies de les seves parts.

Després de realitzar el marc teòric, vaig aprofitar els coneixements adquirits per dissenyar una sèrie de maquetes de bots de rem. Per escollir l'escala de les maquetes vaig realitzar unes proves inicials amb dos perfils diferents. Es tractava de la maqueta d'en Joan Collell i un altre perfil més ovalat. Els resultats d'aquests assajos em van fer veure que era preferible construir les maquetes a escala 1:5.

Durant els mesos de juny i de juliol vaig baixar periòdicament a l'institut per treballar al taller de fusteria a construir les maquetes. Per realitzar aquesta tasca comptava amb l'ajuda del professor i fuster Juli Lozano, qui m'aconsellava i m'assistia a l'hora d'utilitzar la maquinària més perillosa.

D'altra banda, vaig estudiar en què consisteix un canal d'experiències hidrodinàmiques. Per simular-lo, ha estat imprescindible l'ús del sensor de força MultiLab.

El canal d'experiències hidrodinàmiques que he utilitzat està constituït per una piscina de 12 metres de llarg, un motor amb un variador de freqüència que fa de remolcador, una càmera de vídeo que ens serveix per trobar la velocitat d'avanç del bot i el sensor de força que obté la resistència que aquest ha oposat. Tal mètode seria semblant al que utilitzen als canals d'experiències hidrodinàmiques reals.

¹ **Joan Collell i Ferrusola** (Fontcoberta, 1953): ex-remer, arranador i constructor de bots. Va rebre la medalla de bronze de la Reial Orde del Mèrit Esportiu el 2016. Adjunto la seva biografia a l'annex I.

² **Hangar**: instal·lació de l'àrea de competició destinada a guardar-hi els bots.

Utilitzant el programa MultiLab, he deduït la força de resistència per a cada bot i l'he relacionat amb la velocitat corresponent, trobada a partir dels vídeos mitjançant un altre programa anomenat Tracker.

Per acabar, he deduït l'exponent de la velocitat (n) per a tots els bots i, després, la constant de proporcionalitat (K) de cada perfil, seguint la fórmula: $F=K \cdot v^n$. D'aquesta manera he pogut discutir quina resistència presenten les diferents maquetes i comparar-les.

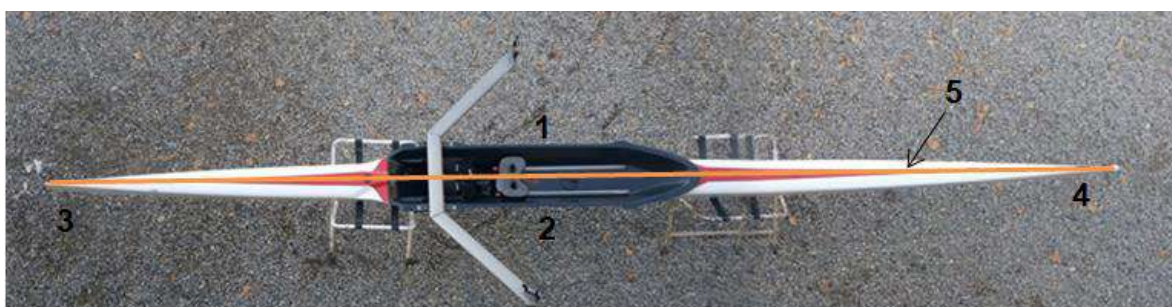
2. Bots de rem

El rem és una disciplina esportiva que consisteix en la propulsió d'una embarcació sobre l'aigua mitjançant la força muscular d'un o diversos remers, cadascun d'ells usant un o dos remes com palanques simples de segon grau i assegurats d'esquena a la direcció de l'avanç, per això poden necessitar un timoner que els guiï.

Àmpliament parlant, es distingeixen dues grans famílies de bots de rem, que es classifiquen segons la mobilitat del banc on seu el remer. Per una banda, el rem de banc mòbil o rem olímpic és la modalitat en la qual el remer (amb els peus fixats) està assegut sobre un carro que es desplaça a proa i a popa per tal de poder aprofitar la força de les cames. Mentre que, per l'altra banda, al rem de banc fix el remer no té els peus fixats i va assegut en un banc que no es mou, amb el qual gairebé no pot aprofitar la força de les cames. Aquestes dues modalitats són reglamentades per la *Federación Española de Remo*³, però la segona no és olímpica. A partir d'aquí podria tractar infinitats de temes, però el meu treball se centrarà exclusivament en el rem de banc mòbil, ja que es tracta de la modalitat més popular gràcies al fet que és un esport olímpic des de l'any 1896. El rem de banc mòbil es practica amb els bots que veurem més endavant.

2.1 Parts del bot i del rem

Parts d'un bot de rem de banc mòbil:



Il·lustració 1: parts abstractes d'un bot de rem.

1. BABORD: costat esquerre d'una embarcació, mirant de popa a proa.
2. ESTRIBORD: costat dret d'una embarcació, mirant de popa a proa.
3. POPA: part posterior del bot.
4. PROA: part davantera del bot, on se situa la bola.
5. ESLORA: llargària d'una embarcació.

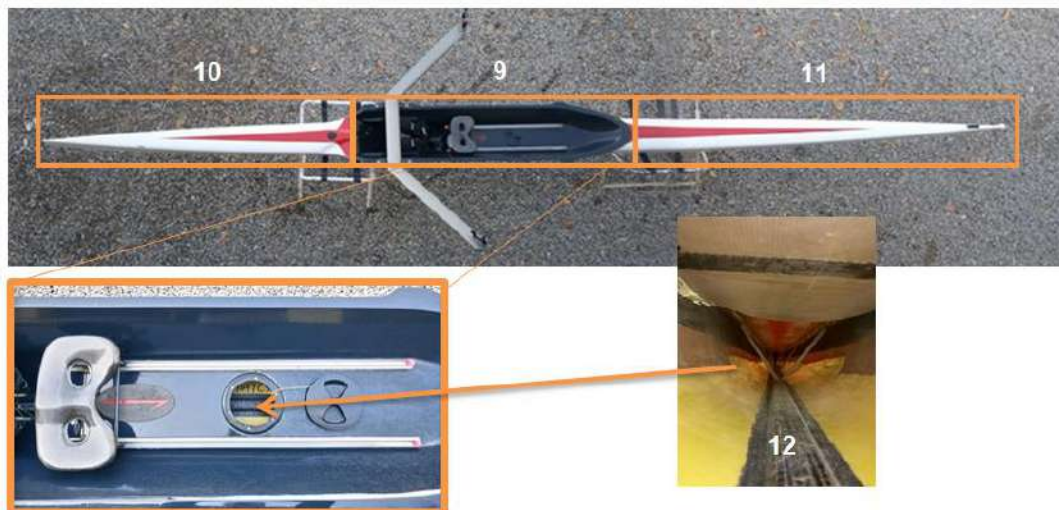
³ **Federación Española de Remo** (FER): màxim organisme nacional de rem a Espanya. La seva seu és a Madrid i, fins fa poc, el seu president era el concitadà banyolí Fernando Climent Huerta.

6. BUC: cos d'una embarcació, construït de fusta o de fibra sintètica, les característiques del qual determinen la flotabilitat i la velocitat del bot.
7. CASC: part exterior del bot que manté contacte amb l'aigua.
8. FOLRE: revestiment de fusta o de fibra que cobreix exteriorment l'esquelet del buc.



Il·lustració 2: Buc, cas i folre d'un bot de rem.

9. BANYERA: cavitat descoberta de la part superior d'un bot, on se situen el carro i les pedalines dels remers.
10. COBERTA DE POPA: part del bot que cobreix la banyera per la popa i clou el buc.
11. COBERTA DE PROA: part del bot que cobreix la banyera per la proa i clou el buc.
12. CAMBRA D'AIRE: conjunt de parts estanques situades sota les cobertes de proa i de popa dels bots.



Il·lustració 3: Cobertes i cambra d'aire d'un bot de rem.

13. TAP: peça situada a la coberta del bot que en manté estanques les cambres d'aire interior i que permet buidar-ne l'aigua que hi hagi pogut entrar.



Il·lustració 4: Tap de la cambra d'aire de proa.

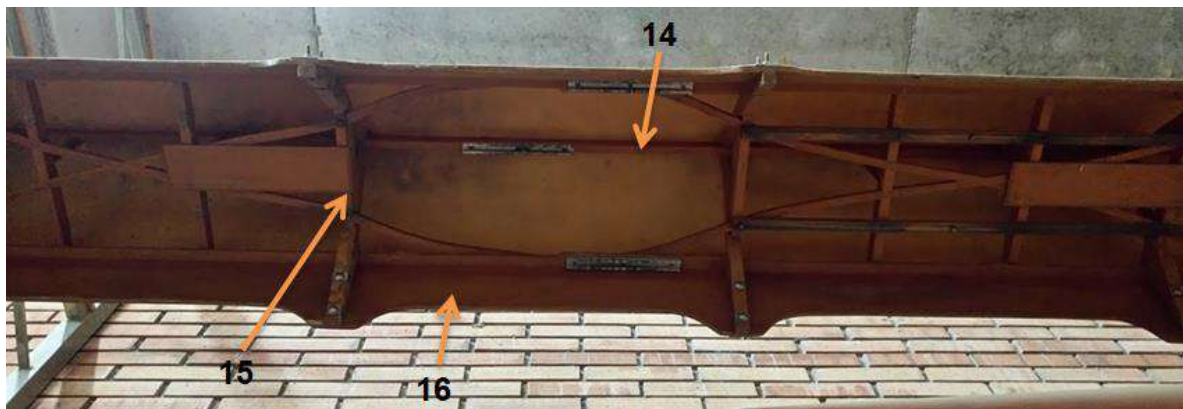
14. QUILLA: peça longitudinal disposada de proa a popa a la part inferior dels bucs de fusta.

15. QUADERNA O COSTELLA: cadascun dels parells de peces corbades i perpendiculars a la quilla i a la sobrequilla que constitueixen el buc i en determinen la forma.

16. BANDA: costat d'una embarcació on es collen els portants.



Il·lustració 5: Quaderna d'un bot modern.



Il·lustració 6: Bot antic amb quilla, costelles i banda.

17. PARAMAR: prolongació vertical de les bandes cap a la coberta de proa, que evita l'entrada d'aigua dins el bot.

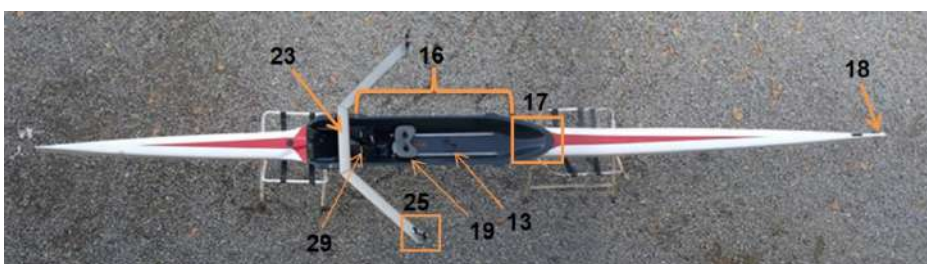


Il·lustració 7: Paramar.

18. BOLA: cos esfèric de color blanc d'almenys 4 cm de diàmetre, que se situa a la proa dels bots per protegir-los i senyalitzar-los.



Il·lustració 8: bola.



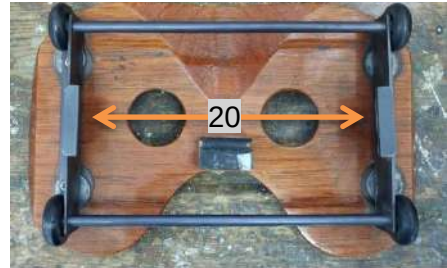
Il·lustració 9: parts principals d'un bot de rem.

19. CARRO: seient mòbil amb rodes a la part inferior que llisca sobre unes guies en l'eix longitudinal de l'embarcació, en el qual s'asseu el remer per propulsar el bot.

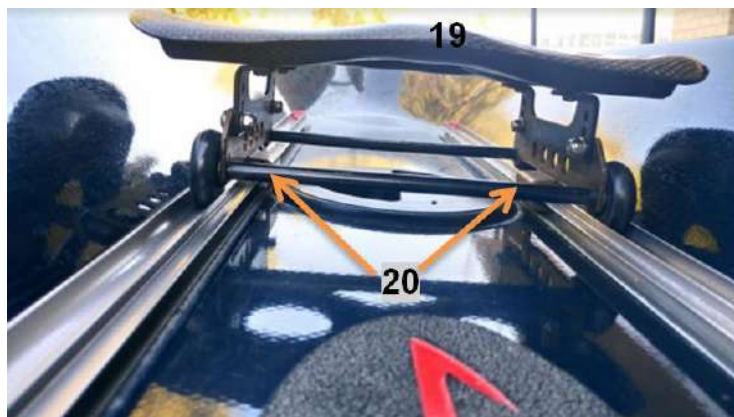


Il·lustració 10: Carro.

20. PESTANYA: cadascuna de les dues peces del carro que, a manera de pinça, el mantenen fixat a les guies per evitar que caigui si el bot bolca o en treure el bot de l'aigua.



Il·lustració 11: Pestanyes.



Il·lustració 12: Carro i pestanyes.

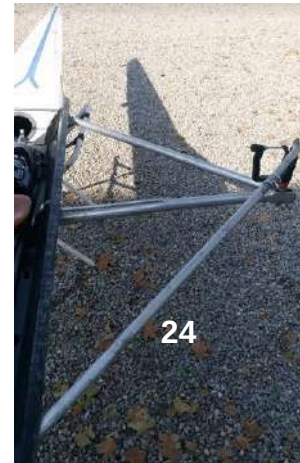
21. GUIA: cadascun dels dos carrils per on llisca el carro en un bot de banc mòbil.
22. TOPALL: peça situada als extrems anterior i posterior de les guies del carro, que evita que aquest se surti del raíl.



Il·lustració 13: Guies i topalls.

23. PORTANT: conjunt de barres lleugeres d'acer, d'alumini, etc. que, fixades a la banda exterior del bot, sostenen l'escalemera.

24. BARRA QUINTA: barra exterior d'un portant, que va de la part superior de l'eix de l'escalemera cap a proa fins a la banda del bot, que evita que es mogui la inclinació de l'escalemera.



Il·lustració 14: Portant amb barra quinta.

25. ESCALEMERA: peça de plàstic situada a l'extrem exterior del portant, a través de la qual es transmet la força del rem al bot.

26. PASSADOR: peça de l'escalemera que tanca l'obertura per la qual es passa el rem.

27. EIX DE L'ESCALEMERA: eix collat al portant, en el qual gira l'escalemera.

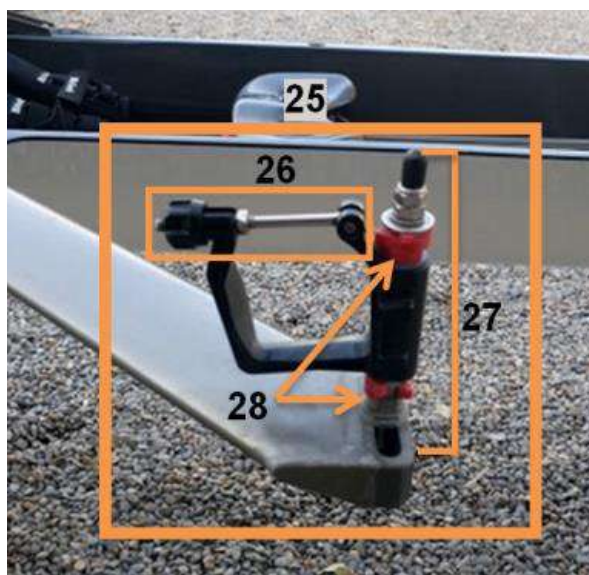


Il·lustració 15: Passador.

28. VOLANDERA: peça en forma de corona circular que es posa a l'escalemera per regular-ne l'alçada.



Il·lustració 16: Volanderes.



Il·lustració 17: L'escalemera.

29. PEDALINA: conjunt constituït per un parell de sabatilles fixades a una fusta d'inclinació regulable i amb desplaçament horitzontal, on el remer recolza els peus per donar-se impuls quan rema.
30. SABATILLA: calçat flexible i d'obertura fàcil que hi ha a la pedalina del bot, ajustada amb cargols per la sola a la fusta de la pedalina i amb un dispositiu que l'agafa pel taló però permetent-ne un cert moviment.
31. FUSTA DE LA PEDALINA: dispositiu de la pedalina constituït per una planxa regulable sobre la qual es col·loquen les sabatilles.



Il·lustració 18: Pedalines.

32. LLAÇ DE SEGURETAT: llaç amb què es lliga el taló de la sabatilla de la pedalina, que deixa al remer un cert moviment del taló i li permet alliberar-se de la sabatilla en cas de bolcada.



Il·lustració 19: Llaç de seguretat.

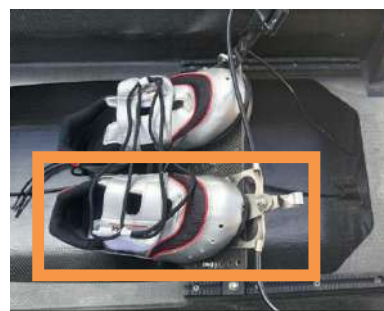
33. ORSA: planxa fixa de metall o de plàstic que sobresurt per sota de la quilla i que serveix per a contrarestar la deriva.



Il·lustració 20: Orsa.

