POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi delle caratteristiche idrodinamiche di tavole da surf attraverso strumenti di fluidodinamica computazionale

Relatore

firma del relatore (dei relatori)
prof. Domenic D'Ambrosio
.....
.....

Candidato

firma del candidato
Matteo Pastuglia

Anno Accademico 2020/2021

Dedico questo spazio a chi con dedizione e pazienza ha contribuito alla mia formazione professionale e umana e alla realizzazione del mio progetto di vita.

Un ringraziamento particolare al mio relatore professore Domenic D'Ambrosio che mi ha guidato con suggerimenti e consigli in ogni step della realizzazione dell'elaborato e con il quale condivido la passione per il surf.

Ringrazio mia madre e mio padre che mi hanno accompagnato fino a questo traguardo e mi hanno sempre sostenuto nelle mie scelte e supportato per la realizzazione dei miei sogni.

Ringrazio i parenti che mi sono stati sempre vicini nel mio percorso di vita e hanno contribuito alla mia crescita personale e umana.

Grazie anche ai miei amici che hanno condiviso con me gioie, sacrifici, successi e hanno reso più spensierate e allegre le mie giornate.

INTRODUZIONE

Il surf è una disciplina che risale alla metà del 1700, le cui fonti storiche raccontano di alcuni polinesiani che tentavano di scivolare con delle tavole di legno sulle onde. Questo sport si è affermato a partire dagli anni Settanta, quando si usavano tavole molto grandi ("longboard") per cavalcare le onde, e ha suscitato un crescente interesse anche grazie alla moderna tecnologia che ha permesso di costruire tavole molto più leggere e performanti. Inizialmente le tavole erano realizzate in legno (materiale molto pesante) e in seguito alla scoperta di materiali più performanti sono state costruite con poliuretano espanso, fibra di vetro e fibra di carbonio, più leggeri e resistenti.

Lo scopo del seguente elaborato è quello di studiare come variano i parametri aerodinamici (portanza e resistenza) modificando la geometria delle tavole da surf, in particolare rocker, rails e tail.

Il disegno CAD è stato eseguito mediante il software BoardCad (licenza gratuita) che permette di modificare una tavola di default mediante lo spostamento di alcuni punti di controllo.

Per la simulazione idrodinamica è stato usato il software StarCcm+ che risolve le equazioni di Navier-Stokes permettendo, quindi, di studiare come varia velocità, pressione e scia all'interno del dominio di riferimento.

Con questo lavoro si è tentato di inserire la CFD all'interno del mondo del surf al fine di migliorarne lo sviluppo tecnologico e le caratteristiche semplicemente attraverso la modifica di un disegno CAD, senza dover costruire numerosi e costosi prototipi.

INDICE

INTRODUZIONE 4
1. STORIA E CARATTERISTICHE DEL SURF 7
1.1 INTRODUZIONE 7
1.2 MATERIALI 7
1.3 PARAMETRI GEOMETRICI 9
1.3.1 ROCKER 10
1.3.2 FORMA DEL BOTTOM 11
1.3.3 RAILS 13
1.3.4 TAIL 14
2. MODELLO CAD 16
2.1 BOARDCAD 16
2.2 RHINOCHEROS 21
3. STUDIO DINAMICO PRELIMINARE 23
3.1 INTRODUZIONE 23
3.2 IDRODINAMICA DEL SURF 23
3.2 FORZE 24
3.2.1 GALLEGGIABILITÀ 24
3.2.2 GRAVITÀ 25
3.2.3 ATTRITO 26
3.2.4 PORTANZA 27
3.2.5 MOMENTI 28
3.3 PARAMETRI UTILIZZATI 28
3.4 TEORIA DELLE ONDE DI KELVIN 29
4. SOFTWARE PER LA SIMULAZIONE 31
4.1 CAD 31
4.1.1 IMPORTAZIONE DEL CAD 31
4.1.2 CREAZIONE BLOCCHI DI RAFFINAMENTO 36
4.2 CREAZIONE DELLA PARTE 37
4.3 GENERAZIONE DI UNA REGIONE 40
4.4 GENERAZIONE DELLA MESH 41
4.5 CREAZIONE MODELLO DINAMICO 48
4.6 MODELLO FISICO 49

5. ELABORAZIONE RISULTATI _____ *52*
5.1 SIMULAZIONE DINAMICA PRELIMINARE _____ *52*
5.2 ROCKER_06 _____ *57*
5.3 ROCKER_09 _____ *59*
5.4 ROCKER_12 _____ *61*
5.4 RISULTATI FINALI _____ *63*
6. SVILUPPI FUTURI _____ *68*
APPENDICE A _____ *69*

1. STORIA E CARATTERISTICHE DEL SURF

1.1 INTRODUZIONE

Il surf si è diffuso soprattutto tra gli anni ’60 e ’70 e ha come scopo quello di “cavalcare” un’onda tramite l’utilizzo di una tavola in legno o in poliuretano espanso. I surfboard variano in base al peso dell’atleta, allo stile e alle dimensioni dell’onda; ad esempio, per eseguire manovre freestyle vengono usate tavole di dimensioni ridotte dette “shortboard” che offrono maggiore manovrabilità e leggerezza, mentre per surfare onde alte e ripide sono più adatte tavole grandi, dette “longoboard”, che garantiscono maggiore stabilità.

1.2 MATERIALI

La tavola è composta da tre componenti assemblate:

- L’anima, detta anche “blank”, ovvero la schiuma utilizzata per creare la tavola
- Il longherone, un’asta in legno (generalmente in balsa) disposta longitudinalmente nella zona mediana della tavola, conferisce, come avviene in ambito aeronautico, rigidità e resistenza all’intera struttura; con l’introduzione della fibra di carbonio in sostituzione del legno si è avuto, negli ultimi anni, un notevole miglioramento per quanto riguarda il flex della tavola.
- Resine e fibre utilizzate per rivestire e rendere impermeabile il blank e per conferire resistenza alla struttura.

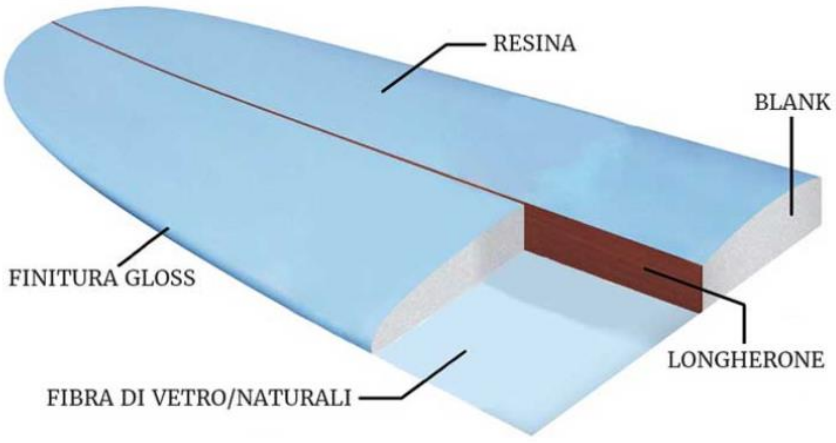


Figura 1-1 Struttura tavola da surf [da 12]

Il “blank” è il materiale con cui è costruita la parte interna della tavola ed influisce in maniera significativa sul suo peso. Una tavola molto leggera, ad esempio, ha come vantaggio un’elevata galleggiabilità e manovrabilità ma una bassa resistenza all’impatto che può provocarne la rottura in seguito a cadute sull’acqua. Il giusto compromesso sta quindi nel realizzare una tavola con una buona galleggiabilità senza andare a discapito della resistenza. I materiali con cui è costruito il blank sono principalmente tre:

- POLIURETANO: materiale maggiormente usato negli anni ’50 perché aveva le caratteristiche di essere leggero, flessibile e duttile; in seguito si è scoperto essere tossico durante la lavorazione e per questo motivo venne abbandonato.
- POLISTIRENE ESPANSO: è una particolare versione del polistirolo che viene usato più diffusamente per i comuni imballaggi, anche conosciuto come EPS. Si tratta di un materiale molto leggero e resistente, ma risulta abbastanza difficile da modellare a mano e ha la capacità di assorbire acqua; per questo motivo deve essere impermeabilizzato con apposite resine idrorepellenti.
- LEGNO: materiale con il quale erano costruite le prime tavole; vengono usati preferibilmente i legni di Paulownia o Balsa per la loro minore densità che conferiscono alla tavola leggerezza e flessibilità. Questi materiali sono più pesanti rispetto al Poliuretano e all’ EPS, ma hanno comunque un buon galleggiamento e si deformano di meno con il passare degli anni.

  La struttura interna dei surfboard realizzati in legno è simile a quella usata in campo aerospaziale dell’ala dell’aereo. Infatti, come si può osservare nella fig. 2-1 , vengono posizionate delle centine disposte perpendicolarmente al longherone per conferire una certa rigidità alla struttura.

Figura 2-1 Interno tavola da surf [da 12]

In seguito alla costruzione e modellazione del blank si applicano delle resine per rendere impermeabile e resistente la tavola che possono derivare sia da fibre naturali sia da processi chimici:

- RESINA EPOSSIDICA/VETRORESINA: questo tipo può essere utilizzato unicamente quando il blank è in polistirene e con tavole costruite in EPS; questa resina è dotata di una buona resistenza alla frattura e presenta un grado di tossicità inferiore rispetto alla resina poliestere.

Nel campo delle resine naturali vengono utilizzate più frequentemente due tipi:

- FIBRE DI LINO E JUTA: sono capaci di resistere all'impatto con gli urti, in particolar modo la juta, che, essendo meno elastica e più resistente rispetto al lino, viene impiegata per tavole sottoposte a forti impatti con l'acqua.
- FIBRE DI BASALTO: è un materiale che deriva dalla roccia vulcanica ed è utilizzato per rinforzare le parti più sollecitate della tavola. [12]

1.3 PARAMETRI GEOMETRICI

La misura delle tavole da surf varia in base a molti fattori quali il peso del surfista, il tipo di onda da cavalcare e le manovre da eseguire.
Esistono molte configurazioni legate alle diverse esigenze d'uso, ma si possono individuare due grandi categorie:

- SHORTBOARD: come ci suggerisce la traduzione dall'inglese stiamo parlando di tavole corte che vengono principalmente usate su onde piccole in quanto consentono una buona manovrabilità. Sono usate da surfisti che vogliono praticare salti e rotazioni sulle onde.
- LONGBOARD: sono tavole più grandi rispetto alle shortboard sia per lunghezza che per volume e presentano un'elevata galleggiabilità e stabilità, il tutto a discapito però della manovrabilità; per questo sono maggiormente usate dai principianti.

Oltre a queste due macrocategorie sono state create molte tavole ibride che possiedono caratteristiche intermedie rispetto a quelle sopra descritte, proprio per offrire performance al rider in qualsiasi tipo di onda e condizione del mare.
Nella fig. 3-1 è possibile notare le differenze tra le varie tavole presenti nel mondo del surf.

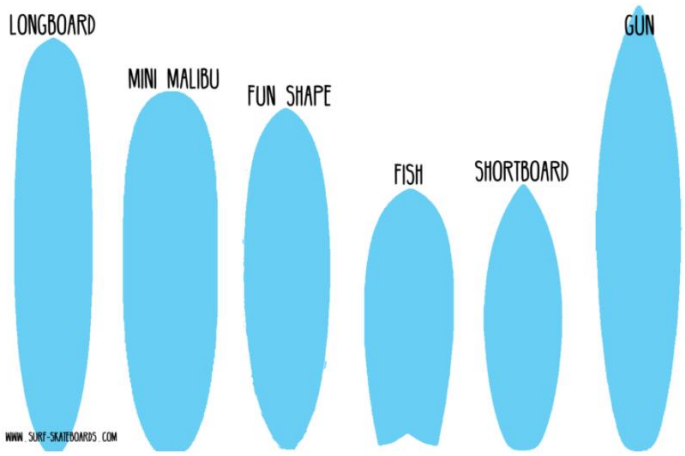


Figura 3-1 Tipi di tavole da surf [da 15]

Nel seguente elaborato è stata presa in esame una shortboard della quale sono stati modificati i seguenti parametri geometrici: rocker, rails, tail e bottom.

1.3.1 ROCKER

Il rocker, ovvero la "curvatura", è uno dei parametri fondamentali che determina galleggiamento, velocità e manovrabilità della tavola sull'onda.
Questa curvatura è fondamentale nelle tavole da surf in quanto permette alla struttura di adattarsi nelle parti più ripide dell'onda; infatti se la tavola fosse completamente piatta si impunterebbe sulla superficie dell'acqua.

Figura 4-1 Rocker [da 12]

In base alla curvatura più o meno accentuata si possono ottenere performance differenti.
Il rocker piatto ha il vantaggio di aumentare la galleggiabilità e la facilità nella planata, in quanto la superficie a contatto con l'acqua è maggiore e di conseguenza si viene a sviluppare un'alta spinta idrostatica (Principio di Archimede) che permette di surfare anche onde poco formate. Al contrario una tavola con poca curvatura ha una manovrabilità minore e tende ad impuntarsi nelle parti più ripide dell'onda.
Un rocker più accentuato, invece, aumenta la resistenza generale della tavola, rendendo di conseguenza più difficoltosa la remata e la partenza, ma fornendo una prestazione migliore nelle sezioni dove l'onda è ripida; la tavola risulta così più maneggevole e si presta a manovre freestyle in quanto fornisce un maggiore grip durante carvate e salti. Si comprende, quindi, perché questo tipo di tavole sono più utilizzate da surfisti esperti in cerca di performance particolari.
Nell'immagine in fig 5-1 sono illustrate le caratteristiche sopra descritte.

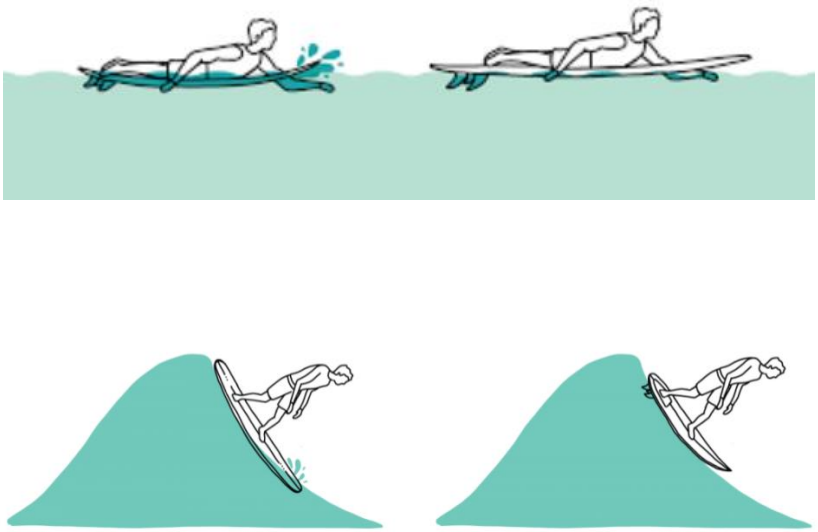


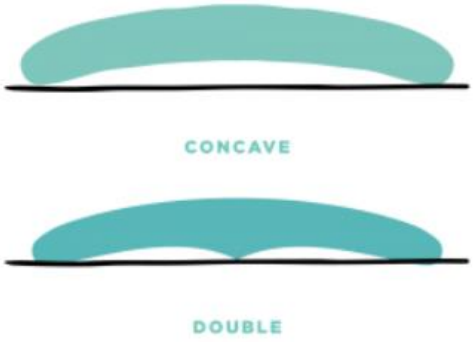
Figura 3-1 Influenza del rocker [da 12]

1.3.2 FORMA DEL BOTTOM

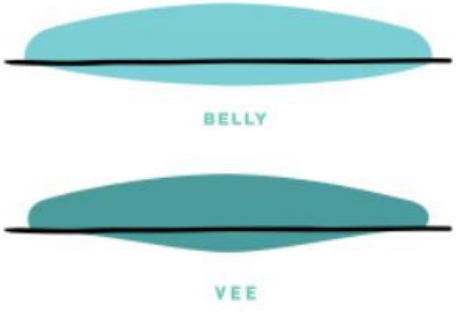
Il bottom è la geometria della parte inferiore della tavola, un fattore determinante per la stabilità e l'idrodinamica della struttura in quanto responsabile dell'incanalamento e della fuoriuscita dell'acqua.
Nelle tavole si hanno tre tipi di bottom in base alla loro forma:

1. PIATTO: questo tipo di fondo è ottimo per planare in superficie, infatti incrementa la galleggiabilità della tavola a discapito, però, della manovrabilità, che risulta molto più complicata; infatti è più facile perdere il controllo in quanto l'acqua non è incanalata nei binari.

2. CONCAVO: con un profilo di questo genere si ottiene un'ottima spinta verso l'alto, infatti, incanalando l'acqua al di sotto della tavola da surf invece di farla defluire dai bordi, si crea portanza e si riduce la resistenza complessiva. Oltre a fornire velocità i profili concavi aiutano i cambi di direzione rail to rail e soprattutto rendono la tavola più stabile durante la surfata.



3. CONVESSO: in questo tipo di tavola il punto più basso è immerso nell'acqua, il che agevola le transizioni rail to rail e rende la tavola molto maneggevole durante le carvate. Questa geometria porta degli svantaggi dal punto di vista della portanza e della resistenza, in quanto l'acqua non viene incanalata verso l'interno della tavola, ma viene fatta defluire verso l'esterno riducendone di conseguenza la velocità. Maggiori prestazioni si hanno con onde molto veloci dove la portanza è supportata dall'alta velocità dell'acqua.



Negli ultimi anni grazie allo sviluppo della fluidodinamica sono state studiate nuove tipologie di fondi con molti canali al fine di incrementare la velocità dell'acqua al di sotto della tavola, di aumentare la portanza e di ridurre la resistenza idrodinamica. Con la CFD è stato possibile lo studio sulle innovazioni in quanto si sono potuti simulare numerosissimi tipi di tavole senza il ricorso a prove sperimentali

1.3.3 RAILS

Il termine "rails" fa riferimento ai bordi laterali della tavola il cui spessore e forma incidono sulle caratteristiche della surfata, in particolare nei cambi di direzione.
Possiamo dividere i vari tipi di rails in due macrocategorie:

1. SOFT RAILS: hanno una forma molto arrotondata il che offre una buona galleggiabilità della tavola e permette di mantenere la velocità in uscita dalle curve. L'aspetto negativo di questa geometria è proprio la manovrabilità in quanto questi bordi non riescono a penetrare efficacemente l'acqua e di conseguenza non riescono a garantire un buon grip durante una curva.
2. HARD RAILS: hanno una geometria più spigolosa e, contrariamente ai soft rails, hanno poco galleggiabilità ma di contro offrono una buona manovrabilità durante le curve; per questa caratteristica vengono utilizzati nelle tavole più performanti e nelle short board.

Figura 6-1 Principali tipi di tail [da 12]

Nelle tavole più recenti si trovano diverse geometrie di rails all'interno della stessa tavola; solitamente nella parte posteriore, che sta maggiormente a contatto con l'acqua, vengono adoperate delle geometrie "hard" in modo da garantire una buona trazione sull'onda, mentre nella parte centrale sono impiegate geometrie più smussate in modo da aumentare la gallegggiabilità durante la remata.
Come è illustrato nella fig.7-1 esistono moltissime varianti di rail, di cui alcune sono state prese in esame più avanti per le simulazioni fluidodinamiche.

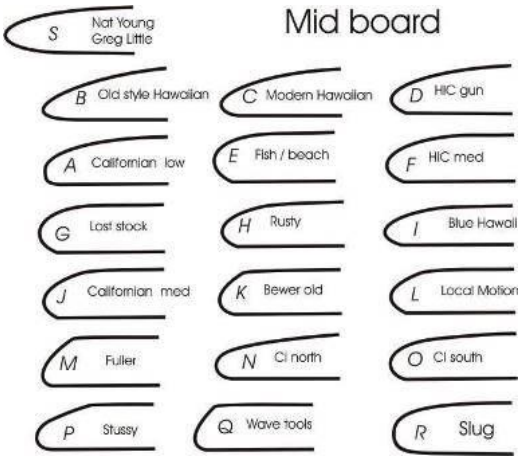


Figura 7-1 Tail presenti nelle tavole da surf [da 12]

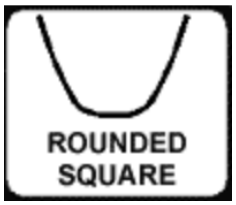
1.3.4 TAIL

La coda è una delle zone che determina l'uscita del flusso di acqua ed è la parte su cui viene posizionata la maggior parte del peso del surfista per le varie manovre. Ne esistono di diverse forme in base alla larghezza e alla geometria; più la coda è stretta maggiore sarà la manovrabilità della tavola a discapito della stabilità. Alcune sono più utilizzate nelle tavole odierne:

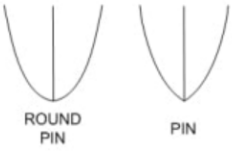
- CHOP SQUARE: il taglio netto crea dei bordi molto accentuati che conferiscono alla tavola delle ottime performance dal punto di vista della manovrabilità.

- SWALLOW: il taglio a coda di rondine viene utilizzato soprattutto per le tavole dei principianti in quanto garantisce delle ottime performance dal punto di vista della galleggiabilità.

- ROUNDED SQUARE: il bordo smussato è il tail maggiormente usato nelle tavole da surf e garantisce un buon compromesso tra manovrabilità e stabilità.



- PIN & ROUNDED PIN: la forma affusolata del bordo è preferibile nelle onde potenti perché permette di avere un buon controllo ma allo stesso tempo non rallenta la tavola conferendogli una buona velocità.



-

Negli anni gli shaper hanno inventato dei nuovi tipi di coda per venire incontro alle esigenze dei surfisti. Nell'immagine in fig. 8-1 sono rappresentate le principali code che esistono nel mondo del surf che si ispirano alle forme canoniche sopra descritte ma con delle leggere modifiche. [12]

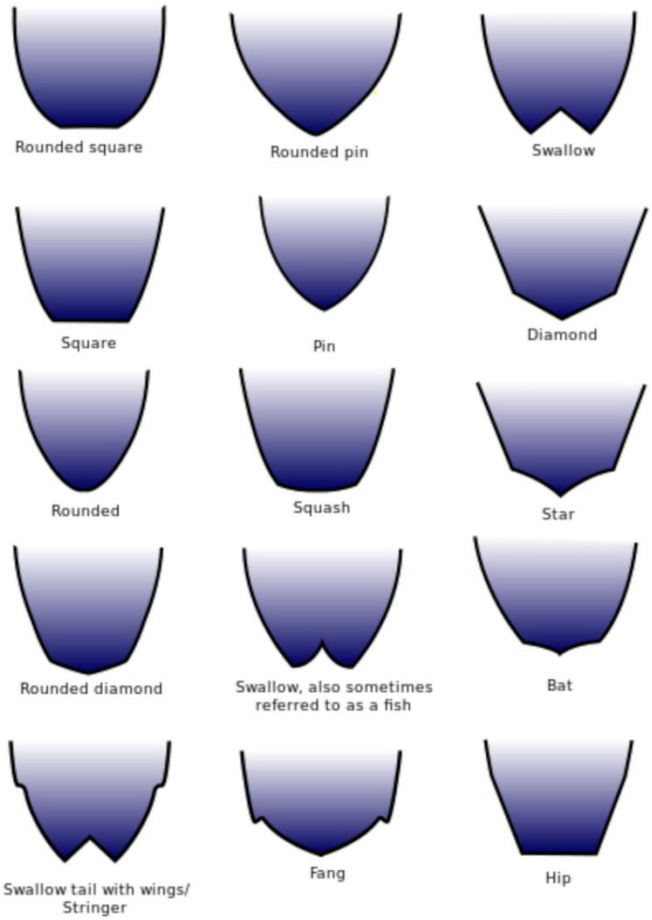


Figura 8-1 Tipi di tail usati nelle tavole da surf [da 12]

2. MODELLO CAD

Il modello CAD è stato realizzato attraverso BoardCad, un software parametrico open source che permette di modellare la tavola da surf partendo da una geometria di default.
Prima di scegliere tale software è stata condotta un'indagine di mercato sui vari programmi esistenti di surfboard design e questo è risultato essere il più completo e soprattutto il più vantaggioso in termini economici.

2.1 BOARDCAD

Di seguito vengono descritte le funzioni principali per disegnare una tavola da surf, modificare l'outline, il rocker e creare un modello 3D.
Normalmente per realizzare un nuovo progetto si parte da un modello di default, all'interno del programma si può scegliere fra tre differenti tipologie (shortboard, longboard e funboard) selezionando "file" e successivamente "new".
Nell'immagine in fig. 1-2 è raffigurata la schermata iniziale di BoardCad con la nostra tavola precedentemente selezionata, proiettata in tre viste bidimensionali (Outline, Profile e Cross section). Dapprima occorre impostare correttamente l'unità di misura al fine di evitare di dover convertire tutte le dimensioni una volta terminato il disegno; questa operazione può essere eseguita dalla schermata a tendina chiamata "unit" e, nel progetto in esame, sono stati scelti i millimetri, l'unità di misura più frequente nei disegni CAD.

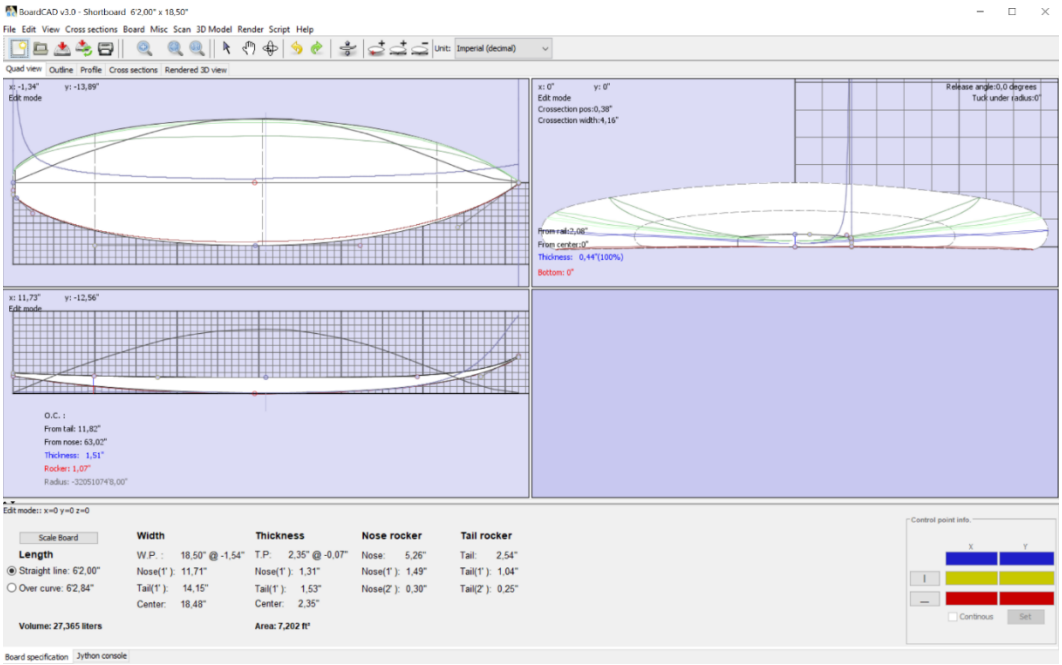


Figura 1-4 Schermata principale BoardCad

Si può ora procedere alla modifica delle curve partendo proprio dall'outline.
Come si può osservare nell'immagine in fig. 2-2 il contorno della tavola è formato da una serie di segmenti curvilinei che iniziano e finiscono in corrispondenza di un punto di controllo blu, a sua volta compreso tra altri due: uno rosso e uno giallo, che permettono di modificare la curva all'interno di uno specifico segmento. Per avere una curva continua tra due differenti segmenti è necessario cliccare sulla spunta in basso a destra denominata "continous", altrimenti tra un segmento e l'altro si avrà una linea spezzata.

