

**MONITORAGGIO ED ANALISI A FATICA DELLE  
STRUTTURE OFFSHORE IN ACCIAIO**

**MONITORING AND FATIGUE ANALYSIS OF STEEL  
OFFSHORE STRUCTURES**

Michele Rizzo,  
Ostilio Spadaccini  
Università degli Studi di Firenze  
mrizzo@dicea.unifi.it  
ostilio.spadaccini@dicea.unifi.it

Paolo Castelli  
Edison S.p.A.  
Siracusa  
Paolo.Castelli@edison.it

**ABSTRACT**

Near the offshore production platform Vega A, the tanker FSO Leonis is moored to a steel column with circular section, 130 meters high and 10 meters in diameter, installed in 1988 in the Sicilian Channel, the connection is via a bridge structure with welded steel sections that make up the system SPM (Single Point Mooring). The structural system in steel box girders and column, with its cylindrical hinges, is calls-to the actions of the sea that induce cyclic stresses and fatigue. The paper presents the monitoring system of the bridge structure connecting the ship to the column, installed on your system by structural in October 2009, is composed of strain gauges sensors, in fiber optic, and inclinometers biaxial that detect rotations of the column and the bridge. The research concerns the method of collecting and interpreting statistical data, to determine the structural behavior under the action of the wind and sea. The data relating to optical fiber sensors are processed, operating temperature compensation, and together with the data of the inclinometers are determined the stresses in the steel column attached to the seabed to a foundation, also in steel ballasted gravity. Through the elaboration of the data it was possible to identify the dynamic response of the system SPM, counting the number of fatigue cycles and conduct the verification in welded sections of the column and the hinge joints.

The results allowed us to evaluate the conditions assumed in the project and made it possible to define a program of inspection and maintenance of steel structures.

## SOMMARIO

Nei pressi della piattaforma offshore di produzione Vega A, la nave-cisterna FSO Leonis è ormeggiata ad una colonna in acciaio a sezione circolare, alta 130 metri e diametro 10 metri, installata nel 1988 nel Canale di Sicilia; il collegamento fra la nave e la colonna avviene attraverso una struttura a ponte con sezioni a cassone saldate in acciaio che costituiscono il sistema SPM (Single Point Mooring). Il sistema strutturale in acciaio, travi a cassone e colonna, con relative cerniere cilindriche è sollecitato dalle azioni del mare che inducono sollecitazioni cicliche e fatica.

La memoria presenta il sistema di monitoraggio della struttura del ponte di collegamento della nave alla colonna, installato sul sistema strutturale dall' ottobre 2009, e composto da sensori di dilatazione, strain-gauges, a fibre ottiche e da inclinometri biassiali che rilevano le rotazioni della colonna e del ponte.

La ricerca riguarda il metodo di raccolta e interpretazione statistica dei dati, per determinare il comportamento strutturale sotto le azioni del mare e del vento. I dati relativi ai sensori a fibre ottiche vengono elaborati, operando la compensazione della temperatura, e insieme ai dati degli inclinometri vengono determinate le sollecitazioni nella colonna in acciaio collegata a fondo mare ad una fondazione, pure in acciaio, zavorrata a gravità.

## 1 INTRODUZIONE

Il campo VEGA si trova a circa 12 miglia a sud della costa meridionale della Sicilia, al largo della costa di Pozzallo e comprende una piattaforma chiamata VEGA A per lo sfruttamento del giacimento di petrolio e una nave di un deposito di 110.000 tonnellate ottenuta dalla trasformazione della ex petroliera Leonis in FSO (Floating - Storage - Offloading). La nave è ormeggiata presso SPM (Single Point Mooring) che si trova a circa 1,5 miglia dalla piattaforma ed è collegata alla piattaforma mediante condotte sottomarine. Nella figura 1 viene mostrata la nave Leonis e l' SPM.



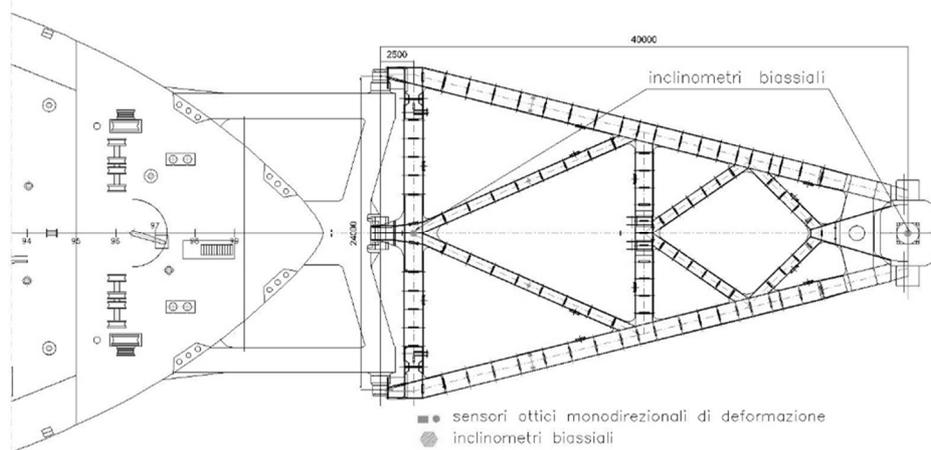
**Fig. 1.** Nave Leonis e sistema di ormeggio.