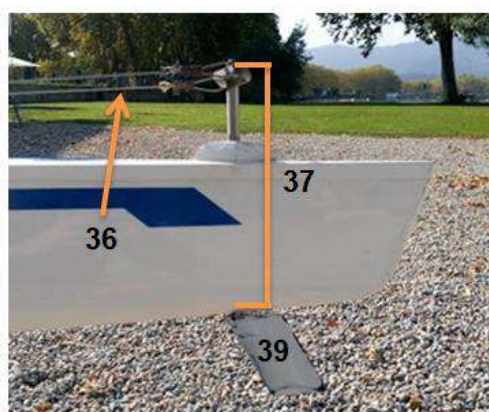
34. TIMÓ: peça situada a la popa i constituïda per una creueta, un cable, un eix vertical i una pala, que es pot fer girar a babord o estribord de manera que, a causa de la resistència que la pala ofereix a l'aigua, permet variar la direcció del bot.

35. TIMÓ DE PEU: timó que, en els bots de dos sense, quatre sense i en els quatre *scull*, un dels remers, generalment el marca⁴, controla amb un peu des de la pedalina.



Il·lustració 21: Timó de peu.

36. CABLE DEL TIMÓ: cable fixat pels extrems a la creueta del timó, que permet al timoner o a un remer de moure-la a distància per guiar el bot.
37. EIX DEL TIMÓ: part del timó que enllaça la creueta amb la pala i, a través d'un moviment de rotació, permet que la pala giri de babord a estribord.
38. CREUETA: peça plana articulada a la part superior de l'eix del timó, que accionada a través d'uns cables permet guiar el bot.
39. PALA DEL TIMÓ: part inferior del timó que actua oferint resistència a l'aigua per canviar la direcció del timó.



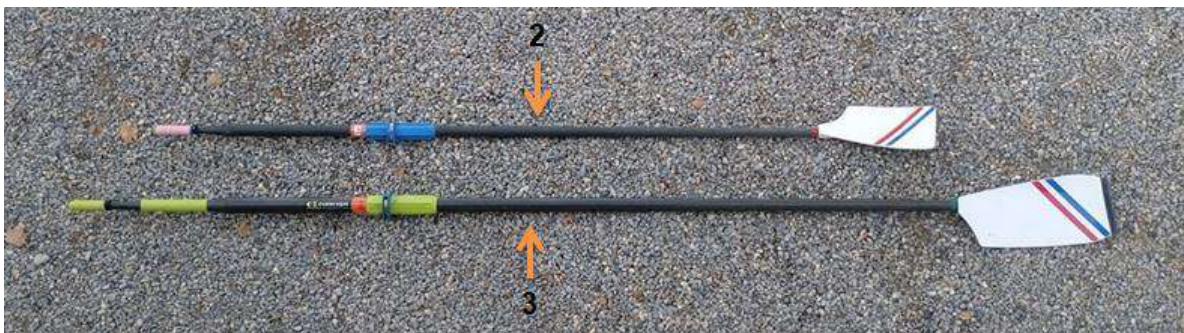
Il·lustració 22: El timó.



⁴ Marca: remer situat més a popa, visible per la resta de remers, que s'encarrega de marcar el ritme.

Parts d'un rem:

1. REM: instrument de fusta o de fibra sintètica constituït per un galló, una canya i una pala, que serveix per a propulsar el bot.
2. REM DE *COUPLE*⁵: rem de 2,96 a 3,02 m de longitud aproximadament i uns 2 kg de pes, utilitzat en la modalitat de rem *couple*.
3. REM DE PUNTA: rem de 3,80 a 3,86 m de longitud aproximadament i uns 4 kg de pes, utilitzat en la modalitat de rem en punta.

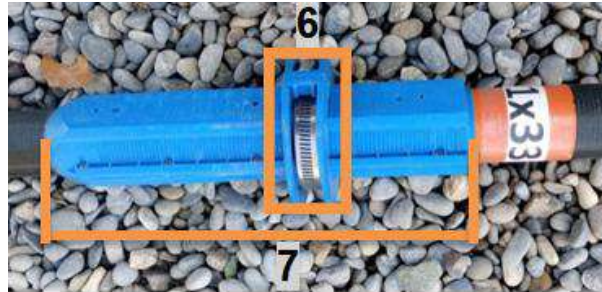


Il·lustració 23: Tipus de rem.

4. PALA: extrem ample del rem que s'introdueix dins de l'aigua per a remar.
5. CANYA: part més llarga del rem, de fibra sintètica o de fusta, que serveix de nexa d'unió entre el galló i la pala.
6. COLL: part més estreta de la canya, on comença la pala.
7. ESTROPERA: peça de plàstic col·locada a la canya del rem i en contacte amb l'escalemera, per on la força del rem es transmet al bot.

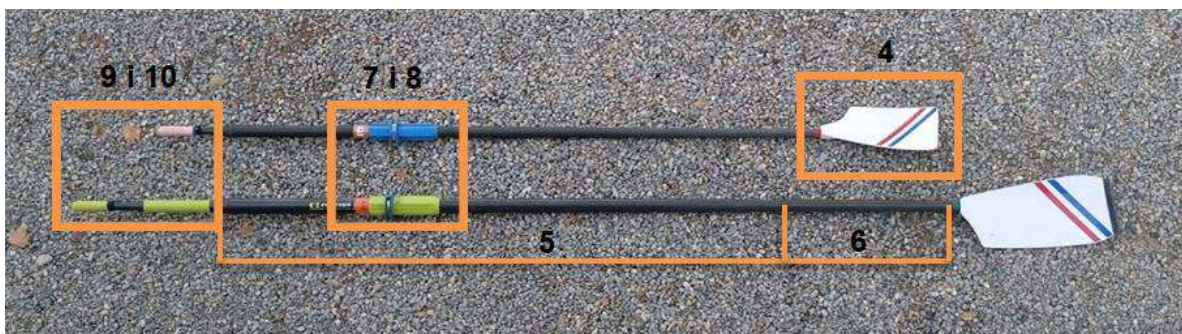
⁵ **Couple**: de l'anglès "parell" o "parella".

8. TOPALL: peça del rem en forma d'anella que envolta l'estropera i serveix per a evitar el desplaçament del rem cap enfora, subjectar-lo a l'escalemera i donar la pressió adequada.



Il·lustració 24: Estropera i topall.

9. EMPUNYADURA O GALLÓ: part estreta del rem, de secció rodona, sense envernissar i normalment protegida en els remos de couple amb un puny, per on el remer subjecta per manejar-lo.
10. PUNY DEL GALLÓ: peça de cautxú que cobreix el galló del rem de couple per protegir les mans del remer.



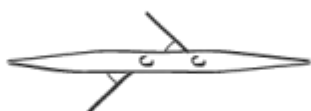
Il·lustració 25: Parts del rem.

2.2 Modalitats de bots de rem de banc mòbil

Els bots de rem es divideixen en dos grans grups o modalitats:

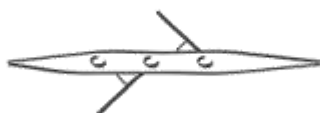
2.2.1 Rem en punta

Anomenem rem en punta al conjunt de modalitats en què cada remer utilitza un sol rem de punta per propulsar l'embarcació, sigui situat a la banda d'estribord o de babord. En aquesta disciplina hi trobem les següents modalitats:



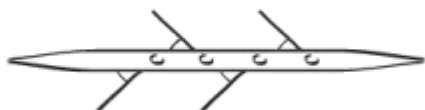
2- (dos sense timoner)

Modalitat de rem que es practica amb un bot de 10 m d'eslora aproximadament i 27 kg de pes mínim, propulsat per dos remers amb un rem cadascun i sense timoner.



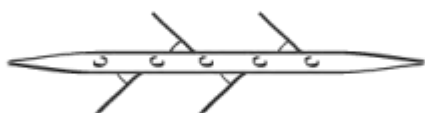
2+ (dos amb timoner)

Modalitat de rem masculina que es practica amb un bot d'11 m d'eslora aproximadament i 32 kg de pes mínim, propulsat per dos remers amb un rem cadascun i guiat per un timoner.



4- (quatre sense timoner)

Modalitat de rem que es practica amb un bot de 13,5 m d'eslora aproximadament i 50 kg de pes mínim, propulsat per quatre remers amb un rem cadascun i sense timoner.



4+ (quatre amb timoner)

Modalitat de rem masculina que es practica amb un bot de 14,5 m d'eslora aproximadament i 51 kg de pes mínim, propulsat per quatre remers amb un rem cadascun i guiat per un timoner.



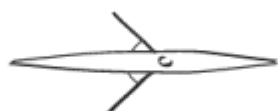
8+ (vuit amb timoner)

Modalitat de rem que es practica amb un bot de 17,5 m d'eslora aproximadament i 93 kg de pes mínim, propulsat per vuit remers amb un rem cadascun i guiat per un timoner.

De les anteriors modalitats només el 2-, el 4- i el 8+ són modalitats olímpiques.

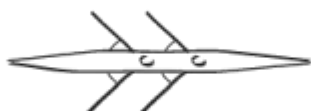
2.2.2 Rem en *couple* o *scull*

Anomenem rem en *couple* o *scull* al conjunt de modalitats de rem en què cada remer aplica la força amb dos remes de *couple*, un amb cada braç. En aquesta disciplina hi trobem les següents modalitats:



1x (skiff o esquif)

Modalitat de rem que es practica amb un esquif, bot de 8,3 m d'eslora aproximadament i 14 kg de pes mínim, propulsat per un remer amb dos remes i sense timoner.



2x (doble scull)

Modalitat de rem que es practica amb un bot de 10 m d'eslora aproximadament i 26 kg de pes mínim, propulsat per dos remers amb dos remes cadascun i sense timoner.



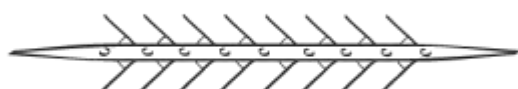
4x (quàdruple scull)

Modalitat de rem que es practica amb un bot de 13,5 m d'eslora i 52 kg de pes mínim, propulsat per quatre remers amb dos remes cadascun i sense timoner.



4x+ (quàdruple scull amb timoner – aquest tipus de bot s'usa rarament)

Com l'anterior però amb un timoner que dirigeix.



8x+ (òctuple scull amb timoner – aquest tipus de bot s'usa rarament)

Vuit remers, setze remes i un timoner assegut a la popa.

2.3 Evolució en el procés de construcció de bots de rem

Un dels conceptes que trobo necessari entendre per a la realització d'aquest projecte és com han evolucionat els mètodes de construcció de bots de rem a mesura que han passat els anys fins a comptar amb les tecnologies que tenim avui dia. Per això he fet una entrevista a en Joan Collell, qui es dedica a reparar i fins i tot construir bots de rem des de fa quaranta-un anys i compta amb una dilatada experiència en el tema.

Cal destacar que aquests processos són molt complexos i de difícil comprensió per als que no estan familiaritzats amb el tema, procuraré explicar-ho de manera convincent i aclarir els tecnicismes que utilitzi. Sóc conscient que si aprofundís més en aquesta matèria, podria dedicar-hi tot un treball de recerca, ja que el repertori d'informació és inesgotable, és per això que tan sols resumiré breument els diferents procediments que s'han seguit al llarg dels anys des que existeix el rem com a esport de manera que quedi ordenada i clara la idea.

Seguint les indicacions d'en Joan, explicaré els tres mètodes principals que s'han emprat per a la construcció de bots al llarg dels anys i els situaré en la història.

Els primers artesans que construïen bots d'ençà que es comença a practicar el rem com a esport fins als anys cinquanta iniciaven el bot per la carcassa. Col·locaven els llistons i la quilla com es veu a la imatge. Els llistons són la base de la banda, i la quilla, com he mencionat a l'apartat 2.1, és l'ànima que va de popa a proa.



Il·lustració 26: Quilla i llistons.

Es collava l'estructura sobre una taula i hi encaixaven unes plantilles (com la de la imatge) cada quaranta o cinquanta centímetres, aquestes definien la forma que havia de tenir el buc.



Il·lustració 27: Plantilla.

Anaven numerades i cadascuna tenia el seu lloc.

Després anaven ajustant unes fulloles de tres o quatre mil·límetres de gruix sobre l'estructura per fer el casc, una de les peces més importants en un bot de rem. Es tractava d'unes fulloles enteres, i se'ls donava la forma de les plantilles. Per evitar que es trenquessin s'estovaven amb aigua



Il·lustració 28: Muntatge de les fulloles

calenta. Utilitzaven unes esponges o parracs que continguessin el líquid i anaven mullant la fullola. Aquesta s'estovava de mica en mica i això feia més fàcil la torsió per donar-li la forma.

Joan Collell comenta: *“En els bots de fusta podem arribar a distingir les diferents fulloles que han estat emprades per fer el bot en qüestió. Per exemple, un esquif està constituït per dos peces de fullola, un doble scull per dos o tres peces, un quatre scull per tres o quatre, ... De totes maneres, calia ser un autèntic artista per aconseguir fer encaixar les fulloles entre elles sabent que només tenien un gruix de tres, màxim quatre mil·límetres.”*

Un cop aconseguit això, procedien a polir el casc amb molt rigor fins a aconseguir una superfície ben fina. Llavors, per donar-li la capacitat de tolerar els cops i la pressió de l'aigua, li aplicaven moltes capes de vernís, aconseguint així un acabat més resistent i impecable.



II·lustració 29: Polir el casc.

A més, als bots que eren més bons antigament, se'ls

aplicava un teixit molt lleuger de seda a la part exterior i interior del casc que li concedia més cos i fortalesa al bot. Aquesta tela era envernissada i quedava imperceptible a simple vista de tal manera que diries que no hi és. Cal tenir en compte



II·lustració 31:
Teixit de seda.

que la seda és una fibra de teixit natural provinent del cuc de seda, cosa que la converteix en un material molt car.



II·lustració 30: Envernissar.

A continuació, es retirava el bot del banc de treball on es trobava i es col·locava invertit sobre una altra taula per treballar-ne l'interior. En aquesta fase els artesans muntaven tots els puntals i els llistonets, aquests són els que afermen el bot i n'eviten la deformació. Llavors fixaven les costelles dins el casc ja existent (cada una és diferent, ja que està feta pel seu lloc) i l'últim que es posava era la banda. Les costelles són el suport dels portants. Per acabar, es muntaven els portants, el carro, les guies i les pedalines, entre altres elements.



II·lustració 32: Puntals i llistonets.

A partir dels anys 60 hi ha una autèntica revolució davant la creació de les coles com les coneixem ara, les quals són resistents a l'aigua.

Durant aquesta etapa apareix un sistema innovador, en comptes de fabricar el casc amb una sola fullola, es feia amb la unió de tres fulloles molt primes, tant com un paper. Per entendre aquest mètode hem de tenir present que les fustes tenen aigües i que aquestes fan que una fusta pel llarg sigui més forta que pel través.

Per a construir un bot seguint aquest sistema, es necessitava un motlle massís amb la forma del casc d'un bot de rem ja fet. En aquest motlle s'hi encaixaven la quilla,

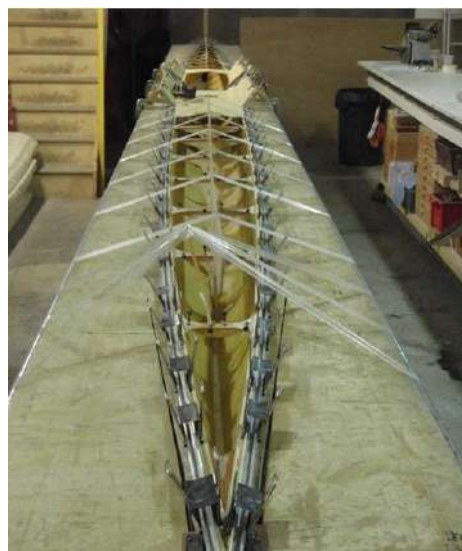
els llistons i els mòduls. Llavors, s'hi acoblava una fullola pel llarg, una pel través i una altra pel llarg, d'una en una i ben encolades. Quan s'assecava la cola es quedaven amb la forma.



Il·lustració 33: Tres fulloles.

També a partir dels anys seixanta, se substitueix la seda per un teixit de fibra de vidre⁶ molt fi que és com un tel de ceba. Entre els dos teixits no es veu gaire la diferència, però cal destacar que la fibra de vidre és molt més econòmica, gràcies al fet que és un derivat del petroli. Finalment, perquè el bot tingués un bon acabat, el cobrien amb fibra de vidre i ho envernissaven. El resultat final quedava molt resistent, com un vidre.

Actualment, els mètodes emprats per a la construcció de bots de rem s'han modernitzat molt més, fins al punt de prescindir de la fusta. El primer que es necessita és fabricar un motlle, per fer-lo s'ha de disposar d'una unitat feta. Aquests tipus d'embarcacions no es fan mai enteres: Per una banda s'elabora el motlle de tot el casc, es tracta d'una peça amb unes parets molt gruixudes. Per l'altra banda, també es realitzarà el motlle de la part de les cobertes, aquest es pot fer sencer o fer-ne un de diferent per a la coberta de popa i de proa. És molt important que dins els motlles s'hi apliqui una fina capa de cera especial perquè el bot no s'hi quedi enganxat. Llavors, se li donen totes les capes necessàries de tela depenent del gruix que se li vulgui donar al bot, se sol utilitzar fibra de vidre, fibra de carboni o altres materials que veurem a continuació. Per unir i enganxar les diferents capes s'utilitza resina epoxi⁷. Un cop tenen la part del casc i les dues cobertes construïdes, senzillament



Il·lustració 34: Motlle del casc.



Il·lustració 35: Encerat.

⁶ **Fibra de vidre:** material format per filaments extremadament fins i molt lleugers de vidre.