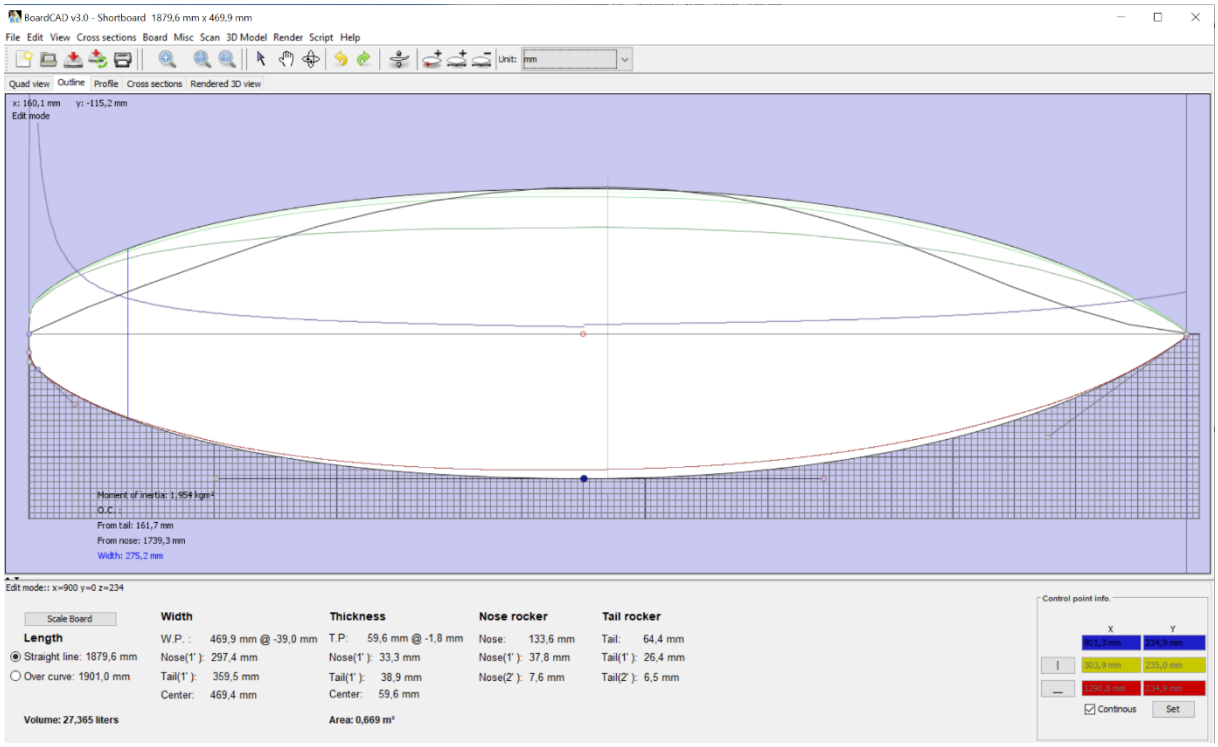


Figura 2-2 Outline tavola da surf

È possibile aggiungere anche uno o più control points per modificare lo *skecth* in alcune posizioni particolari, ma tali inserimenti se da un lato fornisce una maggiore libertà nel disegno dall'altro rende più difficile la creazione di linee regolari, quindi è un'operazione consigliabile solo quando è estremamente necessario e per la creazione di geometrie particolari.
Allo stesso modo per modificare il rocker basta selezionare *profile* e procedere alla modifica della geometria con i control point, come spiegato in precedenza.
Come ultima operazione si può modificare la *cross section*, in particolare la forma dei *rails* e del *bottom*. Per garantire una buona riuscita del disegno 3D si consiglia di modificare solo poche sezioni trasversali; ad esempio, si può iniziare dal centro della tavola per poi procedere con il *nose* e il *tail*, così da modificare la direzione del flusso dell'acqua in entrata e in uscita.

Per modificare una particolare zona della tavola è necessario selezionare nell'immagine sottostante (vista in sezione) la zona interessata e successivamente procedere alla modifica tramite l'ausilio dei control point.

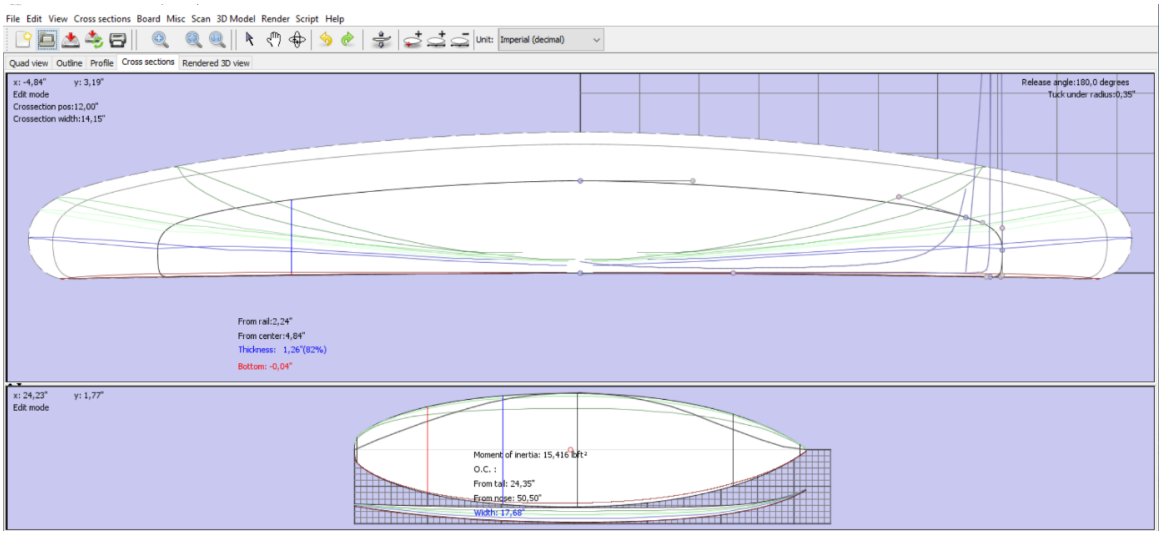


Figura 3-2 Cross section tavola da surf

Arrivati a questo punto si sceglie se procedere alla stampa del disegno bidimensionale oppure passare alla creazione di un modello tridimensionale; quest'ultima operazione diventa obbligatoria nel caso in cui si vuole usare il modello su un altro software CAD oppure far costruire la tavola da un sistema CNC. Per fare ciò è necessario selezionare nel menù *3D model* la funzione *Approximate from Beizer* che in pochi istanti crea un modello 3D derivante dall'approssimazione delle curve 2D. Fatto ciò è possibile procedere alla modifica di quelle parti non editabili nella parte bidimensionale, come la creazione della *swallow tail* e la scalatura del *rocker* della tavola.

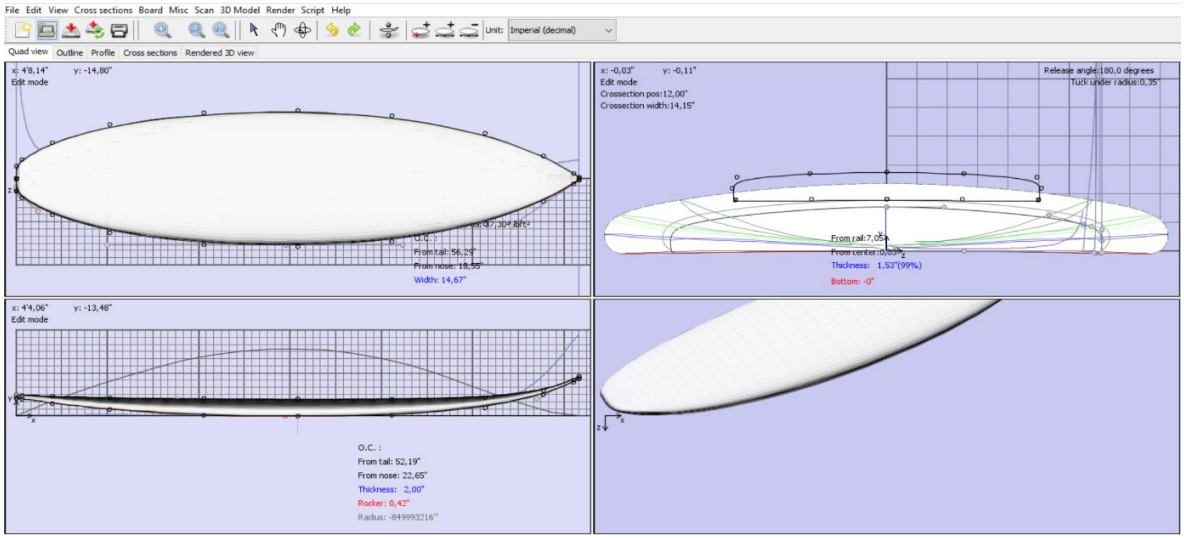


Figura 4-2 Geometria 3D tavola da surf

Il modello 3D standard è in grado di approssimare la maggior parte delle forme in modo abbastanza accurato; è possibile, inoltre, aumentare la risoluzione del modello 3D o modificare la posizione dei suoi punti di controllo al fine di migliorarne l'approssimazione quando necessario. Infatti, nella creazione di alcune geometrie, è necessario avere più punti di controllo; questa operazione può essere fatta tramite il comando *set nr of segments* presente sotto la barra 3D model.
Un esempio di quello che avviene aggiungendo più punti di controllo (in questo caso 50) è mostrato nella fig. 5-2.

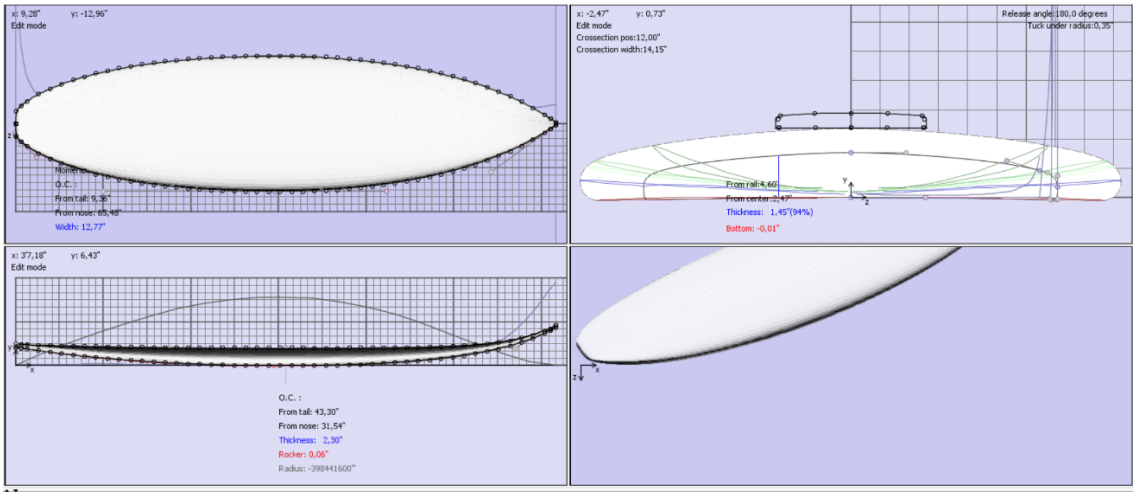


Figura 5-2 Effetto aumento nr of segments

Per modificare la geometria della tavola è possibile impostare il programma sulle seguenti opzioni *simple editing* o *advance editing*. La differenza tra i due sta nel fatto che con il primo si modifica la geometria della tavola nelle varie sezioni ovvero spostando i singoli punti di controllo nel piano bidimensionale, mentre con il secondo il control point viene spostato nel piano 3D. La funzione avanzata permette una maggiore libertà di movimento, ma è anche più complessa da usare in quanto richiede una certa precisione.

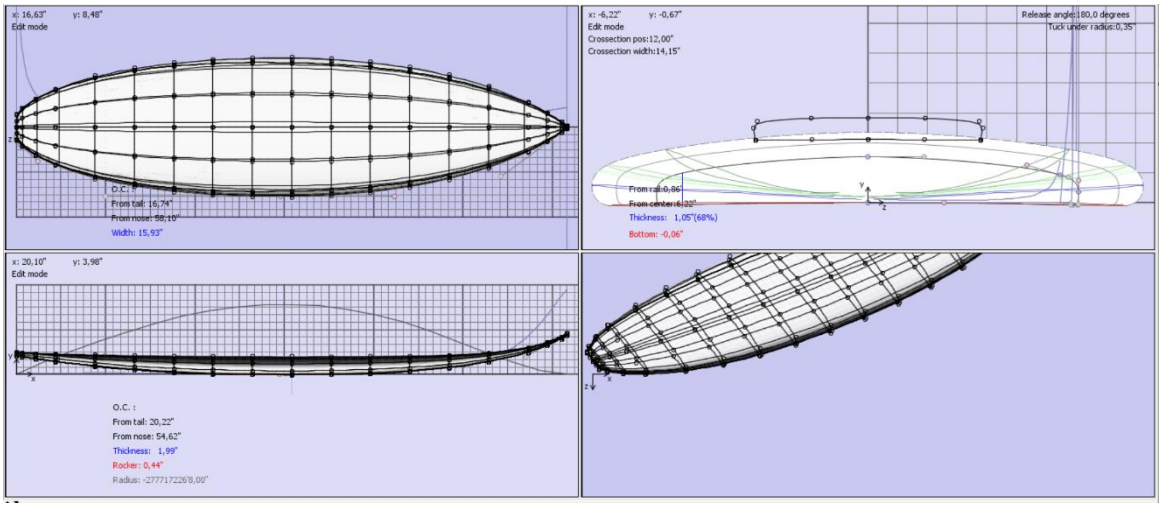


Figura 6-2 Modalità Advance editing

Infine, per controllare l'esito finale del modello 3D si accede alla sezione *Render 3D view*, operazione necessaria perché permette di rilevare errori nella geometria prima di procedere all'esportazione.

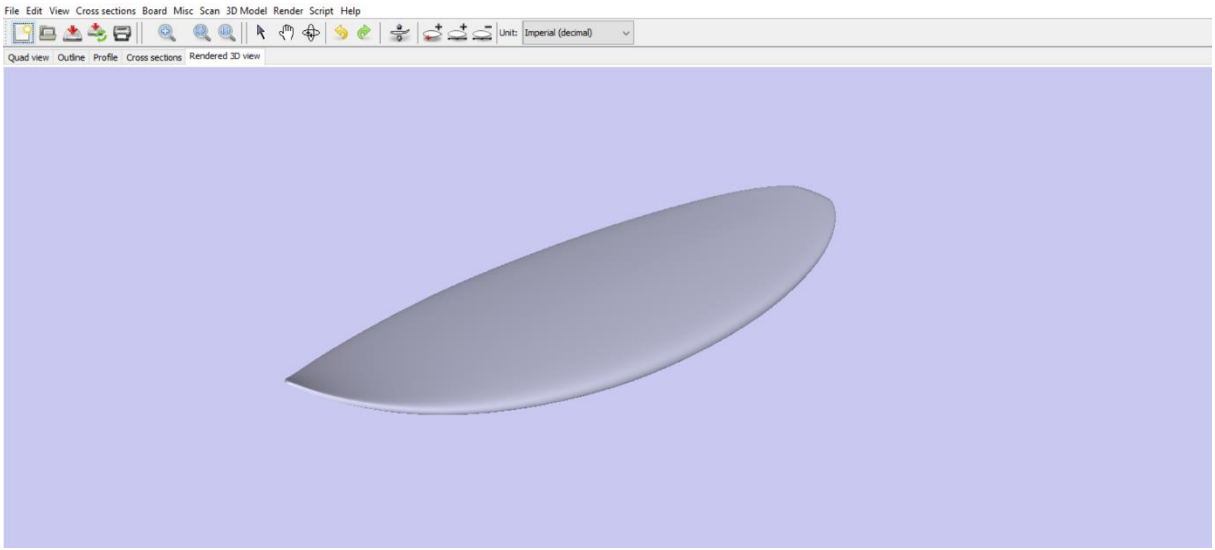


Figura 7-2 Render tavola ottenuta

Come ultimo procedimento è necessario esportare il modello per poterlo utilizzare nel programma di simulazione e salvare la tavola in formato .step selezionando "Save as", "Export" e "Nurbs to step".
STEP è un formato internazionale utilizzato per scambiare dati tra differenti software CAD, che non include soltanto la geometria ma anche una grande quantità di meta-data. [6]

2.2 RHINOCHEROS

Rhinoceros è un software utilizzato per la modellazione tridimensionale di superfici in cui le geometrie del modello Cad sono rappresentate mediante NURBS (*Non Uniform Basis Rational Splines*), ossia una classe di curve per realizzare le superfici. La scelta di questo software deriva dal fatto di poter dividere le aree della tavola precedentemente creata in BoardCad, così da poter poi infittire la *mesh* in starccm+ solo in determinate zone e non pagare un eccessivo costo computazionale.

Le superfici che sono state così isolate sono il nose, tail e i rails ovvero le zone che presentano una curvatura maggiore.

Per prima cosa è stato importato il file in formato *.step* all'interno di Rhinoceros; successivamente si è proceduto alla creazione delle linee per la divisione delle superfici, come si vede in fig. 8-2.

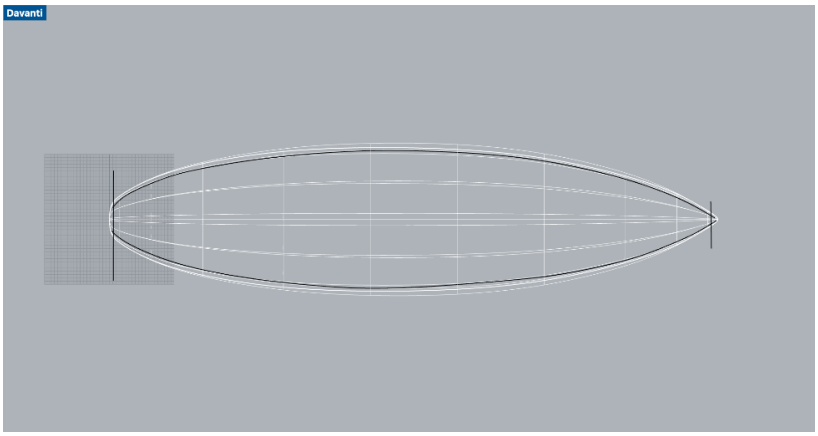


Figura 8-2 Suddivisione superficie

Una volta eseguito questo passaggio si procede all'estrusione delle linee in modo che queste vadano ad intersecare la tavola in entrambi i lati.

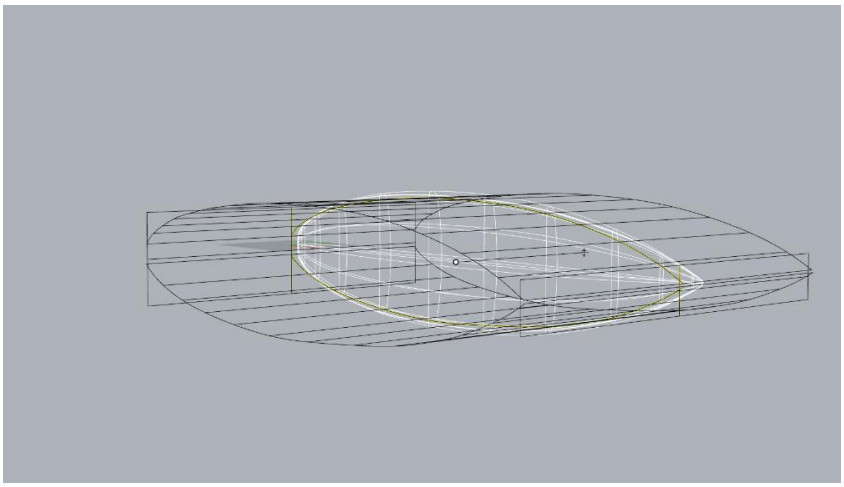


Figura 9-2 Estrusione linee suddivisione

A questo punto si può procedere alla suddivisione delle varie superfici mediante il comando “Suddividi” e selezionare l’oggetto da suddividere, nel nostro caso la tavola da surf, che è formata da una sola superficie.

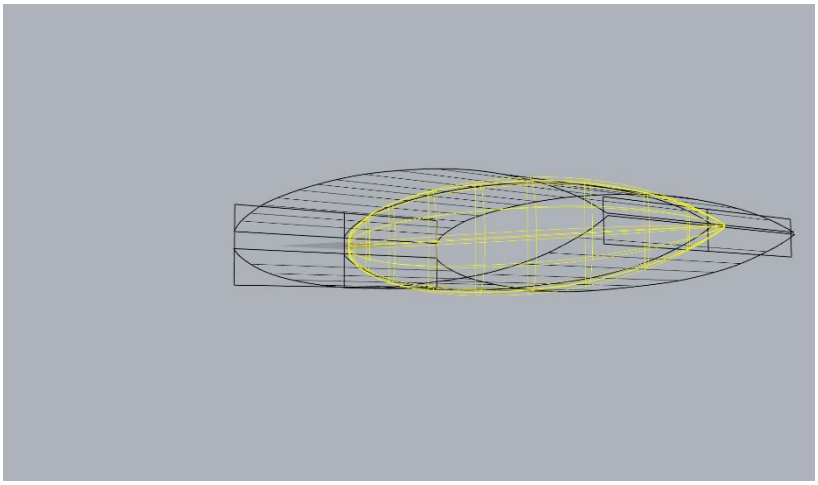


Figura 10-2 Selezione oggetto della suddivisione

Una volta premuto il tasto invio si procede alla selezione di tutte le superfici precedentemente estruse che vanno a dividere la tavola da surf.

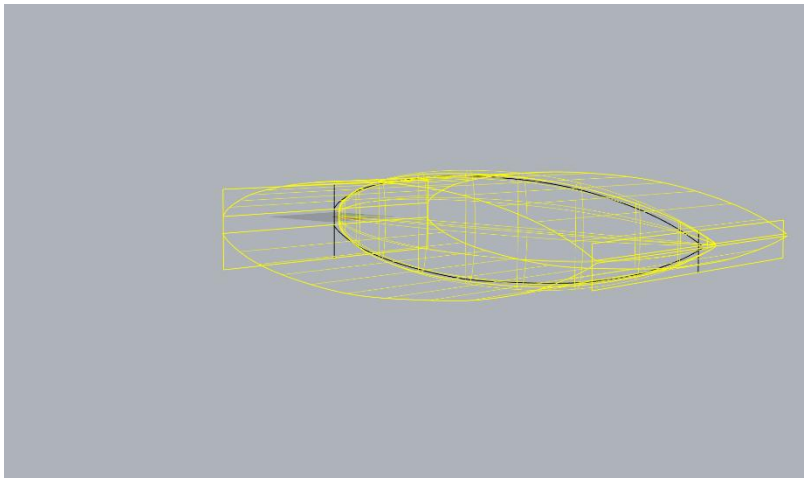


Figura 11-2 Suddivisione delle superfici

3.STUDIO DINAMICO PRELIMINARE

3.1 INTRODUZIONE

Lo studio dinamico eseguito in questo capitolo ha l'obiettivo di evidenziare le forze che entrano in gioco nella pratica del surf e come queste variano nelle diverse fasi della planata. Per questa analisi preliminare è stato fatto uso di alcuni paper redatti negli anni passati in cui sono stati eseguiti sia studi teorici che pratici sulle tavole da surf e sulle onde.

3.2 IDRODINAMICA DEL SURF

I parametri che portano una tavola del surf a muoversi lungo un'onda sono l'altezza dell'onda, la sua velocità e la velocità del surf. Per stare nella zona "unbroken" il surfista e la tavola devono avere una velocità pari o maggiore a quella dell'onda.
Nell'immagine in fig. 1-3 sono riportate come vettori le velocità del surfista, quella dell'onda e della sua buccia.
L'obiettivo principale per il surfista è quello di rimanere nella regione in cui l'onda inizia a rompersi, ossia la regione tra la whitewater region e quella in cui l'onda non si è ancora rotta. Per alcune manovre la velocità del surfista può essere più o meno maggiore rispetto a quella dell'onda. Per eseguire una buona surfata, la velocità media del surfista dovrebbe essere la somma dei vettori ($u_{peel} + u_{wave}$) per fare in modo che si segua quella traiettoria. [2]

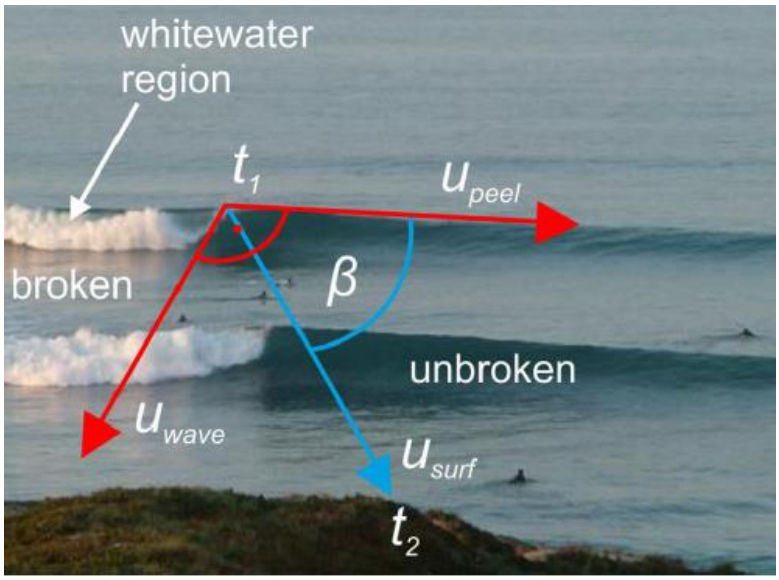


Figura 1-3 Vettori velocità onda [da 2]

3.2 FORZE

In questa sezione dell'elaborato verranno analizzate tutte le forze che agiscono su una tavola da surf che possono essere equiparate a quelle che si hanno in un normale velivolo.
Infatti, la tavola da surf si comporta come un aereo in quanto su di essa agiscono portanza e attrito e i tre momenti: rollio, beccheggio ed imbardata.

3.2.1 GALLEGGIABILITÀ

Anche per le tavole vale il principio di Archimede, ossia che "un corpo immerso parzialmente o completamente in un fluido riceve una spinta verticale dal basso verso l'alto, uguale per intensità al peso del fluido spostato". La galleggiabilità è molto utile a basse velocità, in particolare durante la partenza sull'onda, quando si cerca di far emergere la tavola dall'acqua in quanto in quel momento l'unica componente di portanza della tavola deriva dalla spinta di Archimede.
Tutti i corpi che operano nel campo dell'acqua, infatti, hanno due principali componenti di portanza: una statica che deriva proprio dalla spinta di Archimede ed una dinamica che deriva dalla velocità con cui il fluido scorre al di sotto della tavola.
La misura delle tavole da surf varia a seconda del peso del surfista, in quanto si cerca di dare la galleggiabilità ottimale a seconda della massa della persona. Nel caso in cui un surfista si trovasse sopra una tavola sovradimensionata per il suo peso, durante la planata la portanza (dinamica+idrostatica) sarebbe troppo elevata e di conseguenza renderebbe la tavola instabile. [3]
Nella fig. 2-3 possiamo vedere che tavole più grandi offrono una migliore galleggiabilità in quanto la superficie a contatto con l'acqua è maggiore e di conseguenza lo saranno pure le forze che agiscono su questa zona.

