

ATTIVITÀ SPERIMENTALE IN MARE SU UN MODELLO IN SCALA 1:30 DI UN SUPPORTO GALLEGGIANTE PER TURBINA EOLICA OFFSHORE DI TIPO SPAR

Carlo Ruzzo¹, Felice Arena¹, Vincenzo Fiamma¹, Giuseppe Failla¹, Maurizio Collu² & Vincenzo Nava³

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Energia, dell'Ambiente e dei Materiali (DICEAM) dell'Università Mediterranea degli Studi di Reggio Calabria; (2) Cranfield University, Cranfield, United Kingdom; (3) Tecnalia Research & Innovation, Energy and Environment Division, Bilbao, Spain.

ASPETTI CHIAVE

- L'attività sperimentale descritta ha lo scopo di investigare la fattibilità dell'identificazione dinamica a costi contenuti di strutture galleggianti in mare piuttosto che in vasche ondogene.
- L'attività riguarda un modello in scala 1:30 dell'OC3-Hywind Spar. Il fattore scala relativamente grande ottenuto in mare consente di rispettare la similitudine di Froude per le forze idrodinamiche.
- I risultati fino ad ora raccolti forniscono informazioni sul comportamento dinamico dello spar e sono incoraggianti in ottica dell'identificazione in opera di strutture galleggianti.

1 INTRODUZIONE

Nel panorama mondiale delle fonti energetiche rinnovabili, l'eolico offshore si presenta come una delle alternative più promettenti per lo sviluppo a breve, medio e lungo termine. Parchi eolici offshore su profondità del fondale relativamente basse sono già in uso, ma si ritiene che lo spostamento verso il largo, dunque su fondali più profondi, possa portare vantaggi rilevanti in termini di aumento della produzione energetica e di riduzione dell'impatto ambientale. Tuttavia, superata una determinata soglia di profondità del fondale, stimata pari a circa 70-80 m (Collu *et al.*, 2010), l'utilizzo di supporti fissi, come quelli attualmente adottati, diventa economicamente non vantaggioso e sorge la necessità di sviluppare idonee alternative galleggianti. Molte soluzioni sono state proposte e comparate (Lefebvre & Collu, 2012; Failla & Arena, 2015) e tra queste il supporto di tipo spar sembra essere particolarmente vantaggioso per profondità superiori ai 120 m.

Concettualmente lo spar è un cilindro cavo, la cui posizione d'equilibrio è verticale grazie all'utilizzo di zavorra nella parte inferiore e il cui posizionamento è garantito da un ancoraggio flessibile, ad esempio mediante catene. Il primo prototipo di turbina eolica galleggiante con supporto di tipo spar è stato l'Hywind Demonstration Project. L'Hywind è stato installato nel 2009 da Statoil Hydro a largo della costa sud-occidentale della Norvegia, su un fondale profondo circa 200 m e supporta una turbina eolica offshore di 2.3 MW. Il successo di questo progetto ha determinato un certo interesse nei confronti di questa tipologia strutturale e varie proposte sono state avanzate (Sethumaran & Venugopal, 2013; Matha *et al.*, 2014), tra cui assume particolare rilievo l'OC3 Hywind Spar buoy (Jonkman, 2010), progettato per supportare la turbina eolica offshore NREL-5 MW (Jonkman *et al.*, 2009).

Nonostante l'esperienza con i supporti galleggianti maturata nel settore petrolifero, lo studio approfondito della loro dinamica del moto si rende necessario per la destinazione d'uso eolica perché i requisiti e le condizioni di esercizio sono radicalmente diversi, ad esempio in termini di rapporto tra masse e rigidità, di tipologie di forze sul supporto, di moti ammissibili, etc. Gli esperimenti in scala ridotta, fondamentali per portare avanti questo studio, vengono realizzati solitamente in vasche artificiali, equipaggiate per ricostruire le condizioni ondose rilevanti per la struttura (Skaare *et al.*, 2007; Myhr *et al.*, 2011). Sebbene molto attendibili, queste attività presentano alcuni svantaggi, quali la limitatezza delle dimensioni delle vasche, che ha ricadute sul fattore di scala da adottare, e gli elevati costi, che solitamente comportano durate molto brevi per le attività.

