

## RILIEVO FOTOGRAMMETRICO E ANALISI CFD DI COPPIE GENOA RANDA E CONFRONTO TRA *FLYING SHAPE* E *DESIGN SHAPE*

S. Milone<sup>b</sup>, G. Virzì Mariotti<sup>c</sup>, E. Chiappetta<sup>a</sup>

<sup>a</sup> e-mail: [erasmoch@alice.it](mailto:erasmoch@alice.it)

<sup>b</sup> Università degli Studi di Palermo - Dipartimento DICGIM, Viale delle Scienze, 90128 Palermo, e-mail: [milone@dima.unipa.it](mailto:milone@dima.unipa.it)

<sup>c</sup> Università degli Studi di Palermo - Dipartimento DICGIM, Viale delle Scienze, 90128 Palermo, e-mail: [virzi@dima.unipa.it](mailto:virzi@dima.unipa.it)

### Sommario

Le vele di una imbarcazione sono sottoposte a grandi spostamenti a causa della loro natura altamente flessibile, per tale motivo, la forma che assumono quando sono sottoposte alla forza del vento è differente da quella di progetto stabilita dal velaio. Nel lavoro gli autori propongono un metodo basato sull'utilizzo della tecnica fotogrammetrica per il rilievo in navigazione di vele in vera grandezza. L'utilizzo di tecniche ottiche di Reverse Engineering consente, infatti, la ricostruzione tridimensionale del modello dell'intera vela. Vengono costruiti i modelli CAD delle vele di un'imbarcazione di classe Meteor in condizioni di navigazione (*flying shape*) e in condizioni di progetto (*design shape*) che sono analizzati con metodi CFD.

### Abstract

The sails of a vessel are subjected to large displacements due to their highly flexible nature; therefore, the form they take when they are subjected to the force of the wind project is different from that established by the sailmaker. In the work the authors propose a method based on the use of photogrammetric techniques for the relief of sails in navigation in real size. The use of optical techniques of Reverse Engineering allows, in fact, three-dimensional reconstruction model of the entire wing. CAD models of the sails of a boat in the Meteor-class are built in surfing conditions (*flying shape*) and in design conditions (*design, shape*) and are analyzed by CFD methods.

**Parole chiave:** fotogrammetria, vele, *flying shape*, *design shape*, CFD.

### 1. INTRODUZIONE

La vela è una superficie di tela o di sottile e robusto materiale sintetico di forma tale che, utilizzando la forza del vento, genera propulsione.

Al fine di realizzare geometrie che ottimizzino le performance dell'imbarcazione, esistono particolari software che consentono al velaio di disegnare la vela con una corretta curvatura, originando la sua *design shape* cioè la sua forma di progetto. Per ottenere una valutazione del comportamento aerodinamico delle vele progettate, queste possono essere sottoposte ad una analisi CFD, la quale, tuttavia, può fornire previsioni di prestazioni inesatte a causa di una differenza non sempre trascurabile tra la forma a riposo delle vele e quella sotto carico o *flying shape*, poiché le superfici veliche sono sottoposte a grandi spostamenti a causa della loro natura altamente flessibile.

Una valutazione della *flying shape* può essere fatta utilizzando tecniche di fotogrammetria che consentono di ottenere un modello tridimensionale della vela in condizioni di carichi e vincoli applicati qualora la vela sia già costruita e utilizzata.

Se si tratta di progetti di vele in formato digitale, è possibile eseguire un'analisi fluidodinamica e strutturale accoppiata che tramite una procedura iterativa restituisce un modello della forma in volo partendo dalla forma di progetto.

Il presente studio vuole individuare le differenze tra la *design* e la *flying shape* dello stesso set di vele a due differenti andature, confrontandone la curvatura e la distribuzione del grasso e, tramite una analisi CFD, le caratteristiche aerodinamiche.

## 2. FOTOGRAMMETRIA

La fotogrammetria o video fotogrammetria è la tecnica finalizzata all'analisi delle informazioni geometriche contenute in fotografie o fotogrammi [3]. Effettuare il rilievo di un oggetto significa ricavare la posizione spaziale di tutti i punti di interesse.

A livello teorico l'applicazione della fotogrammetria risolve il problema di relazionare lo spazio oggetto tridimensionale con l'immagine bidimensionale in maniera univoca in modo da fare corrispondere punti discreti, opportunamente scelti, nei due sistemi di riferimento.

La relazione tra lo spazio 2D e lo spazio 3D è noto come proiettività ed è governata da precise regole matematiche e geometriche o parametri di orientamento.