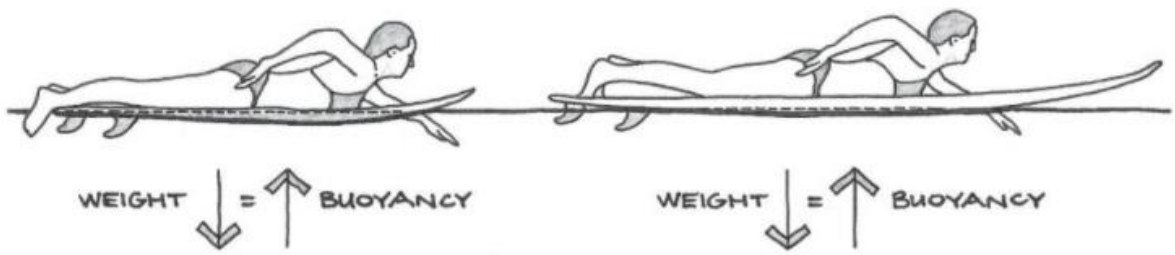


Figura 2-3 Effetto della galleggiabilità [da 3]

3.2.2 GRAVITÀ

La gravità è una forza che attrae due masse, in questo caso consideriamo la terra che attrae verso il basso il surfista che sta sull'onda; tale forza permette di scivolare sull'onda fino a raggiungere il punto più basso. Se il rider dovesse essere troppo pesante per la tavola e la gravità dovesse prevalere sulla spinta che l'acqua crea sotto la tavola (Principio di Archimede) il surfista sarebbe spinto sotto l'acqua in quanto la tavola non sarebbe in grado di scivolare a causa della poca galleggiabilità.
Come è possibile notare nella fig. 3-3 più l'onda è ripida, più la direzione del surfista sarà allineata con la forza di gravità, il che si traduce in una maggiore velocità.
Nella parte bassa dell'onda, essendo l'attrazione gravitazionale quasi perpendicolare alla direzione del surfista, si ha una diminuzione della velocità; per questo motivo i surfisti tendono a risalire l'onda con la velocità acquisita nella parte iniziale per poi ritrovarsi nuovamente sulla cresta ed avere maggiore velocità in discesa. [3]

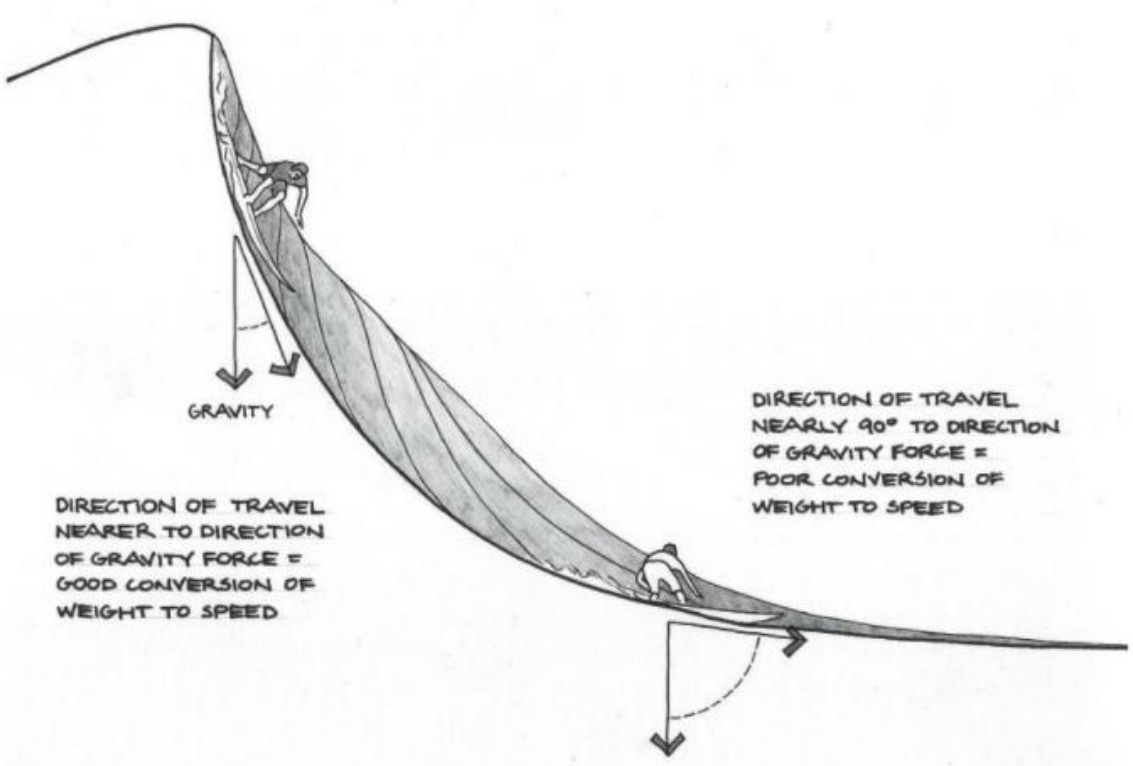


Figura 3-3 Effetto forza di gravità [da 3]

3.2.3 ATTRITO

L'attrito, come avviene in qualsiasi campo di moto, è quella forza che si oppone al movimento del corpo quando esso è immerso in un fluido. In questo caso la tavola da surf, stando a contatto con due fluidi differenti, è soggetta sia alla forza di attrito dell'acqua che dell'aria, anche se quest'ultima è trascurabile rispetto a quella esercitata dall'acqua.
Nel nostro caso abbiamo due tipi di resistenza: quella di attrito e di forma.
La prima è generata dall'acqua che impatta con la tavola, di conseguenza maggiori saranno la superficie a contatto con l'acqua e la velocità del surfista sull'onda, maggiore sarà la forza di attrito della tavola. Questo implica che tavole più grandi producono una maggiore resistenza sull'acqua, anche se, ad alte velocità, la portanza generata dalla superficie sarà superiore, quindi solo una parte della tavola sarà a contatto con l'acqua, diminuendo di conseguenza l'attrito.
Nell'immagine in fig. 4-3 viene schematizzato quanto descritto precedentemente.

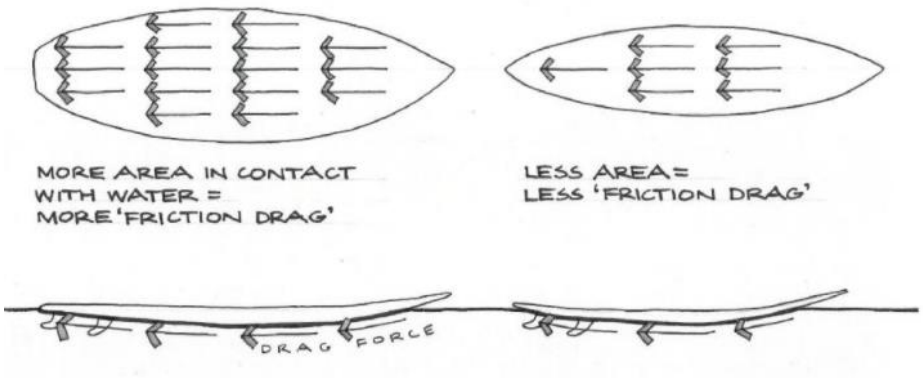


Figura 4-3 Effetto del rocker sulla resistenza [da 3]

L'attrito di forma deriva direttamente dalla geometria della tavola, in particolare dalla sua area apparente, ossia la superfice che impatta con l'acqua guardando la tavola di fronte. Come possiamo vedere nell'immagine in fig. 5-3 per tavole con elevato rocker abbiamo un'area maggiore rispetto a quelle piatte, di conseguenza anche l'attrito di forma sarà superiore.

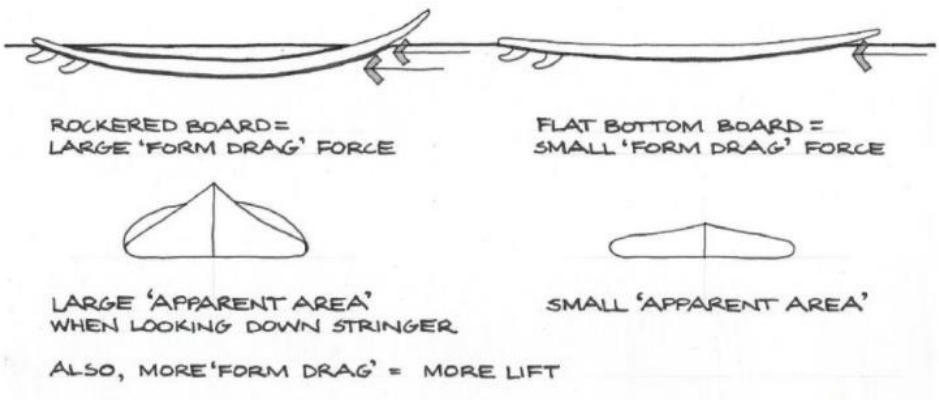


Figura 5-3 Effetto del rocker sulla resistenza dell'attrito di forma [da 3]

3.2.4 PORTANZA

La portanza è necessaria al surfista per poter scivolare sull'onda e non affondare. Questa forza che si oppone perpendicolarmente alla superficie della tavola è generata sia dalla velocità che dall'angolo di Attaco (AoA).
L'AoA è definito come l'angolo che intercorre tra l'asse longitudinale della tavola (corda della tavola) e la direzione del flusso. Un angolo di attacco pari a 0° corrisponde ad un flusso parallelo alla corda della tavola; tipicamente nel surf l'angolo di attacco maggiormente utilizzato va dai 7°/10°, raramente si raggiungono valori più elevati (tipicamente per manovre particolari come transizioni e carvate con raggio molto stretto).
Un altro parametro molto importante riguarda il rapporto portanza/resistenza (L/D) che è sinonimo di manovrabilità e stabilità della tavola durante le manovre. Nel campo aerospaziale questo rapporto è indice di efficienza dei consumi, infatti si cerca sempre di avere un'alta resistenza ed una bassa resistenza di attrito. Stessa cosa accade nel mondo del surf; infatti i surfisti cavalcando l'onda su e giù ed eseguendo curve e manovre hanno bisogno di una buona manovrabilità, senza quasi alcuna perdita di velocità.
Nell'immagine in fig. 6-3 vengono riportati i parametri usati per la tavola da surf, dove *d* è la distanza della parte sommersa, *h* è la distanza del nose dalla superficie dell'acqua ed α l'angolo di attacco. [1]

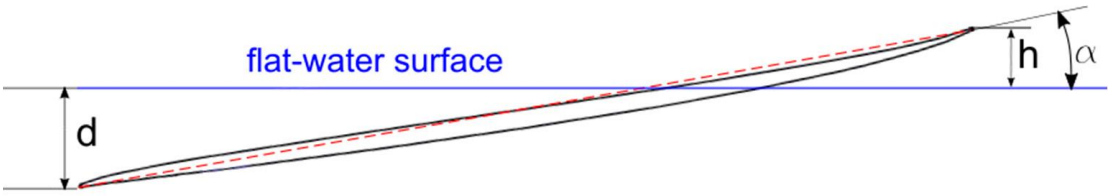


Figura 6-3 parametri tavola da surf [da 1]

3.2.5 MOMENTI

Nella tavola da surf, a seconda di come il rider si muove durante il moto, si vengono a creare dei momenti di pitch, roll o yaw proprio come accade nel moto di un velivolo nel piano longitudinale e latero direzionale.

Ora analizziamo come possono essere generati i 3 momenti:

- ROLL: viene generato quando il peso non è applicato vicino all'asse di simmetria della tavola. Si ha del rollio quando vengono svolte delle transizioni rail-to-rail e la tavola viene inclinata in uno dei due lati
- PITCH: si origina dallo spostamento del peso nel piede avanti o in quello dietro.
- YAW: è uno spostamento della tavola voluto intenzionalmente dal surfista quando cerca di aumentare la velocità nella parte bassa dell'onda; questo momento incrementa la velocità apparente del flusso di acqua al di sotto della tavola con un conseguente aumento della portanza. [3]

3.3 PARAMETRI UTILIZZATI

Come già anticipato nel capitolo precedente le tavole da surf lavorano a contatto tra due fluidi: l'aria e l'acqua. Proprio per questo motivo il loro moto è descritto dai numeri di Froude, Weber e Reynolds.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot d}}$$

$$W = \frac{\sigma}{\rho g l^2}$$

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

Il numero di Froude è il rapporto tra forza di inerzia e forza peso. Questo numero è molto importante in ambito navale in quanto definisce il modo con cui il corpo si muove nell'acqua. Ad esempio oggetti che lavorano a bassi numeri di Froude hanno una portanza che deriva principalmente dalle forze idrostatiche (principio di Archimede) o dalla galleggiabilità dello stesso; al contrario, corpi che lavorano ad alti numeri di Froude hanno una portanza che deriva maggiormente dalle forze idrodinamiche.

Nel mondo del surf ci troviamo a lavorare sia a bassi che ad alti numeri di Froude: si registrano elevati numeri di Froude quando la portanza deriva principalmente dalla velocità con cui l'acqua scorre al di sotto del surf, bassi numeri quando siamo nella fase di remata per raggiungere l'onda o fermi sulla tavola.

Il numero Weber è la relazione tra la tensione superficiale e le forze gravitazionali che agiscono su un fluido. Questo vale sia per la navigazione che per le onde cavalcate in quanto sono onde generate dalla gravità, il che significa che hanno un basso numero di Weber. Il moto delle piccole onde, invece, deriva proprio dalla tensione superficiale. Questo è importante per determinare le forze su una tavola, in quanto le due categorie di onde hanno effetti diversi sulla resistenza.
Infine il numero di Reynolds mostra un rapporto tra le forze inerziali e di attrito. Un numero basso indica che il flusso è laminare, alto che il flusso è turbolento. Questo influisce notevolmente sulla resistenza all'attrito sviluppata su un corpo in movimento. Una tavola da surf su un'onda opera a numeri di Reynolds intorno a 10^6 che si trova nella regione di transizione tra flussi laminari e turbolenti. È probabile che il flusso sia spesso in regime turbolento a causa dell'acqua e che si muova contemporaneamente alla tavola. [4]

3.4 TEORIA DELLE ONDE DI KELVIN

Guardando anatre o barche muoversi in acqua calma è chiaramente visibile che la scia che essi generano a valle è molto simile, infatti differiscono solamente per le dimensioni. Nel 1887, Lord Kelvin dimostrò che la scia creata da un oggetto che si muove in acqua è sempre delimitata da un angolo uguale ad $arcsin\frac{1}{3} = 19{,}47°$. A partire da questa teoria altri studi hanno dimostrato che si possono distinguere due differenti tipi di onde sulla scia: trasversali e divergenti. Le loro ampiezze dipendono fortemente dal numero di Froude $Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot d}}$, dove V è la velocità dell'oggetto in movimento, d la sua dimensione tipica e g la costante di gravitazione universale. È stato osservato che all'aumentare del numero di Froude aumenta anche l'ampiezza delle onde divergenti, al contrario le onde trasversali diminuiscono rapidamente fino a scomparire per numeri di Froude sufficientemente alti. La comprensione della resistenza all'onda è di grande importanza pratica nell'industria navale per la progettazione dello scafo ed in particolare modo anche nel mondo del surf dove la resistenza gioca un ruolo fondamentale. Recenti osservazioni sperimentali di Rabaud e Moisy hanno ampliato la teoria Lord Kelvin, infatti, dopo alcune osservazioni, essi hanno dimostrato come l'angolo della scia diminuisce all'aumentare del numero di Froude. Per spiegare le loro osservazioni, hanno imposto la forte ipotesi secondo cui un oggetto non possa generare lunghezze d'onda maggiori della sua dimensione. Anche se questa ipotesi porta a risultati coerenti per quanto riguarda i risultati sperimentali, non è stata saldamente consolidata ed è discutibile.
Nell'immagine in fig. 7-3 si nota la variazione della scia e delle onde generate in relazione al numero di Froude.

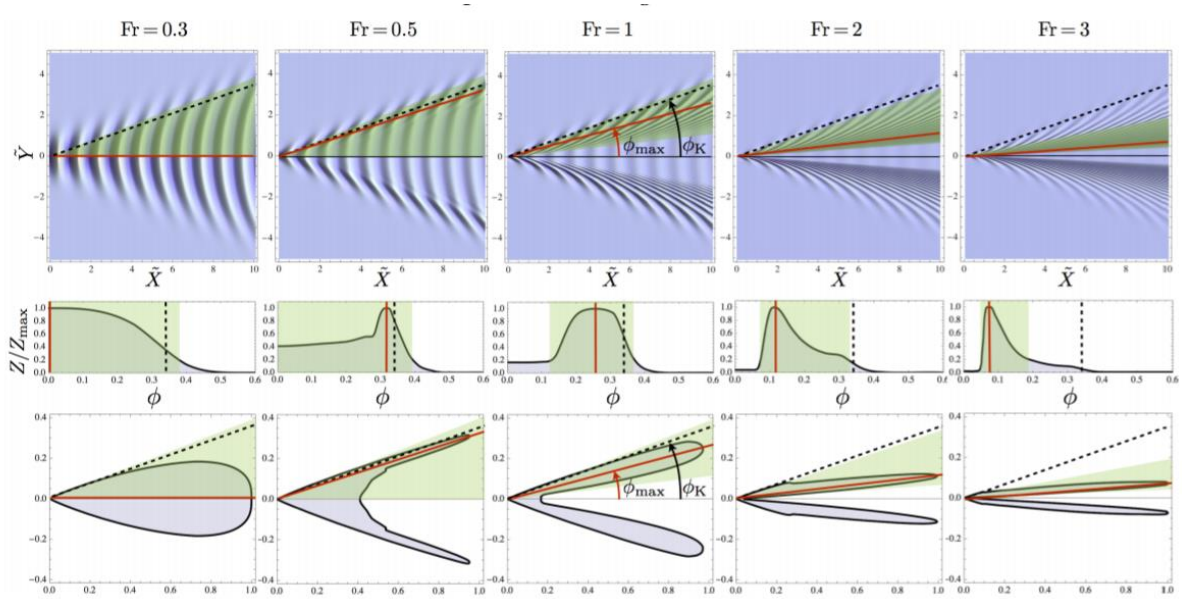


Figura 7-3 Angolo onde per diversi numeri di Froude [da 14]

Nella prima fila notiamo i grafici di rilievo dello spostamento superficiale per diversi numeri di Froude. Nella seconda fila è rappresentato l'inviluppo angolare normalizzato dello spostamento superficiale in funzione di ϕ per diversi numeri di Froude in cui ϕ è l'angolo polare originato dall'asse orizzontale. Infine nella terza fila, come per la seconda, viene rappresentato l'inviluppo angolare normalizzato per diversi numeri di Froude. In tutti i grafici il massimo dell'inviluppo angolare ottenuto per $\phi = \phi_{max}$ è rappresentato da una linea rossa solida e l'angolo di Kelvin $\phi_K = \arcsin\left(\frac{1}{3}\right)$ è rappresentato da una linea nera tratteggiata. La regione di colore verde delimita l'area in cui l'ampiezza delle onde è superiore al 20% del massimo dello sviluppo angolare. [14]

4. SOFTWARE PER LA SIMULAZIONE

Il software usato per la simulazione delle tavole da surf è STAR-CCM+ (commercializzato da Siemens Digital) ed è il più utilizzato sia in ambito accademico che commerciale.
Il programma è scritto in codice Java e si basa sul metodo dei volumi finiti (tetraedi, celle trimmate e poliedri) per risolvere i vari problemi computazionali.
L'interfaccia di Starccm+ è molto semplice ed intuitiva da usare in quanto permette diverse operazioni:

- Importare, creare e modificare un Cad direttamente nell'ambiente Starccm+.
- Costruire una mesh sulla superficie importata
- Impostare delle condizioni al contorno e il modello fisico da usare
- Visualizzare i risultati mediante grafici 2D e 3D.

4.1 CAD

4.1.1 IMPORTAZIONE DEL CAD

Il primo step è l'importazione del modello Cad sul quale effettuare la nostra simulazione. È possibile eseguire questa operazione aprendo la voce *Geometry* e successivamente cliccando con il tasto destro su *3D-CAD MODELS.*

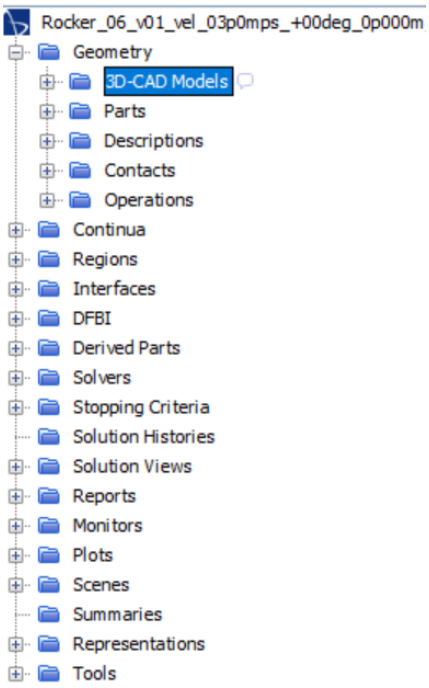


Figura 1-4 Menù a tendina StarCcm+

Una volta all'interno dell'ambiente Cad, eseguendo di nuovo lo stesso procedimento, si importa la geometria in formato .igs, in quanto dopo numerosi tentativi risulta essere il migliore. Infatti, usando il file in .step, si creavano delle imperfezioni (fori e sovrapposizione di alcune superfici); problemi che nell'altro formato vengono parzialmente risolti.
Il Cad, anche in .igs, risulta avere dei problemi di geometria, cosa che può essere verificata selezionando con il tasto destro la geometria importata e cliccando su *Check validity*. Il messaggio riportato da Starccm+ nella schermata degli output è il seguente: "*Body Rocker06 is not valid*". Questo sta a significare che il corpo presenta delle imperfezioni nella geometria e non può essere usato per la simulazione, inoltre i tools offerti dal programma non consentono di riparare correttamente il corpo.
La risoluzione del problema verrà spiegata più avanti, in particolare nel capitolo in cui viene fatta la mesh, in quanto si è optato per una risoluzione automatizzata in modo da rendere più semplice l'uso della simulazione e da non dover ripetere ogni volta questo passaggio.

Figura 2-4 Geometria Cad

Ora è necessario che il modello Cad venga posizionato in modo opportuno rispetto agli assi, quindi vengono fatte delle operazioni di traslazione e rotazione affinché la punta della tavola coincida con l'origine del nostro sistema di riferimento.

Per fare questa operazione è necessario selezionare con il tasto destro il modello importato e applicare una trasformazione booleana prima di rotazione e poi di traslazione.

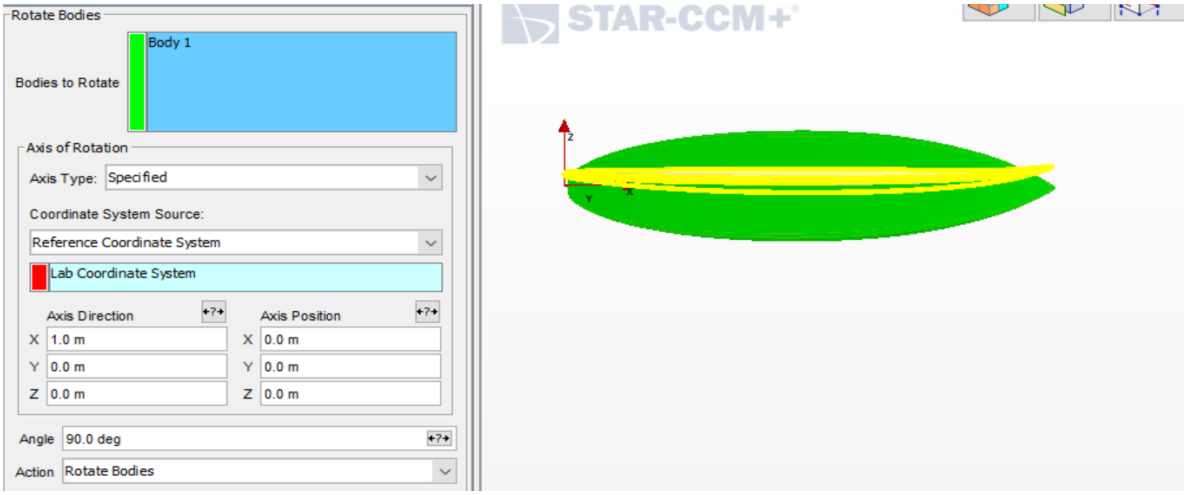


Figura 3-4 Operazione booleana di rotazione

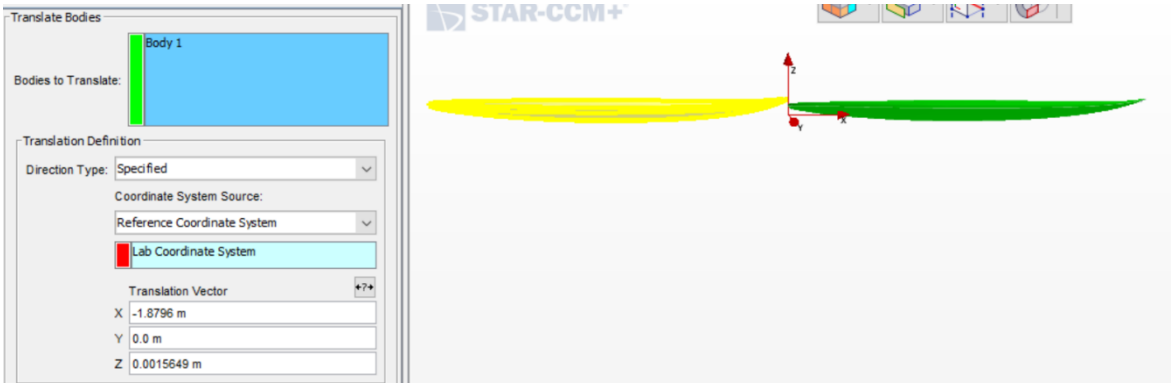


Figura 4-4 Operazione booleana di traslazione

In questo modo il muso della nostra tavola è posizionato proprio in corrispondenza dell'origine del sistema di riferimento e l'asse y della terna *Oxyz* è uscente dal piano del foglio.

Successivamente a queste operazioni ne sono state applicate altre due, una di rotazione e un'altra di traslazione con la quale si va a definire rispettivamente l'angolo di attacco e l'affondamento della tavola.

Possiamo notare che al posto dei valori numerici per la rotazione e la traslazione sono stati usati dei parametri, rispettivamente "AoA" e "$$displacemente$$". In questo modo per modificare questi due valori è sufficiente accedere nel menu a tendina sotto la voce *Tools→Parameters* nella quale si può cambiare questi dati senza dover variare questi dati ogni volta nell'ambiente CAD.

Quando nella simulazione troviamo il simbolo $ siamo in presenza di una grandezza scalare, mentre il $$ ne indica una vettoriale.

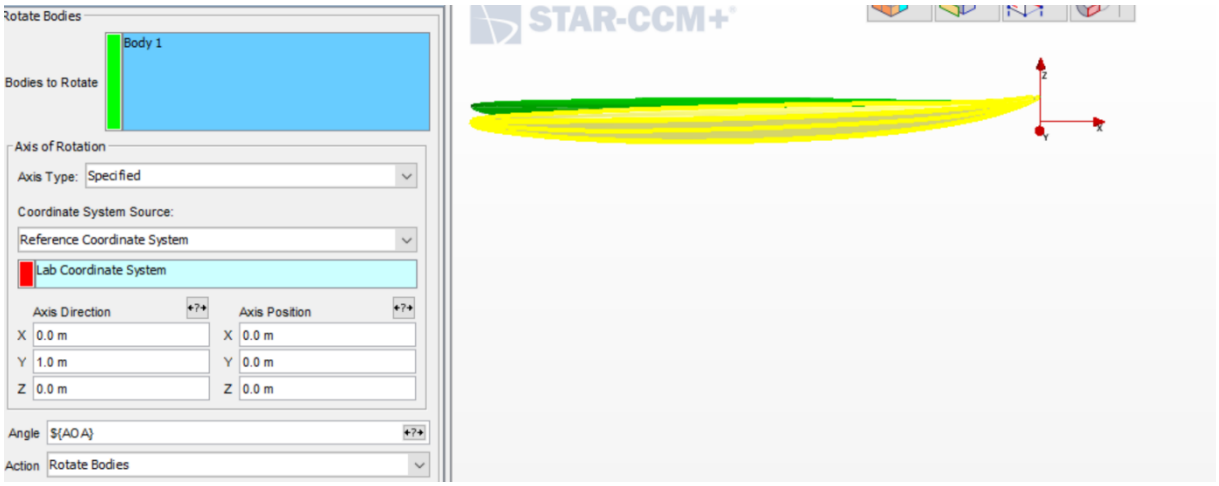


Figura 5-4 AoA tavola da surf

Figura 6-4 Affondamento surfboard

Ora è necessario andare a rinominare le varie superfici della tavola da surf, in particolare il nostro Cad è stato diviso in Nose, Tail, Rails, Bottom e Top. Questo consente di svolgere l'operazine di modifica una sola volta nell'intera simulazione e di avere la superficie suddivisa con le nuove denominazioni.