L'attività descritta in questo lavoro si pone il duplice obiettivo di investigare le caratteristiche dinamiche dell'OC3-Hywind e di dimostrare la fattibilità dell'identificazione dinamica a basso costo di supporti galleggianti, attraverso attività sperimentali condotte in mare su modelli a scala intermedia. In particolare, un modello in scala 1:30 dell'OC3-Hywind e della turbina eolica offshore NREL-5 MW a rotore fermo è stato progettato, costruito e installato davanti al lungomare di Reggio Calabria nel Natural Ocean Engineering

Laboratory (NOEL). Gli spostamenti del modello nei sei gradi di libertà e gli stati di mare corrispondenti sono stati registrati attraverso apposite stazioni di misura e i risultati sono stati utilizzati per procedere all'identificazione del modello.

2 DESCRIZIONE ATTIVITÀ SPERIMENTALE

2.1 Scelta della località

La località scelta per le prove, grazie alle particolari caratteristiche geografiche e di vento, garantisce durante determinati mesi dell'anno la realizzazione, con sufficiente regolarità, di stati di mare composti da pure onde di vento (spettro simile al JONSWAP) con altezze significative comprese tra i 0.20 e i 0.40 m e periodi di picco tra gli 1.8 e i 2.6 s circa, ottimali per la rappresentazione in scala 1:30 e similitudine di Froude delle condizioni ondose estreme per il progetto della struttura. Allo stesso tempo, stati di mare misti composti da onde di vento e onde di mare lungo sovrapposte, rare mareggiate locali con altezze significative oltre i 50 cm e periodi di calma quasi assoluta consentono di investigare la risposta del modellino in un ampio spettro di sollecitazioni ondose, il che è molto utile per procedere all'identificazione.

Di contro, le condizioni ondose non sono controllabili, il che rende inutilizzabili i metodi classici di identificazione, e le mareggiate locali possono costituire una minaccia per la resistenza strutturale del modellino, che va sovradimensionata rispetto alla struttura a vera scala. Infine, il fondale inclinato costituisce un ostacolo per la rappresentazione dei sistemi di ancoraggio con catene, che usualmente sono progettati per fondali orizzontali.

2.2 Progettazione del modello in scala

La prima parte dell'attività ha avuto come oggetto la progettazione e l'installazione del modello. La descrizione per esteso di questa fase è riportata in *Ruzzo et al.* (under revision,a).

La modellazione numerica della struttura a vera scala, è stata effettuata attraverso il software commerciale ANSYS AQWA e seguendo lo stesso approccio di *Jonkman* (2010) ed è servita come supporto alla progettazione. Sfruttando il vantaggio di poter lavorare in mare, il fattore di scala è stato scelto in modo tale che le caratteristiche idrodinamiche del modellino (drag e inerzia) fossero rappresentative della struttura a vera scala. Modelli più piccoli, infatti, porterebbero ad alterazioni dei coefficienti idrodinamici come mostrato in *Ruzzo et al.* (under revision,a).

Lo scafo è stato progettato in modo tale da rispettare la similitudine di Froude con l'OC3-Hywind in termini di masse, dimensioni geometriche e posizione del baricentro e allo stesso tempo per resistere agli stati di mare estremi locali. Per ottenere questi due obiettivi, lo spessore strutturale del cilindro d'acciaio è stato maggiorato e il conseguente innalzamento del baricentro dovuto alla riduzione del peso della zavorra è stato controbilanciato, sostituendo la zavorra originale di acque e rocce con dei dischi di acciaio all'interno della parte inferiore dello scafo. Gli ancoraggi sono stati progettati ad hoc per il fondale locale inclinato, non potendosi scalare quelli della struttura a vera scala, progettati per fondale orizzontale. Le principali fasi dell'installazione del modello sono riportate in Figura 1 mentre le sue caratteristiche geometriche e di massa più rilevanti sono mostrate in Tabella 1.

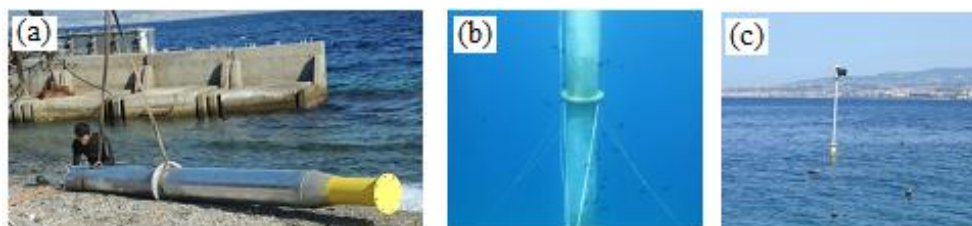


Figura 1. Fasi di installazione dello spar: nel pannello (a) è mostrato lo scafo cilindrico prima del varo, nel pannello (b) la foto subacquea dello scafo installato e ancorato con le catene, nel pannello (c) una vista aerea dell'intero supporto con torre installata e strumentata in opera.