Si può affermare che tra i due spazi esiste una proiettività quando è possibile trovare una matrice A (operatore di trasformazione), tale che, individuato un generico punto P nello spazio oggetto, esista un corrispondente punto P<sup>I</sup> nello spazio immagine. Quanto descritto si esprime con la seguente (1):

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{U} \quad (1)$$

dove  $\mathbf{u}=(x,y)$  è un vettore con le coordinate bidimensionali dello spazio immagine, A è la matrice di trasformazione che contiene i parametri di orientamento del fotogramma, ed  $\mathbf{U}=(X,Y,Z)$  è un vettore con le coordinate tridimensionali dello spazio oggetto.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a1 & a2 & a3 & a4 \\ a5 & a6 & a7 & a8 \\ a9 & a10 & a11 & a12 \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

le relazioni che intercorrono tra le coordinate  $x_i$  e  $y_i$  di un generico punto immagine P<sup>I</sup> e le coordinate X,Y,Z del punto oggetto corrispondente P sono espresse dalle equazioni (3):

$$x_I = x_{0I} - c \frac{R_{11}(X - X_0) + R_{21}(Y - Y_0) + R_{31}(Z - Z_0)}{R_{13}(X - X_0) + R_{23}(Y - Y_0) + R_{33}(Z - Z_0)} \quad (3)$$

$$y_I = y_{0I} - c \frac{R_{12}(X - X_0) + R_{22}(Y - Y_0) + R_{32}(Z - Z_0)}{R_{13}(X - X_0) + R_{23}(Y - Y_0) + R_{33}(Z - Z_0)}$$

Dalle quali volendo ricavare le coordinate oggetto si ottengono le equazioni (4):

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{R_{11}(x_I - x_{0I}) + R_{12}(y_I - y_{0I}) - R_{13}c}{R_{31}(x_I - x_{0I}) + R_{32}(y_I - y_{0I}) - R_{33}c} \quad (4)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{R_{21}(x_I - x_{0I}) + R_{22}(y_I - y_{0I}) - R_{23}c}{R_{31}(x_I - x_{0I}) + R_{32}(y_I - y_{0I}) - R_{33}c}$$

A causa della presenza della coordinata Z relativa alla profondità, per ogni punto immagine esistono infiniti punti oggetto.

Al variare di Z, il punto oggetto P descrive una retta proiettiva che congiunge il punto immagine  $P^I$  al punto oggetto P; tutti i punti che fanno parte di tale retta danno luogo a un solo punto immagine.

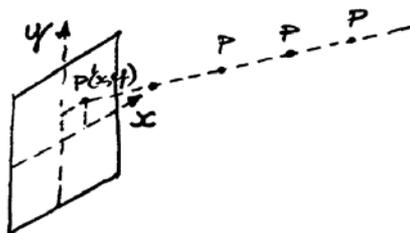


Figura 1 - retta proiettiva

Avviene quindi che lo spazio oggetto dà luogo allo spazio immagine, invece lo spazio immagine non può ricostruire lo spazio oggetto che lo ha generato; di conseguenza, è impossibile ricostruire la geometria di un oggetto da un solo fotogramma.

Affinché ciò avvenga è necessario avere almeno un altro fotogramma che riporti il medesimo punto (Figura 2).

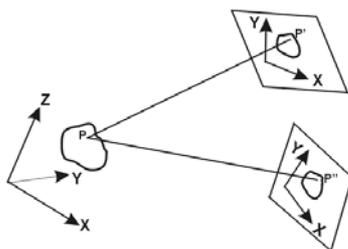


Figura 2 - coppia di fotogrammi con punti omologhi

Per utilizzare le fotografie a fini metrici è indispensabile conoscere le caratteristiche della macchina da presa, definite parametri di orientamento, per permettere al *software* che si occupa della ricostruzione di riprodurre i modelli con le stesse caratteristiche geometriche degli oggetti rilevati.

## 2.1 Rilievo fotogrammetrico

Le prove sono state svolte su un'imbarcazione a vela modello Meteor con un vento costante di 5,4 m/s con provenienza 150° SE sul quale si è andati sia al traverso che di bolina stretta con una coppia di vele nuove e con dimensioni prese dal regolamento di stazza.

Nel rilevamento fotogrammetrico di superfici veliche si devono garantire condizioni assimilabili a quelle stazionarie per fotografare le vele da angoli diversi senza che vi siano variazioni di forma significative. Tali condizioni sono state ottenute agevolmente grazie alle favorevoli condizioni di direzione ed intensità del vento e del moto ondoso.

Per eseguire il rilievo sono state scattate foto con angoli diversi, ma con assi quanto più possibile convergenti, viste le brevi distanze tra fotocamera e vele. Per ovviare a possibili errori dovuti alla non precisa orientazione è stato necessario utilizzare un numero considerevole di fotogrammi per ogni rilievo; sebbene ciò appesantisca le operazioni di *referencing*, limita gli errori dovuti al posizionamento.

Il progetto di rilievo fotogrammetrico delle superfici veliche in navigazione è stato elaborato con il software commerciale Photomodeler Scanner ver. 6 della EOS System.

### 2.1.1 Calibrazione

Il primo passo da eseguire in un rilievo fotogrammetrico è quello della calibrazione della macchina da presa, nel caso in questione si tratta di una camera amatoriale di tipo NIKON COOLPIX P90 con lunghezza focale di 4.6 mm e con sensore da 12,1 milioni di pixel. Un'accurata calibrazione della macchina da presa è un prerequisito necessario per estrarre dalle foto precise e realistiche informazioni metriche tridimensionali.