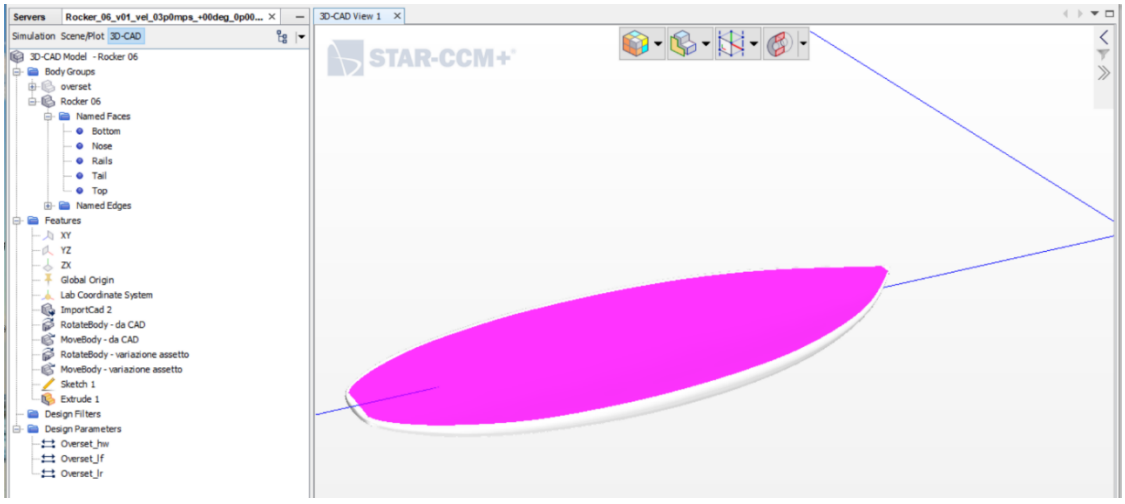


Figura 7-4 Superfici rinominate su 3D-Cad

Come ultimo step è stato costruito il dominio di calcolo (parallelepipedo rettangolo) nel quale è stata inserita la tavola per la simulazione poco dietro la faccia avanzata del solido, mentre nella parte posteriore la misura è stata sempre parametrizzata sulla lunghezza della tavola, così da non dover modificare l'Overset nel caso di simulazioni con surfboard di diverse misure.
È possibile notare che è stato costruito solamente mezzo dominio, questo perché la simulazione verrà fatta su metà campo di moto proprio per risparmiare una quantità significativa di celle.
Questa operazione è fattibile in quanto l'oggetto esaminato presenta una simmetria, altrimenti tale approssimazione non sarebbe stata applicabile.

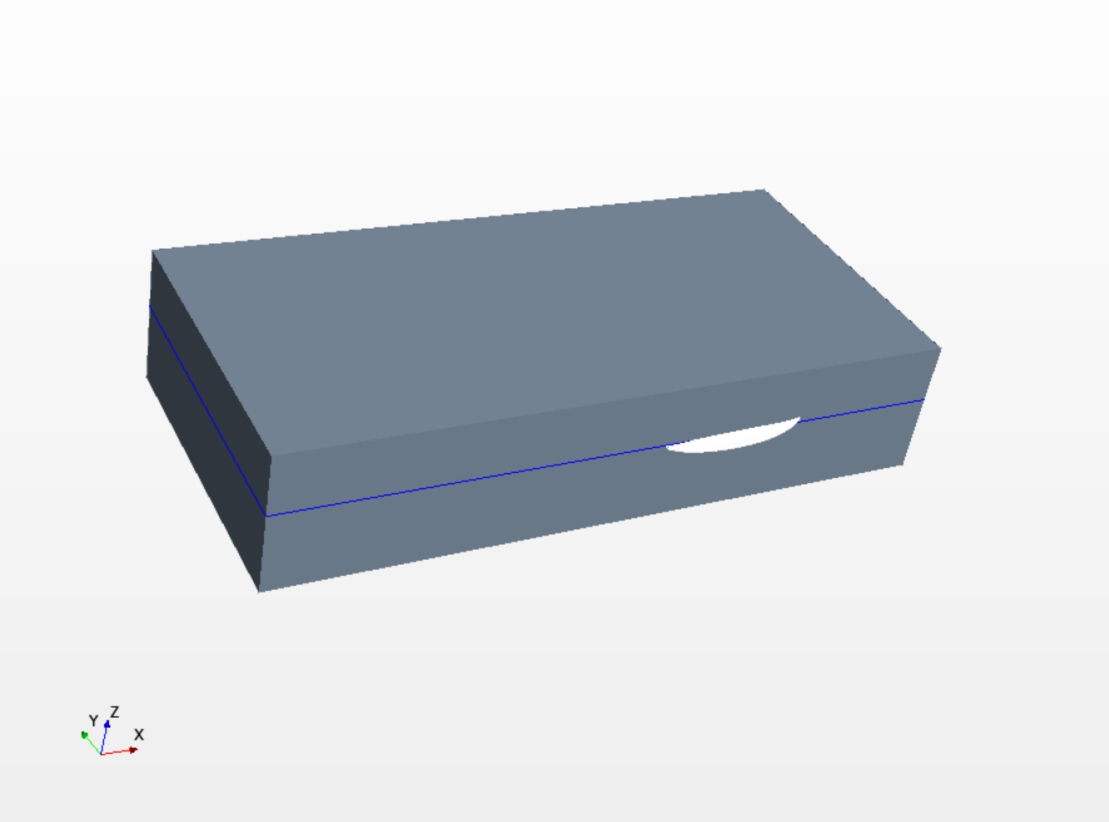


Figura 8-4 Overset+tavola

4.1.2 CREAZIONE BLOCCHI DI RAFFINAMENTO

Questa operazione è fondamentale per la successiva meshatura, in quanto consente di utilizzare differenti tipi di mesh per ogni geometria, ma allo stesso tempo studiare tutto il corpo come se fosse una singola entità.

Come secondo passaggio è necessario creare un secondo modello di Cad (come descritto in precedenza) per realizzare i vari blocchi di raffinamento della tavola.

La creazione di questi blocchi ci consente di avere una mesh sempre più raffinata nell'intorno della tavola, così da poter studiare con molta precisione i vari fenomeni che avvengono nelle vicinanze del corpo e avere una griglia leggermente più grossolana nelle zone lontane.

Per la realizzazione di questi blocchi è stato creato semplicemente un rettangolo (sempre parametrizzato sia in lunghezza che larghezza della tavola) e poi estruso per formare un parallelepipedo.

Nell'immagine in fig. 9-4 si può notare la parametrizzazione sia in lunghezza che larghezza, così che, per lo studio di tavole di diverse misure, si debba solamente cambiare due parametri, ovvero la lunghezza e la larghezza, e non si vanno a modificare tutti i blocchi di raffinamento ex novo. Inoltre, è stato inserito un *fix constraint point* in modo da mantenere il parallelepipedo sempre in quella posizione.

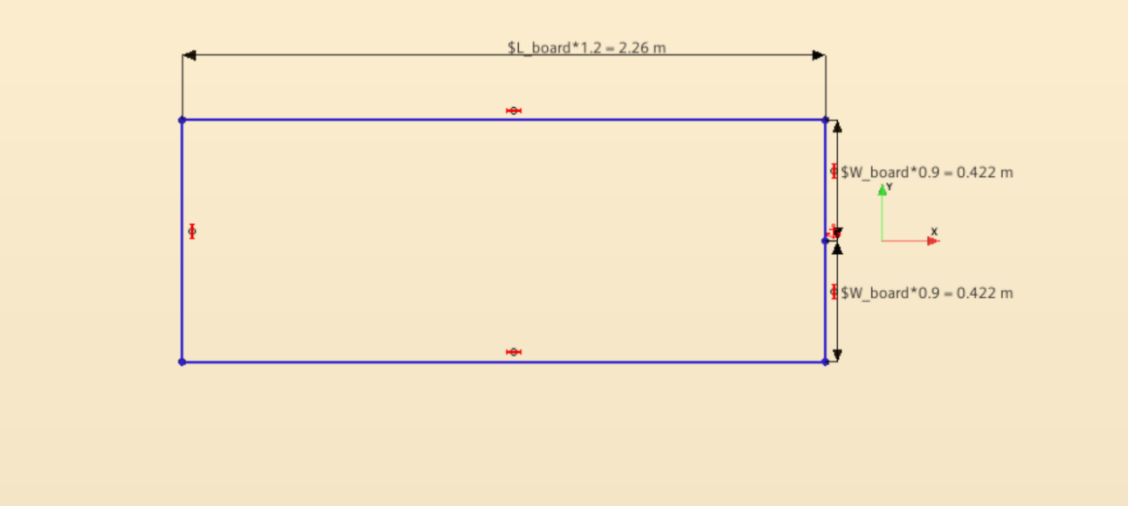


Figura 9-4 Parametrizzazione blocchi

A questi blocchi inoltre sono state applicate, come per la tavola, delle trasformazioni di rotazione e traslazione così che si possano spostare in base alla variazione di angolo di attacco e affondamento del surf board.

In particolare, i blocchi di raffinamento che sono stati usati sono cinque, inoltre ne è stato aggiunto un altro posto in corrispondenza delle pinne. In questa simulazione la tavola è stata studiata senza pinne, ma è stato comunque aggiunto questo blocco che può essere utilizzato qualora ne fosse necessario.

4.2 CREAZIONE DELLA PARTE

Una volta creati i CAD come precedentemente descritto è possibile passare alla realizzazione della parte geometrica, cliccando con il tasto destro su entrambi i modelli e selezionando *New Geometry* Part; successivamente, nella schermata che compare, si sceglie la tassellazione *Very Fine*.

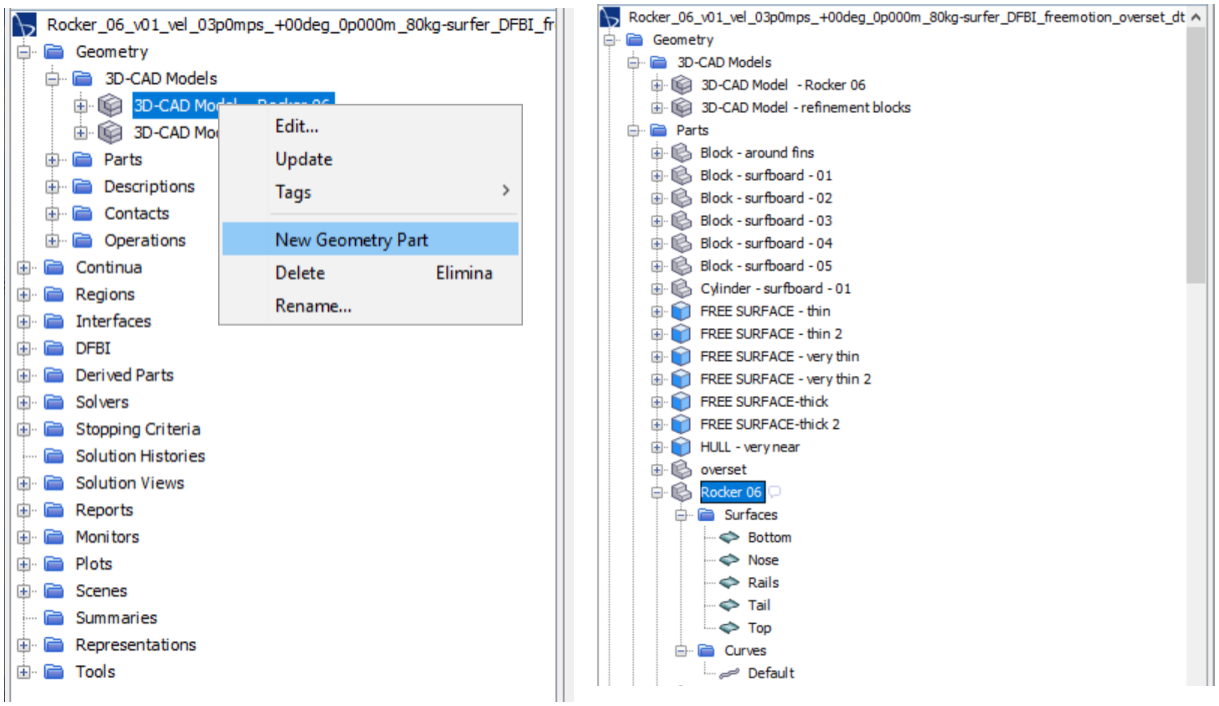


Figura 10-4 Creazione di una parte

La nostra tavola da surf ora è diventata una parte geometrica e, come si può vedere nella figura sottostante, ha mantenuto tutte le sue superfici rinominate nell'ambiente CAD.
La medesima operazione è stata fatta anche per i blocchi di raffinamento.

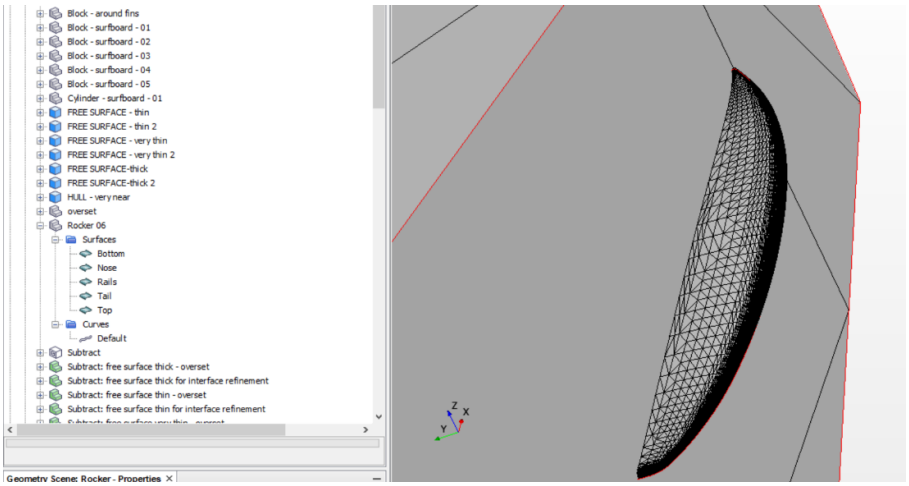


Figura 11-4 Parte geometrica (tavola+overset)

Come la tavola, anche l'Overset (volume di aria e di acqua che circonda lo scafo) è diventato una parte geometrica.
Nella figura 12-4 sono visibili le varie facce rinominate.

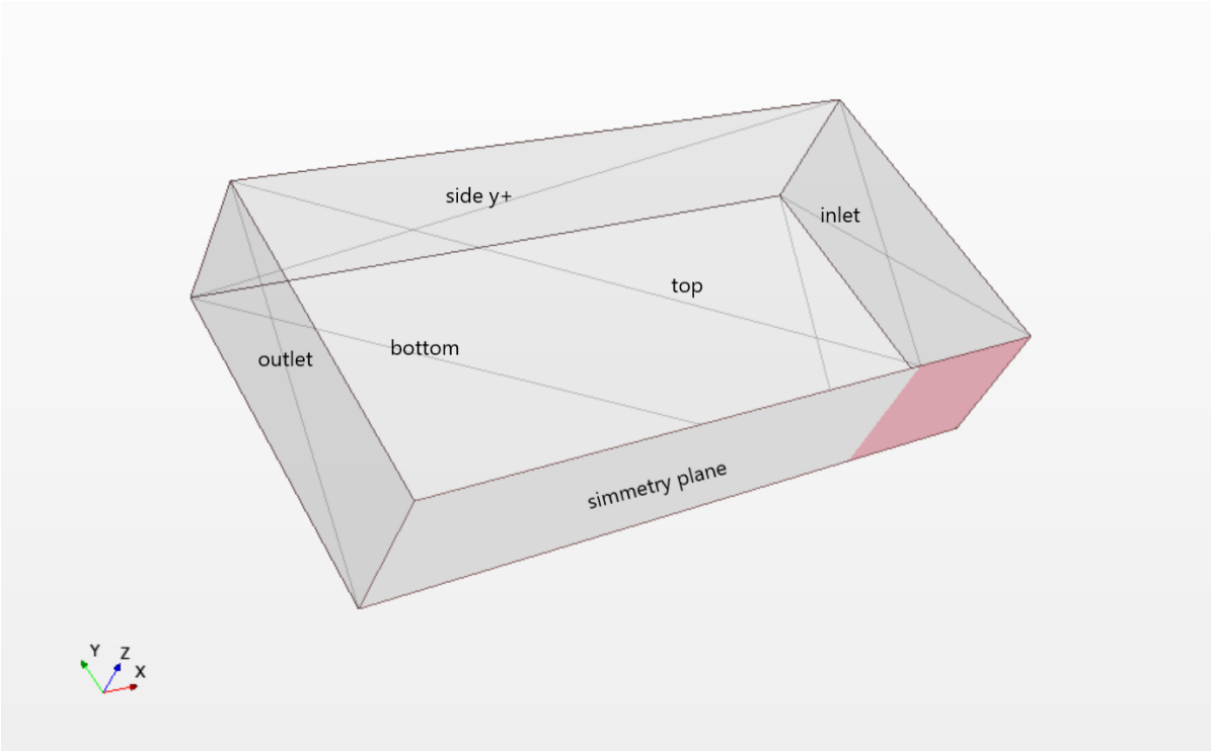


Figura 12-4 Parti overset

Oltre a queste parti geometriche già realizzate è necessario creare vari blocchi per l'infittimento della mesh in prossimità del pelo dell'acqua e nella zona dove si generano le onde così da poter avere un buono studio del campo di moto.
Nella fig. 13-4 sono riportate tutte le varie parti che sono state create per permettere lo studio del moto del corpo; in particolare sono stati creati diversi blocchi (sempre più sottili) che vanno a cogliere cosa avviene nel pelo dell'acqua.
Inoltre è stato aggiunto un dominio molto più grande (Tank) che contiene sia l'overset che la tavola e consente di andare a captare le onde che si generano a valle.
Sono state fatte anche molte operazioni di sottrazione per generare dei blocchi che evitassero la sovrapposizione della mesh di overset con quella dei vari blocchi creati successivamente. L'operazione di sottrazione *Overset-Rocker* è stata eseguita per generare proprio un calco del surfboard all'interno del dominio di calcolo e per fare in modo che la mesh volumetrica non si estenda all'interno della tavola.

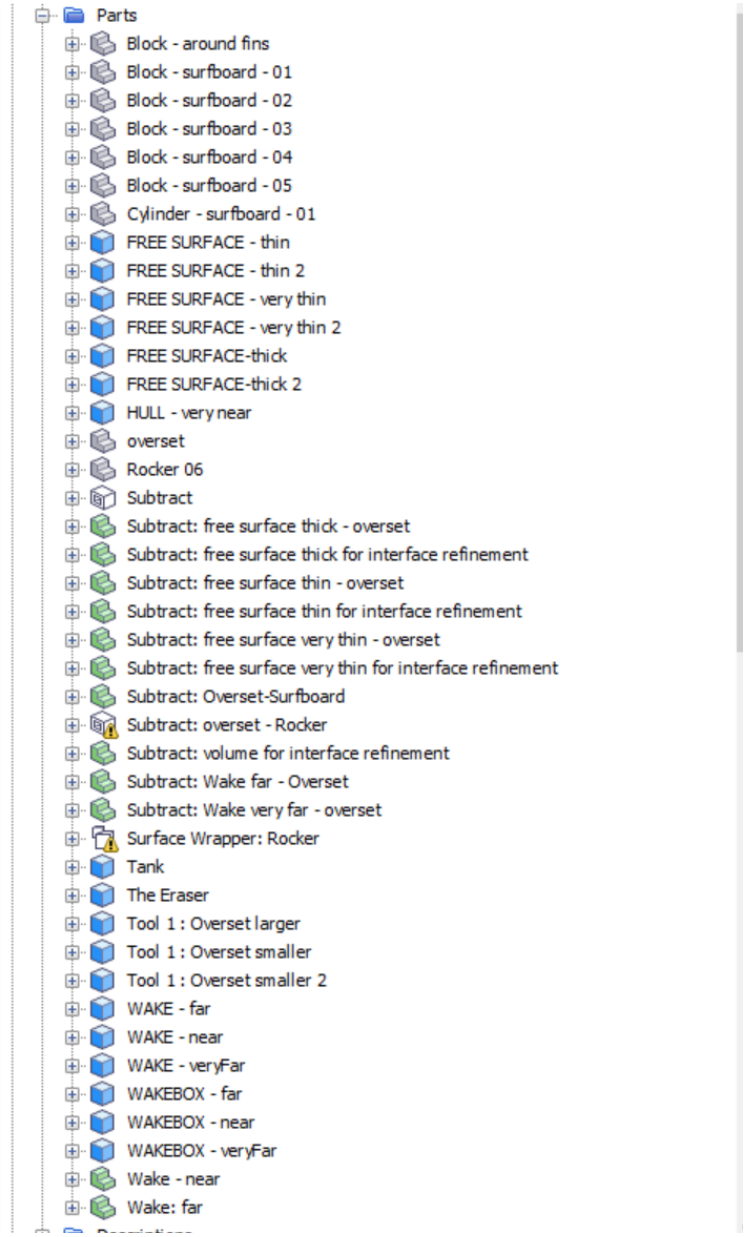


Figura 13-4 Parti geometriche create per la simulazione

4.3 GENERAZIONE DI UNA REGIONE

Una volta realizzate le varie parti che compongono il nostro dominio di calcolo è necessario assegnare a queste ultime una regione, nonché assegnare delle condizioni al contorno.
Nelle tabelle 1-4 e 2-4 vengono elencate le varie condizioni al contorno usate sia per la tavola che per il tank.

Superficie	Condizioni al contorno
Bottom	Velocity inlet
Inlet	Velocity inlet
Outlet	Pressure outlet
Side	Symmetry plane
Simmetry	Symmetry plane
Top	Velocity inlet

Tabella 1-4 Condizioni tank

Superficie	Condizioni al contorno
Surfboard	Wall
Boundaries	Overset mesh
Symmetry	Symmetry plane

Tabella 2-4 Condizioni surfboard+overset

A tutte le varie parti della tavola è stata applicata la condizione di *Wall*, perciò il flusso impatta contro quel tipo di regione come se fosse una parete solida e di conseguenza devia il suo percorso.
La condizione al contorno di no-slip wall sulla superficie della tavola viene usata proprio quando si studia un flusso viscoso, dove la velocità tra la parete e il flusso è nulla.
Per il Tank, invece, è stato definito una Velocity Inlet in cui il flusso entra con una velocità di 5m/s che presumibilmente è la stessa che dovrebbe avere un surfista mentre scivola su di un'onda di media grandezza.
Il fluido esce dalla parete opposta (Pressure Outlet) con la stessa velocità di ingresso per evitare la formazione di sovrapressioni nella parte di uscita.
Infine, sia nel Top che nel Bottom del mio dominio di calcolo è stata impostata una velocità pari a quella in ingresso proprio per evitare la formazione di uno strato limite che nella realtà non sarebbe presente.
La condizione al contorno Wall rappresenta una superficie impermeabile, mentre il Symmetry Plane rappresenta un immaginario piano di simmetria nella simulazione. La soluzione che si ottiene con l'utilizzo del piano di simmetria è identica alla soluzione che si otterrebbe specchiando la mesh attorno al piano di simmetria (in metà del dominio risultante).

4.4 GENERAZIONE DELLA MESH

Una volta impostate le condizioni al contorno si può procedere alla generazione della mesh di volume.

Prima di effettuare la generazione della mesh è fondamentale risolvere alcuni problemi derivati dall'importazione della geometria CAD.

Il software usato per la creazione della tavola da surf (BoardCad) presenta alcuni bug durante l'esportazione del file in formato *.step*; infatti, una volta importata la tavola all'interno del programma Starccm+, sono stati riscontrati numerosissimi problemi: non-manifold edges, non-manifold vertices, superfici auto-intersecanti e bucate, infine una triangolazione del corpo che non era ottimale per procedere alla meshtatura del nostro solido, tanto che il programma non riusciva ad effettuare una mesh. Come è possibile vedere nelle fig. 14-4 e 15-4 sia nel Nose che nel Tail si hanno dei punti in cui vi è un addensamento di linee e in quelle zone il programma riconosce delle non manifold edges, condizione che si verifica quando lo spigolo insiste su molteplici facce e quindi si può ridurre l'efficacia della mesh.

Inoltre, è ben visibile la deformazione relativa alla triangolazione delle superfici da cui si evince che il programma non riesce a supportare la mesh.