⁷ **Resina Epoxi o poliepòxid:** polímer orgànic termoestable que s'endureix quan es barreja amb un agent catalitzador.

les han d'encaixar i ja tindrien el bot pràcticament fet. Els bots sempre són buits per dins. Aleshores, es procedeix a pintar-lo. Inclòs es pot posar la pintura al motlle de manera que quan facis el bot amb resina la pintura ja s'hi queda agafada.

Altres materials utilitzats, a part de la fibra de vidre, són la fibra de carboni (també emprada en la confecció de bicicletes) o el *Kevlar*⁸, usat per grans fabricants com Empacher i Filippi⁹, aquest no és tan trencadís com la fibra de carboni que és molt forta, però si hi ha algun accident o un cop molt fort es trenca, en canvi el *Kevlar* no es trenca, només s'arruga.



Il·lustració 36: Teixits de Kevlar.



Il·lustració 37: Fibra de carboni.

Alguns dels *empachers* de competició tenen panells d'abella a l'interior (un teixit sintètic resistent a l'aigua) que li atorga força i rigidesa, i separa els teixits de *Kevlar* que cobreixen l'interior i l'exterior del casc. La carcassa està pintada, aconseguint un acabat molt fi.



Il·lustració 38: Panell d'abella.

Pel que fa als remos, les canyes també són fetes de fibra de carboni i utilitzant un motlle de ferro. Disposen d'un teixit de fibra de carboni que ha estat fet expressament, és com un mitjó de la mida del motlle i hi introdueixen la vara de ferro encerada a dins. Tot seguit, ho traslladen a una màquina especial que comença a voltar, s'hi va abocant resina a sobre i es va quedant impregnat. A continuació ho envolten amb una cinta que evita que caigui la resina, és aquest el motiu pel qual la textura dels remos és rugosa. Llavors, quan encara estan molsos, els pengen amb un pes a baix perquè el ferro quedi ben recte, ho fan a una espècie de forn, amb una xemeneia perquè surtin els fums dels reactius i a sota se'ls escalfa perquè s'asseguin més de pressa. Finalment, quan està sec, es treu el motlle amb l'ajuda d'una anella.

⁸ **Kevlar**: fibres de llargues cadenes de *poliparafenilè tereftalamida*, molècula que suporta altes temperatures amb què es poden construir equips lleugers i resistents.

⁹ **Empacher i Filippi**: fabricants d'embarcacions, especialitzats en l'esport de rem.

Abans, els remes es construïen amb fustes. Les muntaven, les encolaven i els hi donaven forma a mà.

Joan Collell ens diu: *“Abans fer bots era quelcom artesanal. Ara si et vols dedicar a fer bots, i no vols perdre-hi diners, ho has de fer industrialment, tenir una fàbrica dedicada només a aquest fi. Si tu fas un bot artesanalment, resulta que hi haurà un altre que farà un bot tant o més bo que el teu i com que aquell ho fa en sèrie, li sortirà més econòmic. Igual que passa amb els cotxes, els que es fan en sèrie sortiran més econòmics que si un taller petit en fa un o dos a l'any. Abans si que es podia fer, ja que tots es feien artesanalment, no hi havia aquestes tecnologies de les fibres, ho feien amb fusta i tu podies fer el mateix que qualsevol altre.*

Ara, els motlles que són molt cars, ja que són gruixuts i necessiten un descompressor d'aire per desemmotllar els bots. Si els volen amortitzar, han de fer molts de bots cada any. Inclòs, els fabricants diuen que no és una indústria rendible, els bots són molt cars i encara ho haurien de ser més, el problema és que llavors no els compraria ningú. Les inversions que es fan per construir bots, si es fessin amb un altre tipus de producte, tindrien més guanys. Els que treballen en aquesta indústria ho fan per amor a l'esport i no prioritzen el capital, per això hi ha tan poca gent que s'hi dedica.”

3. Conceptes mecànica de fluids

La mecànica de fluids és una branca de la mecànica dels medis continus, que a la vegada és una part de la física. La mecànica de medis continus s'ocupa de l'anàlisi del comportament cinemàtic i dinàmic dels materials que es comporten com un continu, tant sòlids com fluids. Un medi continu és aquell material que pot ser subdividit continuadament en elements infinitesimals que conserven les mateixes propietats del material.

La mecànica de fluids estudia les lleis i els comportaments dels fluids així com les seves interaccions amb l'entorn que el delimita. Si el fluid es troba en repòs o equilibri estàtic llavors s'anomena hidrostàtica, i si el fluid es troba en moviment, hidrodinàmica.

3.1 Definició i propietats dels fluids

Els fluids són substàncies les molècules dels quals intercanvien les seves posicions relatives amb molta facilitat, és a dir, les seves forces internes de cohesió molecular són febles.

Els fluids més importants són els líquids i els gasos. Els líquids són pràcticament incompressibles, és a dir, el seu volum no varia significativament sota l'acció de forces de compressió. Per tant, els líquids ocupen un volum definit i tenen superfícies lliures. Els gasos, en canvi, són compressibles i amb forces de compressió petites experimenten reduccions de volum significatives. Per tant, una massa de gas s'expansiona dins d'un recipient fins a ocupar totes les parts d'aquest recipient.

3.2 Hidrodinàmica

La hidrodinàmica, com s'ha esmentat anteriorment, estudia les lleis i els comportaments d'un fluid en moviment.

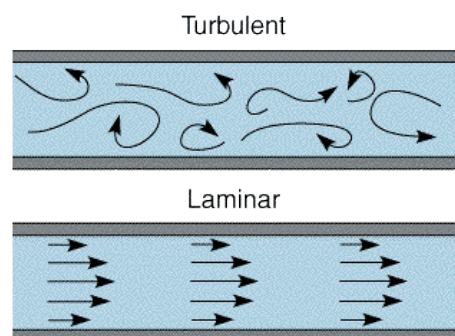
Contràriament al que succeeix amb els sòlids, l'estudi d'un fluid en moviment és complex i no sempre pot ser estudiat de manera exacta, és a dir, de forma teòrica emprant conceptes i fórmules purament matemàtiques, ja que intervenen moltes variables en el moviment de les seves partícules.

3.2.1 Règims de corrent i capa límit

El moviment i/o trajectòria que segueix l'aigua un cop ha impactat amb la superfície del perfil pot ser ordenat i més o menys uniforme, o bé pot ser desordenat i generar turbulències. Això provoca que els règims de corrent es divideixin en règims laminars i règims turbulents.

En els règims de **corrent laminar** les diferents partícules del fluid es mouen seguint trajectòries paral·leles i formen capes o làmines al llarg de tot el perfil. En canvi, en els règims de **corrent turbulent** en un punt del perfil el corrent deixa de ser laminar, és a dir, les partícules del fluid

deixen de seguir trajectòries paral·leles, i passen



Il·lustració 39: Corrent turbulent i laminar.

a seguir trajectòries més complexes.

Quan un cos, per exemple un bot, es mou dins un fluid, es produeix una pertorbació. La capa de partícules que estan en contacte amb la superfície del bot es manté adherida a la mateixa per l'efecte de viscositat. Quan les partícules d'aigua estan prou allunyades de la superfície no els afecta. La zona que existeix entre la paret o superfície del perfil i aquest punt on les partícules estan prou allunyades de la superfície és la **capa límit**. Els règims de corrent s'han de tenir presents quan s'estudia la capa límit.

La capa límit és tot el gruix de fluid que es veu pertorbat pel pas del perfil. A igual velocitat, un mateix perfil, en el medi aeri pertorba una capa límit més estreta que en el medi aquàtic, on la resistència de fricció és major i s'arrossega un major gruix de capa límit. A més, en el medi aquàtic pot ser que tinguem una paret a prop, fet que augmentarà encara més la resistència. Per aquest motiu, tant en el rem com en altres esports, els carrers més ràpids són els centrals, que no tenen parets a prop. Si el camp de regates fos molt poc profund, augmentaria també la resistència de fricció.

En definitiva, si la capa límit és la zona on les partícules de l'aigua es veuen afectades per la presència del perfil, aquesta podrà ser laminar o turbulenta, segons el règim de corrent que segueixin les partícules. Part d'aquesta variació es deu a la forma de l'objecte entorn el qual es forma la capa límit.

3.2.2 Nombre de Reynolds

Per tal de determinar si el flux d'un fluid és laminar o turbulent s'utilitza el nombre de Reynolds¹⁰, que relaciona les diferents variables que en el moviment d'un fluid poden provocar la turbulència. La variable més important és la viscositat, ja que la seva acció esmorteix qualsevol tendència a la turbulència.

El nombre de Reynolds (Re) és un nombre adimensional donat pel quocient entre les forces d'inèrcia que tendeixen a ocasionar turbulències i les forces degudes a la viscositat que les esmorteixen.

¹⁰ **Osborne Reynolds** (1842-1912): enginyer i físic irlandès que va realitzar importants contribucions en els camps de la hidrodinàmica i la dinàmica de fluids, sent la més notable la introducció del nombre de Reynolds l'any 1883.

El flux laminar ocorre a nombres de Reynolds baixos, quan les forces viscoses són dominants, i es caracteritza per un fluid de moviment suau i constant. El flux turbulent, per altra banda, ocorre a nombres de Reynolds elevats i és dominat per les forces inercials, que tendeixen a produir remolins aleatoris, vòrtexs i d'altres fluctuacions del flux. Per valors de Reynolds inferiors a 2000 el règim es considera laminar.

El nombre de Reynolds es defineix matemàticament segons la fórmula següent:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$

o bé

$$Re = \frac{v_s D}{\nu} .$$

on

ρ : densitat del fluid

v_s : velocitat característica del fluid

D : Diàmetre de la canonada a través de la qual circula el fluid

μ : viscositat del fluid

ν : viscositat cinemàtica del fluid

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} .$$

La fórmula està definida per fluids líquids que passen per canonades. Però, també es pot aplicar en altres casos. Per emprar aquesta fórmula, per exemple, quan es vol saber el nombre de Reynolds sota el qual estarà un perfil amb una velocitat determinada, s'ha de substituir el terme de diàmetre de la canonada per la superfície del perfil.

4. Física del rem

4.1. La resistència a l'avanç

Tot cos que avança per un fluid està sotmès a les forces de resistència (drag). Per definició, el frec o força de resistència és el conjunt de forces que dificulten l'avanç dels cossos en els fluids. La força de resistència és una força que té lloc en la direcció i sentit del flux relatiu. S'aplica a l'anomenat centre de resistència (lloc fictici en què es pot concentrar el conjunt de les diferents forces de resistència originades en diferents zones del perfil).

La resistència a l'avanç d'un bot a una velocitat determinada és la força necessària per remolcar-lo a aquesta velocitat en aigües tranquil·les (suposant que no hi ha interferència del remolcador). S'ha comprovat que la força de resistència està relacionada amb la velocitat d'avanç elevada al quadrat.

La resistència determina la potència que necessita el bot per ser propulsat i, per tant, el consum d'energia de l'esportista. La minimització d'aquesta i, en conseqüència, la potència propulsora és un aspecte d'importància crucial en el disseny del bot.

Un dels problemes de major importància que ha d'afrontar un enginyer nàutic és assegurar que, dins dels límits de requeriments de disseny, la forma del casc sigui el més eficient possible en el sentit hidrodinàmic. És a dir, que l'embarcació dissenyada es mogui a la menor resistència a l'avanç possible.

La resistència total ve determinada per l'acció de forces hidrodinàmiques que depenen d'una sèrie de contribucions individuals:

- Resistència del casc nu.
- Resistència de l'orsa.
- La brutícia del casc.

La contribució més important és la del casc nu que depèn principalment de la forma del bot. L'optimització de la forma del bot, en el sentit de la minimització de la resistència a l'avanç, és un problema de gran complexitat a causa de les moltes

limitacions pràctiques (dimensions principals, pes mort, capacitat de càrrega, costos de construcció, ...), per aquesta raó el problema se sol abordar de manera simplificada.

4.1.1. Descomposició de la resistència

La mesura de la resistència en aigües calma se sol descompondre en diverses components, aquestes interactuen entre elles i moltes no poden ser mesurades de forma individual.

→ **RESISTÈNCIES PARÀSITES:** són supèrflues i s'han d'eliminar al màxim.

Ex: pèls, cabells, roba, brutícia, ...

→ **RESISTÈNCIES INDUÏDES:** no poden ser eliminades sense comprometre la propulsió o estructures vitals del cos.

Ex: casc, quadre de la bicicleta, ala de l'avió, ...

→ **RESISTÈNCIA D'ONATGE:** només es dona al medi aquàtic i en els cossos que avancen amb un cert nivell de flotació o prop de la superfície, però no a partir de certa profunditat.

Es pot mesurar a partir de l'altura i freqüència de les ones generades.

La component de la resistència deguda a la formació d'ones varia en els casos pràctics entre un 10% i un 70% de la resistència total d'un bot en aigües tranquil·les.

Mentre que per velocitats baixes aquesta resistència és pràcticament nul·la, s'eleva dràsticament a l'augmentar la velocitat.

L'aspecte més significatiu d'aquesta component i el que li dona més importància és la seva capacitat d'experimentar importants variacions davant de relativament petites modificacions de la forma del bot.

→ RESISTÈNCIES DE PRESSIÓ:

- ◆ **RESISTÈNCIA FRONTAL** (altes pressions): es genera a la zona davantera dels perfils.
- ◆ **RESISTÈNCIA DE SUCCIÓ O REBUF** (baixes pressions): es genera a la zona posterior dels perfils.

Aquestes resistències són directament proporcionals a l'àrea frontal de xoc contra el fluid però també tenen dependència de la forma del perfil:

Els **perfils molt llargs o acabats en angle recte** tindran importants resistències de succió. Els perfils llargs poden donar lloc a un desprendiment prematur de la capa límit això significa que al llarg de la longitud del perfil la capa límit anirà perdent velocitat (pel fregament d'unes capes contra les altres) respecte al perfil fins al punt d'un possible desprendiment prematur. Aquest és un fenomen no desitjat des del punt de vista hidrodinàmic. Per evitar-ho es pot obligar a recórrer més trajecte (augmentar el diàmetre del perfil prop de la vora de sortida) o es pot inclús provocar una capa límit turbulenta, que es desprèn més tard del perfil per tenir més energia cinètica (es mou a més velocitat).

Els **perfils arrodonits** provoquen importants rebufts igual que els que acaben en **angle recte**. Un exemple de com solucionar els rebufts als perfils esfèrics, són les pilotes de golf amb *dimples*¹¹ que disminueixen la resistència de succió.



Il·lustració 40: Pilota de golf amb dimples.

Els **perfils acabats en punta** provoquen menys rebuf. Com més gran sigui la **superfície frontal de xoc** contra el flux relatiu major serà la resistència de pressió. L'augment de l'àrea frontal de xoc provoca una disminució de la velocitat.

¹¹ **Dimples**: lleugeres depressions en una superfície.

→ **RESISTÈNCIA DE FORMA:** component de la resistència total a l'avanç deguda a la forma, però no a la mida d'un perfil.

Es calcula mitjançant el C_x o C_d (drag coefficient) que es troba a canals experimentals tant a mida real com a escala, ja que no depèn de la mida dels perfils sinó de la forma.

El C_x s'obté de la comparació de la resistència que genera un determinat perfil (degut a la seva forma) amb una placa quadrada de la mateixa superfície frontal que el perfil. És una magnitud adimensional.

El C_x està definit com:

$$c_d = \frac{2F_d}{\rho v^2 A}$$

On:

F_d = força de resistència (*drag*)

ρ = densitat del fluid, en el cas de l'aigua 1 kg/l

v = velocitat del perfil relativa al fluid

A = àrea de referència

Els **perfils allargats amb forma punxeguda** a la vora de sortida tenen millors C_x que les **formes arrodonides i acabades en angle recte**.

En perfils allargats el C_x millora si el diàmetre major del perfil es troba a prop de la vora de sortida respecte a si està a prop de la vora d'atac.

La constitució de l'esportista, la posició que adopti i la musculació més accentuada d'una o altres parts del cos modifiquen el C_x .

Clàssicament s'ha dit que un **perfil en forma de gota d'aigua** té un bon C_x .

→ **RESISTÈNCIA DE FRICCIÓ O FREGAMENT:**

Resistència viscosa associada a la generació de la capa límit. Es tracta de la component més important. La seva variació és aproximadament quadràtica amb la velocitat del bot.

La resistència de fricció és causada pel frec del perfil amb la capa de fluid més propera i al frec d'unes capes de fluid amb altres al llarg de tota l'amplada de la capa límit.

Una manera indirecta de calcular la resistència de fregament és coneixent el nombre de Reynolds, ja que mitjançant aquest nombre es pot predir el comportament de la capa límit: laminar o turbulenta. Quan sigui laminar es

produirà una menor resistència de fregament, mentre que amb capes límit turbulentes augmenta.

La força de fregament es pot calcular a partir de la superfície de contacte, el coeficient absolut de viscositat i la separació en altura entre les capes per mitjà de la fórmula:

$$F = \mu \cdot S \cdot \frac{v}{y}$$

On:

F = força de fregament entre 2 capes de fluid

μ = coeficient de viscositat absolut

S = superfície de les capes considerades

v = diferències de velocitat entre capes de fluid

y = altura de separació entre les capes

Com he esmentat anteriorment, els *dimples* de les pilotes de golf disminueixen de forma important la resistència de succió. Però, d'altra banda, tenen més resistència de fricció que si fossin llises (sense *dimples*).

Alguns esports es veuen afectats a la vegada per resistència del medi aeri i aquàtic, com és el cas del rem. A la resistència de fricció del casc, se li suma la resistència deguda a la fricció de l'aire amb la superestructura i el rem.