Le operazioni di calibrazione della camera sono state condotte adottando procedure standard previste nel software utilizzato che si basano sull'impiego di reticoli piani di calibrazione (Figura 3) e schemi di presa prefissati.

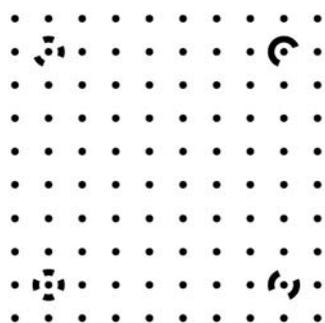


Figura 3: Reticolo piano di calibrazione

L'utilizzo del reticolo consente di eseguire l'operazione di calibrazione tramite l'individuazione, in maniera totalmente automatica, dei targets ed il successivo calcolo dei parametri di orientamento. L'intera operazione di calibrazione è rappresentata nella figura 4.

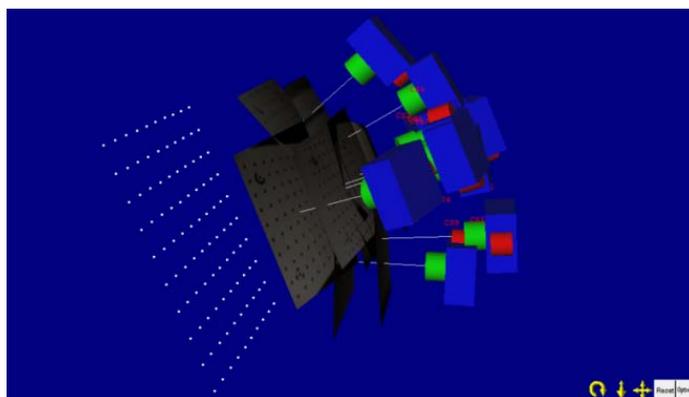


Figura 4: Schema finale

### 2.1.2 Referencing

Terminata l'operazione di calibrazione si passa alla fase di *referencing* delle foto scattate durante i test in mare.

Per la randa, in entrambe le andature, sono state utilizzate cinque foto che ritraggono da due angolazioni diverse sia la parte bassa che quella alta (figura 5).

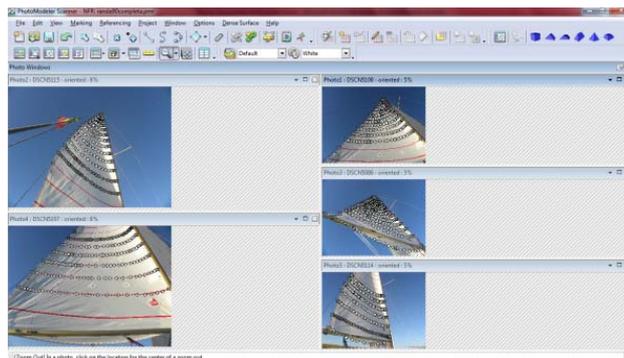


Figura 5: Acquisizione randa

Sulle cinque foto è stato applicato il comando *Mark curves mode* che permette di creare curve seguendo automaticamente il profilo di base segnato sulla vela, interpolando una serie di punti che possono essere scelti casualmente; questi sono stati infittiti nelle zone con maggiore curvatura per mettere in evidenza la posizione del grasso (figura 6)

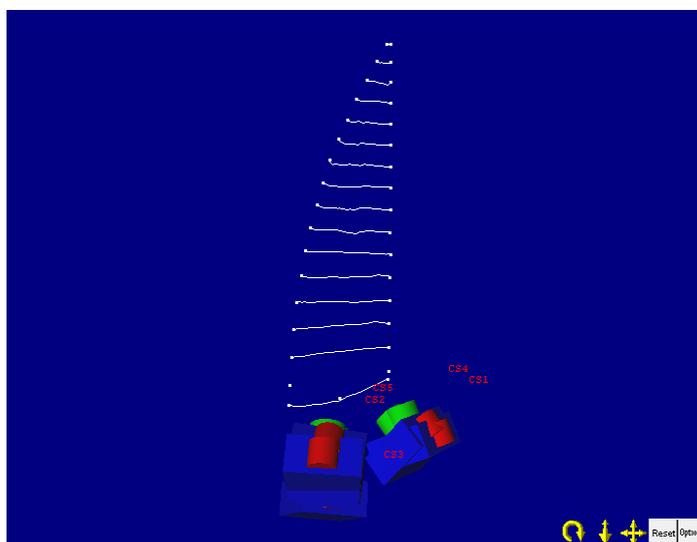


Figura 6: Modello randa restituito

Per il rilievo del fiocco sono state utilizzate cinque immagini con angolazioni diverse. In questo caso, a differenza del rilievo della randa, si è preferito usare il comando *Mark points mode* per la presenza di marcatori puntuali (figura 7).