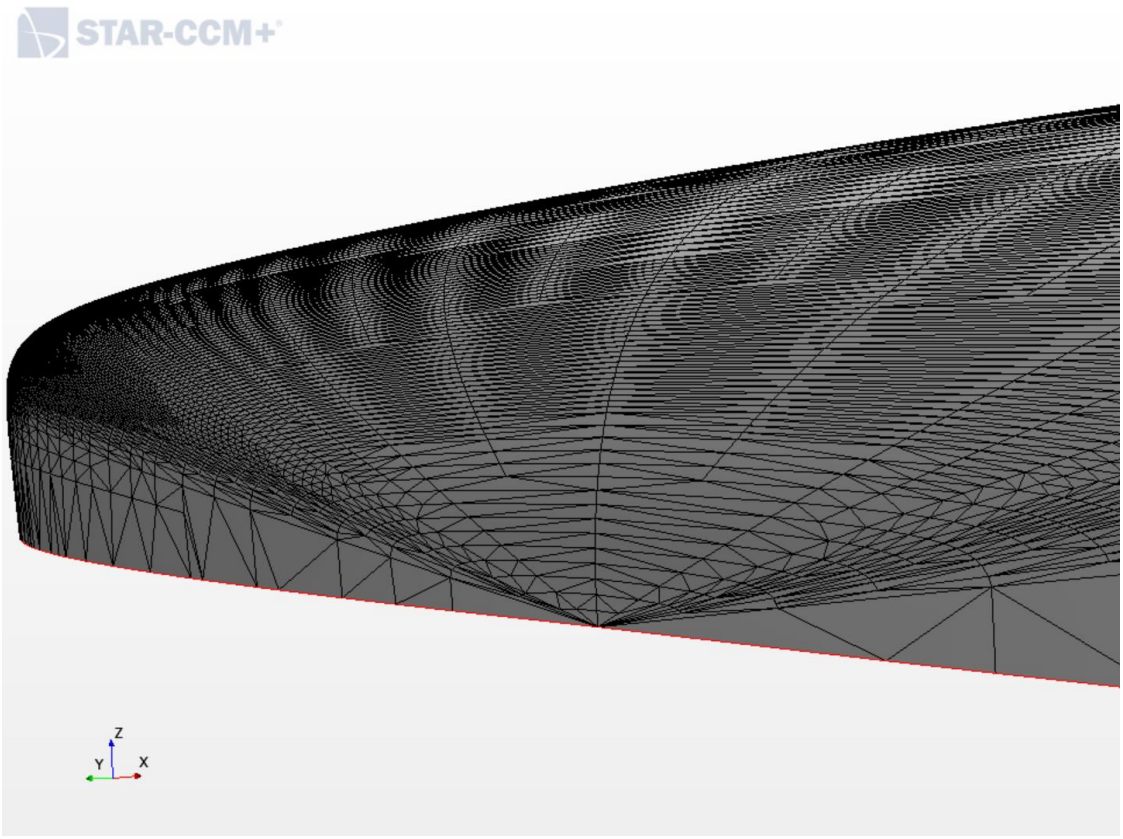


Figura 14-4 Triangolazione iniziale tail

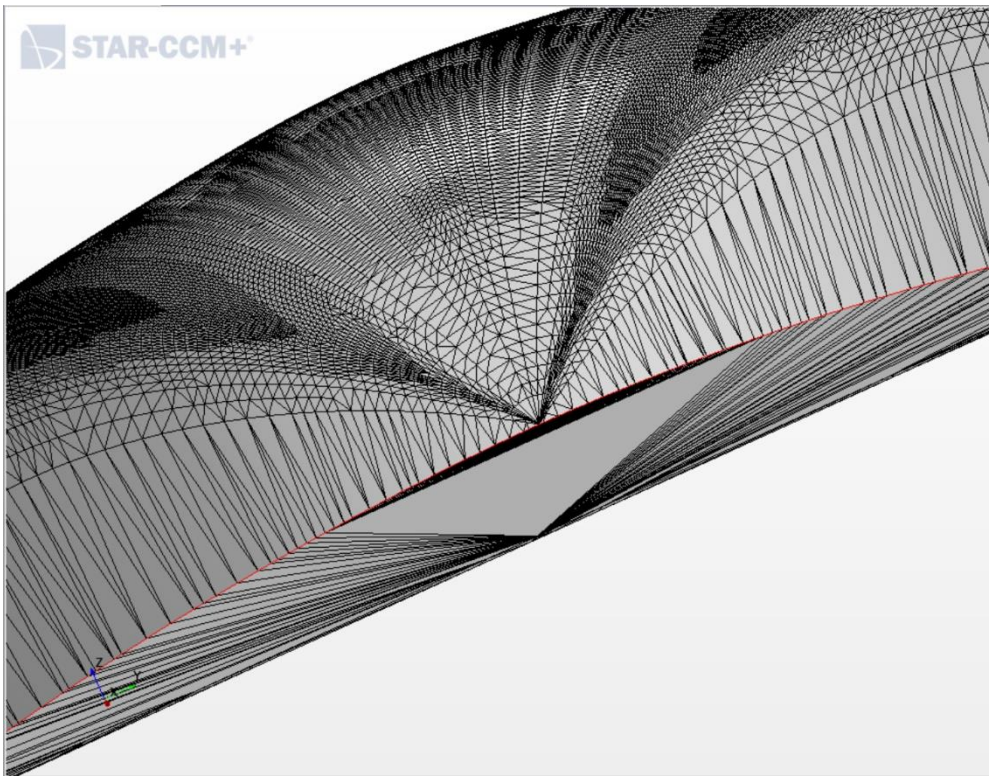


Figura 15-4 Triangolazione iniziale nose

Questo problema, dopo vari tentativi, è stato risolto con l'ausilio del comando *Surface Wrapper* che non fa altro che cambiare la triangolazione e rattoppare la superficie del modello Cad.

Per questa operazione è stata usata la divisione delle varie superfici in modo da utilizzare una triangolazione molto più fina ed accurata proprio in quelle zone che presentavano maggiori criticità (Nose, Tail e Rails)

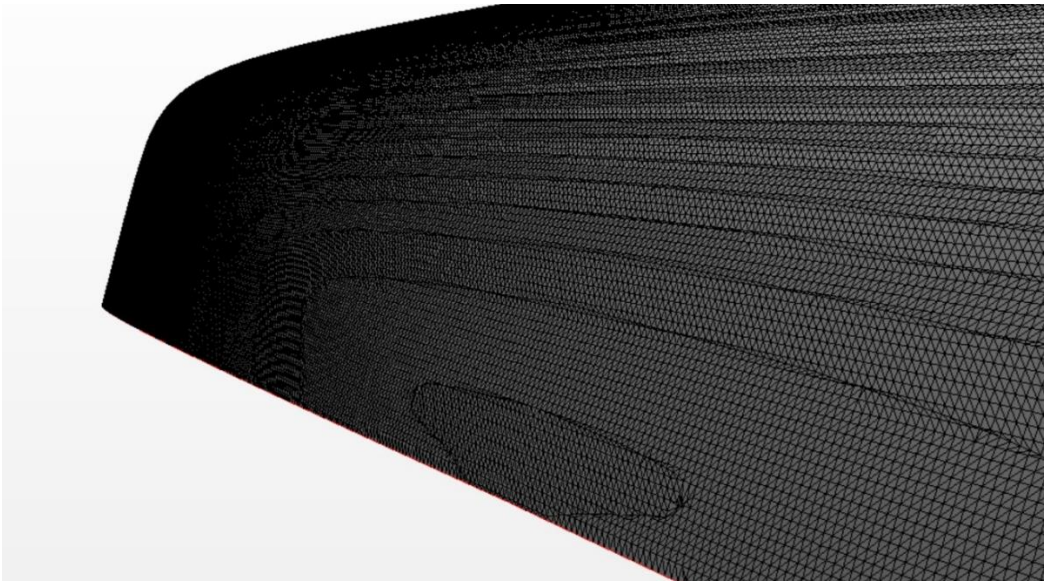


Figura 16-4 Triangolazione tail dopo surface Wrapper

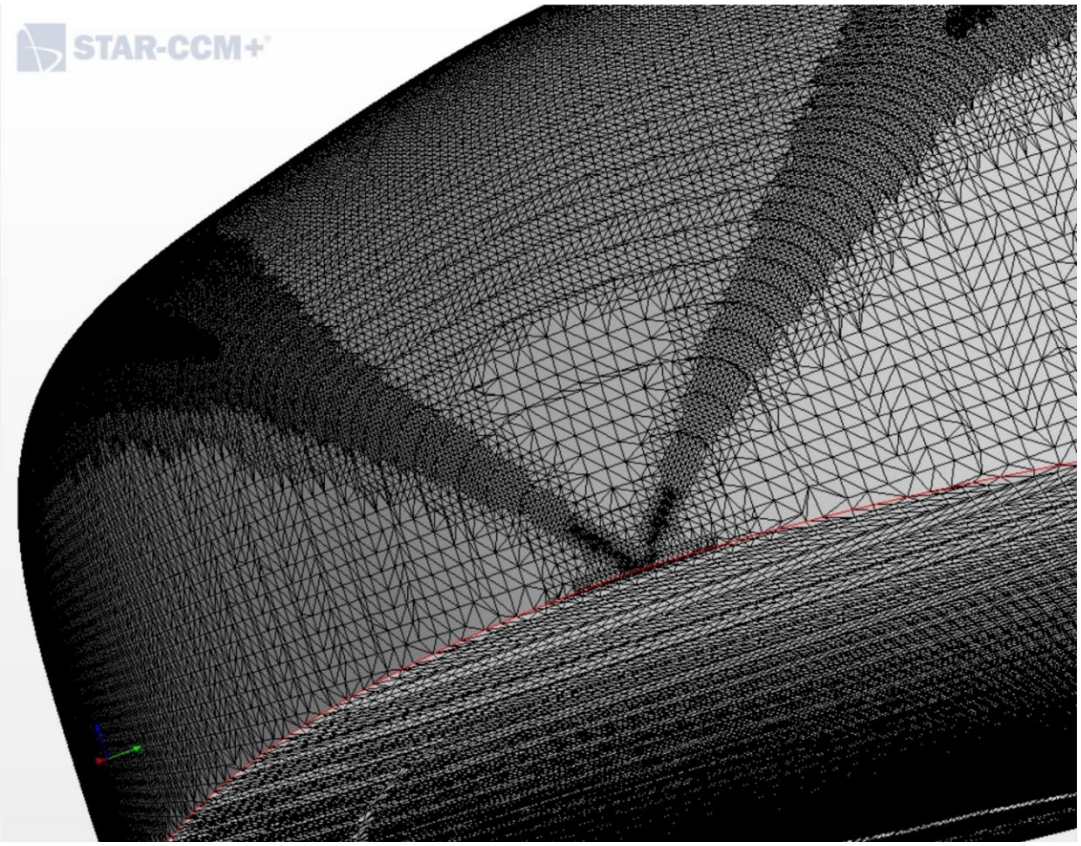


Figura 17-4 Triangolazione nose dopo surface Wrapper

Una volta risolto questo problema si è passati alla fase della meshatura vera e propria.
In Starccm+ è implementato il metodo dei volumi finiti e questo ci consente di modellare le celle in maniera opportuna, ad esempio di infittire il numero delle celle in corrispondenza delle zone in cui si hanno delle geometrie molto complesse, oppure in quelle zone in cui si vuole uno studio molto approfondito del comportamento del flusso.
Oltre a queste impostazioni la griglia può essere infittita anche manualmente, come è stato fatto per le zone in prossimità della tavola e per il pelo dell'acqua.
Sono state create varie superfici di controllo in particolare cinque in corrispondenza della tavola da surf per studiare con maggiore dettaglio i fenomeni che avvengono in prossimità della tavola. Per quanto riguarda il modello CAD è stato seguito lo stesso ragionamento del Surface Wrapper, ossia è stata fatta una mesh più fina in corrispondenza delle zone ad elevata curvatura (Nose, Tail e Rails). Sono stati anche creati alcuni volumi di controllo per osservare la separazione del flusso, della scia, delle onde che si generano a valle del corpo e per raffinare la mesh attorno alla superficie libera, che rappresenta i punto di contatto tra acqua e aria.
I controlli volumetrici permettono, una volta definita la forma del volume (nelle simulazioni sono stati usati parallelepipedi e cilindri), di specificare oltre a vari settaggi, la densità della mesh.

La mesh di background e di Overset è stata riportata nelle figure seguenti:

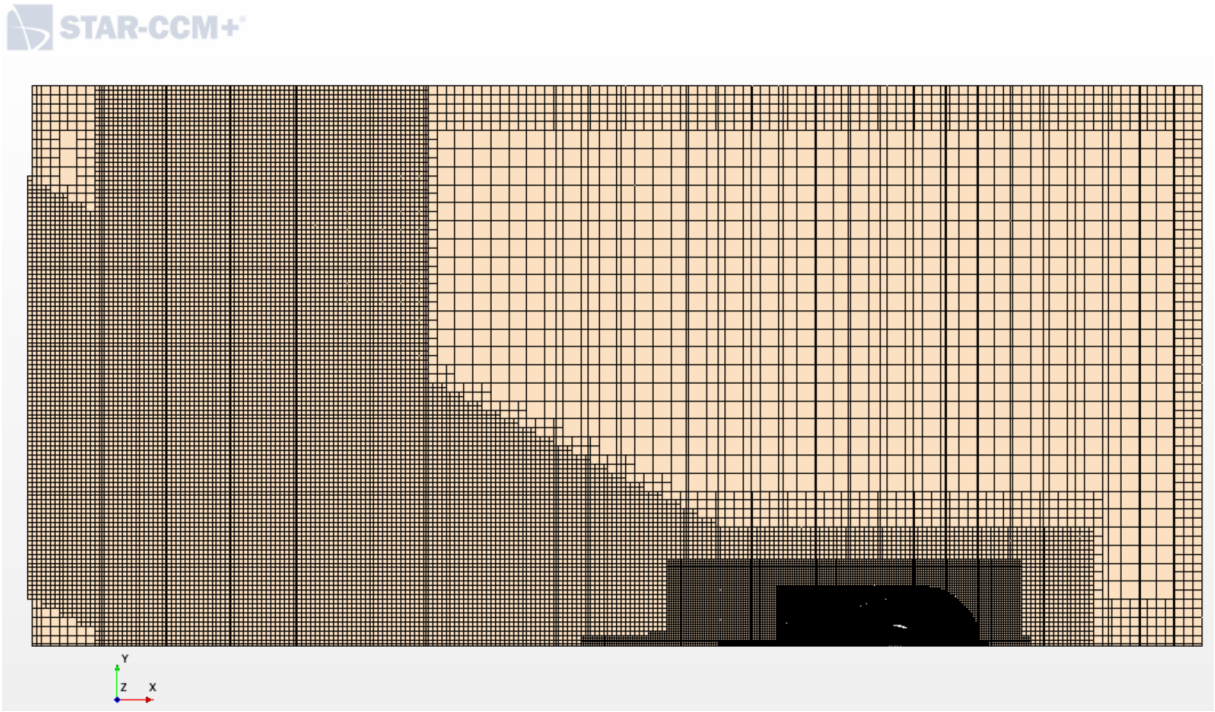


Figura 18-4 Mesh

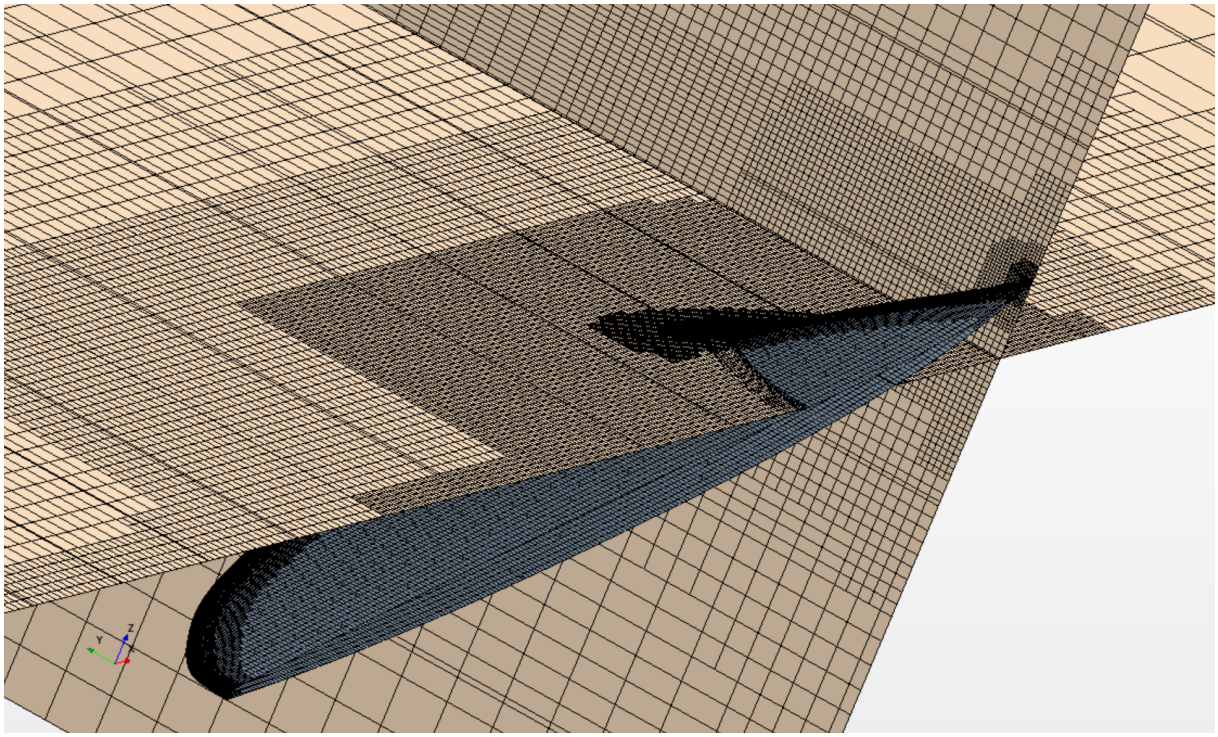


Figura 19-4 Mesh

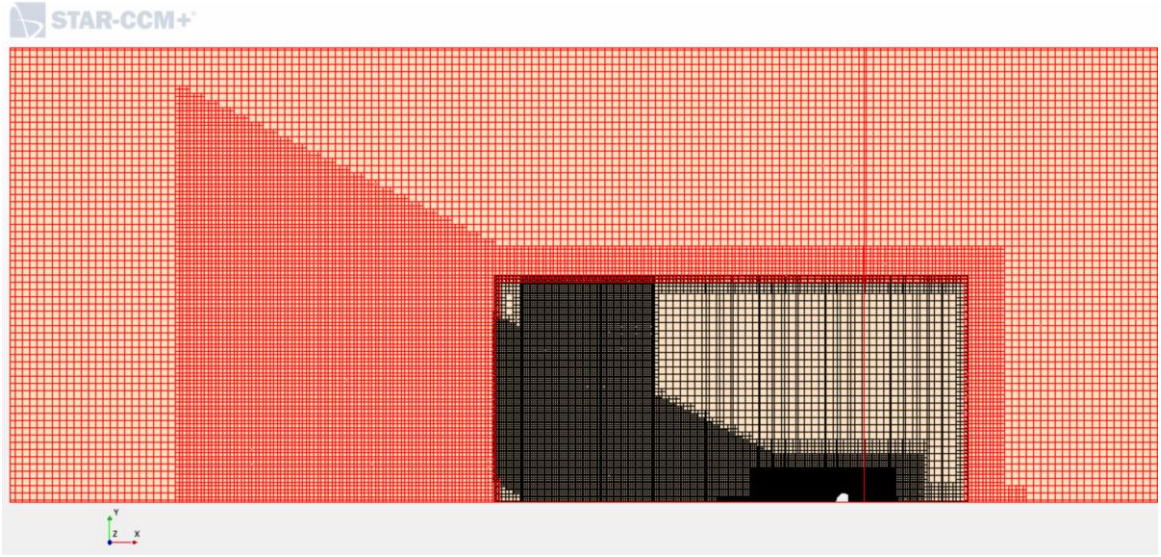


Figura 20-4 Mesh

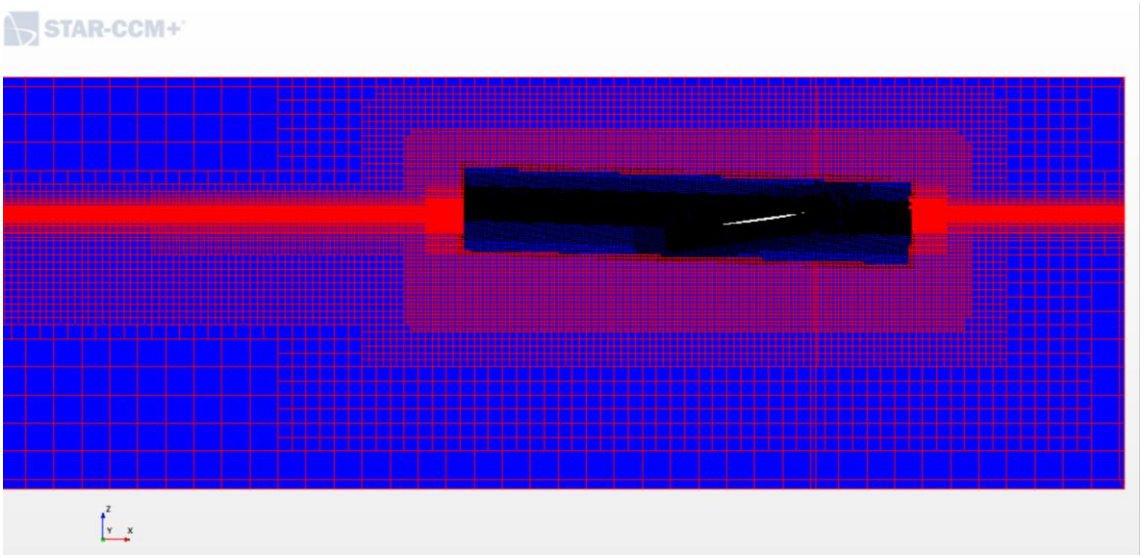


Figura 21-4 Mesh

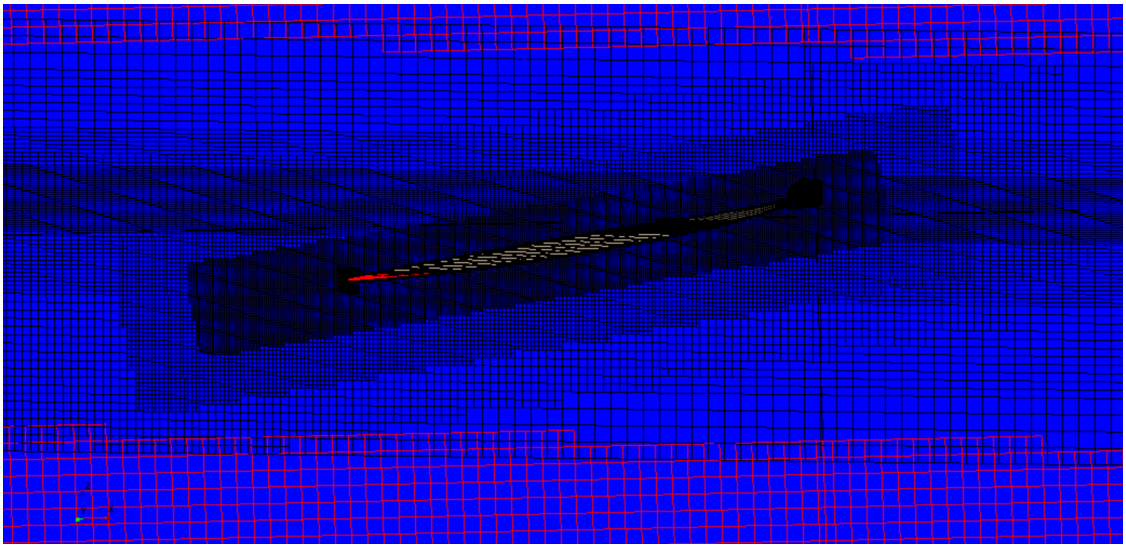


Figura 22-4 Mesh

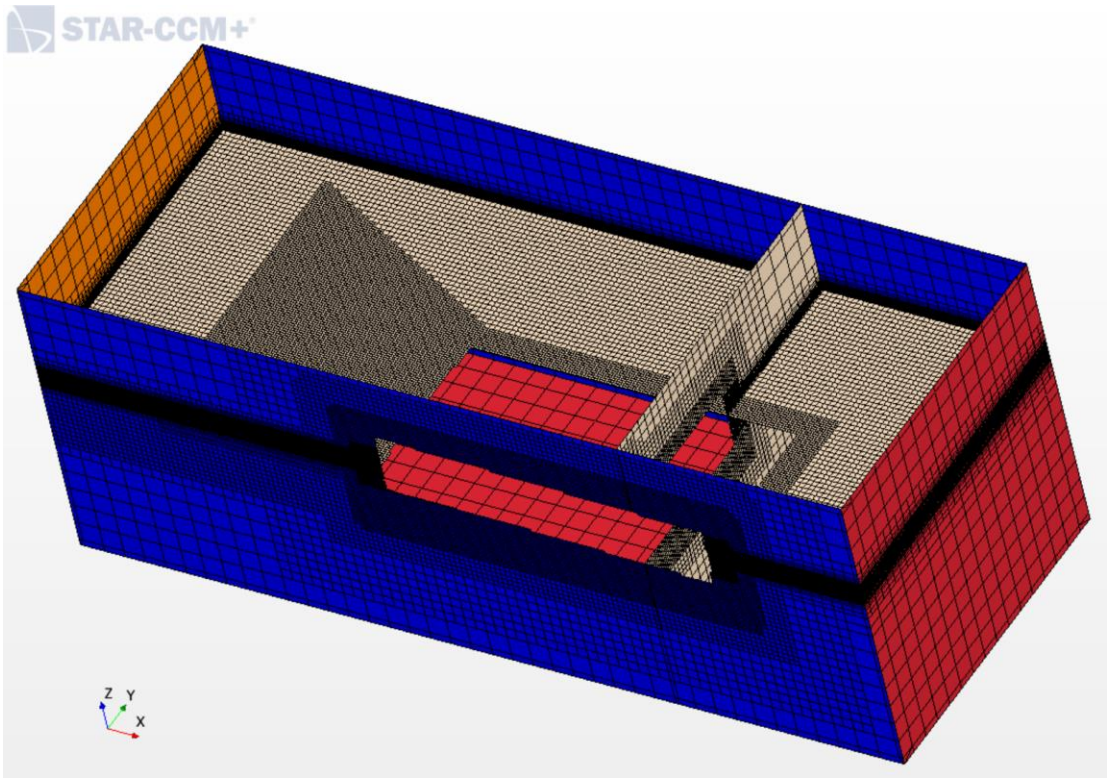


Figura 23-4 Mesh

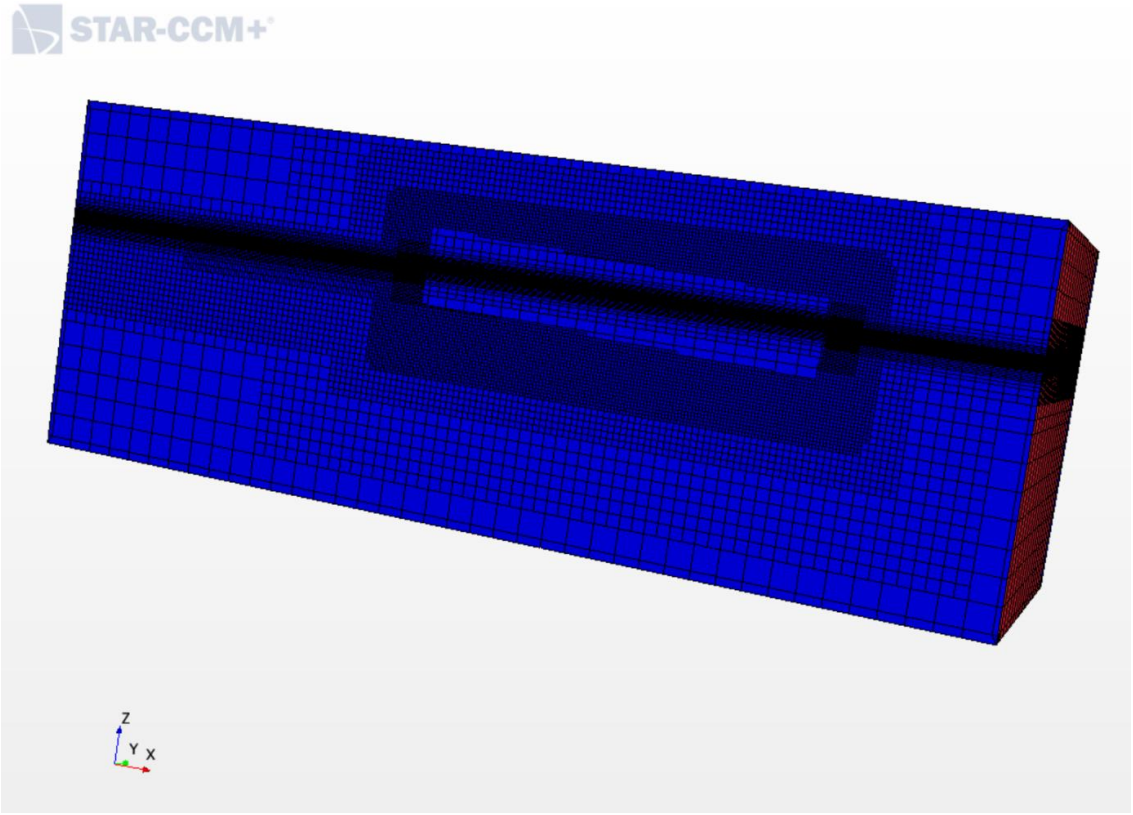


Figura 24-4 Mesh

Nelle tabelle 3-4, 4-4 e 5-4 sono riportati tutti i valori usati per la mesh del tank e dell'overset:

Parte Geometrica	Absolute x size	Absolute y size	Absolute z size
Free surface (coarse)	${base_size}*16	${base_size}*16	${base_size}*2
Free surface (fine)	${base_size}*8	${base_size}*8	${base_size}
Free surface (very fine)	${base_size}*8	${base_size}*8	${base_size}/2
Wake (very far)	${base_size}*8	${base_size}*8	${base_size}*8
Wake (far)	${base_size}*4	${base_size}*4	
Wake (near)	${base_size}*2	${base_size}*2	

Tabella 3-4 Mesh parti geometriche

Parte Geometrica	Custom control
Board refinement 01	${base_size}/2
Board refinement 02	${base_size}
Board refinement 03	${base_size}*2
Board refinement 04	${base_size}*4
Board refinement 05	${base_size}*8

Tabella 4-4 Dimensione mesh blocchi raffinamento

Parte Geometrica	Target surface size	Minimum surface size
Bottom, Top	${base_size}	${base_size}/8
Rails, Nose, Tail	${base_size}	${base_size}/32
Boundaries	${base_size}*4	${base_size}*4
Symmetry	${base_size}*4	${base_size}*4

Tabella 5-4 Dimensione mesh tavola da surf

Dove la *base_size* è una cella quadratica di riferimento con dimensione di 16mm. In questo modo è possibile generare una mesh parametrizzata rispetto ad una misura di riferimento; infatti si ha il vantaggio di avere tutte celle scalate tra loro, quindi è possibile aumentare o diminuire il numero di celle semplicemente cambiando il valore della cella target.
Per la superficie libera dell'acqua sono stati usati dei rettangoli aventi la dimensione lungo l'asse z minore rispetto a quella degli altri assi della terna ortogonale, così facendo si va a studiare cosa avviene nel pelo dell'acqua senza aumentare notevolmente il numero delle celle all'interno del nostro dominio.