→ **Altres tipus** de resistència que apareixen en casos especials (deguda a onades trencants,...)

La fórmula senzilla que calcula millor de forma general la influència de diversos tipus de resistència, es coneix des de l'època de Newton:

$$F_r = S \cdot C_x \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

C_x = coeficient aerodinàmic

S = àrea frontal efectiva

$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ = pressió dinàmica

Aquesta fórmula està relacionada amb la que utilitzaré jo més endavant:

$$F = K \cdot v^2$$

5. Experiències hidrodinàmiques

Tradicionalment, l'enginyer naval ha vist els assajos hidrodinàmics amb models a escala com la millor manera per conèixer la resistència a l'avanç, sent aquest l'únic assaig que existeix per determinar la resistència amb exactitud. Desafortunadament aquests assajos són costosos i lents, pel que el seu ús és limitat quan es volen assajar diverses formes de cascots. Realment, la idea de realitzar assajos amb models no és nova: ens consta que Leonardo da Vinci va dur a terme una sèrie d'assajos amb tres models, per valorar l'efecte de diferents components.

Més endavant, diversos investigadors com Samue Fortrey o Benjamin Franklin van fer assajos utilitzant l'arrossegament per gravetat. Però no va ser fins al 1871, quan William Froude¹² va utilitzar el que pot considerar-se el primer canal d'assajos, precursor dels tancs de remol existents avui dia.

5.1 Mètodes de correlació

S'entén com mètodes de correlació al conjunt d'hipòtesis i càlculs que permeten obtenir la resistència a l'avanç d'un bot a partir d'assajos amb models a escala. La correlació model-bot és el problema fonamental en un canal d'experiències i la seva resolució està lligada a l'extrapolació de la resistència a mida real.

5.2 Canals d'experiències hidrodinàmiques

Un canal d'experiències hidrodinàmiques és una instal·lació experimental utilitzada per assajar el comportament hidrodinàmic dels cossos submergits en aigua.

Aquests tipus de canals realitzen la seva tasca experimental mitjançant l'assaig amb models a escala de bots. Sovint, un canal d'aigua serà ubicat amb altres instal·lacions experimentals, és per això que una unes instal·lacions d'aquesta mena disposen majoritàriament de tres grans laboratoris:

- Canal d'aigües tranquil·les
- Túnel de cavitació
- Laboratori de Dinàmica del Buc

¹² **William Froude** (1810-1879): enginyer hidràulic i arquitecte naval anglès. Primer en establir lleis respecte a la resistència que l'aigua exerceix a l'avanç dels navilis, i a calcular la seva estabilitat.

5.2.1 Canal d'aigües tranquil·les

La principal instal·lació de la qual consta un establiment d'experiències hidrodinàmiques, i la que precisament m'interessa explicar al detall, és el canal d'aigües tranquil·les. Es tracta d'un instrument molt antic, ja utilitzat fa centenars d'anys per als enginyers navals per a donar lloc als seus assajos de remolc.

Els canals d'aigües tranquil·les no tenen unes dimensions establertes, però normalment segueixen un mateix patró. Solen mesurar al voltant de 320 m de llarg, 12,5 m d'ample i 6,5 m de profunditat. La instal·lació, en tenir una gran secció transversal, té un efecte de bloqueig pràcticament menyspreable i per tant els mesuraments tenen un alt grau de fiabilitat.

Durant les experiències que tenen lloc a aquestes instal·lacions, els perfils que volen ser posats a prova són estirats per un carro remolcador que han afermat al model. El carro remolcador pot adquirir diverses velocitats, que seran les que assolirà el bot que realitzi la prova, fins a un màxim de 10 m/s, amb una acceleració màxima d'1 m/s². El seu programari de control permet establir de forma automatitzada la velocitat d'assaig dels perfils.



Il·lustració 41: Carro remolcador, Canal Experiències Hidrodinàmiques del Pardo, Madrid.

Les seves característiques i instrumentació permeten la realització de diferents assajos de remolc, sent el més habitual el que té com a objectiu fer recerca al voltant de la resistència a l'avanç i analitzar-ne les dades per a un perfil concret. Aquest tipus d'assaig de remolc serà el que més endavant realitzaré per a dur a terme aquest treball de recerca.

Altres dels assajos que tenen lloc al canal d'aigües tranquil·les són els que analitzen l'autopropulsió, l'arrossegament i la tracció del buc, les línies de corrent que produeix en el fluid, els que estudien l'orientació i situació d'apèndixs, entre d'altres. Un altre estudi que s'hi pot dur a terme és la determinació dels coeficients propulsius d'un vaixell, cosa que s'utilitza per analitzar i estudiar la influència de les formes del casc en el funcionament del seu propulsor. Mitjançant vídeos submarins, es decideix l'orientació i situació dels apèndixs.

El sistema d'adquisició i anàlisi de dades s'executa de forma automàtica per mitjà de tecnologia digital, amb programes d'anàlisi desenvolupats específicament per a aquesta instal·lació. La tasca de modernització i millora és contínua en aquest tipus de canals gràcies a la feina d'erudits equips d'enginyers navals.

Entre la instrumentació disponible, calen esmentar equips de diferents tipus de dinamòmetres i sensors diversos entre els quals destaca el dinamòmetre de remolc que és el que més s'assembla més amb el que jo faré servir. Alguns disposen d'equips de registre i càmeres de vídeo.

Els assajos que es realitzen en aquesta instal·lació permeten optimitzar les embarcacions observant el seu comportament hidrodinàmic, determinar amb gran exactitud el valor de la resistència a l'avanç que aquests oposen i intentar minimitzar-la determinant la influència de les formes del buc en el seu comportament.

5.2.2 Túnel de cavitació

El túnel de cavitació és la instal·lació que s'utilitza, entre altres fins, per optimitzar el disseny d'hèlixs comprovant i estudiant la generació de cavitació, risc d'erosió, fluctuacions de pressió i la producció de sorolls inherents a la cavitació. Els assajos poden realitzar-se amb el propulsor en flux lliure o bé simulant l'estela del vaixell amb malles.

5.2.3 Laboratori de dinàmica del buc

El laboratori de dinàmica del buc disposa de tecnologia de generació d'onatge i instrumentació per a assajos d'estudi del comportament hidrodinàmic del moviments de vaixells, plataformes *offshore*¹³ i artefactes flotants en ones i vent.

Disposa d'un generador d'ones lateral amb paletes rígides d'articulació simple. Els segments o *flaps* que configuren el generador d'ones s'accionen hidràulicament. A l'extrem oposat, es troba la platja d'absorció de l'onatge generat, formada per una capa d'encenalls d'acer inoxidable.

¹³ **Plataforma offshore:** terme anglès que refereix a una construcció flotant o fixada al fons marí.

6. Pràctica amb perfils

6.1. Introducció

Com a part pràctica del meu treball m'he proposat dissenyar i construir una sèrie de maquetes de bots de rem a escala, partint dels conceptes teòrics que he adquirit. Les maquetes em serviran per realitzar diversos assajos de remolc, que tindran lloc en un canal d'aigües tranquil·les ideat per mi. Les proves consistiran en remolcar els perfils a una velocitat coneguda mentre se'n registra la força que oposen a l'avanç. Per un mateix bot, es realitzaran diferents mostres en cada velocitat amb l'objectiu de reduir el marge d'error. Amb els resultats obtinguts seré capaç de relacionar la força de resistència respecte la velocitat d'avanç de cada perfil. Conseqüentment, suposant que la força de resistència correspon a una constant (K) multiplicada per la velocitat elevada a un exponent ($F=k \cdot v^n$), podré calcular quin és aquest exponent. Llavors, a partir de la fórmula amb l'exponent trobat, deduiré quina és la constant de cada perfil i les compararé.

Un cop s'hagi fet tot això es podran acceptar o refutar les hipòtesis inicials.

6.1.1 Consideracions inicials

Abans de començar cal deixar clars alguns conceptes. Com hem vist a l'apartat 4.1.1 del treball, les forces que intervenen en el moviment d'un bot són molt complexes. Per simplificar la situació i poder fer un treball pràctic, en el meu projecte em basaré en suposar que existeix una única força de fregament que depèn de la velocitat elevada a un exponent seguint la fórmula: $F=k \cdot v^n$.

També cal destacar que no faré ús de les sofisticades eines amb què compten els enginyers. Sinó que, en comptes d'emprar un canal d'experiències hidrodinàmiques real, realitzaré els assajos a una piscina convertint-la en el meu propi canal d'aigua i utilitzaré el sensor de força per trobar la resistència.

D'altra banda, cal mencionar que un cos amb una silueta tan fina com el bots de competició no es pot mantenir en equilibri sol, sinó que necessita alguna estructura de suport. Per aquest motiu vaig dissenyar i construir una estructura amb pontons estabilitzadors. Aquesta estructura la serà afegida a totes les maquetes de manera que la seva influència serà la mateixa.

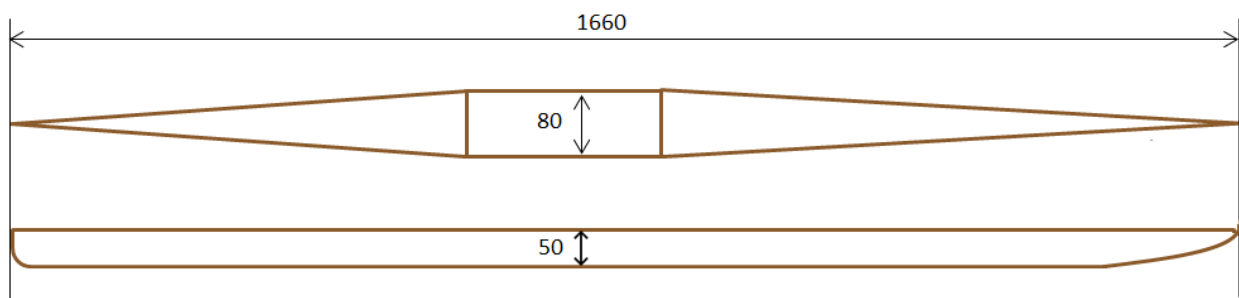
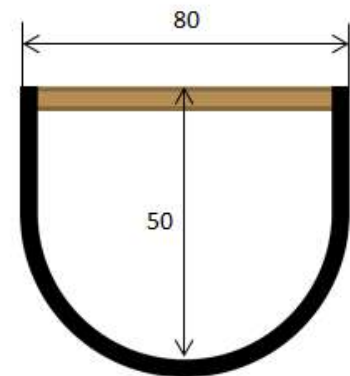
6.2 Fase de disseny

Es dissenyaran, a la mateixa escala, un bot estàndard i un parell bots més. L'única variació entre ells serà en la forma, no en la mida.

La idea inicial era construir les maquetes a escala 1:10, igual que la maqueta d'en Joan Collell, però vaig creure que a escala 1:5 les diferències de resistència entre els models serien més evidents.

Les dimensions d'un esquif són de 8,3 metres d'eslora, una alçada màxima de 25 centímetres i una amplada de 20 centímetres a la secció del centre. Per tant, a escala 1:5, on un metre del model correspon a cinc metres del bot real, les proporcions seran de 166 cm d'eslora, 5 cm d'alçada i 8 cm d'amplada.

Vaig anar a prendre mides a bots a escala real i vaig fer-ne els plànols a escala 1:5.



El pes també cal que sigui a escala, ja que aquest determina la flotació del bot. Un esquif real pesa 14 kg i un remer sol pesar al voltant de 75 kg, per tant, la massa total és de 89 kg. Si volem que la massa del nostre bot sigui a escala 1:5 haurem de dividir la massa real entre 125; donat que, segons la fórmula $m=d \cdot V$, la massa d'un cos és proporcional al seu volum. Sabem que si reduïm cinc vegades cada una de les dimensions lineals del bot, el volum queda reduït $5 \times 5 \times 5$ vegades i consegüentment la massa també.

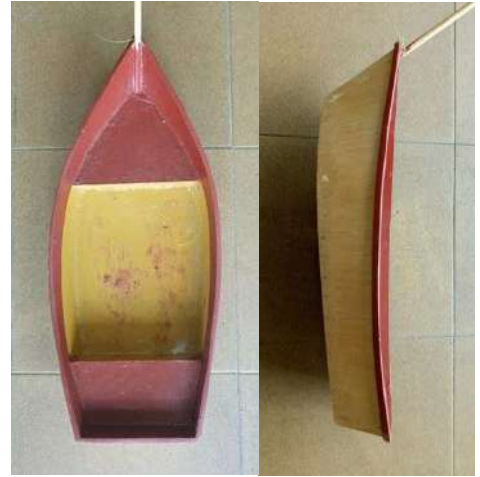
Per tant, dividim 89 kg entre 125 i resultarà que la nostra maqueta ha de tenir una massa de 712 g.

6.2.0 Bot 1

Aquest bot no va ser dissenyat per mi, sinó que me'l van deixar els fusters.

Es tracta d'una maqueta a escala 1:10 d'un bot de rem de banc fix.

Aquest tipus d'embarcació no ha estat dissenyada per al rem de competició, i per tant, un cop obtinguts els resultats, podria comparar fins a quin punt s'han optimitzat els bots de rem.



6.2.1 Bots 2 i 3

Els bots 2 i 3 són les maquetes d'un bot de rem estàndard.

En aquest cas en construiré dues rèpliques exactes, ja que tinc pensat escurçar progressivament la popa del bot 3 per descobrir si la hipòtesi esmentada als objectius és correcta.

Tallaré la popa del bot diverses vegades, cada 20 cm, amb el propòsit de que el bot acabi amb angle recte i augmenti la superfície posterior.

Per tant, el bot 2 fa la funció de reserva per si s'havia de tornar a realitzar algun assaig amb el bot 3 però ja estava tallat.

Per conèixer les proporcions, vaig prendre mesures als esquifs a escala real que tenim a l'hangar del Club Natació Banyoles.



6.2.2 Bot 4

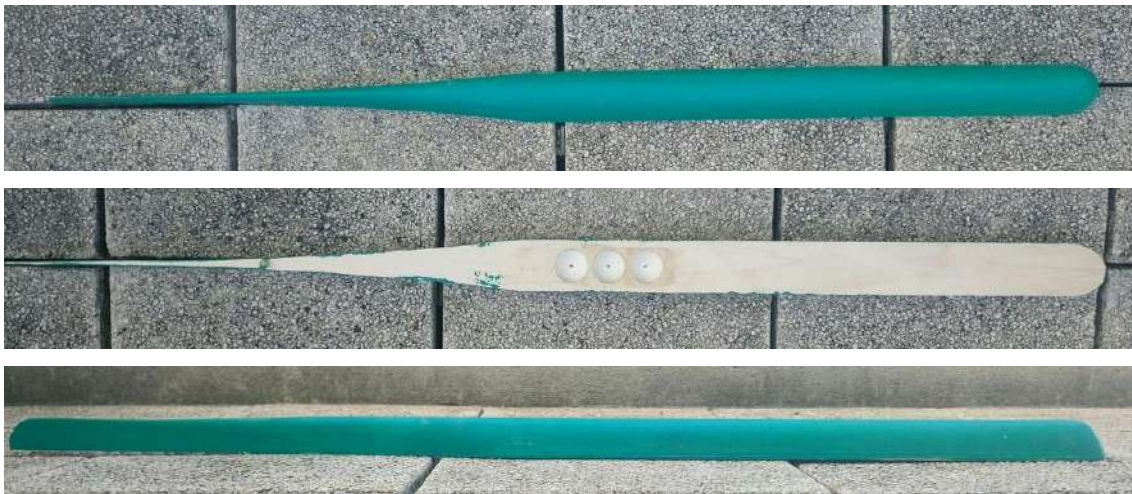
El bot 4 és el primer que vaig dissenyar i construir. Va ser com una prova.

Tot i que la seva aparença és semblant a la dels bots 2 i 3, no va ser construït amb les proporcions i per tant no s'assajarà.



6.2.3 Bot 5

Una de les formes que he volgut donar a un dels models és la forma de gota, ja que els perfils en forma de gota solen oposar menys resistència a l'avanç.



6.2.4 Bot 6

El bot 6 és el resultat de la inversió de les corbes d'obertura de les bandes de proa i popa d'un bot estàndard.

Presenta menys àrea frontal de xoc.



6.2.5 Batanga o pontó estabilitzador

Una batanga és un flotador allargat que subjectat el buc principal d'algunes embarcacions i augmenta l'estabilitat.

Per al disseny d'aquesta batanga em vaig fixar en els bots de rem paralímpics.



El construiré de manera que encaixi a tots els bots.



6.3 Fase de construcció

El pas següent després de tenir clares les formes que donaria a les meves maquetes i haver-les plasmat al paper és procedir a fabricar-les.

El primer que vaig haver de decidir va ser quina seria la millor manera de construir-les, aquestes són els mètodes que es van valorar:

La meva primera idea va ser imprimir els models amb la **impressora 3D** que tenim a l'institut, les maquetes serien construïdes amb un material anomenat PLA, derivat del plàstic. El principal avantatge que suposaria aquest mètode és la facilitat de construcció, ja que l'únic que faria falta fer són els plànols. A més, vaig valorar que, donat que l'institut ja comptava amb una impressora d'aquest tipus, no seria necessari buscar-ne una. També crec que hagués sigut interessant, ja que en un futur no gaire llunyà aquest tipus d'aparells formaran part del nostre dia a dia. D'altra banda, em va tirar enrere el fet que la impressora de l'institut, igual que la majoria, és massa petita per imprimir-hi un bot sencer de 166 cm d'eslora. Una possible solució, haguera sigut trobar-ne una més gran, cosa poc probable, o imprimir els models dividits en diferents parts i unir-los.