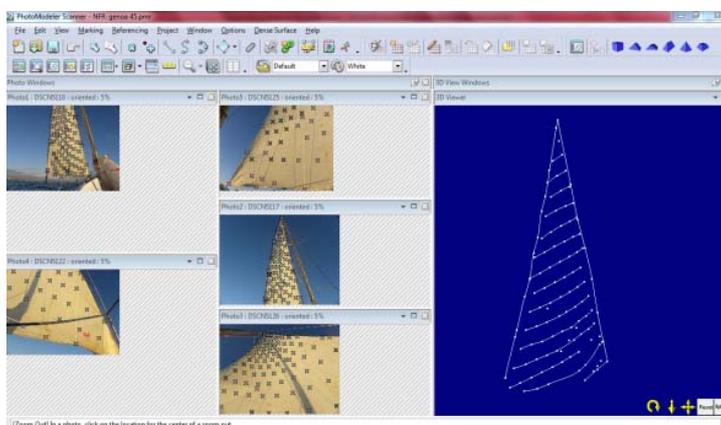


Figura 7: Acquisizione fiocco

#### 4 GENERAZIONE DEI MODELLI

L'utilizzo del software di modellazione 3D *Rhinceros* ver. 4.0 ha permesso di creare le superfici di tipo NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) che bene si adattano a descrivere una superficie di forma libera come la vela; inoltre ha permesso di verificare le geometrie e le dimensioni delle superfici rilevate. Le superfici di randa e fiocco sono state costruite partendo da sezioni trasversali della vela costituite da curve di tipo NURBS sulle quali sono state generate le superfici tramite il comando *sweep a due binari*.

Successivamente sono stati creati un albero di sezione circolare con diametro di 7 centimetri e lo strallo di prua di 758 centimetri di lunghezza in modo da ricreare le stesse condizioni geometriche della realtà. I valori riportati sono stati misurati sull'imbarcazione e confrontati con quelli riportati nel regolamento di stazza.

Per ricreare la *flying shape* e la forma dell'armo su cui sovrapporre le vele, si sono utilizzati i parametri geometrici presenti nelle tavole del regolamento di stazza, mentre per le posizioni dei punti di scotta delle vele di prua e della randa, sono state effettuate misurazioni durante le prove in mare. I risultati ottenuti sono visibili in figura (8).

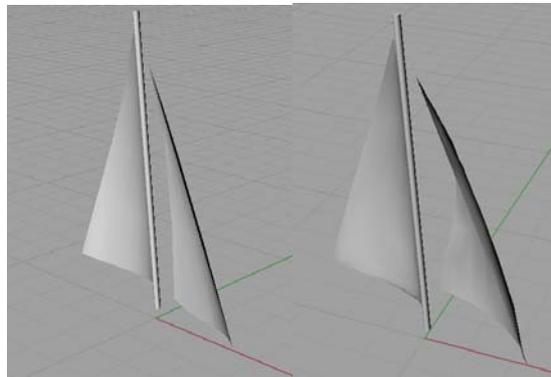


Figura 8: Flying shape 45° e 90°

Dopo la creazione dei modelli appena descritti si è passati alla generazione delle *design shape* utilizzando le vele di progetto (randa, genoa, fiocco) gentilmente fornite dalla veleria Doyle sails.

Al fine di ottenere superfici di pari dimensioni, i modelli delle *design shape* sono stati generati con software specifici utilizzando come dati di riferimento le misure delle vele utilizzate nella prova in mare. I modelli delle vele forniti dalla veleria sono stati assemblati con lo stesso criterio utilizzato per le *flying shape*, sia per la forma dell'armo che per le regolazioni.

I risultati ottenuti sono visibili in figura (9).

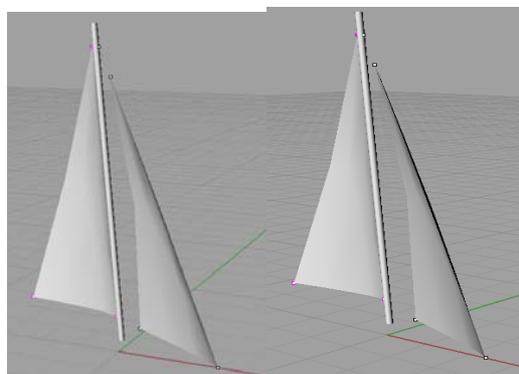


Figura 9: Design shape 45° e 90°

Le dimensioni caratteristiche dei modelli geometrici sono riportate in tabella (1).

Tabella 1 – dimensioni dei modelli

vele	Flying shape [m <sup>2</sup> ]	Design shape [m <sup>2</sup> ]	Regolamento di stazza [m <sup>2</sup> ]
randa	9.6	9.4	9.5
fiocco	8.9	8.9	8.95

## 5 FLUIDODINAMICA COMPUTAZIONALE E METODI CFD

La combinazione di codici CAD e CFD rende possibile una rapida ed economica esplorazione di un ampio range di configurazioni geometriche e di condizioni aerodinamiche, senza far ricorso ai test nella galleria del vento, limitando, spesso, le prove sperimentali alla determinazione dei dati di input delle procedure numeriche ed alla successiva validazione dei risultati ottenuti con le simulazioni numeriche.