4.5 CREAZIONE MODELLO DINAMICO

La tavola, durante la planata, è soggetta a numerosissime forze, di cui le principali sono due:

- Forza peso: che è composta sia dal peso del surfista che da quello della tavola
- Forza di gravità

Il modello DFBI (Dynamic Fluid Body Interaction) della simulazione si occupa proprio di trovare il giusto angolo di attacco e l'affondamento della tavola per garantire l'equilibrio.

In questo modo è possibile poi andare a fare le successive simulazioni disabilitando questo comando in quanto si conoscono i valori per cui una determinata tavola da surf è in equilibrio e si procede alla variazione dell'AoA nell'intorno di quella posizione per ottenere delle polari al variare del rocker.

Nella tabella 6-4 sono riportati i valori inseriti all'interno del programma:

Grandezza	Dimensione
Velocità angolare	[0.0, 0.0, 0.0] radian/s
Centro di massa	$${CoG_initial}
Momenti di inerzia	[0.0324522, 0.384579, 0.415305] kg/m^2
Forza di gravità	Enabled
Peso del surfista	[0.0, 0.0, -400.0] N
Peso della tavola	2,45 kg

Tabella 6-4 Condizioni modello DFBI

Il peso della tavola e il Centro di Massa sono stati presi dal programma BoardCad con cui è stata creta la tavola da surf, mentre tutti gli altri sono stati ricavati manualmente mediante alcuni tools che offre il software per la simulazione fluidodinamica.

I valori non vengono immessi all'inizio della simulazione, ma dopo un certo periodo di tempo (1s) per consentire inizialmente al flusso di stabilizzarsi; il peso viene rilasciato progressivamente e non in una sola volta per consentire alla tavola di stabilizzarsi gradualmente.

Ovviamente aumentando il release time ed il ramp time si avrà un tempo di calcolo molto più lungo, ma al contempo si raggiunge sicuramente un angolo di attacco che stabilizza sia le forze aerodinamiche che il momento, in quanto il rischio che si incorre nell'inserire tutto il peso simultaneamente è quello di far ribaltare la tavola.

Tramite il Free Motion si possono impostare i movimenti che il corpo può effettuare, che sono espressi in funzione delle coordinate scelte per la simulazione. Le rotazioni sono positive quando avvengono in senso orario e viceversa.

Il corpo sarà lasciato libero di traslare e ruotare lungo l'asse z quindi la tavola può affondare e cambiare il suo angolo di attacco.

Nello studio dei corpi plananti il rischio è proprio quello di non raggiungere la stabilità e generare dei momenti che fanno ribaltare il corpo, per ovviare a questo problema bisogna essere molto cauti nell'inserire il peso in modo graduale. Nello studio delle barche, ad

esempio, i pesi e le forze possono essere anche rilasciate tutte simultaneamente in quanto non generano momenti importanti che portano all'instabilità del corpo.

4.6 MODELLO FISICO

Il comportamento del fluido è descritto dalle equazioni di Navier-Stokes, ossia tre equazioni alle derivate parziali non lineari:

- Conservazione della massa
- Conservazione della quantità di moto
- Conservazione dell'energia

Per risolvere queste equazioni è necessario imporre delle condizioni al contorno a seconda del problema da analizzare.
La soluzione analitica di queste equazioni è quasi impossibile (tranne per alcuni casi molto semplificati) quindi si sfrutta la soluzione numerica nella quale vengono usate forme algebriche al posto di derivate parziali e degli integrali.
Il primo passo da eseguire per la risoluzione del problema è la discretizzazione del dominio di calcolo, che può essere svolto tramite i metodi delle differenze finite, elementi finiti o volumi finiti. Con questi metodi di risoluzione il calcolatore risolverà le equazioni per ogni cella, per questo è consigliabile limitare il numero di celle così il calcolatore avrà un numero minore di operazioni da svolgere il che si traduce in un costo computazionale meno elevato, anche se questo si traduce in una risoluzione minore.
Per tale simulazione, è necessario definire un modello di turbolenza ed in questo caso è stato scelto il modello $k-\omega$ composto da due equazioni, dove la seconda rappresenta il rate di dissipazione per unità di volume.
Quest'ultima equazione è scritta in funzione di ω, ossia la frequenza caratteristica dei vortici, ed è data da:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \overline{\boldsymbol{V}} \cdot \omega = C_{\omega 1} \frac{\omega}{k} \bar{\bar{r}} : \nabla \overline{\boldsymbol{V}} - C_{\omega 2} \omega^2 + \frac{\mu_t}{\rho \sigma_\epsilon} \nabla \omega$$

dove i termini nella parte destra rappresentano la produzione, dissipazione e trasporto della frequenza dei vortici. Questo modello viene principalmente usato nel caso in cui si hanno gradienti avversi di pressione e separazione dello strato limite.
Le parti liquide e gassose sono state trattate usando il modello Euleriano multifase in coppia con quello VOF (volume of fluid), che richiede la risoluzione di un'equazione aggiuntiva di trasporto in funzione di una variabile che indica la percentuale di fluido presente in ogni cella.
In seguito, vengono riportati i principali modelli utilizzati nella simulazione

Three Dimensional

Questo modello è preferibile in presenza di mesh tridimensionali, dove il fluido può spostarsi in tutte le direzioni; non è consigliabile attivare questo comando se non si hanno delle mesh tridimensionali.

All y+ Wall Treatment

Un Wall Treatment è l'insieme di ipotesi di modellazione vicino alla parete per i tre differenti modelli di turbolenza:

• Il trattamento della parete high-y+ avviene quando si è in prossimità della parete in cui la particella di fluido si trova all'interno della regione logaritmica dello strato limite.

• Il trattamento a parete low-y+ è adatto solo per modelli di turbolenza a basso numero di Reynolds in cui il substrato viscoso è correttamente risolto.

• Il trattamento a parete all-y+ è ibrido e tenta di emulare il modello high-y+ per le maglie grossolane e quello low-y+ per le maglie sottili.

Quest'ultimo è quello che meglio risponde indipendentemente dal tipo di mesh che viene usata.

La regione in prossimità del muro è suddivisa in quattro aree: laminar sub-layer, the blending region, the logarhitmic law region and the outer region. Ogni regione ha un effetto diverso sulla turbolenza per cui si deve porre particolare attenzione alla posizione y+ della prima cella nello strato limite. Verrà utilizzato un diverso insieme di equazioni a seconda delle dimensioni di questa cella, che, tuttavia, non deve essere compresa tra y+=5 e y+=30 perché non è disponibile alcun modello turbolento in quest'area.

Implicit unsteady

Questo modello usa il risolutore implicito non stazionario, l'unico che può essere combinato con il Segregated Flow e la cui funzione principale è controllare sia il calcolo in ogni momento fisico della simulazione sia la dimensione dell'intervallo di tempo. Tale modello è l'alternativa al risolutore *Esplicit unsteady* per la scala temporale del fenomeno preso in esame; uno svantaggio è l'instabilità se viene impiegato un passo temporale troppo grande.

Eulerian Multiphase

Questo modello viene preferito in presenza di due o più fluidi che si interfacciano all'interno dello stesso dominio per cui la simulazione risulta più complessa rispetto al caso in cui si va a trattare un singolo fluido. Il modello multifase Euleriano è utilizzato per definire le proprietà delle fasi quando se ne hanno diverse da gestire in cui ciascuna rimane una sostanza fisica distinta, senza cambiamento di fase. I due fluidi usate per queste simulazioni sono acqua e aria, ciascuna definita con densità e viscosità dinamica costanti. Il modello di interazione

(Multiphase Interaction) e l'equazione di stato (Multiphase Equation of State) vengono aggiunti automaticamente quando si sceglie il modello multifase Euleriano.

Volume Of Fluid (VOF)

Questo modello viene utilizzato in combinazione con il risolutore RANS per determinare la posizione della superficie libera; si tratta di una tecnica progettata a griglia fissa per due o più fluidi immiscibili dove la posizione dell'interfaccia tra i fluidi non è nota (incognita del problema). Nel modello VOF i fluidi sono risolti tramite lo stesso set di equazioni e il loro volume è monitorato per ogni singola cella in tutto il dominio. Questo modello presuppone che la risoluzione della mesh sia sufficientemente elevata per determinare la posizione e la forma dell'interfaccia tra le fasi, per questo è necessario un raffinamento della mesh nella posizione stimata della superficie libera.

Il modello VOF Waves viene impiegato per simulare le onde dovute alla forza di gravità superficiali sull'interfaccia tra un fluido leggero e un fluido pesante e insieme al modello 6-DOF Motion trova uso per applicazioni marine.

Supponendo che le onde abbiano una propagazione costante senza subire variazioni, il fronte delle onde può essere descritto con tre scale di lunghezza fisica: profondità dell'acqua, lunghezza d'onda e altezza d'onda. STAR-CCM + fornisce differenti modelli di onde VOF: quello utilizzato nella simulazione è il Flat Wave, un'onda piatta che emula un piano d'acqua tranquillo.

Gravity

Selezionando questo modello si include l'accelerazione gravitazionale all'interno della simulazione; la sua applicazione ha due effetti sui fluidi in STAR-CCM +: la pressione diventa pressione piezometrica e la forza del corpo dovuta alla gravità è inclusa nelle equazioni del momento. Questo modello è necessario quando si lavora con una superficie libera.

Segregated Flow

Questo solver risolve le equazioni di conservazione integrale di massa e quantità di moto in modo sequenziale, una dopo l'altra per le incognite del problema come u, v, w, p. Il segregated flow solver utilizza un algoritmo di accoppiamento pressione-velocità in cui il vincolo della conservazione di massa sul campo di velocità è soddisfatto risolvendo un'equazione di correzione della pressione. L'equazione di correzione della pressione si costruisce partendo dall'equazione di continuità e dalle equazioni del momento in modo tale da garantire che il campo di velocità soddisfi l'equazione di continuità, che si ottiene correggendo la pressione, la quale viene ottenuta come variabile dall' equazione di correzione della pressione. Questo solver va a formare un processo iterativo in cui ad ogni iterazione viene svolto un aggiustamento delle variabili; viene usato principalmente per dei flussi con densità costante.

5. ELABORAZIONE RISULTATI

Sono state eseguite diverse simulazioni per studiare come variano i parametri aerodinamici (portanza, resistenza e momento) nelle diverse geometrie. In particolare è stata effettuata un'analisi su dei surfboards aventi diversi rocker, parametro maggiormente incisivo nella dinamica delle tavole.

5.1 SIMULAZIONE DINAMICA PRELIMINARE

In un primo momento è stata eseguita una simulazione con DFBI attivo, proprio per capire quali fossero gli angoli di attacco e l'affondamento necessari a garantire l'equilibrio in determinate condizioni. In questa analisi è stato utilizzato un time-step molto piccolo che consente di avere una soluzione precisa del problema, anche se aumenta notevolmente il costo computazionale e di conseguenza il tempo per arrivare a convergenza.
La simulazione dinamica è stata eseguita esclusivamente per determinare un angolo di attacco che potesse garantire l'equilibrio dell'intero sistema (tavola e surfista), in quelle successive, invece, si osserverà come variano le caratteristiche aerodinamiche per le tavole prese in esame.
Nelle fig 1-5,2-5,3-5 sono riportati i risultati della simulazione: un'immagine delle onde generate dalla tavola, i grafici di portanza, resistenza e momento intorno all'asse x.

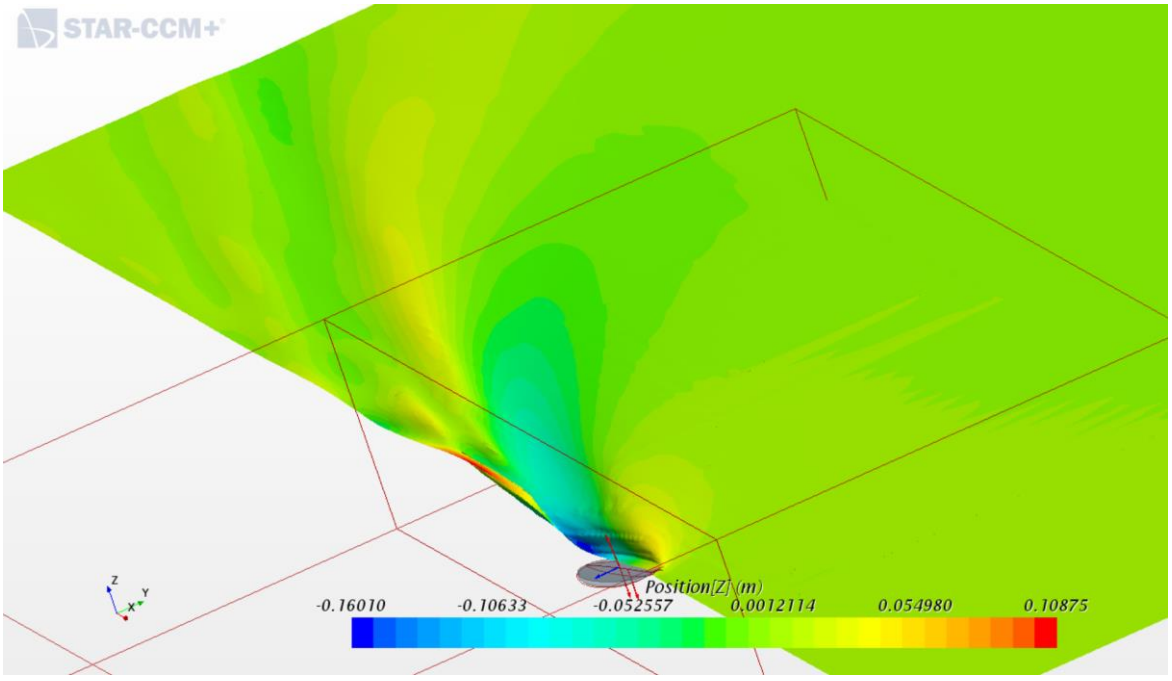


Figura 1-5 Onde generate dalla tavola

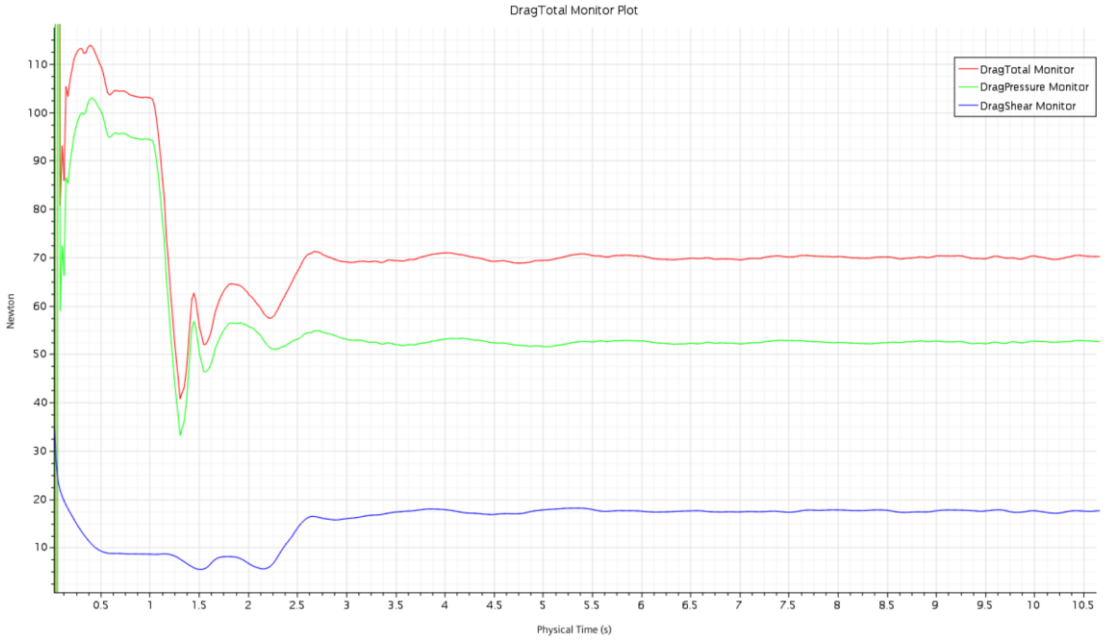


Figura 2-5 Grafico resistenza

Figura 3-5 Grafico portanza

Nel grafico della resistenza è chiaramente visibile che il contributo maggiore deriva dal campo di pressione che si genera nel bottom e in minima parte dalla resistenza parassita. Per corpi plananti come le tavole da surf le forze di pressione incidono in maniera considerevole nella resistenza totale, infatti i surfboards vengono trattati con particolari resine idrofobe al fine di rendere minimo il coefficiente di resistenza parassita.

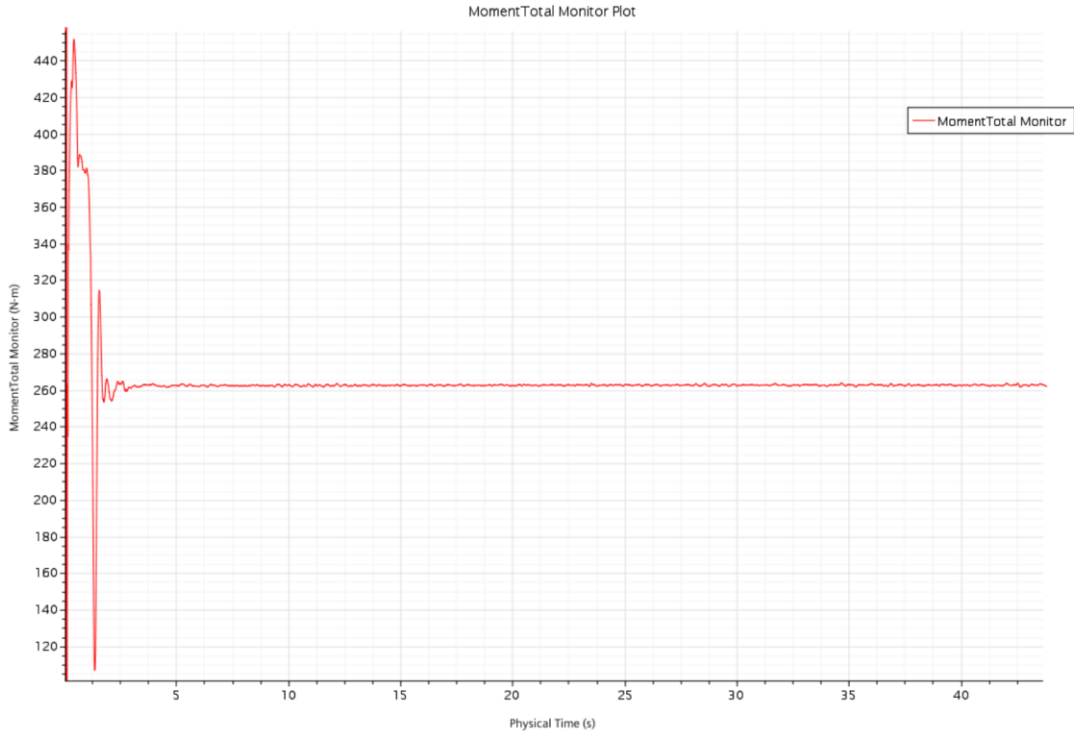


Figura 4-5 Grafico momento

Il momento viene calcolato in un punto che si trova al di sotto del nose e traslato verso l'alto del relativo valore di affondamento (in questo caso h) della tavola.

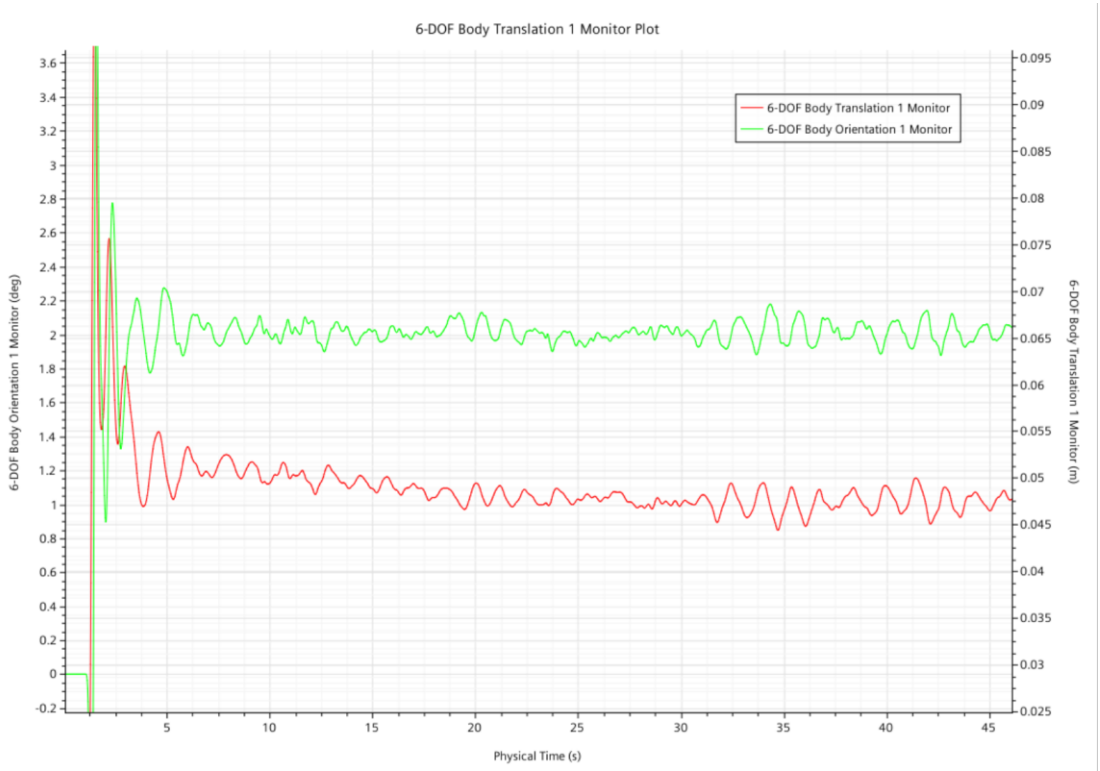


Figura 5-5 Grafico valori angolo di attacco e affondamento

Nel grafico in fig 5-5 riguardante l'angolo di attacco e l'affondamento il valore che rende stabile la tavola è di 8° rispetto al valore impostato inizialmente di 10° con un affondamento di 0.7. Il grafico va letto come una variazione da aggiungere ai valori impostati all'inizio della simulazione e non come valori finali.

Nei grafici delle simulazioni è possibile notare il transitorio e il valore di regime che presenta comunque delle piccole oscillazioni nell'intorno della posizione; questo dato è molto importante in quanto dovrà poi essere raggiunto attraverso una simulazione steady-state e con un time-step più grande proprio per permettere una riduzione dei tempi di calcolo senza compromettere la validità del risultato.

Nella fig. 6-5 sono riportati i residui della simulazione, il cui diagramma viene creato automaticamente dal risolutore e riporta in ascisse il numero di iterazioni della simulazione mentre in ordinate il valore in scala logaritmica dei residui.

Il grafico è sintomo della convergenza o meno della simulazione, infatti se l'andamento dei residui è periodico ne indica la convergenza, se, al contrario, l'andamento è divergente non si arriva ad una soluzione del problema, per cui è necessario ricontrollare i parametri iniziali.

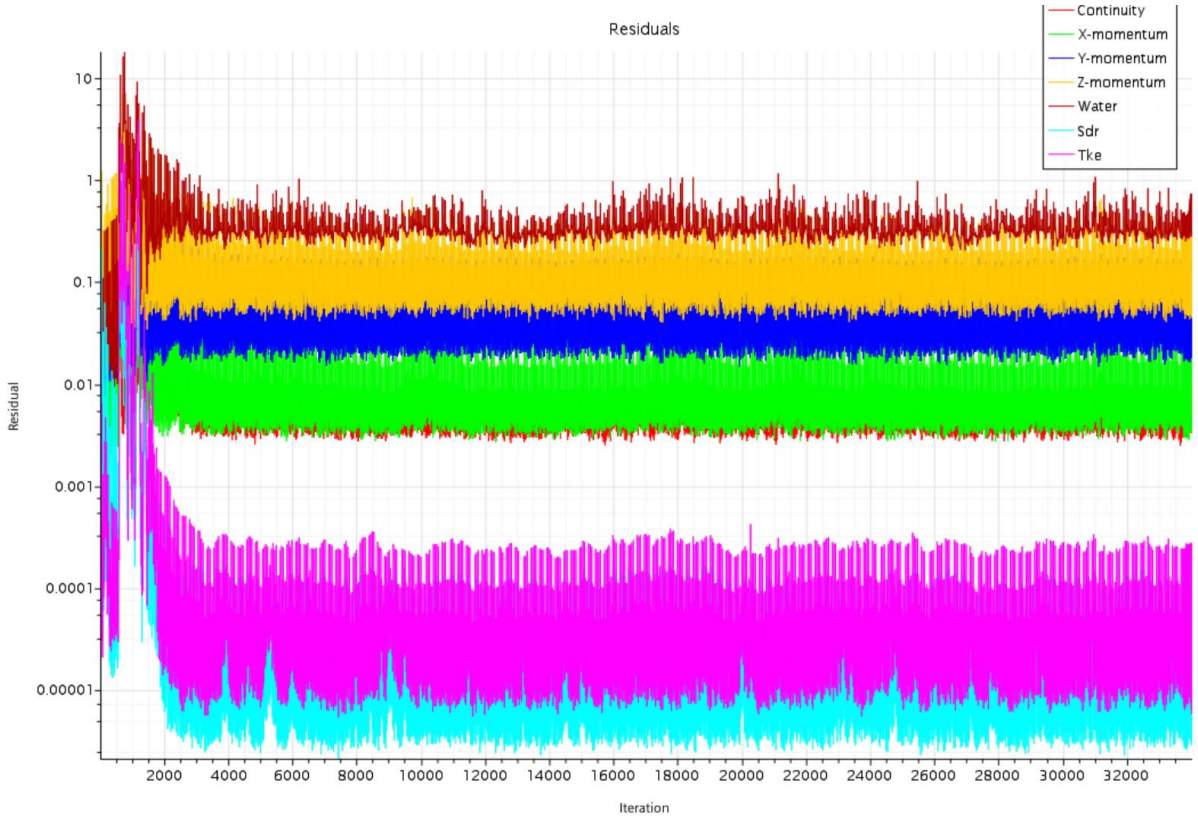


Figura 6-5 Grafico dei residui

Nelle simulazioni stazionarie il software, tramite una serie di iterazioni, tenta di raggiungere un risultato a convergenza. Essendo in un campo altamente turbolento, non stazionario, non si raggiunge una soluzione puntuale ma dei valori oscillanti intorno ad una posizione di equilibrio che coincide con quella trovata nella soluzione time-dependent. Questo metodo ci consente di ottenere dei risultati soddisfacenti con dei tempi di calcolo ragionevoli. Infatti l'obiettivo delle simulazioni fluidodinamiche, oltre ad ottenere dei risultati senza prove

sperimentali, è quello di fornirli in tempi molto rapidi, per questo è necessaria la riduzione dei costi computazionali.
Nei seguenti capitoli sono riportate le analisi svolte per le varie tipologie di tavole da surf in cui viene incrementata sempre di più l'incurvatura della tavola. Per rendere automatizzato il processo di variazione dell'angolo di attacco e dell'affondamento è stata creata una macro in codice Java che varia automaticamente questi parametri dopo un certo numero di iterazioni.
Per la creazione il software StarCcm+ mette a disposizione il comando di registrazione di una macro mentre vengono inseriti i comandi da parte dell'utente. Il programma salverà questa serie di comandi in un file Java apribile con qualsiasi altro programma nel quale sono illustrati gli step eseguiti dall'utente. Da questo momento è possibile modificare il file inserendo dei loop per ripetere determinate operazioni; in particolare, nel nostro caso, è stata inserita la procedura per variare angolo di attacco e affondamento per poi procedere alla risoluzione della simulazione. Una volta eseguito questo processo il file viene salvato per evitare di sovrascrivere i dati, viene cancellata la soluzione e si procede con un nuovo valore di angolo di attacco o affondamento.
Per vedere la macro si rimanda all'appendice A.
Questo processo automatizzato ha permesso di inserire all'interno del server HPC Polito le varie simulazioni e ottenere i risultati senza dover reimpostare ogni volta le condizioni inziali.