A més a més, hagués fet falta fer els dissenys 3D a l'ordinador i hauria comportat entrar a un àmbit que no m'interessava i desconeixia massa.

No obstant, vaig fer una prova imprimint un bot els plànols del qual havia trobat a una pàgina web anomenada www.thingiverse.com. Em vaig adonar que, a part que el bot en qüestió no era a escala, la mida era ínfima per realitzar els assajos. Podeu trobar les imatges d'aquesta impressió a l'annex III .

Un altre mètode per construir les meves maquetes podia ser seguir el mateix **procés de construcció dels bots de rem de fusta**, és a dir, com hem vist a l'apartat 2.3 del treball, fabricant la quilla i les costelles i fent el casc amb una fullola.

També se'm va acudir que podia utilitzar el **control numèric**¹⁴ que tenim als tallers de l'institut, però per descomptat necessitava dissenys en 3D a ordinador, per tant no vaig tirar endavant amb la idea.

La opció que vaig triar endavant va ser la de **donar forma a un bloc de porexpan**.

La maqueta d'en Joan Collell va ser tallada a partir d'un bloc de fusta massissa, per tant, vaig decidir seguir el mateix mètode utilitzant *porexpan* en lloc de fusta. Ja que, com em va dir en Bosco Plana, professor de tecnologia i constructor de barques, és més fàcil donar-li forma.

En Juli Lozano em va assistir-me en la construcció d'aquestes maquetes.

¹⁴ **Control numèric:** dispositiu capaç de dirigir el posicionament d'un òrgan mecànic mòbil mitjançant ordres elaborades de forma totalment automàtica a partir d'informacions numèriques en temps real.

El material emprat per a la construcció d'una unitat ha estat el següent:

MATERIALS		
1	Bloc de <i>porexpan</i> Mides mínimes en cm: 166x8x5	
2	Làmina de fusta Mides mínimes en cm: 166x8	
3	Cola expansiva per <i>porexpan</i> Marca: BALCOTN STANDARD	
4	Pintura setinada Marca: HIDRALUX TITAN	
5	Massilla blanca en pols Marca: AGUAPLAST	

6	Cola blanca	
7	Peses circulars de 50, 100 i 200 grams. Del laboratori de física i química de l'institut.	
8	Espiga de fusta	
EINES		
1	Paper de vidre de diferents rugositats	
2	Llima	
3	Raspa	

4	Serjants	
5	Pinzell	
6	Espàtula i espàtula d'encolar (espàtula amb dents)	
7	Cinta mètrica	
8	Serra de marqueteria	
MAQUINÀRIA		
1	Escairadora (serra circular que té un carro mòbil per suportar peces grans)	

2	Serra cinta (serra elèctrica de pedestal que té una tira metàl·lica dentada, llarga, estreta i flexible)	
3	Trepant Corona de 52 mm Broca de 2 mm.	

El procés que es seguir per a la construcció de cada una de les maquetes és el següent:

Un cop hem reunit tots els materials necessaris, cal **prendre mides al bloc de porexpan** del qual partim per veure si les dimensions seran suficients per realitzar un bot de 166 cm de llarg, 8 cm d'ample i 5 cm d'alçada. Després, hem de decidir com el tallarem de manera que puguem obtenir un bloc elaborat amb dimensions esmentades. El més probable que podem trobar-nos és que no disposem d'un bloc prou llarg per arribar als 166 cm d'eslora, llavors el que cal fer és dividir-lo en dues o més peces i fer-les encaixar. A continuació, **tallem el bloc de porexpan** a l'escairadora amb les mides de 166 x 8 x 5 cm. És important l'ús d'aquest tipus de maquinària, ja que ens proporciona una gran precisió a l'hora de tallar els materials. En el cas que la llargada del bloc primari no sigui suficient, **el tallem en diverses peces i les unim amb cola expansiva**, especial per a *porexpan*.

El següent pas és escollir una **làmina de fusta** d'uns cinc mil·límetres de gruix. Ha de ser suficientment llarga i ampla per encaixar sobre tota la peça de *porexpan* que tenim preparada. Aquesta fullola ens ajudarà a mantenir rígid el bot i a reforçar la

unió entre les diferents peces que el constitueixen. Suposant que la làmina excedeix les dimensions 166 x 8 cm, la tallem amb l'escairadora. Quan estigui enllestida, l'haurem de col·locar sobre el bloc de *porexpan* elaborat. Aquest constituirà el casc del bot i la làmina simularà les cobertes.

Abans de procedir a encaixar les dues parts, hem d'aplicar una **capa de cola expansiva** sobre la cara superior del bloc, utilitzant una espàtula d'encolar. Seguidament, hem d'**aparellar les dues parts** assegurant-nos que coincideixen bé.

Abans de continuar, cal que la cola sigui totalment seca, convertint les diferents components en una peça compacta. Cal **deixar-ho reposar durant 24 hores** aplicant pressió amb uns **serjants**. És aconsellable col·locar una planxa de fusta de gruix considerable entremig perquè protegeixi la làmina més fina com es veu a la imatge.



L'endemà, retirem els serjants i comprovem que s'ha encolat correctament. Llavors, cal **marcar les tres seccions de la maqueta** del bot: la coberta de popa, la part central i la coberta de proa. La primera part mesura 62 cm de llarg, la del mig en mesura 27, i finalment la part de proa fa 77 cm; en total sumen 166 cm que és l'eslora total del bot.



Un cop tenim les parts definides hem de **dibuixar sobre la fullola la forma d'obertura que li voldrem donar** a les puntes de popa i proa del bot tenint en compte les seccions anteriors. Aquest pas és diferent en cada maqueta, ja que cadascuna tindrà una forma particular. En el cas dels bots de rem convencionals, per exemple, la forma d'obertura no és del tot recte sinó que és lleugerament corba. Si volem aconseguir donar-li una silueta així al nostre model, hem de crear una plantilla que ens servirà per dibuixar la forma dels dos angles d'obertura d'un mateix bot. Cal guardar-la si valdrem realitzar una rèplica del bot en qüestió.

El següent pas, un cop tenim dibuixada la silueta que li volem donar, és **serrar el contorn** amb molta precisió, utilitzant la serra cinta. Si volem que la inclinació de curvatura del casc sigui exactament la mateixa a tots els punts, podem passar-lo per l'escairadora i, variant la inclinació de l'eix de la seva serra entre uns quinze i vint graus, podem eliminar trossos de *porexpan* que ens estalviarem de treure més endavant quan li donem forma a mà.

Un cop enllestit això toca fer la tasca més costosa i que requereix més paciència, li hem de **donar la forma desitjada al nostre bot** de manera manual. Utilitzant, en primer lloc, una raspa que és l'eina que més material rebaixa gràcies a la seva superfície guarnida de dents, aquesta ens serveix per endur-nos grans quantitats de *porexpan* ràpidament. A mesura que el bot comença a agafar forma, no ens farà falta una eina tan rasposa, sinó quelcom que poleixi amb més precisió. La llima ens és útil per fer els últims retocs a la silueta.



Finalment, utilitzem el paper de vidre per **polir el casc** perquè quedi ben fi i llis i d'aquesta manera oposi menys resistència a l'avanç. Si volem que el resultat sigui més curós i no deformar el casc amb el paper de vidre, podem arregar un tac de fusta rectangular d'aproximadament 7 x 5 cm i envoltar-hi el paper de vidre, això ens permetrà polir de manera regular a tots els punts del casc i no fer deformacions sobretot a les zones d'unió entre peces on la cola seca dificulta el pas del paper de vidre.



A continuació, **pintem el casc** de la maqueta. És aconsellable fer ús d'un pinzell més aviat ample. Seguidament, caldrà esperar un període aproximat d'una hora fins que la pintura s'eixugui per complet.





El pas següent és important fer-lo, sempre que sigui possible, després d'haver-li aplicat una primera capa de pintura, ja que el fet que aquest sigui de color ens permet adonar-nos de les imperfeccions i senyals que no percebem amb la tonalitat blanca del *porexpan*. Preparem una barreja amb la massilla en pols, aigua i un rajolí de cola blanca i la utilitzem per **omplirem tots els forats**. A continuació, quan l'aglomerat s'hagi assecat, hi passem el paper de vidre per sobre de manera que no quedin rugositats i acabem de perfeccionar la forma del bot.



Quan aconseguim la forma final desitjada procedim a **aplicar una segona capa de pintura** que impermeabilitzarà i protegirà el bot.

Hem de tenir en compte que el *porexpan* té un pes molt insignificant i que per tant flota més del que necessitem. El que volem nosaltres és que el pes de la nostra maqueta també sigui a escala amb el del bot real, que hem dit que era de 89 kg incloent el rem.

Com que un bot d'aquestes dimensions fet de *porexpan* amb prou feines passa dels 100 g, necessitem afegir-hi pes i ho farem de la següent manera: el laboratori de l'institut posa a la meva disposició una sèrie de peses circulars de 50, 100 i 200 g que encaixarem segons convingui en uns orificis a la coberta del bot. Les eines que necessitem per perforar la coberta de la maqueta són un trepant i una corona d'igual

diàmetre que les peses, en aquest cas 50 mm. El primer que hem de fer és dibuixar el contorn dels orificis utilitzant una pesa de referència, les perforacions es duran a terme a la secció del mig del bot perquè el pes quedi centrat i es faran **tres forats** per bot. S'ha d'intentar situar els forats el màxim profund (sense malmetre el model), ja que com més avall estigui situat el pes més estable serà bot.

Per acabar, necessitem un orifici a la punta de popa del bot per poder-li lligar el fil i remolcar-lo durant d'assaig. Malauradament, no podem perforar la fina punta de les nostres maquetes a causa de la seva fragilitat. El que fem és emprar una espiga de fusta que normalment s'usa de nexa d'unió per a la construcció de tamborets i cadires. Realitzarem una petita perforació suficient perquè hi pugui passar el fil de cuca a l'espiga emprant una broca molt prima i **encolem l'espiga** el màxim a la punta del bot que es pugui amb la cola expansiva.



6.4 El canal d'aigua

Un dels principals requisits per a dur a terme el meu propòsit és comptar amb un canal d'experiències hidrodinàmiques d'aigües tranquil·les on realitzar les proves.

L'únic canal d'aquest tipus que tenim en tot Espanya és el *Canal de Experièncias Hidrodinámicas de el Pardo (CEHIPAR)*, situat a Madrid. Es tracta d'un Organisme Autònom de l'Estat, reconegut internacionalment, que realitza assajos per projectes, experimentació i investigació sol·licitats per organismes, drassanes, navilieres, oficines d'enginyeria, fabricants de bots i particulars. Vaig visitar el lloc web de l'organisme i vaig poder veure com és realment un canal d'experiències hidrodinàmiques.



Per la elaboració del canal d'aigua ha sigut imprescindible l'ús del sensor de força que em va proporcionar el tutor. Es tracta d'una de les eines que ofereix MultiLab,

aquest és un programa d'anàlisi de dades que proporciona tot el que els estudiants necessitem per recollir, presentar (en gràfics i taules) i investigar dades amb sofisticades eines d'anàlisi. Cal esmentar que el sensor en qüestió presentava un *offset*¹⁵ de 0,5N que, més endavant, hauria de tenir en compte en els resultats.

Inicialment, em va semblar més fàcil construir un canal d'experiències en el que l'aigua estigues en moviment mentre el perfil està immòbil. Lligaria la maqueta al sensor de força i aquest mesuraria la resistència que el perfil oposa a l'aigua que circula constantment moguda per una bomba.

El canal estaria constituït per una estructura transparent (plàstic, metacrilat), per a poder veure el comportament del bot, una bomba submergible que faci circular l'aigua de manera cíclica i el sensor de força. Ja disposava de la bomba gràcies a un company electricista, fins i tot vaig fer diferents dissenys amb algunes variacions per a valorar quin podria ser el més adient. Els podreu trobar a l'annex II.

Ja sabia que en els canals d'experiències els bots són remolcats i conseqüentment moguts longitudinalment a través d'aigua estàtica. Però per idear-ho em vaig basar en el principi que diu que el moviment relatiu és el mateix tan si es mou l'aigua com si és el bot el que avança.

Més endavant em vaig donar compte que la majoria de les idees anteriors no eren ni necessàries ni efectives, ja que per començar els costos de compra del material emprat serien massa elevats, a més no es tractaria d'aigües tranquil·les, ja que estarien en constant moviment i fins i tot podrien baixar amb turbulències.

Per tant, vaig considerar que el més apropiat seria utilitzar el mateix mètode que s'usa a les instal·lacions professionals destinades a aquest tipus d'experiències, com el CEHIPAR. Vaig decidir realitzar les proves a una piscina, ja que seria suficientment voluminosa i no caldria omplir-la expressament, a més jo podia disposar de la piscina d'uns familiars que mesura 12 m de llarg i 3 m d'ample.



¹⁵ **Offset:** mot provinent de l'anglès que designa la quantitat o la distància a la qual alguna cosa està fora de línia.

Se'm va acudir que un bon sistema per remolcar els bots podria ser utilitzar un motor rotatiu. Aquest enrotllaria el fil en una bobina i, consegüentment, remolcaria el bot que està lligat.

Per aconseguir que el perfil pugui avançar a diverses velocitats, tenint en compte que el motor gira a velocitat fixa, ha estat necessari emprar un variador de freqüència¹⁶. Aquest ens permet modificar la velocitat de gir del motor augmentant o disminuint la freqüència del corrent.



El motor que he utilitzat és de la marca *LEROY SOMER*.

I mirant les seves característiques sabem que, treballant amb una tensió d'entre 220 i 230 volts, aquest gira a una velocitat angular de 1500 revolucions per minut. D'altra banda, el variador de freqüència en qüestió és de la marca *Schneider Electric*. Les seves característiques són

V	Hz	min ⁻¹	kW	cosφ	A
220/230	50	1500	.18	.7	1.05
240	50	1500	.18	.65	1.05
380/400	50	1500	.18	.7	.6
485	50	1500	.18	.65	.6

els de la imatge i, tal com es pot veure, permet variar la freqüència del corrent des d'un valor mínim de 0,5 Hz fins a un valor màxim de 400 Hz.

El motor quan treballa a les condicions normals de 50/60 Hz gira a 1500 revolucions per minut. Si li subministrem una freqüència menor, la velocitat de rotació disminuirà. En canvi, si augmentem la freqüència a la qual treballa, la velocitat incrementarà.

Al principi, volia aprofitar una bobina que anteriorment havia servit per estirar vaixells, però em va resultar impossible ajuntar els dos eixos i acoblar-la al motor.

Davant d'això, vaig decidir dissenyar-ne una i imprimir-la a la impressora 3D, d'aquesta manera podria realitzar-la amb les mides que més convinguessin.



La bobina que imprimiria havia de tenir el diàmetre adequat perquè, a les 1500 revolucions per minut a les que va el motor, el bot pogués agafar velocitats properes als deu metres per segon. Els càlculs que vaig realitzar són els següents:

¹⁶ **Variador de freqüència:** dispositiu electrònic que controla velocitat rotacional d'un motor de corrent altern per mitjà del control de la freqüència d'alimentació subministrada al motor.

Si tenim un motor que gira a 1500 rpm, passem a unitats del Sistema Internacional:

$$\omega = 1500 \frac{\text{voltes}}{\text{min}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ volta}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 157 \text{ rad/s}$$

I volem que el bot avanci a velocitats properes a 10 m/s:

$$V = 10 \text{ m/s}$$

Partint de la fórmula:

$$V = r \cdot \omega$$

V = velocitat lineal	(m/s)
r = radi	(m)
ω = velocitat angular	(rad/s)

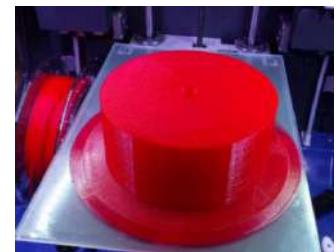
Aïllem el radi, la incògnita que volem trobar:

$$r = \frac{V}{\omega}$$

I substituïm:

$$r = \frac{10}{157} = 0,065 \text{ m} \approx 70 \text{ mm} \longrightarrow \text{Diàmetre} = 2r = 2 \times 70 = 140 \text{ mm}$$

En conclusió, la bobina dissenyada mesurarà 140 mil·límetres de diàmetre. Podeu trobar els plànols en dues i tres dimensions i les imatges de la impressió de la bobina a l'annex III.



També se'm va ocórrer imprimir una estructura de suport del motor, ja que la base d'aquest és bastant inestable com es pot veure a la imatge. Per dissenyar-la, vaig deduir les mides que hauria de tenir aquesta perquè la base del motor hi quedi ben fixada i guanyi estabilitat.