Uno dei principali vantaggi della simulazione numerica è che le proprietà del flusso possono essere facilmente osservate in ogni punto del dominio di calcolo. E' così possibile analizzare dettagliatamente fenomeni che potrebbero risultare difficili o impossibili da valutare sperimentalmente.

### 5.1 Costruzione e discretizzazione del dominio di calcolo

Le dimensioni del dominio devono essere sufficientemente estese e tali da potere considerare indisturbato il fluido in corrispondenza delle superfici estreme e cioè che non risenta della presenza delle vele. La discretizzazione della geometria e dello spazio deve essere molto accurata in modo da poter cogliere le più piccole variazioni di curvatura delle vele e seguire queste nel loro sviluppo spaziale. L'esigenza di limitare il numero di nodi per evitare un aggravio computazionale impone l'utilizzo di una mesh fitta là dove ci si aspetta una variazione rilevante di una variabile del problema, e l'utilizzo di una mesh più rada nelle zone di flusso indisturbato, cioè agli estremi del volume di controllo.

La discretizzazione del sistema fisico in esame è basata sul concetto della topologia a blocchi (block topology), ovvero la suddivisione del dominio in blocchi che costituiscono una struttura di spigoli e vertici dalla quale si origina la mesh. La griglia generata è di tipo esaedrica (hexahedral mesh) caratterizzata, cioè, da 8 nodi per elementi (figura 10).

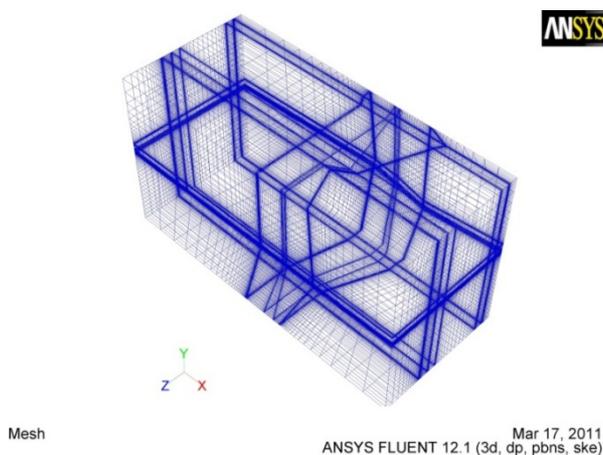


Figura 10: dominio discretizzato

La mesh risulta essere costituita da 2416425 elementi esaedrici; tale numero si mantiene invariato per le quattro configurazioni poiché la struttura a blocchi è adattata di volta in volta alle varie geometrie.

## 5.2 Impostazioni delle simulazioni numeriche

Le configurazioni utilizzate per il solutore sono:

- *3D double precision*;
- modello di turbolenza k- $\epsilon$  con standard wall functions [4], [7];
- algoritmo accoppiamento pressione-velocità *simple*;
- *under-relaxation factors* con valori più conservativi di quelli predefiniti, al fine di garantire una più veloce convergenza e una maggiore stabilità del processo di calcolo.

## 5.3 Impostazioni delle condizioni al contorno

Facendo riferimento alla figura 11, vengono elencate di seguito le condizioni al contorno impostate considerando la natura fisica del problema in esame:

- velocity inlet per le pareti 1 e 2 identificabili in figura con il colore verde;
- Outflow per la parete 3 e 4 colorate in rosso;
- Wall sleep condition per le pareti superiore e inferiore;
- Wall con presenza di strato limite per le superfici delle vele.

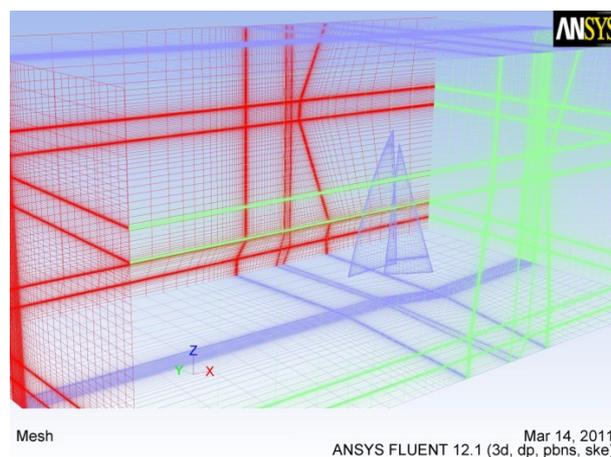


Figura 11: condizioni al contorno

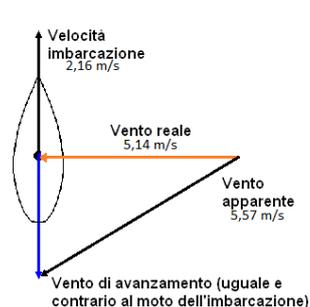


Figura 12: triangolo delle velocità a 90°

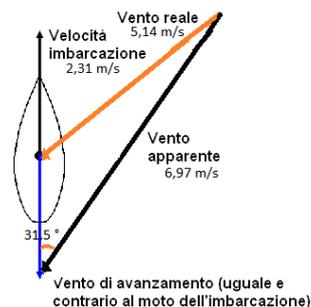


Figura 13: triangolo delle velocità a 45°

## 5.4 Profilo del vento

I valori di velocità in ingresso e gli angoli di incidenza sono stati ricavati costruendo i triangoli delle velocità a partire dai dati di velocità del vento reale e velocità della barca registrati durante le prove (figure 12 e 13).