5.2 ROCKER_06

Questa tavola presenta una curvatura minore rispetto alle altre studiate nei capitoli successivi, infatti per le sue caratteristiche geometriche viene utilizzata dai principianti.
Nella tabella 1-5 sono riportati i valori di angoli di attacco e affondamento che sono stati variati durante la simulazione ed i valori di portanza, resistenza e momento che sono stati rivelati per ogni tipo di configurazione.

Variazione AoA [deg]	Affondamento [cm]	Lift [N]	Drag shear [N]	Drag pressure [N]	Drag [N]	Moment [N*m]
2	h=2	153,8	23,74	9,8	33,5	90,5
4		362,6	33,7	25,5	59,2	266,5
6		572,5	24,5	62,9	87,5	433,8
8		792,7	24,7	115,5	140,1	623,2
2	h=5	2,48	0,13	0,14	0,27	2
4		157,2	15,6	12,8	28,6	114,4
6		397	25,2	40	65	329,4
8		661,4	32,4	83	116	564,4
2	h=8	0,52	0,12	0,04	0,16	0,066
4		44,3	6,5	4,4	10,9	33,7
6		274,6	16,8	28,2	44,8	241,6
8		529	25,6	67,6	93,2	474,3

Tabella 1-5 Valori dei parametri aerodinamici

Nei dati riportati nella tabella 1-5 possiamo vedere come la portanza aumenta al variare dell'angolo di incidenza e dell'affondamento.
Inoltre sono stati trascritti i dati sia della resistenza di attrito dovute alle forze di pressione che si generano al di sotto della tavola e di quella parassita che deriva dal contatto con il surfboard con il pelo dell'acqua.
Nel caso di angoli di attacco e affondamenti bassi si vede come le forze di attrito parassite siano superiori a quelle di pressione, proprio perché le pressioni al di sotto della tavola sono nulle in quanto l'acqua lambisce il bottom. Questi valori non hanno molto significato in quanto nella realtà non vengono mai usati, ma sono comunque stati studiati nella simulazione per evidenziare il fenomeno della resistenza.
Nei grafici in fig. 7-5, 8-5, 9-5 sono riportati gli andamenti delle forze aerodinamiche per differenti angoli di attacco.

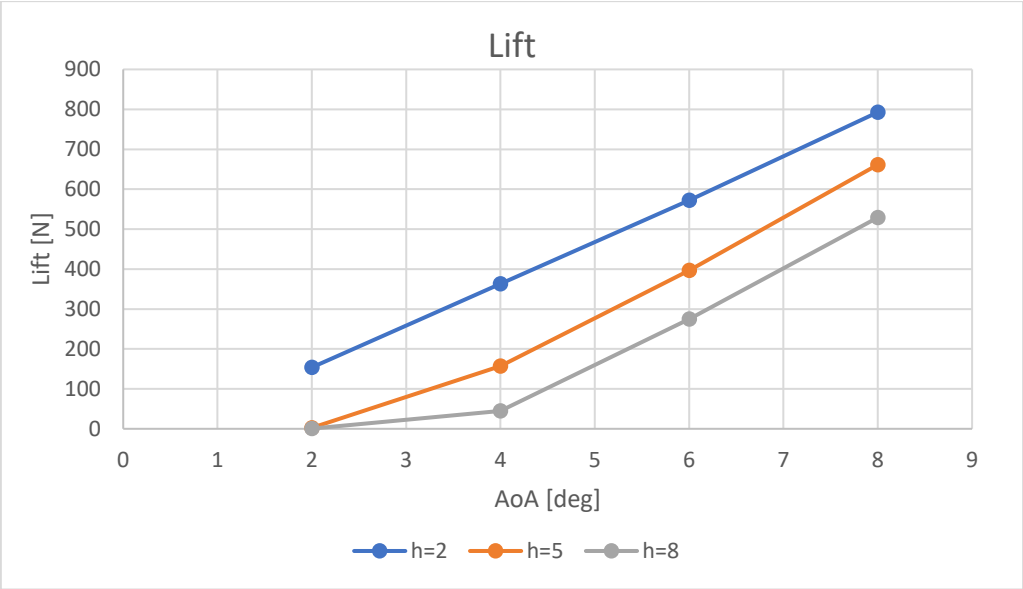


Figura 7-5 Grafico della portanza

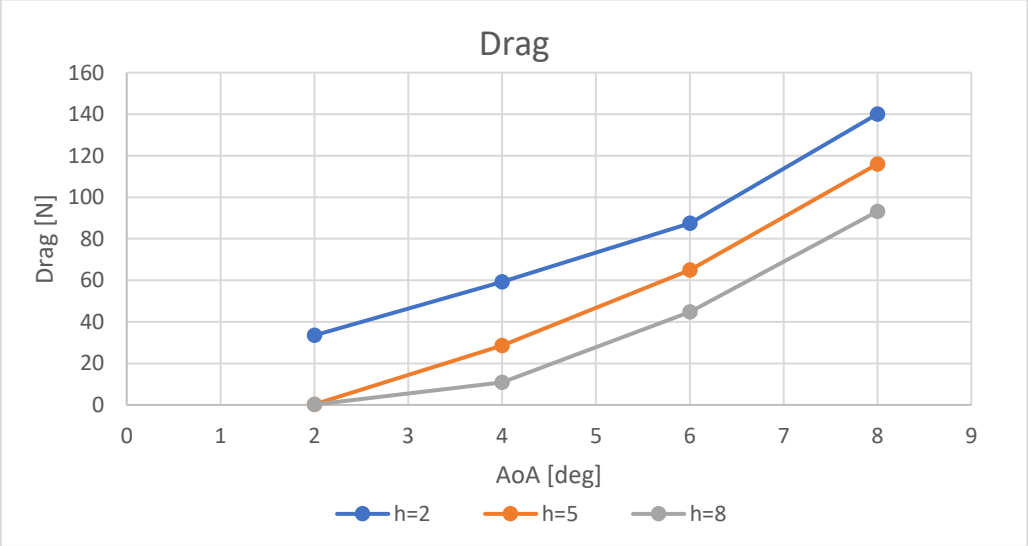


Figura 8-5 Grafico della resistenza

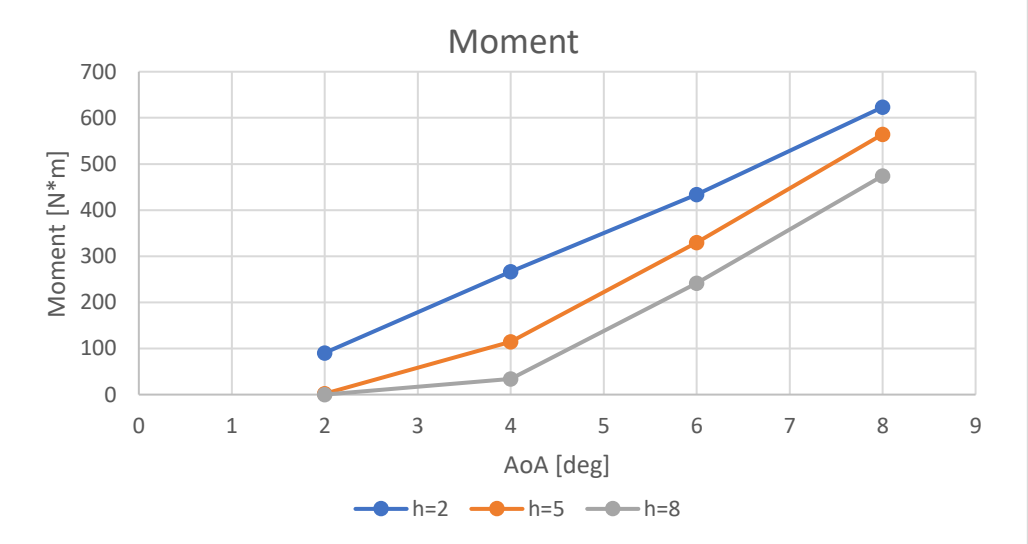


Figura 9-5 Grafico del momento

5.3 ROCKER_09

La tavola analizzata in questo capitolo presenta una curvatura intermedia, tanto da essere usata principalmente da surfisti con un certo livello di esperienza.

Nella tabella 2-5 sono riportati i valori delle forze aerodinamiche in gioco prese dalle simulazioni.

Variazione AoA [deg]	Affondamento [cm]	Lift [N]	Drag shear [N]	Drag pressure [N]	Drag [N]	Moment [N*m]
2	h=2	19,8	13,8	6,7	20,6	-28,8
4		219,2	24,1	22,3	46,4	130,8
6		440,2	34,5	48,4	82,6	315,2
8		672,1	41,2	86,4	127,6	498,7
2	h=5	0,5	0,14	0,2	0,34	-0,86
4		98,4	14,4	12,5	26,9	41,8
6		325,2	25,9	37	62,9	241,3
8		569,2	33	74,1	107,1	450,5
2	h=8	0,4	0,12	0,94	0,22	-0,2
4		-0,12	4,9	3,4	8,4	-23,6
6		204,7	15	24,3	39,3	156,4
8		444,5	25,6	60,8	86,8	370,7

Tabella 2-5 Valori dei parametri aerodinamici

Si un comportamento delle forze aerodinamiche analogo alla precedente tavola, ossia un aumento della portanza e della resistenza in seguito all'incremento dell'angolo di attacco e dell'affondamento.

La differenza sta nel fatto che per angoli di attacco e affondamento simili la portanza e la resistenza sono minori; questo fenomeno accade perché, essendo minore la parte a contatto con l'acqua, la superficie bagnata della tavola diminuisce.

Nella tabella 2-5 compaiono anche dei valori con una portanza negativa, che stanno a significare una deportanza della tavola.

Questo risultato viene ancora di più evidenziato nelle tavole con elevato rocker, infatti quando vengono poste a contatto con l'acqua, a causa della loro curvatura, si viene a creare una depressione nel bottom e di conseguenza la tavola viene "schiacciata" dalla pressione atmosferica.

Il momento negativo evidente in alcune simulazioni, in particolare in quelle a bassa incidenza, indica che la tavola tende cabrare anziché picchiare.

Nelle fig 10-5,11-5 e 12-5 vengono riportati i grafici relativi alle forze aerodinamiche.

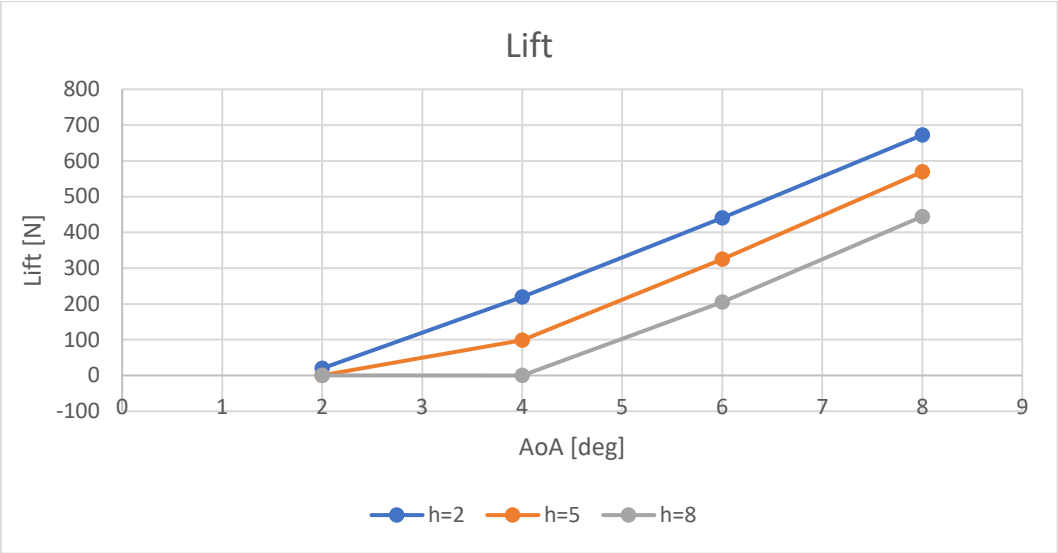


Figura 10-5 Grafico della portanza

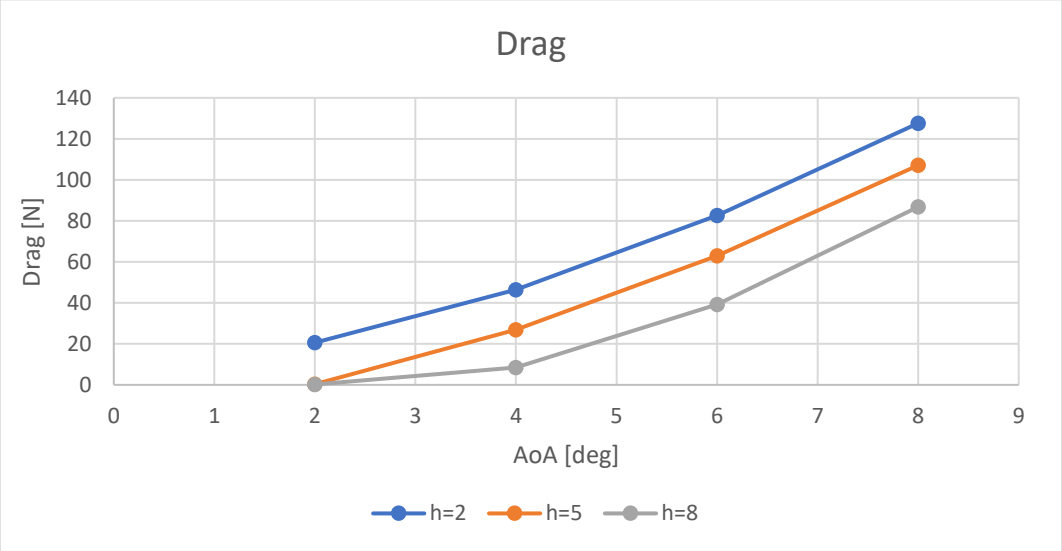


Figura 11-5 Grafico della resistenza

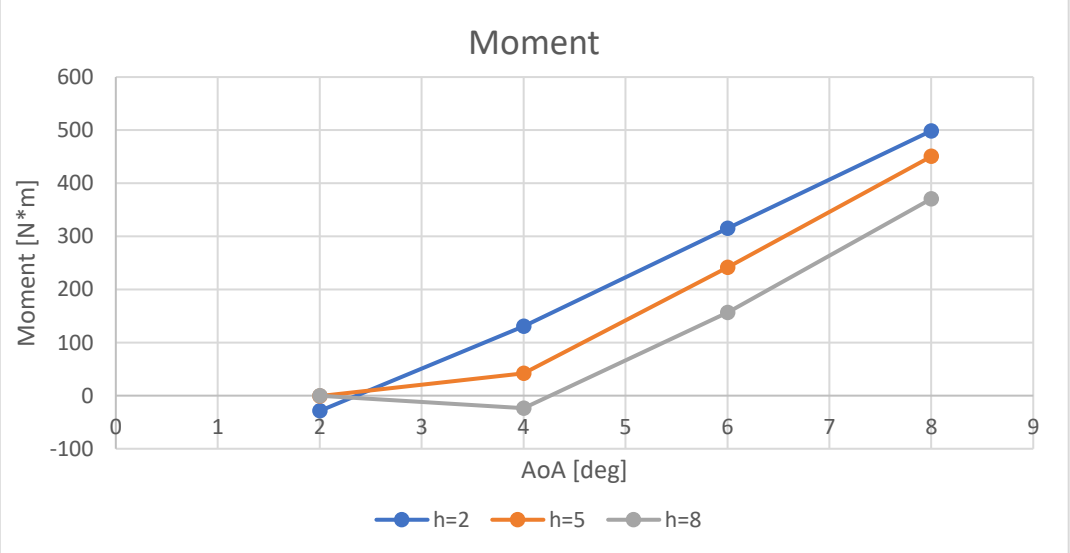


Figura 12-5 Grafico del momento

5.4 ROCKER_12

La tavola in esame presenta una curvatura superiore rispetto alla altre, rispettivamente del 60% e del 30% rispetto al Rocker_06 e al Rocker_09.
Questo tipo di geometria viene principalmente utilizzata nelle tavole per surfisti molto esperti in quanto rende la planata difficoltosa e ha necessità di molta velocità per generare la portanza necessaria ad equilibrare il peso del surfista.
Nella tabella 3-5, come per gli altri surfboard, vengono riportate le forze aerodinamiche agenti su di essa.

Variazione AoA [deg]	Affondamento [cm]	Lift [N]	Drag shear [N]	Drag pressure [N]	Drag [N]	Moment [N*m]
2	h=2	-23,8	12,4	9,6	22	-81,6
4		154,1	24,5	25	49,5	55,5
6		367,1	34,1	48,4	84	230,1
8		578,1	40,6	85,2	125,8	388,2
2	h=5	0,15	0,14	0,33	0,47	-1,47
4		44,7	14,7	13,3	28,1	-20
6		256,9	25,4	35,7	61,3	160
8		486,6	32,7	73,9	107,6	354,9
2	h=8	0,34	0,13	0,19	0,32	-0,48
4		-23,2	3,1	2,9	5,9	-46,2
6		141,9	15,4	21,8	36,6	80
8		365,44	24,9	55,7	80,6	278,3

Tabella 3-5 Valori dei parametri aerodinamici

Anche in questo caso viene confermato quanto detto per le altre tavole rispetto alla variazione di portanza e resistenza dovuta ad un differente angolo di attacco e affondamento.
Si nota che il fenomeno della deportanza, come detto nel capitolo precedente, viene accentuato a causa di una curvatura maggiore della tavola.
Il surfboard con un rocker accentuato, come quello presa in esame, presenta una superficie a contatto con l'acqua molto bassa, di conseguenza ha bisogno di angoli di attacco molto elevati per generare una portanza adeguata.

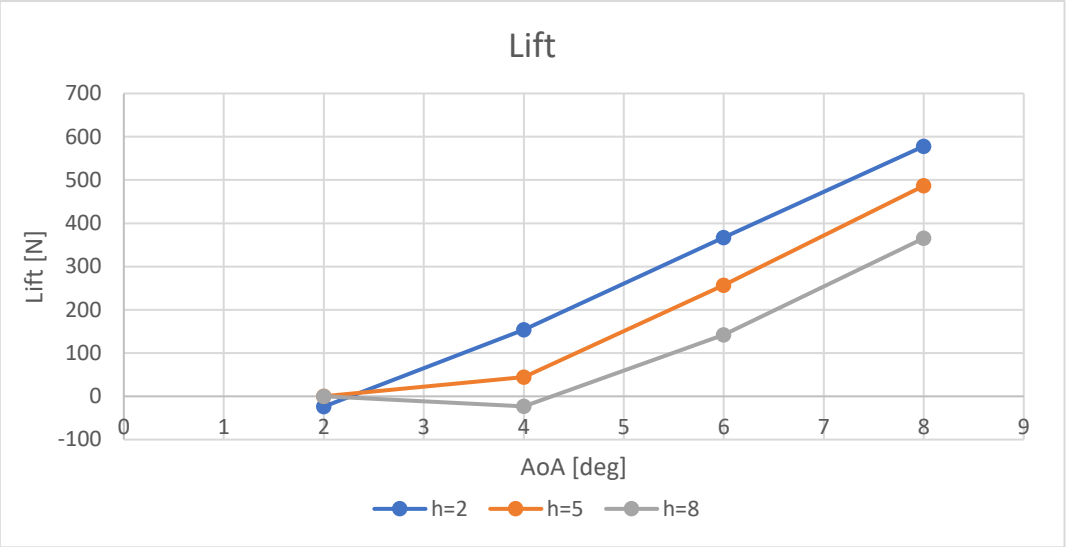


Figura 13-5 Grafico della portanza

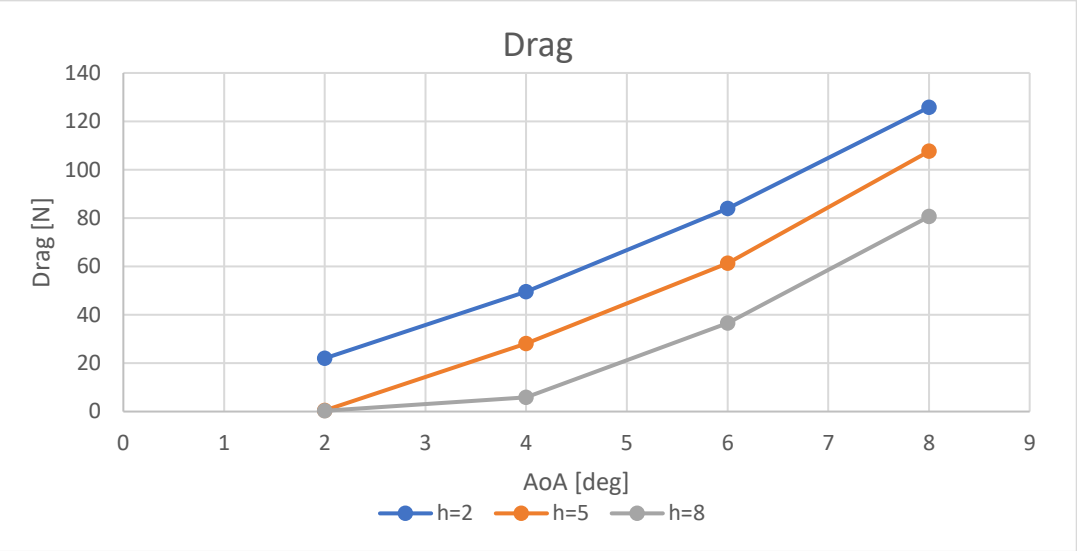


Figura 14-5 Grafico della resistenza

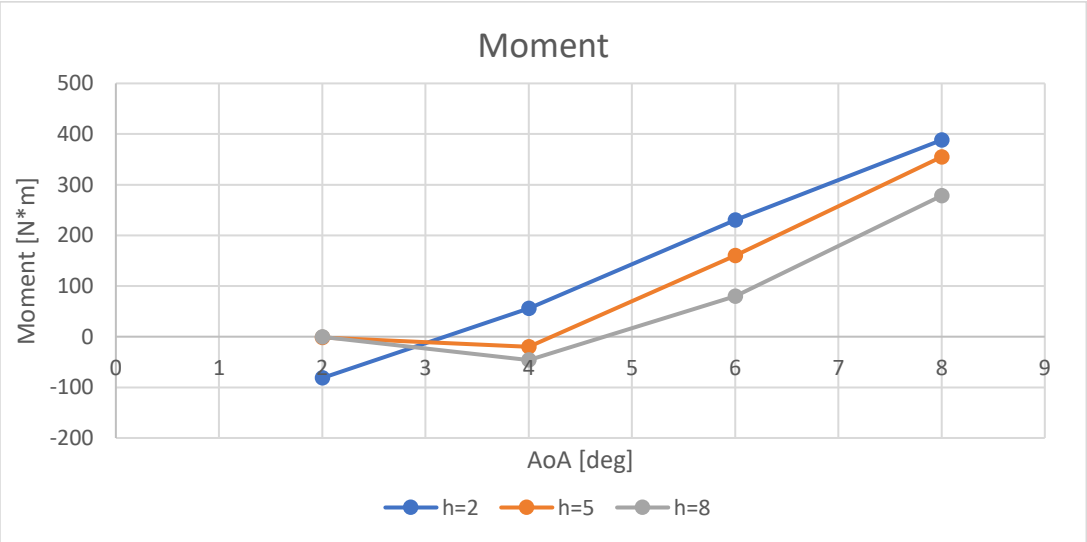


Figura 15-5 Grafico del momento

5.4 RISULTATI FINALI

Nel seguente capitolo verranno riassunti i principali risultati derivanti dalle simulazioni svolte in precedenza.

Tavola	Variazione AoA [deg]	Affondamento [cm]	Lift [N]	Drag shear [N]	Drag pressure [N]	Drag [N]	Moment [N*m]
Rocker_06	2	2	153,8	23,74	9,8	33,5	90,5
	4	2	362,6	33,7	25,5	59,2	266,5
	6	2	572,5	24,5	62,9	87,5	433,8
	8	2	792,7	24,7	115,5	140,1	623,2
Rocker_09	2	2	19,8	13,8	6,7	20,6	-28,8
	4	2	219,2	24,1	22,3	46,4	130,8
	6	2	440,2	34,5	48,4	82,6	315,2
	8	2	672,1	41,2	86,4	127,6	498,7
Rocker_12	2	2	-23,8	12,4	9,6	22	-81,6
	4	2	154,1	24,5	25	49,5	55,5
	6	2	367,1	34,1	48,4	84	230,1
	8	2	578,1	40,6	85,2	125,8	388,2
Rocker_06	2	5	2,48	0,13	0,14	0,27	2
	4	5	157,2	15,6	12,8	28,6	114,4
	6	5	397	25,2	40	65	329,4
	8	5	661,4	32,4	83	116	564,4
Rocker_09	2	5	0,5	0,14	0,2	0,34	-0,86
	4	5	98,4	14,4	12,5	26,9	41,8
	6	5	325,2	25,9	37	62,9	241,3
	8	5	569,2	33	74,1	107,1	450,5
Rocker_12	2	5	0,15	0,14	0,33	0,47	-1,47
	4	5	44,7	14,7	13,3	28,1	-20
	6	5	256,9	25,4	35,7	61,3	160
	8	5	486,6	32,7	73,9	107,6	354,9
Rocker_06	2	8	0,52	0,12	0,04	0,16	0,066
	4	8	44,3	6,5	4,4	10,9	33,7
	6	8	274,6	16,8	28,2	44,8	241,6
	8	8	529	25,6	67,6	93,2	474,3
Rocker_09	2	8	0,4	0,12	0,94	0,22	-0,2
	4	8	-0,12	4,9	3,4	8,4	-23,6
	6	8	204,7	15	24,3	39,3	156,4
	8	8	444,5	25,6	60,8	86,8	370,7
Rocker_12	2	8	0,34	0,13	0,19	0,32	-0,48
	4	8	-23,2	3,1	2,9	5,9	-46,2
	6	8	141,9	15,4	21,8	36,6	80
	8	8	365,44	24,9	55,7	80,6	278,3

Tabella 4-5 Valori dei parametri aerodinamici delle tavole in esame

Nella tabella 4-5 vengono riportati i grafici derivanti dalle simulazioni svolte, mentre nei grafici che seguono sono confrontate le caratteristiche delle varie tavole.