Base inestable



Estructura de suport

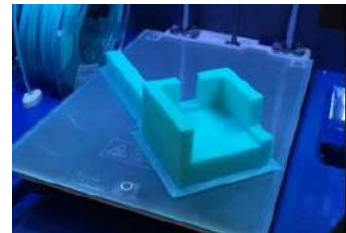
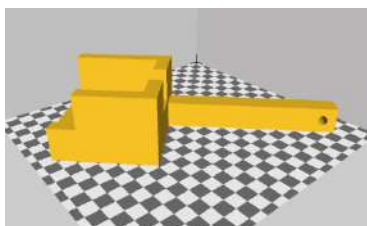
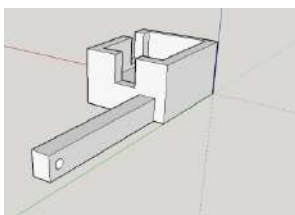
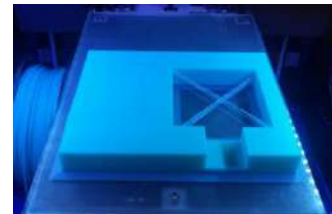
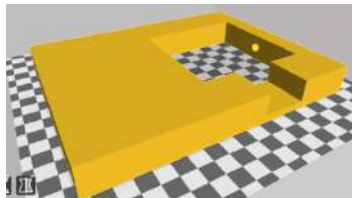
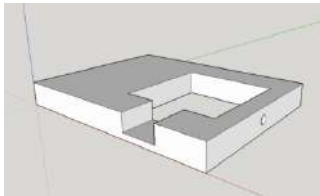
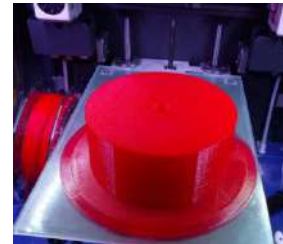
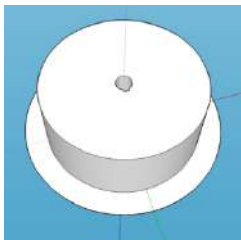


Estabilitat

A més, vaig dissenyar una peça on col·locar el sensor de força perquè aquest se situï sempre al mateix lloc durant tots els assajos i mesuri sempre de la mateixa manera. Els dissenys de les dues estructures de suport es poden torbar a l'annex III.

El programa que vaig utilitzar per passar tots els dissenys a l'ordinador va ser l'SketchUp¹⁷, després els vaig passar a un programa anomenat Cura, que et prepara els models per a imprimir-los en tres dimensions, i per últim els vaig traduir al llenguatge de programació G-code.

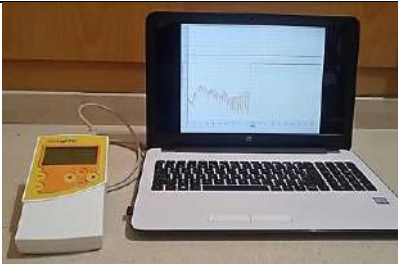
Finalment, vaig imprimir les peces a la impressora 3D de l'institut.



Quan vaig haver imprès totes les peces, vaig acoblar la bobina a l'eix del motor i hi vaig enrotllar un fil de cuca de 12 metres. Per acabar, vaig encaixar el suport a la part inferior del motor perquè fes de base.

¹⁷ **SketchUp**: programa de disseny gràfic i modelatge en tres dimensions (3D).

En resum, el canal d'experiències hidrodinàmiques consisteix en les següents parts:

Canal d'aigües tranquil·les	Piscina de 12 x 3 metres.	
Equip de remolc	Motor que gira a diferents velocitats gràcies a un variador de freqüència.	
Cel·la de càrrega	Sensor de tensió-compensió que permet (igual que un dinamòmetre) obtenir el valor de la força de resistència a l'avanç del model. Aquesta resistència es tradueix en la tensió amb la qual el model és remolcat.	
Sistema d'adquisició de dades	-MultiLab per la força -Tracker per la velocitat	

6.5 Fase d'assaig

La fase d'assaig consisteix a trobar les dades de la força respecte a la velocitat que presenten els diferents models a través d'assajos de remolc.



Durant els primers dies, vaig realitzar algunes proves a recs on l'aigua baixava a diferents velocitats per familiaritzar-me amb el funcionament dels instruments que utilitzaria més endavant. Vaig utilitzar la maqueta d'en Joan Collell.



Després d'aquests assajos, vaig concloure que a una escala tan petita no es veuria gaire diferència hidrodinàmica entre els perfils. Per això vaig decidir construir-les a escala 1:5.

Els assajos que realment m'han servit per trobar les dades definitives els vaig realitzar durant els mesos de juliol i agost.

En primer lloc, fixava el pontó estabilitzador al bot que assajaria i el lligava al fil que estava enroscat a la bobina del motor.



Per a cada bot, es van realitzar assajos a diverses velocitats conegudes. I per a cada velocitat es repetia l'assaig més d'un vegada per disminuir el marge d'error.

Cada prova era gravada a la càmera i enregistrada al sensor de força. A més, m'apunjava com havia anat cada experiment per, més endavant, descartar els que no havien sortit prou bé.



6.5.1 Dades

El procés que vaig seguir per a trobar les dades és el següent:

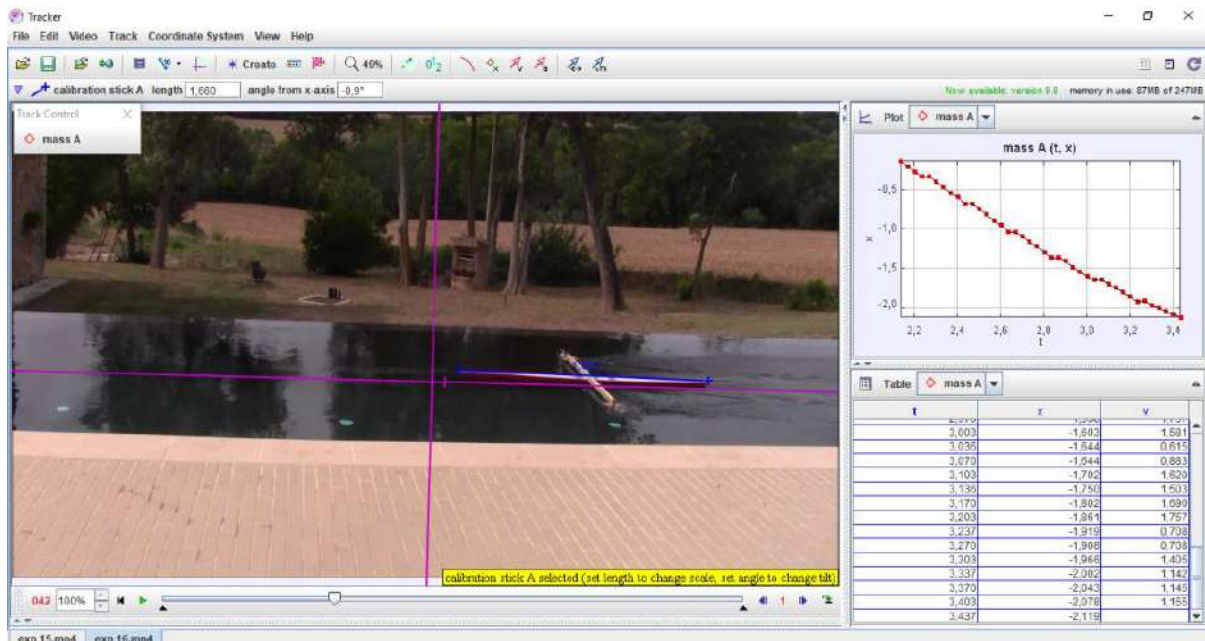
Després de la realització dels assajos em mirava detalladament cada un dels vídeos on hi havia gravats tots els experiments sense talls. A partir de les imatges i els aclariments que jo mateix havia comunicat a la càmera, seleccionava quins assajos havien sortit bé, quins no i quins no eren del tot fiables, ja que el bot no havia seguit una trajectòria recta. Finalment, els numerava tots d'acord amb el seu ordre cronològic, que coincidiria amb el nombre d'experiment registrat pel sensor de força. També calia anotar que en alguns assajos, la direcció del bot havia estat més recta a l'inici o al final de la prova, ja que això després es veuria reflectit a les dades.

Per conèixer la velocitat del bot en cada assaig, necessitava descarregar a l'ordinador totes les imatges que havia enregistrat aquell dia la càmera. Seguidament, editava i tallava els vídeos sencers per dividir els diversos assajos en vídeos independents. Cada un d'aquests fitxers era guardat amb el nom que li tocava, d'aquesta manera no hi hauria confusió.

El programa que vaig utilitzar per deduir la velocitat dels perfils a partir dels vídeos va ser el Tracker. El meu ordinador no comptava amb aquesta aplicació i, tot i haver-la fet servir un cop a classe de física, amb prou feines coneixia el seu funcionament. El meu tutor em va ensenyar com descarregar-lo i em va explicar les eines bàsiques que hauria d'emprar per realitzar el meu treball. Després de mirar-m'ho i fer-lo servir, vaig acabar de comprendre la funció de totes les eines que necessitaria utilitzar.

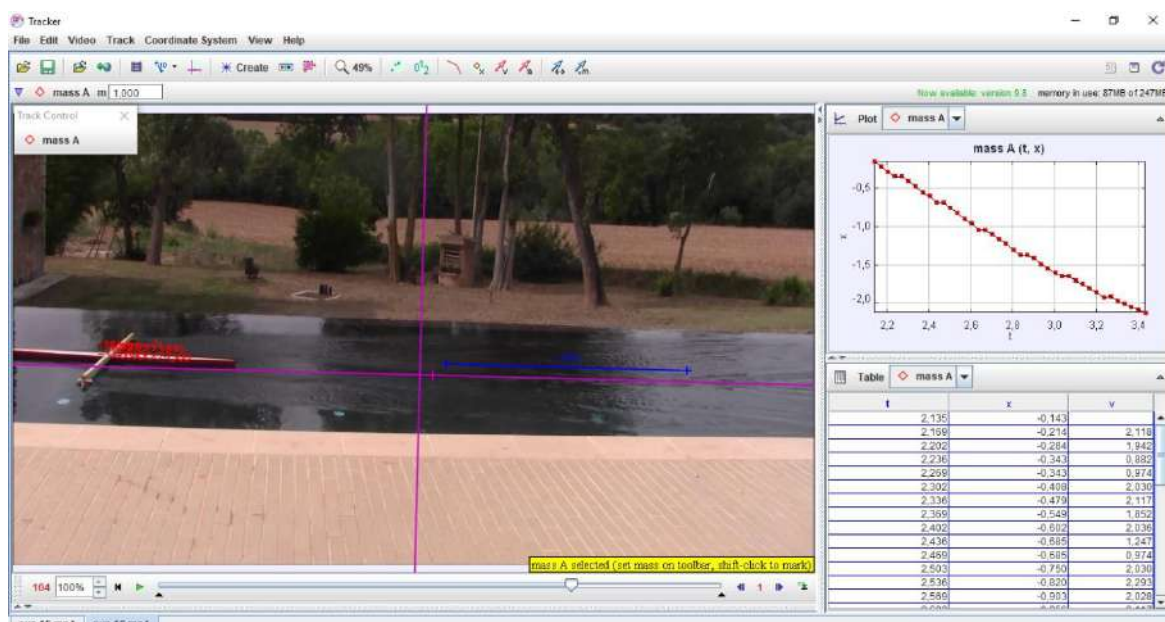
Un cop tenia el programa iniciat i amb un fitxer de vídeo corresponent a un assaig obert, el primer que calia fer era posar uns **eixos de coordenades** intentant fer coincidir l'eix d'abscisses amb la recta imaginària que correspondria a la direcció que segueix el bot. Seguidament, calia seleccionar una **vara de calibratge** i col·locar-la sobre la maqueta de manera que coincideixin en longitud. Coneixent la llargada del model, teclejava la xifra expressada en metres i finalment intentava que la vara fos paral·lela amb els eixos. La vara de calibratge li serveix al programa com

a mida de referència.



El següent pas era crear una **massa puntual (A)**. Aquesta massa puntual correspondria a un punt del bot que està en moviment, aquest es desplaça a una certa velocitat que és a la que ha avançat el model durant aquell assaig. El vídeo torna a l'inici quan es crea una massa puntual, i el que jo feia era avançar-lo fins que el bot es trobava a l'origen de l'eix de coordenades a partir d'on les dades de la velocitat són més fiables.

El que havia de fer llavors era escollir el punt del bot del qual seguiria la trajectòria i anar fent "Shift" "Click" a sobre d'aquest a mesura que anaven passant els fotogrames del vídeo i el punt s'anava movent, d'aquesta manera el programa troba la posició respecte al temps, i per tant, la velocitat a la qual s'ha desplaçat el bot.



Quan ja tenia suficients dades, amb l'ajuda del full de càlcul, inseria un gràfic de dispersió amb les columnes d'espai i temps. Llavor, ajustava la línia de tendència i obtenia l'equació de la recta i el coeficient de regressió (R^2). El coeficient de regressió sempre era molt proper a 1, ja que hi havia moltes dades i, en anar a velocitat constant, els punts es trobaven molt ajustats a la recta. Finalment, fixant-me en el pendent de la recta trobava la mitjana de tots els valors de la velocitat, que correspondria a la velocitat mitjana a la que s'ha mogut el bot durant l'assaig del vídeo en concret.

Una vegada havia seguit aquest procediment amb tots els assajos que s'havien dut a terme amb un bot a una mateixa potència del motor, feia la mitjana de tots els pendents de les rectes, és a dir, de totes les velocitats mitjanes de cada experiment i, finalment, trobava l'equivalent a la velocitat mitjana a la qual s'havia mogut el bot a una potència concreta.

El procés seguit per deduir la força que oposen els perfils a l'avanç és similar. El primer que havia de fer era passar totes les dades del sensor a l'ordinador, llavors havia d'iniciar el programa i obrir un per un tots els experiments gravats. Guiant-me pel full d'observacions, havia de guardar els assajos que s'havien enregistrat correctament amb el nom que els corresponia de manera que, per un mateix experiment, coincidissin el nom del fitxer de la velocitat i el de la força.

Lavors, passava les dades de la força respecte al temps a un full de càlcul i havia d'escollir l'interval de temps en què la força és la que realment oposa el bot a aquella velocitat, per fer-ho calia que em fixés en la gràfica que sortia al programa MultiLab i llegís el que havia anotat a les observacions. Normalment aquest interval corresponia a les dades que es trobaven a partir de la meitat fins que la força disminueix dràsticament, que és el final de l'assaig. A continuació, seleccionava només l'interval de temps que havia anat bé i esborrava la resta de dades. Amb les dades d'interès en feia una mitjana i trobava la força mitjana de l'experiment en concret.

Finalment, amb totes les forces mitjanes dels experiments realitzats amb un bot a una mateixa potència del motor, en feia la mitjana i trobava la força mitjana que oposava el bot a aquella potència.

Per últim calia considerar l'offset del sensor restant al resultat final a cada potència 0,524, i dividir per dos (per...).

RESULTATS:

Les taules i gràfiques següents ens mostren els resultats obtinguts després de processar les dades.

A cada taula hi figura la **força de resistència a l'avanç** relacionada amb la **velocitat** de remolc. Per a cadascun dels bots, trobem ordenades progressivament les diferents velocitats amb les que es va assajar. Al costat de cadascuna d'elles, la força que va ser necessària per estirar el bot a cada velocitat en particular.

La primera columna ens serveix de referència, tot i que no és d'interès per la investigació. Correspon a la **potència** concedida al motor a través del variador de freqüència. Com es pot observar a totes les taules, a mesura que incrementem la potència del motor i, per tant, la velocitat de rotació, el bot és remolcat més ràpidament i la velocitat d'avanç durant l'assaig augmenta, conseqüentment.

Els nombres amb quatre o més xifres decimals han estat aproximats a ordre 3 per arrodoniment.

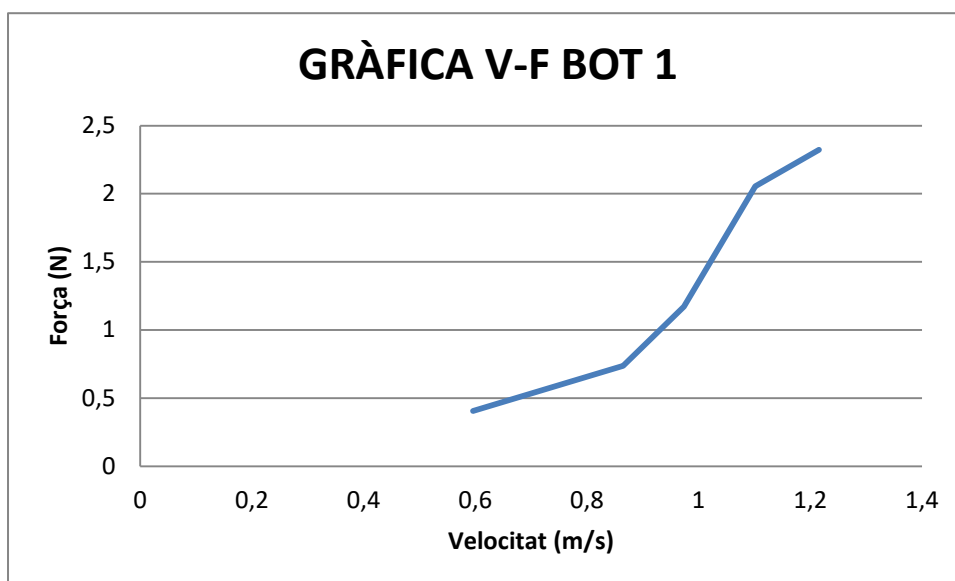
Acompanyant les taules, he adjuntat el gràfic que representa, en el eixos, les dades de velocitat i força per a cada bot. L'eix de les abscisses correspon a la velocitat

expressada en metres partit per segon (m/s) mentre que a l'eix de les ordenades s'hi troba representada la força en Newtons(N). A mesura que remolquem els bots a més velocitat l'augment de la força es desenvoluparà de manera més o menys parabòlica/recta.