Nell'andatura di bolina a 45° rispetto al vento reale la velocità raggiunta dalla barca è stata 2,31 m/s e la velocità calcolata del vento apparente (dato di input dell'analisi fluidodinamica) è pari a 6,97 m/s con un angolo di incidenza rispetto all'asse longitudinale della barca pari 31,5 gradi. Nell'andatura al traverso e con le stesse vele la velocità della barca si è assestata su 2,16 m/s e la velocità del vento apparente 5,57 m/s con un angolo di incidenza pari a 67°. La velocità del vento reale era 5,14 m/s.

## 6 ANALISI DEI RISULTATI

Si è condotta un'analisi comparativa delle distribuzioni di pressioni statiche e dinamiche che si destano nelle varie configurazioni fiocco-randa. L'attenzione è stata focalizzata sulle zone di concentrazione della pressione e in modo particolare sulla sua orientazione.

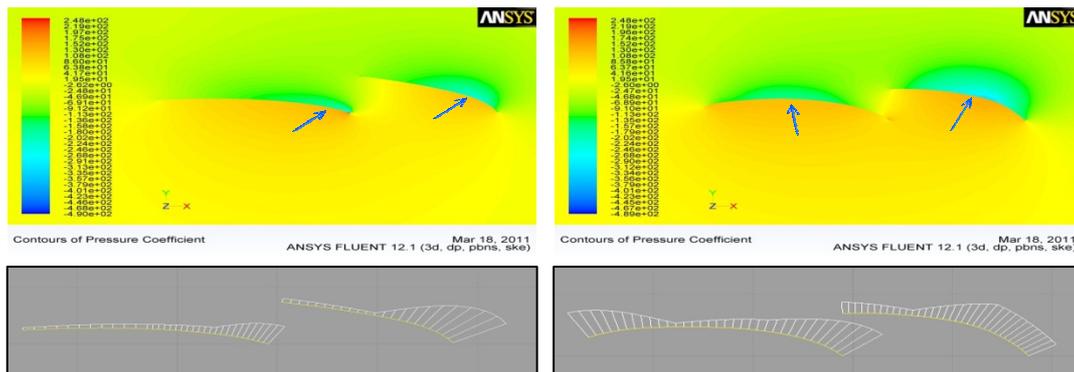


Figura 14: Sezione del piano velico a 1,5 [m] dal piano di coperta; design shape (sinistra), flying shape (destra)

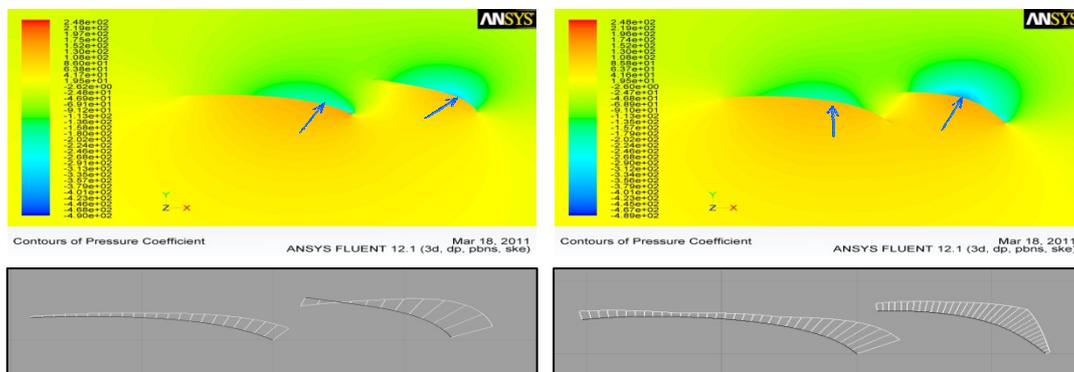


Figura 15: Sezione del piano velico a 3 [m] dal piano di coperta; design shape (sinistra), flying shape (destra)

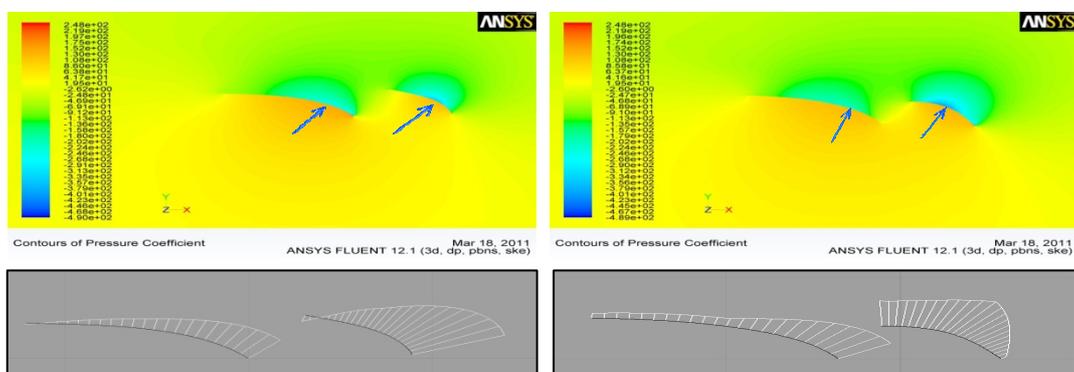


Figura 16: Sezione del piano velico a 4,5 [m] dal piano di coperta; design shape (sinistra), flying shape (destra)