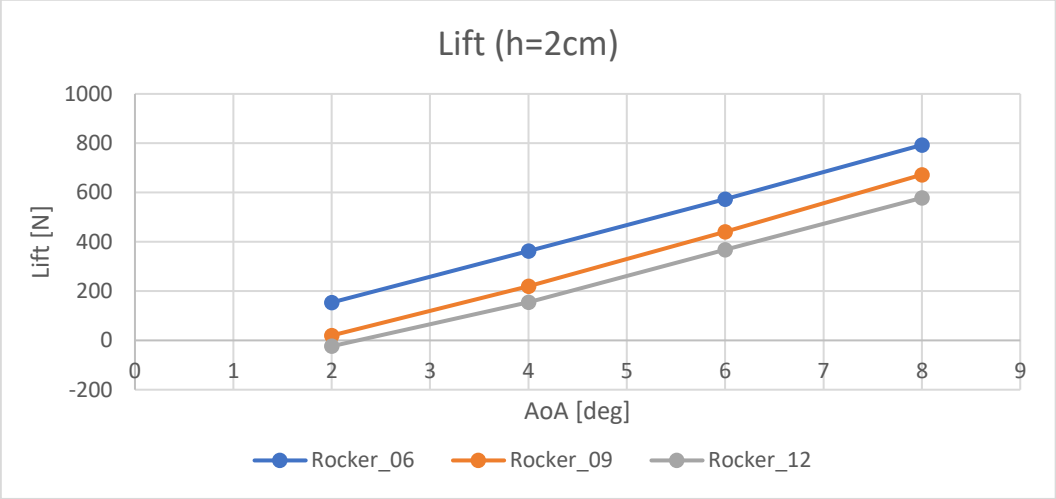


Figura 16-5 Grafico della portanza per h=2cm

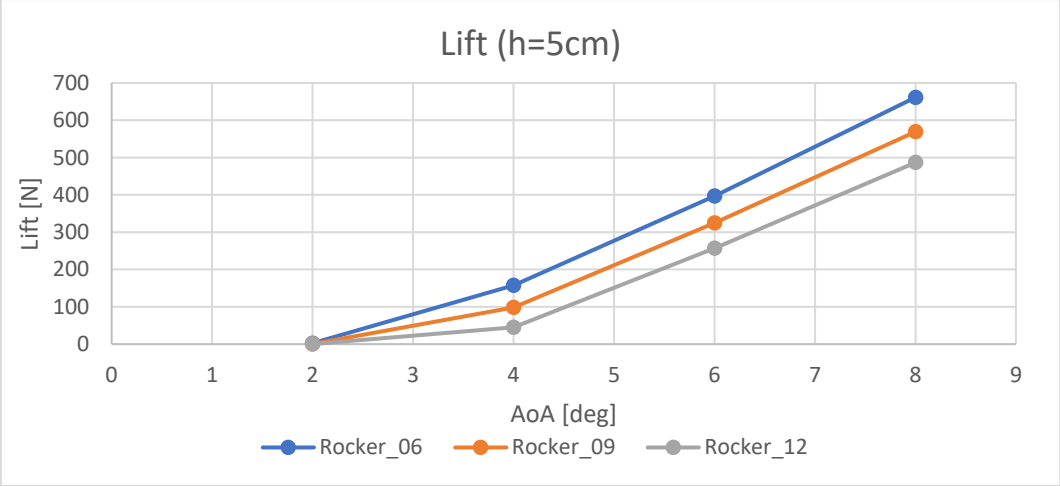


Figura 17-5 Grafico della portanza per h=5cm

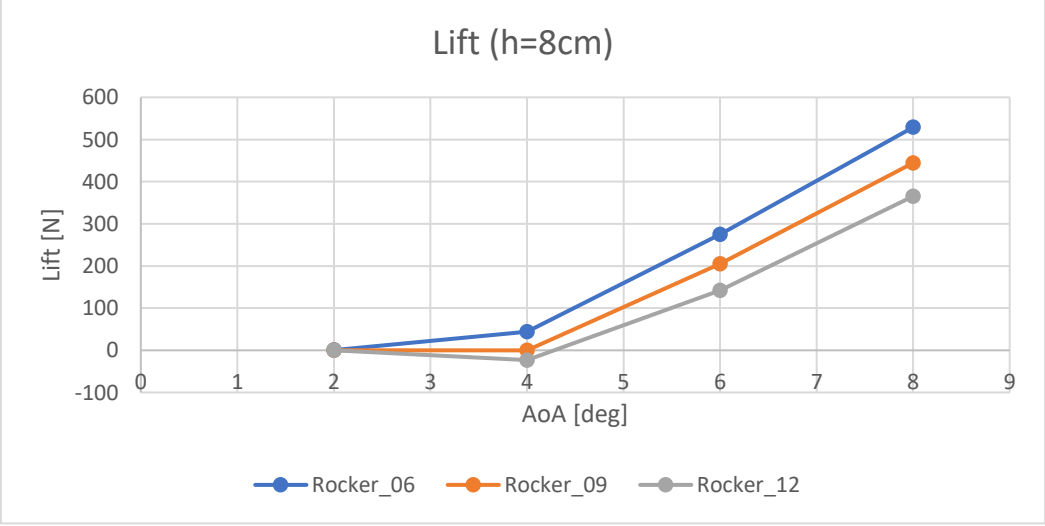


Figura 18-5 Grafico della portanza per h=8cm

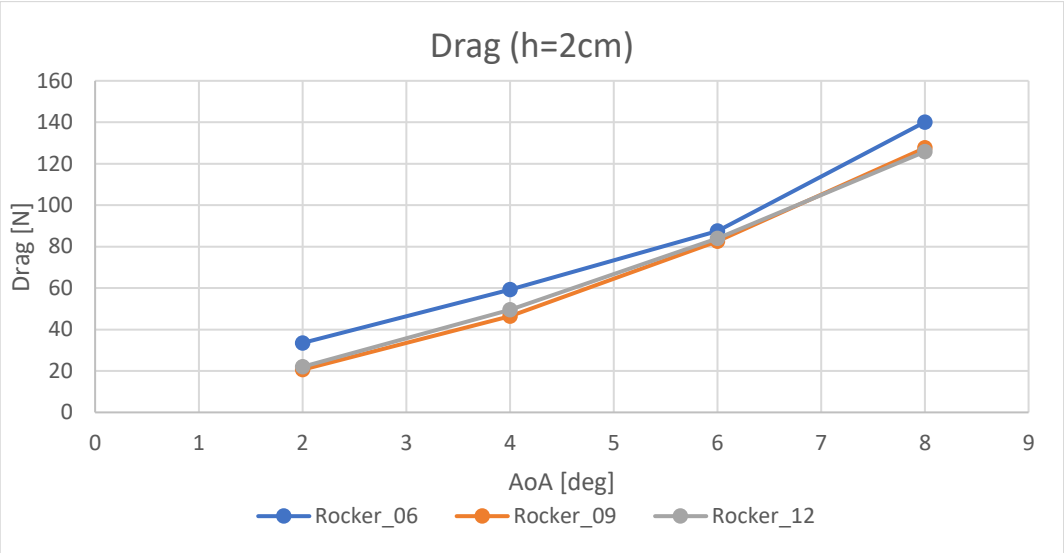


Figura 19-5 Grafico della resistenza per h=2cm

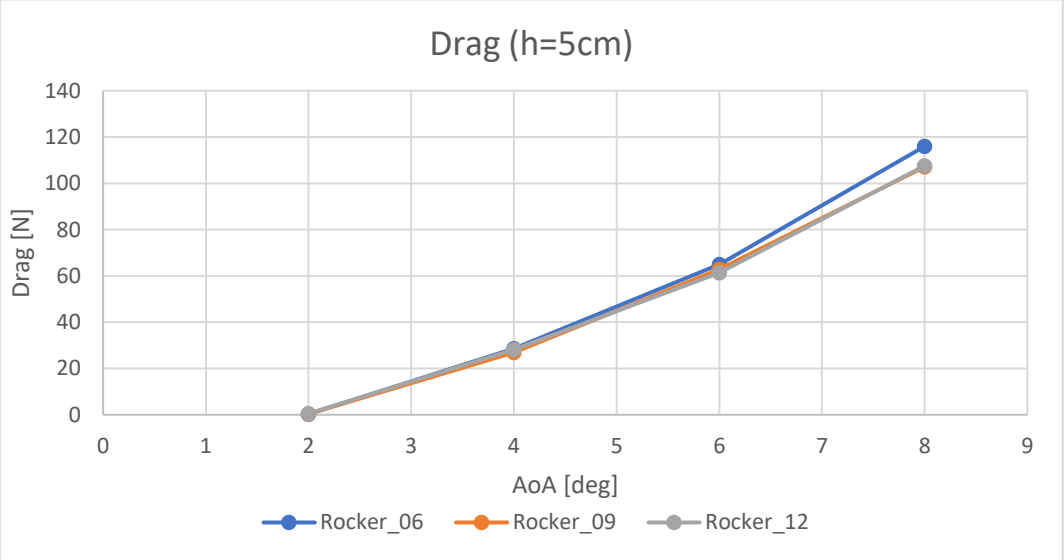


Figura 20-5 Grafico della resistenza per h=5cm

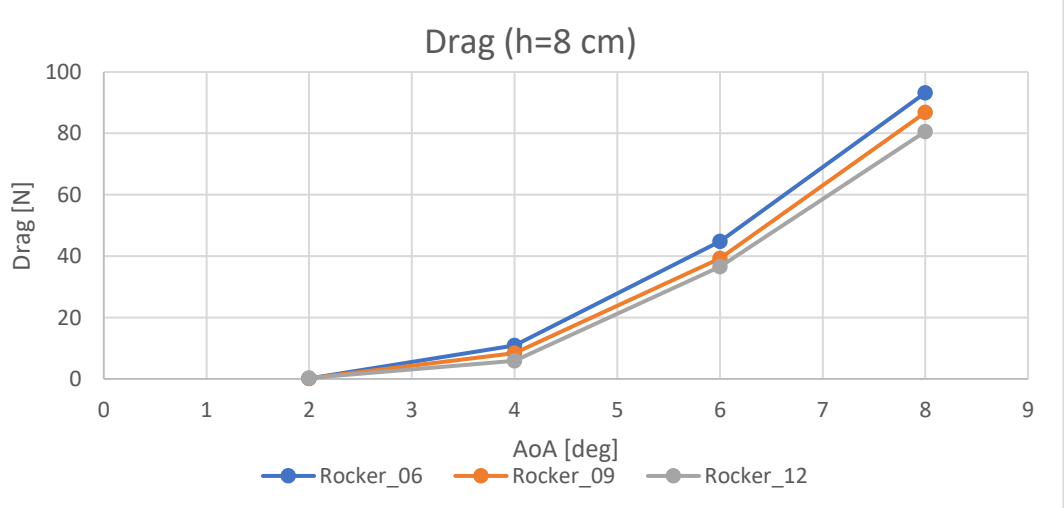


Figura 21-5 Grafico della resistenza per h=8cm

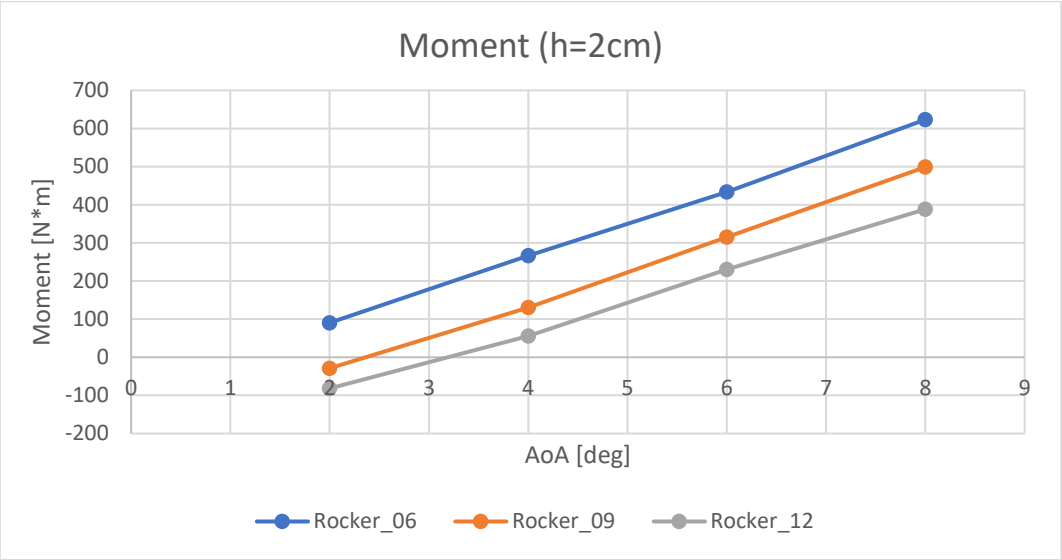


Figura 22-5 Grafico del momento per h=2cm

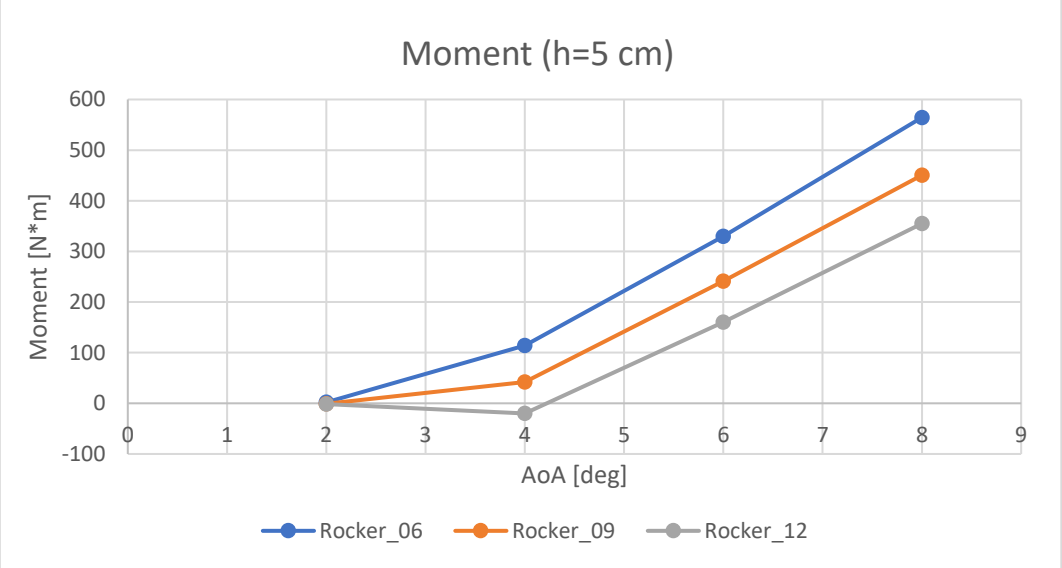


Figura 23-5 Grafico del momento per h=5cm

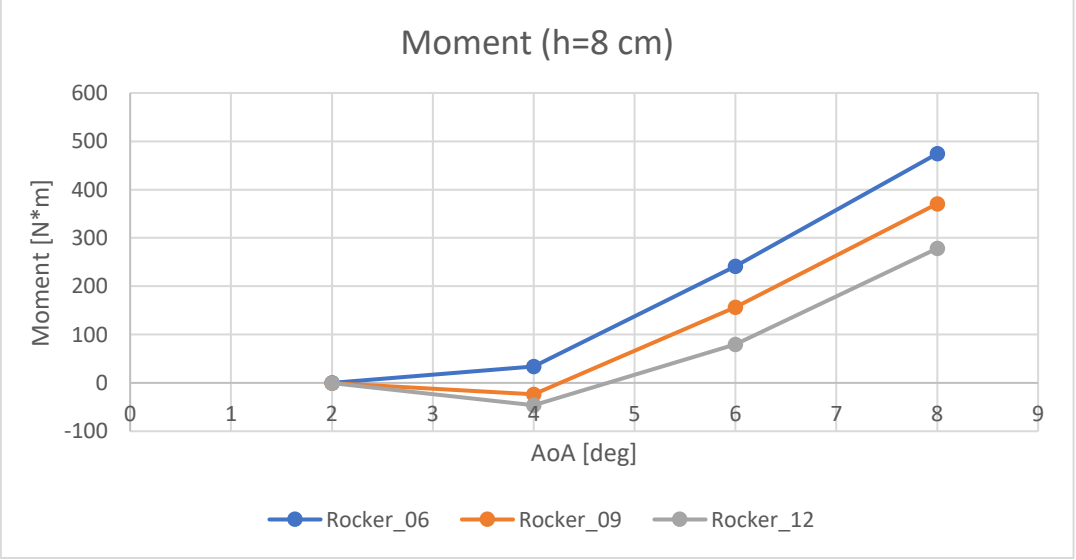


Figura 24-5 Grafico del momento per h=8cm

Nei grafici precedenti, si può notare come il parametro maggiormente influenzato dalla variazione del Rocker è la portanza.
La resistenza subisce delle variazioni minime rispetto alle altre forze analizzate.
Le simulazioni sono state effettuate per un unico numero di Froude, in quanto la velocità utilizzata è di 5 m/s (velocità di un surfista che cavalca un'onda di medie dimensioni) e la lunghezza della superficie bagnata dall'acqua rimane pressoché uguale in tutte le simulazioni.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot d}} = \frac{5}{\sqrt{9{,}81 \cdot 1{,}64}} = 1{,}24$$

L'angolo di scia che si viene a formare nella parte posteriore è 18,5°, numero in accordo con la teoria di Lord Kelvin sulla generazione delle onde illustrata nel capito 3.4.

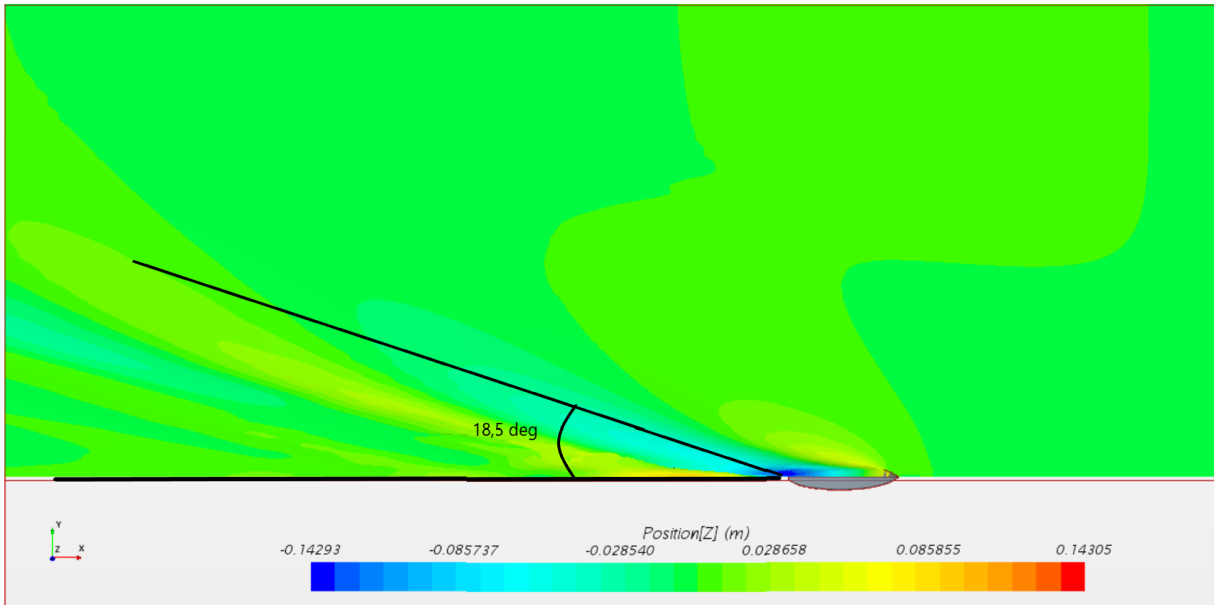


Figura 25-5 Angolo di Kelvin generato a valle della tavola

Provando con altre velocità si avrebbe un confronto su come variano portanza e resistenza al variare della geometria.

6. SVILUPPI FUTURI

L'obiettivo della tesi è stato quello di calcolare la variazione delle forze aerodinamiche su diverse geometrie di tavole da surf ed individuare le componenti principali che determinano la portanza e la resistenza sulla tavola da surf.
A causa della mancanza di tempo e di risorse non è stato possibile eseguire la simulazione su altre tavole con differenti geometrie come evidenziato nella parte iniziale dell'elaborato, d'altro canto grazie all'automatizzazione che è stata raggiunta nella simulazione è possibile importare una nuova geometria e lanciare la simulazione in pochi semplici passaggi. Peraltro si potrebbe pensare di eseguire un'analisi di sensitività in modo da cercare di ridurre il numero di celle per rendere la simulazione meno pesante dal punto di vista computazionale, senza andare a discapito dell'accuratezza dei risultati.
Sarebbe anche interessante validare i risultati ottenuti mediante simulazione CFD nelle camere di traino, per verificare se effettivamente i valori ottenuti sono coerenti con quanto accade nella realtà e perfezionare il modello da utilizzare in altre applicazioni.
Questa simulazione ha l'obiettivo di inserire la CFD all'interno del mondo del surf, in cui spesso vengono realizzati prototipi che successivamente vengono testati con un notevole dispendio economico in caso di insuccesso.
Le aziende che utilizzano la simulazione come supporto alla costruzione delle loro tavole sono poche in quanto spesso i surfboard vengono costruiti direttamente dagli shaper in base alla loro esperienza sul campo. Con la simulazione, invece, si potrebbe arrivare alla personalizzazione delle tavole *ad hoc* per ogni rider in base al proprio peso, livello e stile di surfata.

APPENDICE A

Nella seguente Macro la posizione lungo l'asse z è fissata, mentre per ogni simulazione viene modificato l'angolo di attacco.

```
// STAR-CCM+ macro: sequence.java
// Written by STAR-CCM+ 14.06.012
package macro;

import java.util.*;

import star.common.*;
import star.base.neo.*;
import star.cadmodeler.*;
import star.meshing.*;
import star.surfacewrapper.*;

public class sequence extends StarMacro {

  public void execute() {
    execute0();
  }

  private void execute0() {

    Simulation simulation_0 =
      getActiveSimulation();

       double zpos;
       zpos = 0.05;

       double angle;
       String filename;
       filename = null;

     for (int i=1; i <= 4; i++) {
     angle = -2.0*i;

if (i == 0) {
   filename = "Rocker_06_v01_vel_05p0mps_-00p00deg_+0p050m_dt_2e-
2_damp_td20.sim";
} else if (i == 1) {
   filename = "Rocker_06_v01_vel_05p0mps_-02p00deg_+0p050m_dt_2e-
2_damp_td20.sim";
} else if (i == 2) {
   filename = "Rocker_06_v01_vel_05p0mps_-04p00deg_+0p050m_dt_2e-
2_damp_td20.sim";
} else if (i == 3) {
   filename = "Rocker_06_v01_vel_05p0mps_-06p00deg_+0p050m_dt_2e-
2_damp_td20.sim";
} else if (i == 4) {
   filename = "Rocker_06_v01_vel_05p0mps_-08p00deg_+0p050m_dt_2e-
2_damp_td20.sim";
```

```
} else if (i == 5) {
   filename = "Rocker_06_v01_vel_05p0mps_-10p00deg_+0p050m_dt_2e-
2_damp_td20.sim";
}

    Solution solution_0 =
      simulation_0.getSolution();

    solution_0.clearSolution(Solution.Clear.History,
Solution.Clear.Fields, Solution.Clear.LagrangianDem);

    ScalarGlobalParameter scalarGlobalParameter_0 =
      ((ScalarGlobalParameter)
simulation_0.get(GlobalParameterManager.class).getObject("AOA"));

    scalarGlobalParameter_0.getQuantity().setValue(angle);

    CadModel cadModel_0 =
      ((CadModel) simulation_0.get(SolidModelManager.class).getObject("3D-
CAD Model  - Rocker 06"));

    cadModel_0.update();

    CadModel cadModel_1 =
      ((CadModel) simulation_0.get(SolidModelManager.class).getObject("3D-
CAD Model - refinement blocks"));

    cadModel_1.update();

    SolidModelPart solidModelPart_0 =
      ((SolidModelPart)
simulation_0.get(SimulationPartManager.class).getPart("Block - around
fins"));

    simulation_0.get(SimulationPartManager.class).updateParts(new
NeoObjectVector(new Object[] {solidModelPart_0}));

    SolidModelPart solidModelPart_1 =
      ((SolidModelPart)
simulation_0.get(SimulationPartManager.class).getPart("Rocker 06"));

    simulation_0.get(SimulationPartManager.class).updateParts(new
NeoObjectVector(new Object[] {solidModelPart_1}));

    SurfaceWrapperAutoMeshOperation surfaceWrapperAutoMeshOperation_0 =
      ((SurfaceWrapperAutoMeshOperation)
simulation_0.get(MeshOperationManager.class).getObject("Surface
Wrapper"));

    surfaceWrapperAutoMeshOperation_0.execute();

    SubtractPartsOperation subtractPartsOperation_0 =
```

```
      ((SubtractPartsOperation)
simulation_0.get(MeshOperationManager.class).getObject("Subtract: Tank -
Rocker"));

    subtractPartsOperation_0.execute();

    AutoMeshOperation autoMeshOperation_0 =
      ((AutoMeshOperation)
simulation_0.get(MeshOperationManager.class).getObject("Mesh: Tank -
surfboard grid"));

    autoMeshOperation_0.execute();

    solution_0.initializeSolution();

    simulation_0.saveState(filename);

    simulation_0.getSimulationIterator().run();

    simulation_0.saveState(filename);
  }

}
}
```

BIBLIOGRAFIA

1. D'Ambrosio, D. *Hydrodynamic Characterization of Planing Surfboards Using CFD,* 13th conference of the International Sports Engineering Association, Tokyo, 2020

2. S. Falk , S. Kniesburges , R. Janka , R. Grosso , S. Becker , M. Semmler , M. Döllinger *Computational hydrodynamics of a typical 3-fin surfboard setup,* Erlangen, Germany, 2019

3. Anderson S., Brewer D., Lis S., Mctavish B., *The surfboard book: how design driver performance,* McCag O'Neill Pty Ltd, 2013

4. Beggs R., *Surfboard Hydrodynamics,* School of Engineering and Information Technology, French, 2009

5. B. E. Scarfe, M. H. S. Elwany, S. T. Mead and K. P. Black *The Science of Surfing Waves and Surfing Breaks,* La Jolla, CA 92037, USA, 2003

6. J. Hornstein *The BoardCad Book*, Version 1.0, January, 2001 (www.boardcad.com)

7. User Guide STAR CCM+ 12.06

8. Joel H. Ferziger, Milovan Peric, *Computational Methods for Fluid Dynamics,* terza edizione, Springer, 2002

9. Brown, S., Carswell, D., Foster, G., Lavery, N., *Optimization of Surfboard Fin Design for Minimum Drag by Computational Fluid Dynamics* 4th International Surfing Reef Symposium, University of Swansea, 2005

10. T. Sugimoto, *How to Ride a Wave: Mechanics of Surfing,* Department of Industrial Engineering and managment, Kanagawa University, Yokohama, Japan, 1997

11. Carswell, D.J., *Hydrodynamics of Surfboard Fins*, Swansea University, Swansea, UK, 2007

12. https://www.blide.zone/

13. Jiyuan Tu, Guan Heng Yeoh, Chaoqun Liu *Computational Fluid Dynamics 3rd Edition,* 2018

14. Alexandre Darmon, Michael Benzaquen and Elie Raphael *Kelvin wake pattern at large Froude numbers*, Vauquelin, 75005 Paris, France, 2014

15. https://www.surf-skateboards.com/