Bot 1

POTÈNCIA	VELOCITAT (m/s)	FORÇA (N)
2	0,596	0,405
3,1	0,865	0,737
3,8	0,974	1,170
4,6	1,101	2,056
5,1	1,216	2,322

Taula 1: Velocitat - força bot 1

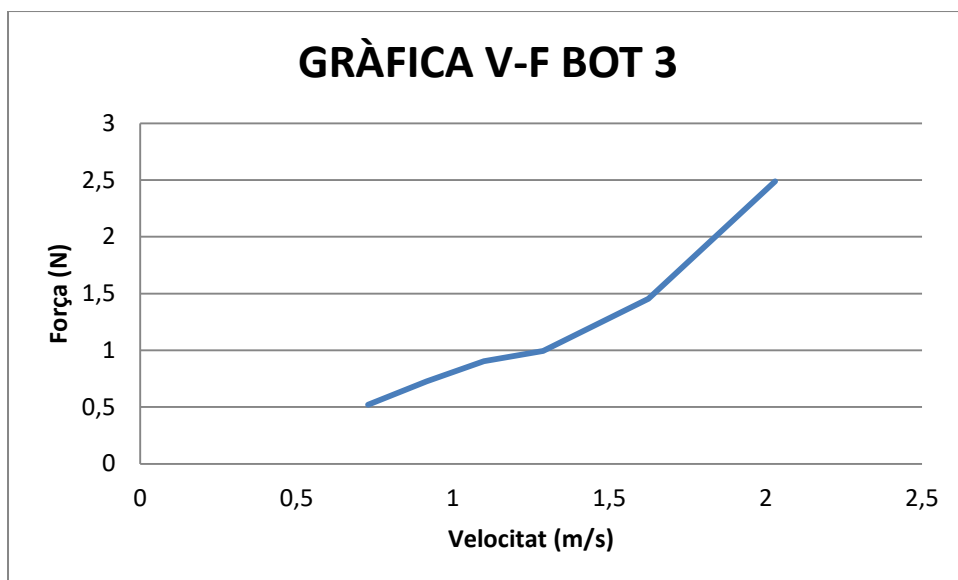


Gràfica 1: Velocitat - força bot 1

Bot 3

POTÈNCIA	VELOCITAT (m/s)	FORÇA (N)
2,4	0,728	0,521
3,4	0,916	0,727
4,3	1,099	0,905
4,9	1,288	0,995
6,5	1,625	1,455
7,2	1,693	1,981
8,4	2,030	2,488

Taula 2: Velocitat - força bot 3

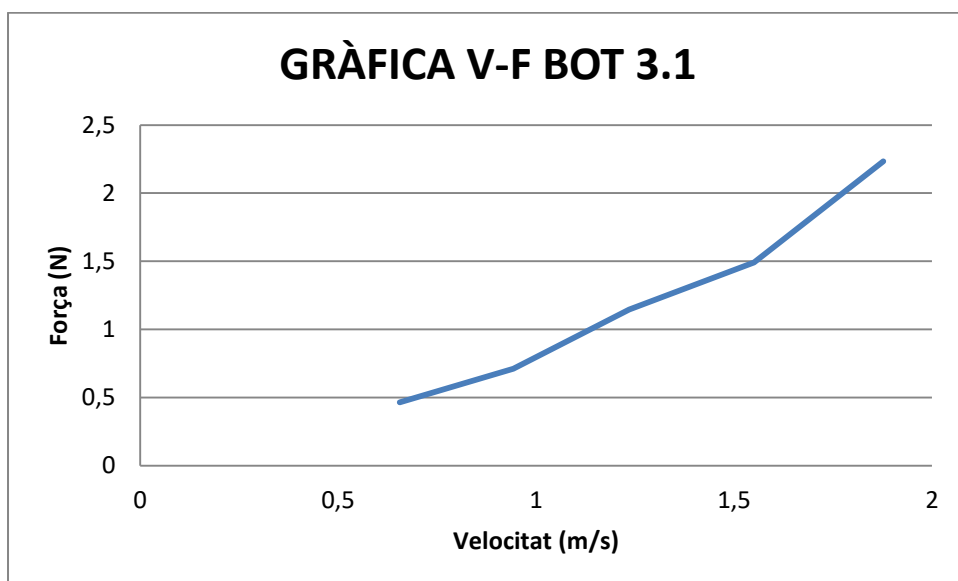


Gràfica 2: Velocitat - força bot 3

Bot 3.1

POTÈNCIA	VELOCITAT (m/s)	FORÇA (N)
2,3	0,655	0,464
3,6	0,942	0,710
4,9	1,235	1,146
6,5	1,550	1,490
7,9	1,877	2,233

Taula 3: Velocitat - força bot 3.1

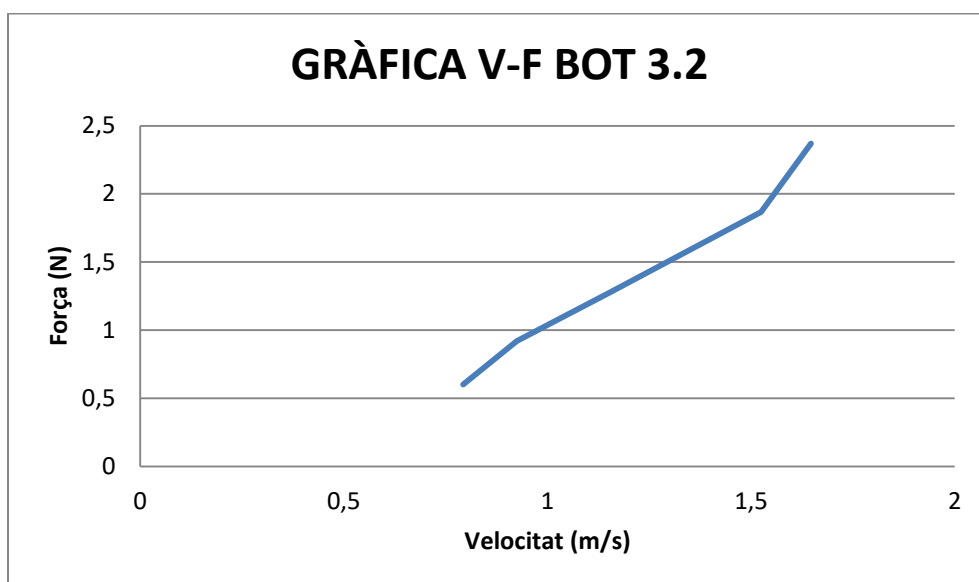


Gràfica 3: Velocitat - força bot 3.1

Bot 3.2

POTÈNCIA	VELOCITAT (m/s)	FORÇA (N)
2,9	0,793	0,600
3,6	0,925	0,920
5	1,155	1,280
6,7	1,525	1,866
7,3	1,647	2,370

Taula 4: Velocitat - força bot 3.2

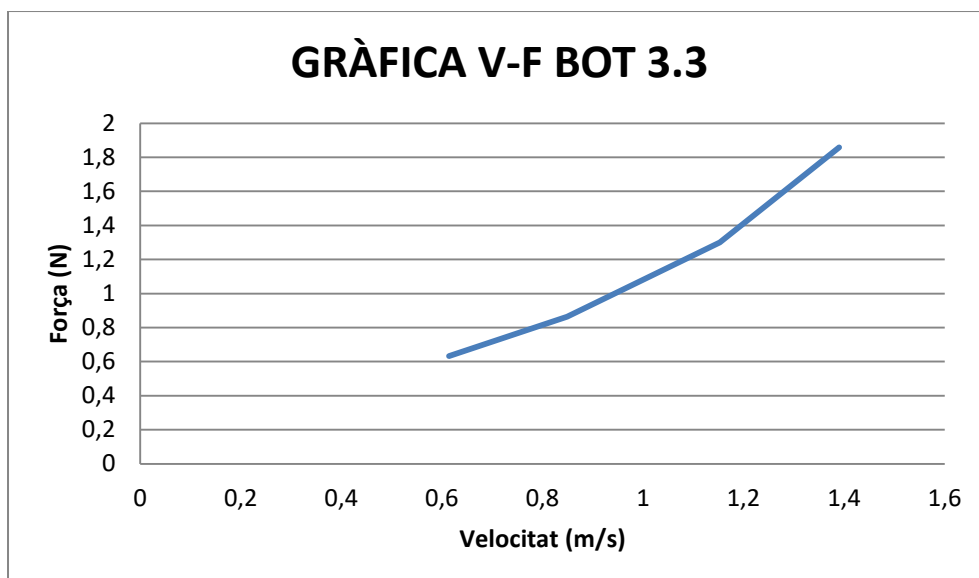


Gràfic 4: Velocitat - força bot 3.2

Bot 3.3

POTÈNCIA	VELOCITAT (m/s)	FORÇA (N)
2,2	0,614	0,632
3,4	0,849	0,863
4,9	1,153	1,300
6,3	1,390	1,858

Taula 5: Velocitat - força bot 3.3

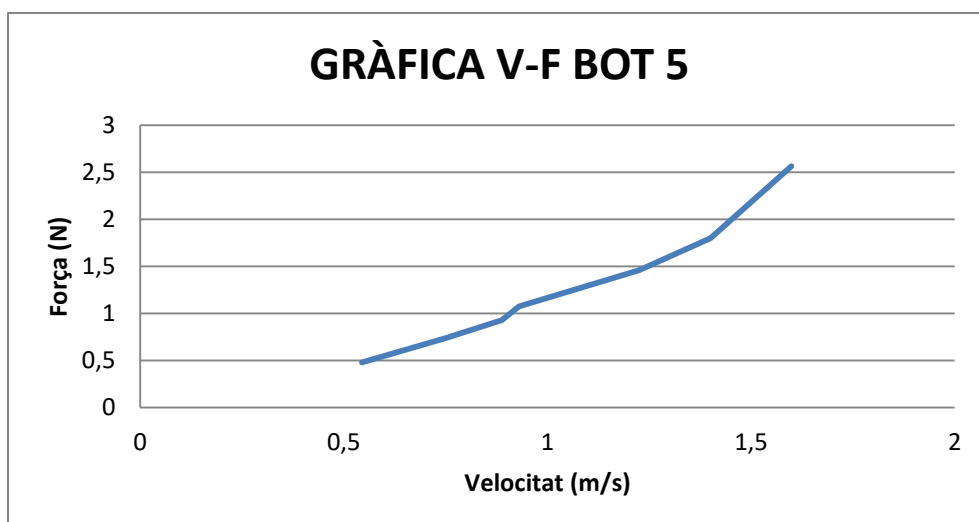


Gràfica 5: Velocitat - força bot 3.3

Bot 5

POTÈNCIA	VELOCITAT (m/s)	FORÇA (N)
2	0,544	0,478
3,2	0,750	0,738
4,1	0,888	0,928
4,6	0,930	1,073
5,5	1,225	1,460
6,3	1,400	1,800
7,2	1,599	2,563

Taula 6: Velocitat - força bot 5

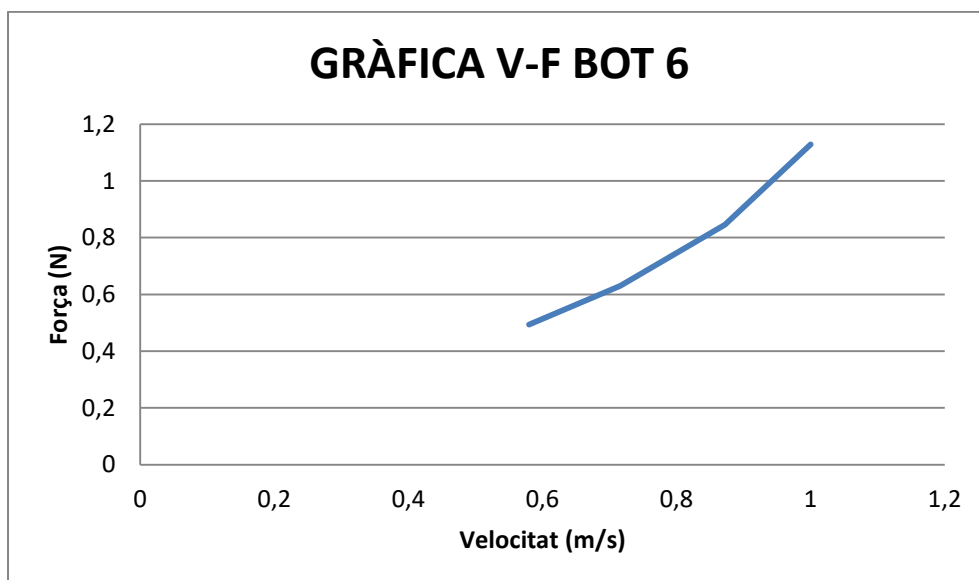


Gràfica 6: Velocitat - força bot 5

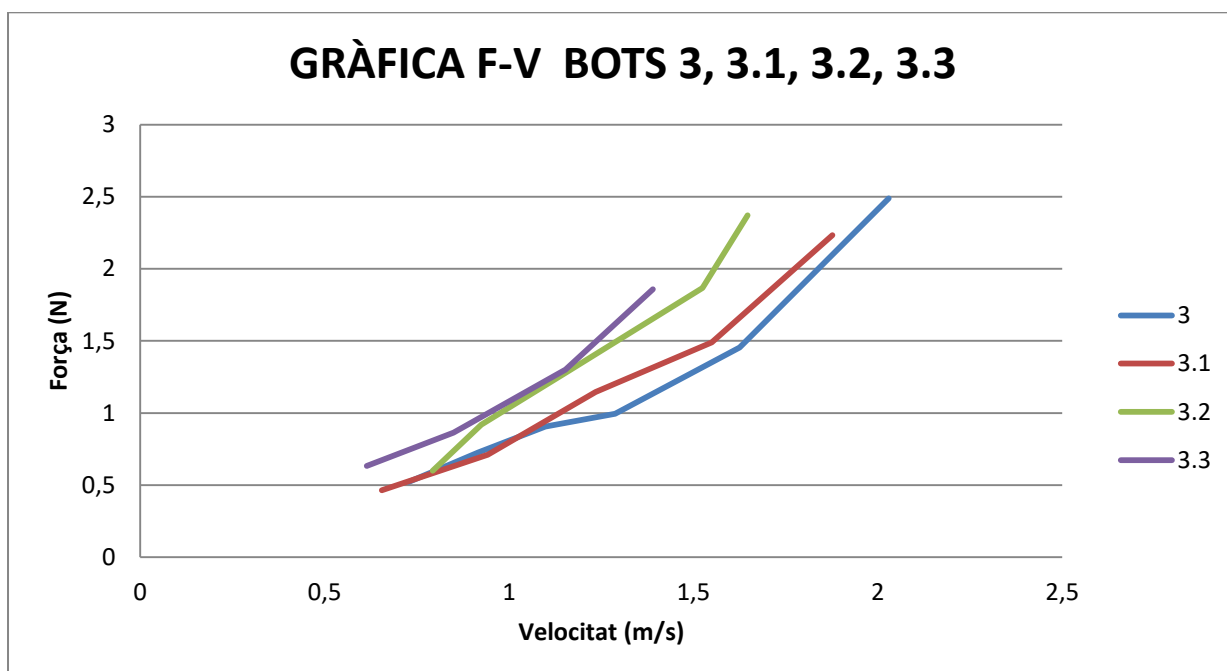
Bot 6

POTÈNCIA	VELOCITAT (m/s)	FORÇA (N)
2,3	0,580	0,494
2,8	0,716	0,630
3,6	0,872	0,845
4,6	0,910	1,128

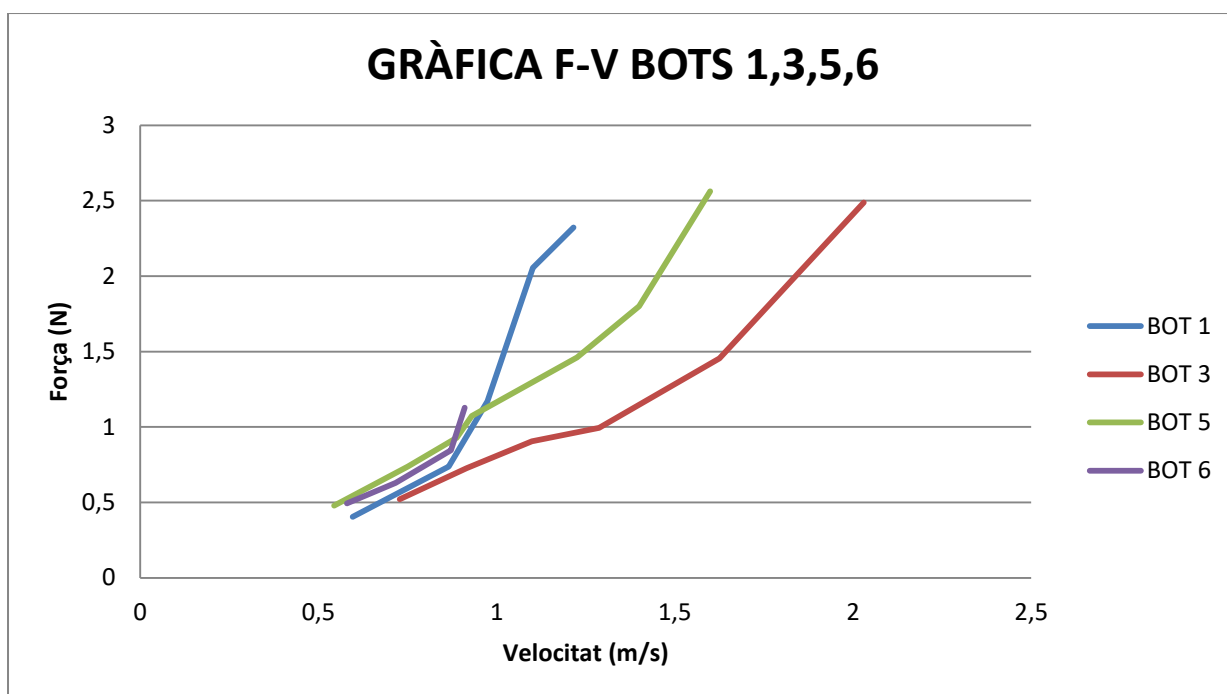
Taula 7: Velocitat - força bot 6



Gràfica 7: Velocitat - força bot 6



Gràfica 8: Comparació entre el bot 3 i els seus derivats



Gràfica 9: Comparació entre els bots de diferent forma

6.7 Càlcul de l'exponent de la velocitat (n)

Per trobar l'exponent de la velocitat "n" partim de la fórmula: $F=k \cdot v^n$

Suposant $F=k \cdot v^n$

Aplico logaritmes

$\log F = \log(k \cdot v^n)$

$\log F = \log k + \log v^n$

$\log F = \log k + n \cdot \log v$

Ajusto una recta $y=a+b \cdot x$

Aplicant logaritmes i ajustant una recta tenim els següents valors de n.