La differenza di pressione tra la parte sottovento e quella sopravvento della vela implicano la presenza di una forza aerodinamica risultante della quale, a seconda della sua distribuzione, è possibile individuare la sua direzione di applicazione. Nelle immagini seguenti viene messo a confronto il coefficiente adimensionale di pressione, rilevato a tre diverse quote dal piano di coperta in andatura di bolina.

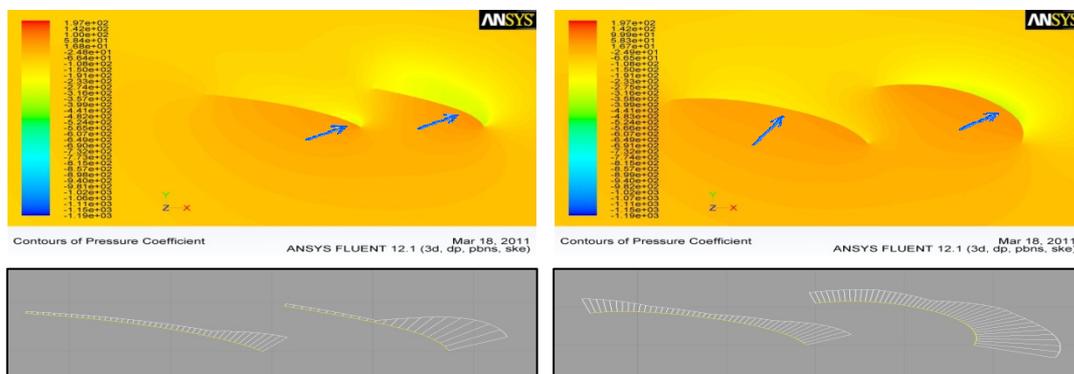


Figura 17: Sezione del piano velico a 1,5 [m] dal piano di coperta; design shape (sinistra), flying shape (destra)

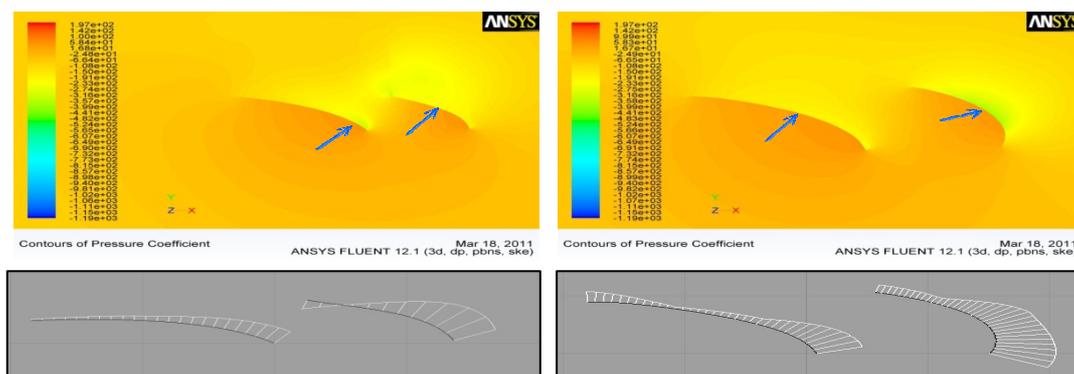


Figura 18: Sezione del piano velico a 3 [m] dal piano di coperta; design shape (sinistra), flying shape (destra)

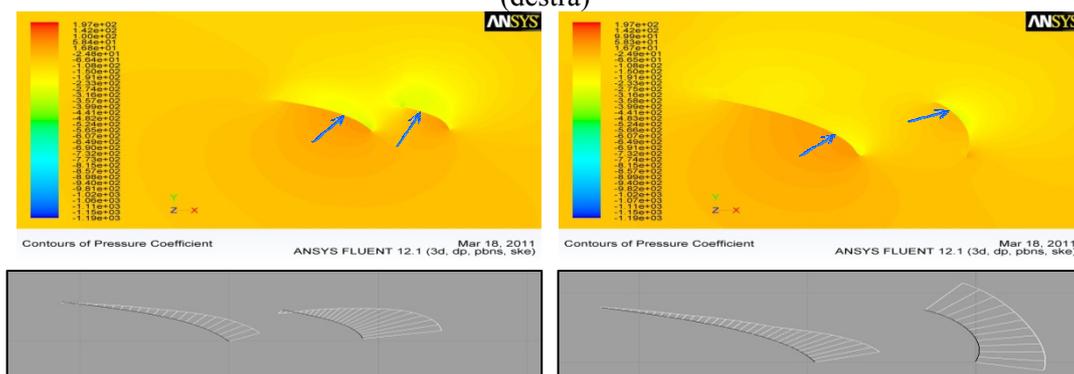


Figura 19: Sezione del piano velico a 4,5 [m] dal piano di coperta; design shape (sinistra), flying shape (destra)