Caratteristiche struttura	OC3-Hywind (1:1)	Modello in scala (1.30)
Profondità del fondale	200 m	6.90 m (spar)
Altezza totale scafo	130 m	4.334 m
Pescaggio	120 m	4.001 m
Diametro cilindro	6.50 – 9.40 m	0.217 – 0.313 m
Altezza torre	80 m	2.60 m
Massa totale spar con turbina	$8.066 \cdot 10^6$ kg	296.2 kg
Altezza chiglia-baricentro	42.00 m	1.381 m
Momenti d'inerzia I_{xx}, I_{yy}	$6.803 \cdot 10^{10}$ kgm ²	$2.976 \cdot 10^3$ kgm ²
Momento d'inerzia I_{zz}	$1.916 \cdot 10^8$ kgm ²	4.861 kgm ²
Massa lineare catene	145 kgm ⁻¹	0.159 kgm ⁻¹
Pretensione linee di ancoraggio	$8.673 \cdot 10^5$ N	25.76 – 31.76 N

Tabella 1. Principali caratteristiche geometriche e di massa della struttura in vera scala e del modello in scala 1:30 realizzato.

3 RISULTATI

A seguito dell'installazione del modellino, i dati registrati sono stati utilizzati per studiare il comportamento dinamico dello spar e l'adeguatezza del modello numerico a coglierne le caratteristiche fondamentali. Non potendosi effettuare prove in condizioni ondose controllate si sono utilizzati gli stati di mare locali per stimare i Response Amplitude Operators (RAOs) della piattaforma che, nell'ipotesi di comportamento lineare, costituiscono la funzione di trasferimento dallo spettro della sollecitazione (spettro ondoso) a quello della risposta in ogni grado di libertà. Per ogni registrazione è stato dunque calcolato lo spettro di frequenza e la direzione di propagazione dominante, lo spettro di risposta del moto nei vari gradi di libertà e poi per ciascuno di essi il RAO, per i soli valori di frequenza con contenuto energetico significativo, utilizzando l'Equazione 1.

$$RAO_{DOF}(\omega) = \sqrt{\frac{S_{DOF}(\omega)}{S_{W,ph}(\omega)}} \frac{\cosh[k(\omega)(d + z_t)]}{\cosh[k(\omega)d]} \quad (1)$$

dove ω è la frequenza, S_{DOF} lo spettro di risposta della registrazione nel grado di libertà considerato, $S_{W,ph}$ lo spettro di frequenza dell'onda del carico di pressione misurato da appositi trasduttori posti alla quota z_t , k il numero d'onda associato alla frequenza ω e d la profondità del fondale. Lo spettro dell'onda del carico di pressione è preferito a quello di superficie, in quanto i trasduttori di pressione garantiscono misure più affidabili e precise di quelle dei misuratori ad ultrasuoni, soprattutto negli stati di mare più intensi dove l'onda di superficie può frangere o incresparsi.

La stima globale del RAO per ciascun grado di libertà è infine ottenuta mediando i risultati dei singoli stati di mare. Il confronto dei risultati ottenuti dall'esperienza con le simulazioni numeriche permette di valutare l'accuratezza del modello numerico e di effettuare delle stime di smorzamento, da confrontare con quelle ottenute dalle prove di decadimento, o free decay tests, realizzate a mare calmo. L'analisi dei risultati relativi al grado di libertà di rollio è stata proposta in Ruzzo et al. (under review,b), e il risultato ottenuto è mostrato, a titolo di esempio, in Figura 2.