Calculo la n per a cada bot i faig la mitjana.

BOT	n
3	1,497
3.1	1,478
3.2	1,734
3.3	1,302
5	1,496
6	1,665
MITJANA	1,529
Desviació	0,153
Error absolut	0,187
Error relatiu	12,235

Taula 8: càlcul de la n mitjana per a tots els bots

6.8 Càlcul de la resistència K

Suposant $n=1,5$, calculo K per a cada potència i cada bot. Fent una mitjana, calculo la k del bot

Bot 3

POTÈNCIA	VELOCITAT	FORÇA	K
2,4	0,728	0,521	0,847
3,4	0,916	0,727	0,832
4,3	1,099	0,905	0,784
4,9	1,288	0,995	0,676
6,5	1,625	1,455	0,692
7,2	1,693	1,981	0,885
8,4	2,030	2,488	0,842
		MITJANA	0,794
		Desviació	0,081
		Error absolut	0,092
		Error relatiu	11,556

Taula 9: càlcul de K per el bot 3

Bot 3.1

POTÈNCIA	VELOCITAT	FORÇA	K
2,3	0,655	0,464	0,887
3,6	0,942	0,710	0,778
4,9	1,235	1,146	0,829
6,5	1,550	1,490	0,762
7,9	1,877	2,233	0,852
		MITJANA	0,822
		Desviació	0,052
		Error absolut	0,069
		Error relatiu	8,428

Taula 10: càlcul de K per el bot 3.1

Bot 3.2

POTÈNCIA	VELOCITAT	FORÇA	K
2,9	0,793	0,600	0,856
3,6	0,925	0,920	1,037
5	1,155	1,280	1,027
6,7	1,525	1,866	0,979
7,3	1,647	2,370	1,105
		MITJANA	1,001
		Desviació	0,093
		Error absolut	0,124
		Error relatiu	12,417

Taula 11: càlcul de K per el bot 3.2

Bot 3.3

POTÈNCIA	VELOCITAT	FORÇA	K
2,2	0,614	0,632	1,333
3,4	0,849	0,863	1,109
4,9	1,153	1,300	1,046
6,3	1,390	1,858	1,123
		MITJANA	1,152
		Desviació	0,125
		Error absolut	0,187
		Error relatiu	16,261

Taula 12: càlcul de K per el bot 3.3

Bot 5

POTÈNCIA	VELOCITAT	FORÇA	K
2	0,544	0,478	1,213
3,2	0,750	0,738	1,146
4,1	0,888	0,928	1,114
4,6	0,930	1,073	1,199
5,5	1,225	1,460	1,070
6,3	1,400	1,800	1,076
7,2	1,599	2,563	1,249
		MITJANA	1,152
		Desviació	0,070
		Error absolut	0,079
		Error relatiu	6,900

Taula 13: càlcul de K per el bot 5

Bot 6

POTÈNCIA	VELOCITAT	FORÇA	K
2,3	0,580	0,494	1,137
2,8	0,716	0,630	1,050
3,6	0,872	0,845	1,042
4,6	0,910	1,128	1,303
		MITJANA	1,133
		Desviació	0,121
		Error absolut	0,182
		Error relatiu	16,044

Taula 14: càlcul de K per el bot 6

6.9 Comparació i discussió dels resultats

El muntatge experimental ha estat difícil i s'ha intentat ser rigorós en el càlcul d'errors. Els errors estan a l'entorn del 5-15%, fet que permet comparar els resultats amb certa fiabilitat.

Excloent els bots 2 i 4, amb els quals no s'ha assajat, podem resumir els resultats en:

PERFIL	CONSTANT K
Bot 3	0,794N·s/m
Bot 3.1	0,822 N·s/m
Bot 3.2	1,001 N·s/m
Bot 3.3	1,152 N·s/m
Bot 5	1,152 N·s/m
Bot 6	1,133 N·s/m

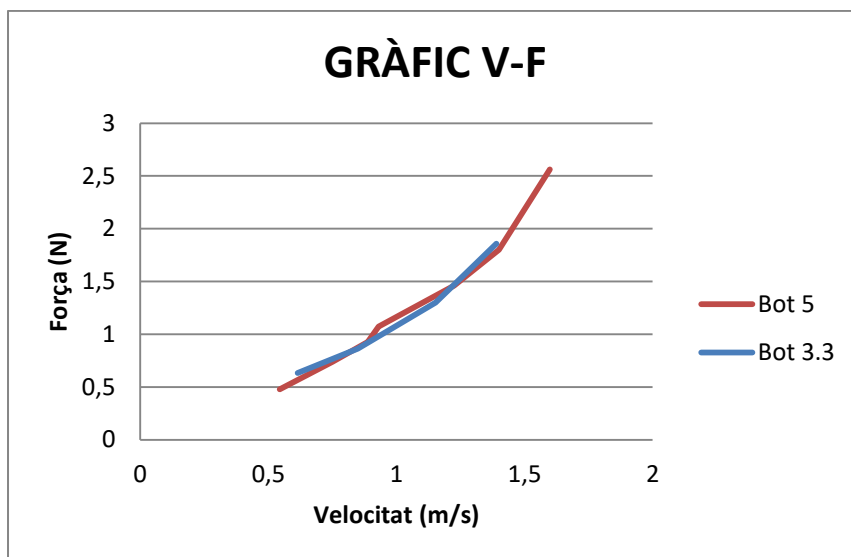
Taula 15: Resultats resumits

Tenint en compte que la constant K és proporcional a la força de resistència, podem determinar quin ha estat el comportament dels perfils:

En primer lloc, observem que el bot 3 és el que ofereix menys resistència a l'aigua amb una K de 0,794N.s/m, molt menor que els altres dos bots dissenyats per mi. D'entrada, aquest resultat no és sorprenent, ja que es tracta de la rèplica idèntica d'un bot de competició estàndard. Aquest no va ser pròpiament dissenyat per mi, sinó que és el resultat d'anys d'estudi i perfeccionament.

També ens crida l'atenció que la constant K del bot 5 i el bot 3.3 ha coincidit. Això significa que oposen la mateixa resistència a l'avanç i, des del punt de vista hidrodinàmic, són els dos perfils menys optimitzats.

A la següent representació podem veure com les dues gràfiques se sobreposen, gairebé coincidint.



Gràfica 10: comparació resultats dels bots 3.3 i 5

7. Conclusions

Una vegada acabat el treball estic satisfet amb els resultats obtinguts. Les conclusions obtingudes són:

- He assolit l'objectiu d'identificar i descriure les forces de resistència que actuen en un bot de rem, ja que com hem vist a l'apartat 4.1 del treball la força de resistència total d'un bot es pot descompondre en diferents components entre els quals, les principals són les **resistències de pressió** tan **frontal** com **de succió o rebuf**, la **resistència deguda a la forma** i la **resistència de fricció o fregament** deguda al frec del perfil amb la capa de fluid més propera i al frec d'unes capes de fluid amb altres al llarg de tota l'amplada de la capa límit. En el meu cas, la més important és la resistència de forma.

- Pel que fa a l'objectiu de dissenyar i construir maquetes a escala de bots de rem, no pensava que me'n sortiria tant bé a l'hora de dur-ho a terme. En aquest aspecte no he tingut massa dificultat i he assolit amb èxit l'objectiu. D'altra banda cal destacar que el procés de construcció comporta molta **dedicació**. Si hagués disposat de més temps m'hagués agradat fabricar alguna maqueta més.
- També he assolit l'objectiu de conèixer el funcionament d'un canal d'experiències hidrodinàmiques, fins al punt de poder idear el meu propi canal d'aigües tranquil·les. Tal com hem vist a l'apartat 5.2 del treball, les funcions principals d'un canal d'aigua són la realització de diferents **assajos de remolc**, sent el més habitual el que té com a objectiu fer **recerca al voltant de la resistència a l'avanç** per optimitzar la forma de les embarcacions.
- La construcció del canal d'aigua va passar per diferents etapes. En un primer moment em va semblar més senzill realitzar un canal en què el bot estigués quiet mentre fos el fluid el que circula. Més endavant em vaig adonar que, des d'un punt de vista hidrodinàmic, seria més eficaç remolcar els perfils seguint el mateix mètode emprat en els canals d'aigua reals. Per tant s'ha aconseguit l'objectiu de construir un canal d'aigua i amb ell he dut a terme un assaig de remolc que consisteix en recopilar la força que es necessita per estirar un perfil a diferents velocitats.
- Un cop enllestits els assajos, he obtingut la relació entre la velocitat i la força. Assumint que existeix una única força de resistència que és proporcional a una constant K i a la velocitat elevada a un exponent com s'expressa a la fórmula: $F=k \cdot v^n$. He deduït que l'exponent n al que està elevat la velocitat és 1,529. No s'allunya gaire de les teories que afirmen que la força de resistència varia de manera gairebé quadràtica amb la velocitat.
- A partir de la n trobada, he calculat la constant de proporcionalitat K de cada bot. Els resultats obtinguts es resumeixen a la següent taula:

BOT	Bot 3	Bot 3.1	Bot 3.2	Bot 3.3	Bot 5	Bot 6
CONSTANT K en N·s/m	0,794	0,822	1,001	1,152	1,153	1,133

Donat que el marge d'error relatiu està entre el 5-15% podem comparar els resultats amb certa fiabilitat.

A la taula, observem que el bot 3, és a dir, el que té la forma d'un bot de rem estàndard de competició és el que oposa menys força de resistència a l'avanç. Aquest resultat era l'esperat i confirma la hipòtesi inicial on vaig preveure la poca probabilitat d'optimitzar el disseny d'un bot de competició.

D'altra banda, veiem que el perfil 5 amb la forma semblant a una gota ha estat dels que més resistència ha oposat. A més, ens fixem que els bots 5 i 3.3 han oposat pràcticament la mateixa resistència. Això pot ser degut a que, tenint en compte que el bot 5 té un acabat arrodonit i que el bot 3.3 acaba amb angle recte, els dos deuen haver experimentat unes importants resistències de succió.

- Referent a la hipòtesi que vaig postular a l'inici del treball, en la qual es predeia que a mesura que anés escurçant la popa del bot i, per tant augmentant l'àrea posterior es generaria un règim turbulent que l'empenyeria, contrarestant així la resistència de fricció, ha resultat ser tot el contrari ja que a mesura que he anat retallant el bot, he observat que augmentava la resistència. Crec que aquest fet és degut precisament a aquesta resistència de succió generada pels rebufls que, al contrari del que creia, alenteixen l'avanç del bot.
- Pel que fa a la metodologia seguida, penso que ha estat la correcta però m'hagués anat bé tenir més temps i poder realitzar els plànols de les maquetes amb programes de disseny en 3D abans de construir-les.
- Com a plantejament de millora de cares a estudis futurs proposo que es realitzin els assajos a un canal d'aigua real i, si fos possible, emprant bots a

escala real. A més, es podrien complementar els assajos amb simulacions en sistemes CFD¹⁸.

7.1 Conclusions personals:

- Un cop finalitzat el treball he conclòs que el tema tractat és un tema complex però alhora apassionant. A nivell teòric pot semblar una disciplina feixuga, però a nivell pràctic es tracta d'un àmbit distret, i més si t'agrada l'experimentació, com és el meu cas.
- He trobat molt interessant poder treballar al taller de fusteria ja que, amb els cinc anys que porto estudiant a l'institut, encara no estava familiaritzat amb el que s'hi fa.
- També ha estat interessant conèixer com s'anomenen realment les parts del bot en català, ja que els esportistes no utilitzem tots els termes que hem vist a l'apartat 2.1.
- Estic especialment orgullós de la capacitat que he tingut de solucionar les dificultats i imprevistos que se m'han presentat al llarg del treball. El que per mi ha estat més complicat ha sigut mantenir l'estabilitat de les maquetes durant els assajos, per aconseguir-ho vaig haver de dissenyar uns pontons estabilitzadors que mantinguessin l'equilibri del bot. Un altre problema freqüent que em vaig trobar realitzant els assajos va ser el fet que en algunes ocasions els perfils no seguien una trajectòria prou recta, per aquest motiu vaig haver de fer molts intents.
- També estic content d'haver-me'n sortit en el procés d'obtenció de dades, donat que no estava familiaritzat ni amb el programa MultiLab ni el Tracker, que havíem utilitzat a l'institut en poques ocasions. A mesura que vaig anar fent servir aquestes eines vaig comprendre el seu funcionament.

¹⁸ **Computational fluid dynamics o mecànica de fluids computacional:** és una branca de la mecànica de fluids que utilitza anàlisis numèriques i estructures de dades per resoldre i analitzar problemes que impliquen fluxos de fluids.

Llista de referències

Bibliografia

Joseph, J., Garófano, F., Carol, J., i Reyes, J. (2005). *Mecànica Batxillerat* (1a ed.). Barcelona: McGrawHill.

Ortega, M. R. (1984). *Lecciones de Física: Mecánica 3* (3a ed.). Bellaterra: Departamento de Física Fundamental, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Barcelona.

Generalitat de Catalunya, Departament de Cultura. (1991). *Diccionari de rem* (1a ed.). Barcelona: Enciclopèdia Catalana./ Termcat, Centre de Terminologia.

Generalitat de Catalunya, Departament de la Presidència, Secretaria General de l'Esport. (1992). *Rem: Reglament oficial* (1a ed.). Barcelona: Enciclopèdia Catalana./ Esport Català.

Direcció General d'Esports. (1992). *Manual de formació: Rem* (1a ed.). Barcelona: COOB'92.

FISA, Fédération Internationale des Sociétés d'Aviron, The International Rowing Federation. (2006). *2006 FISA WORLD ROWING DIRECTORY* (9a ed.). Lausana: World Rowing.

COOB'92, S.A. (1992). *Manual d'equip: Rem* (1a ed.). Barcelona: COOB'92.

COOB'92, S.A. (1992). *Llibret explicatiu: Rem* (1a ed.). Barcelona: COOB'92.

Nilsen, T. (1978). *Remo Olímpico: Introducción a la fisiología, técnica y material* (1a ed.). Banyoles: -.

Webgrafia

Ministerio de Defensa. (2017). *CEHIPAR, Canal de Experiencias Hidrodinámicas de el Pardo*. Recuperat de <http://www.cehipar.es/>

Douglas, C. (2017). *Carl Douglas Racing Shells*. Recuperat de <http://www.carldouglasrowing.com>.

Janousek, S., i Stampfli, T. (2017). *Janousek & Stampfli Racing Boats*. Recuperat de <http://janousekandstampfli.com/>.

Federación Española de Remo. (2017). *Federemo - Federación Española de Remo*. Recuperat de <http://federemo.org/>.

Stephen, V. (2017). *MakerBot Thingiverse*. Recuperat de www.thingiverse.com.

García, J. (-). *Un método de elementos finitos para análisis hidrodinámico de estructuras navales*. Recuperat de http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6869/08_garciaEspinosa_conclusions.pdf?sequence=8.

Facultad de Ciencias del Deporte, Universidad de Castilla la Mancha. (-). *Biomecánica de las Técnicas Deportivas (3º)*. Recuperat de <https://previa.uclm.es/profesorado/xaguado/ASIGNATURAS/BTD/4-Apuntes/08.pdf>.

Salasa, M., Sahoob, P., i Luoca, R. (-). *Avances en la estimación de la resistencia de catamaranes*. Recuperat de <https://fr.scribd.com/document/341386786/Avances-en-la-estimacion-de-la-resistencia-de-catamaranes-pdf>.

Aláez, J. (-). *Los ensayos con modelos y el desarrollo de la hidrodinámica*. Recuperat de <http://www.cehipar.es/files/users/publicaciones/147.pdf>.

Villagómez, J.C. (-). *Avances en Hidrodinámica Experimental en el Canal de Pruebas de la Universidad Nacional de Ingeniería*. Recuperat de <http://studylib.es/doc/7168818/avances-en-hidrodin%C3%A1mica-experimental-en-el-canal-de>.

Jimenez, E.M. (-). *Diseño numerico-experimental de un bulbo de proa para una embarcación pesquera tipo cerco*. Recuperat de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/704/1/jimenez_le.pdf.

Howland, J., Qin, Z., i Dewhurst, T. (-). *Using Computational Fluid Dynamics to Predict Drag on a Boat Hull*. Recuperat de https://works.bepress.com/timothy_dewhurst/72/.

Universitat Politècnica de Catalunya. (-). *Medidas de ahorro de combustible. Resultados del proyecto: resto de medidas*. Recuperat de http://nautica.gencat.cat/web/.content/05-escola-capacitacio-nauticopesquera-cat/documents/fitxers-binariis/v_resultados_proyecto_resto_medidas.pdf.