Dalle immagini si nota chiaramente che la zona di distribuzione della depressione è più estesa nel caso delle vele in “volo ” rispetto alle vele di progetto. Questa differenza non si attenua al variare della quota anzi tende ad aumentare. Una tale distribuzione delle pressioni si traduce in una maggiore forza velica esercitata dalle vele in condizioni di funzionamento ed è dovuta alla forma dei profili che presentano una maggiore concavità o grasso. Le vele di progetto infatti sono ottimizzate per una bolina ancora più stretta, impossibile da raggiungere con imbarcazioni di classe Meteor il cui limite riportato nelle polari veliche fornite dal cantiere è proprio  $45^\circ$  al vento reale.

Di seguito vengono mostrate i risultati ottenuti dalle simulazioni eseguite nel caso di andatura al traverso. Anche in questo caso, le distribuzioni delle pressioni sono favorevoli per le vele in condizioni di funzionamento.

## 7 CONCLUSIONI

Nel presente studio è stata valutata la differenza di forma tra la *design shape* e la *flying shape* di un piano velico appartenente ad una imbarcazione di classe Meteor.

I dati necessari all'analisi sono stati raccolti durante test in mare. In particolare sono state scattate fotografie che riprendevano le vele da diverse angolature e, poi, analizzate utilizzando tecniche di fotogrammetria. Ciò ha consentito di rilevare la forma delle vele sotto carico ottenendo un modello tridimensionale del piano velico in scala 1:1. Le vele di progetto fornite dalla veleria Doyle sails sono state utilizzate per il confronto tra la forme della *design shape* e della *flying shape*.

I modelli dei due piani velici sono stati sottoposti ad analisi fluidodinamica (CFD), dalla quale sono stati visualizzati i diagrammi di distribuzione delle pressioni statiche e dinamiche agenti su tre profili posti a 1.5, 3, 4.5 metri dal piano di coperta. Dal punto di vista aerodinamico la lettura dei risultati ha messo in luce differenze sostanziali tra le geometrie analizzate, portando a preferire la forma della vela durante il funzionamento piuttosto che quella di progetto; quest'ultima è risultata meno efficiente sia nell'andatura di bolina che al traverso. L'analisi ha restituito risultati differenti da quelli attesi: dal momento che le forme delle vele di progetto sono ottimizzate per l'andatura di bolina, l'ipotesi era che queste, a tale andatura, fossero più efficienti rispetto a quelle in condizioni d'uso, ma ciò non si è verificato. È stato fatto, inoltre, un confronto della distribuzione di curvatura dei profili della *flying shape* e della *design shape*. Futuro sviluppo di questo studio è la messa a punto di una procedura che permetta di risalire alla forma delle vele sotto carico partendo dalla forma di progetto. Ciò può realizzarsi tramite una procedura iterativa di analisi fluidodinamica-strutturale accoppiata in modo da ottenere previsioni attendibili riguardo le prestazioni e l'efficienza delle vele.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Chéret Bertrand, *Le vele. Comprendere, Regolare, Ottimizzare*, Mursia, Milano, 2003.
- [2] Marchaj C.A., *Teoria e pratica della vela*, Mursia, Milano, 1976.
- [3] Kraus, K., *Photogrammetry*, Levrotto e Bella, Torino, Voll. 1 e 2, 2000.
- [4] Wilcox, D.C., *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries Inc., La Canada, California, USA, 1994
- [5] Versteeg, H.K., Malalasekera, W., *An introduction to Computational Fluid Dynamics*, Prentice Hall, London, (1995).
- [6] Fluent 6.1, Users's Guide, volume 3, February 2003.
- [7] Pracht, W.E., *Calculating three-dimensional Fluid Flows at all speeds with an Eulerian-Lagrangian computing mesh*, Computational Physics, Volume 17, Issue 2, February 1975, Pages 132-159
- [8] Fondelli M., *Trattato di fotogrammetria urbana e architettonica*. Editori Laterza, Roma, 1992
- [9] Martorelli, M., Broggiato, G.B., Campana, F., Gerbino, S., Confronto tra diverse tecniche di digitalizzazione delle forme per il Reverse Engineering, XIV Congresso Internacional de Ingeniería Gráfica, Santander, España, 5-7 Giugno 2002.
- [10] Balletti, Guerra, Fregonese, Monti, *Appunti di fotogrammetria*. CIRCE-IUAV, Laboratorio di fotogrammetria, 21/10/2010
- [11] EOS Systems, Photomodeler User Guide, Vancouver, BC, Canada, (2000).
- [12] Rhinoceros, On Line Manual, Robert McNeel & Associates, www.rhino3d.com (2005).