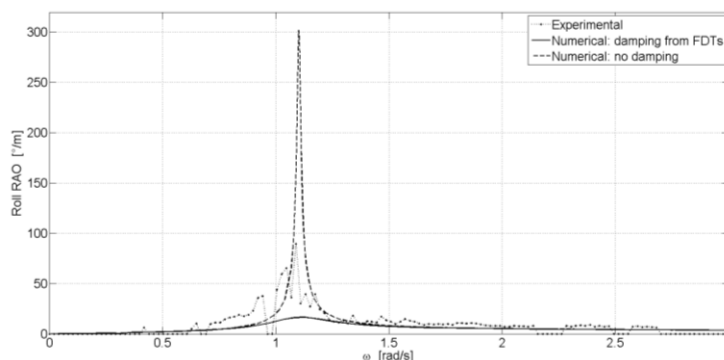


Figura 2. RAOs numerici, con e senza lo smorzamento aggiunto stimato sperimentalmente tramite free decay tests e RAO sperimentalmente per il grado di libertà di rollio (Ruzzo et al., under revision,b) .

4 CONCLUSIONI E LAVORO FUTURO

I risultati ottenuti fino a questo momento sono incompleti per via del campione di registrazioni limitato a disposizione, tuttavia i RAOs sperimentali ottenuti sembrano essere molto promettenti per l'identificazione dinamica del sistema, mentre ancora non è stato possibile ottenere risultati altrettanto soddisfacenti dalle prove di decadimento, per via delle difficoltà di operare a mare calmo. Nei mesi a seguire, l'attività proseguirà con la raccolta di un numero di stati di mare e relativi moti strutturali, sufficienti per tentare di ottenere una stima accurata dei RAOs in tutti e sei i gradi di libertà della struttura, e di risalire alla sua matrice di smorzamento. In parallelo, la realizzazione di nuove prove di decadimento e la loro interpretazione costituirà un importante termine di paragone per la stima degli smorzamenti.

Un successo nell'identificazione delle caratteristiche dinamiche dello spar, oltre al suo valore intrinseco per l'investigazione del comportamento dinamico di questa tipologia strutturale, potrebbe aprire la strada alla modellazione a basso costo di strutture offshore direttamente in mare, che potrebbe costituire una valida alternativa o complemento alle prove nelle vasche artificiali.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ANSYS®, Academic Research, Release 16.0.
ANSYS® AQWA, v. 16.0, Help System, Theory Manual, ANSYS, Inc.
Collu, M., Kolios, A. J., Chahardehi, A. & Brennan, F. P. A comparison between the preliminary design studies of a fixed and a floating support structure for a 5 MW offshore wind turbine in the North Sea. RINA Marine Renewable and Offshore Wind Energy, 2010.
Lefebvre, S. & Collu, M. Preliminary design of a floating support structure for a 5 MW offshore wind turbine. Ocean Engineering, 2012, 40, 15-26.
Failla, G. & Arena, F. New perspectives in offshore wind energy. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 373, 201480228, 2010.
Hywind Demo [Online]. Link: www.statoil.com
Sethumaran, L. & Venugopal V. Hydrodynamic response of a stepped-spar floating wind turbine: numerical modelling and tank testing. Renewable Energy, 2013, 52, 160-174.
Matha, D., Sandner, F., Cheng, P. W., Campos, A. & Molins, C. Efficient preliminary floating offshore wind turbine design and testing methodologies and application to a concrete spar design. Philosophical transactions of the royal society, A – issue, 2014.
Jonkman, J., Butterfield, S., Musial W. & Scott G. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. Technical Report NREL/TP-500-38060, 2009.
Jonkman, J. Definition of the floating system for phase IV of OC3. Technical Report NREL/TP-500-48191, 2010.
Skaare, B., Hanson, T. D., Nielsen, F. G., Yttervik, R., Hansen, A. M., Thomsen, K. & Larsen, T. J. Integrated dynamic analysis of floating offshore wind turbines. Proceedings of the European Wind Energy Conference, Milan, Italy, 7-10 May 2007.
Myhr, A., Maus, K. J. & Nygaard T. A. Experimental and computational comparisons of the OC3-Hywind and Tension-Leg-Buoy (TLB) floating wind turbine conceptual designs. Proceedings of International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), Maui, Hawaii, USA, 19-24 June 2011.
Ruzzo, C., Fiamma, V., Nava, V., Collu, M., Failla, G. & Arena F. In press. Progress on the experimental set-up for the testing of a floating offshore wind turbine scaled model in a field site. Wind Engineering (under revision,a).
Ruzzo, C., Fiamma, V., Failla, G., Arena F., Collu, M. & Nava, V. Open-sea 1:30 scale tests on a spar type offshore wind turbine: progress and future work. To be presented at: RENEW2016, 24-28 October 2016, Lisbon, Portugal (under revision,b).