## 2 IL SISTEMA DI MONITORAGGIO

Sia la piattaforma VEGA A che la nave Leonis con il sistema di ormeggio sono monitorati; la piattaforma mediante 9 accelerometri installati nel primo piano fuori acqua della piattaforma, 6 lineari (nelle tre direzioni x, y e z e in due punti distinti) e tre angolari intorno agli assi principali. La piattaforma è monitorata anche con un sistema meteo marino costituito da un profondimetro e correntometro che servono per la ricostruzione delle mareggiate e con un anemometro per la rilevazione della velocità e direzione del vento che è installato sull'eli-deck. Il monitoraggio della VEGA comprende anche la rilevazione della temperatura e l'umidità relativa dell'aria e la pressione atmosferica.

Il sistema SPM è costituito da una colonna che è incernierata alla base sul fondo del mare mediante un giunto cardanico che permette le rotazioni nei due piani verticali ortogonali e da un braccio reticolare (yoke) che è incernierato, con cerniera triassiale in corrispondenza della colonna e in corrispondenza della nave mediante due cerniere cilindriche allineate.

Lo yoke è costituito da una struttura in acciaio con due tipologie di sezioni rettangolari a cassone di dimensioni rispettivamente 1422x40mm, la piattabanda superiore, e 1892x18mm, le due piattabande verticali, e 800x40mm 1892x18mm per la sezione più piccola.



**Fig. 2.** Vista in pianta del sistema di ormeggio.

Il sistema di acquisizione dati è installato sul Sistema dall' ottobre 2009 e raccoglie sia sullo yoke che sulla nave Leonis le dilatazioni nei punti monitorati e le rotazioni degli inclinometri. Le dilatazioni sono ricavate dai sensori a fibra ottica compensando opportunamente il segnale tenendo conto della temperatura, e sono presenti 12 sensori di dilatazione (+8 di temperatura) in 4 sezioni dello yoke (vedasi figura 2) e 25 sensori di dilatazione (+18 di temperatura) presenti in tre sezioni della nave. In totale i sensori installati sul sistema sono 63. Le posizioni dei sensori di dilatazione sono studiate, per lo yoke, allo scopo di ricostruire l'azione globale che si trasmette alla colonna e per la Leonis per ricostruire l'azione flessionale e tagliante in tre sezioni della nave stessa. Sono presenti due inclinometri biaxiali rispettivamente sulla testa della colonna e sul sistema di collegamento dello yoke con la nave.

La frequenza di acquisizione dei dati relative ai sensori ottici è pari a  $f_c=0.5$  Hz, mentre quella relativa agli inclinometri è  $f_c=1$  Hz. La direzione dello yoke è rilevato sulla nave Leonis. I sensori ottici sono del tipo FBG (Fiber Bragg Gratings) e il segnale di questi sensori è multiplexato, ovvero su un'unica catena di collegamento con la centralina passano più segnali distinti dalla loro frequenza portante caratteristica. Pertanto il sistema di acquisizione dei segnali ottici è composto da un'unica centralina a 16 canali che acquisisce tutti e 63 i segnali (Yoke e nave).

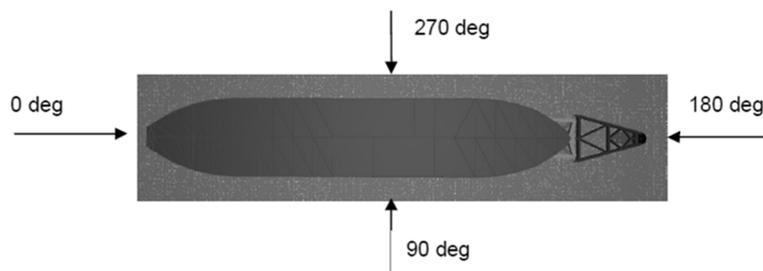
## 2 RISPOSTA DINAMICA DEL SISTEMA

Per confrontare la resistenza del sistema SPM con le forze generate dalle mareggiate di seguito viene presentata una procedura per ricostruire l'azione globale sulla colonna.

Le condizioni di carico e le azioni di progetto e le massime forze che si trasmettono dallo yoke alla colonna sono rappresentate nella Tabella 1 e 2.

**Tabella 1.** Casi di carico di progetto del Sistema SPM

	wave 1			wave 2			wind		current	
	Dir.	Hs	Tp	Dir.	Hs	Tp	Dir.	Speed	Dir.	Speed
	(deg)	(m)	(s)	(deg)	(m)	(s)	(deg)	(kts)	(deg)	(m/s)
Caso 1	180,0	9,0	13,1	-	-	-	180,0	62,6	180,0	0,95
Caso 2	180,0	9,0	13,1	-	-	-	170,0	62,6	180,0	0,95
Caso 3	180,0	5,9	10,6	120,0	3,5	8,2	120,0	41,5	180,0	0,65
Caso 4	180,0	3,5	8,2	-	-	-	180,0	45,6	90,0	0,50
Caso 5	180,0	9,0	13,1	-	-	-	150,0	50,5	135,0	0,57



**Fig. 3.** Sistema di riferimento per le azioni di progetto.

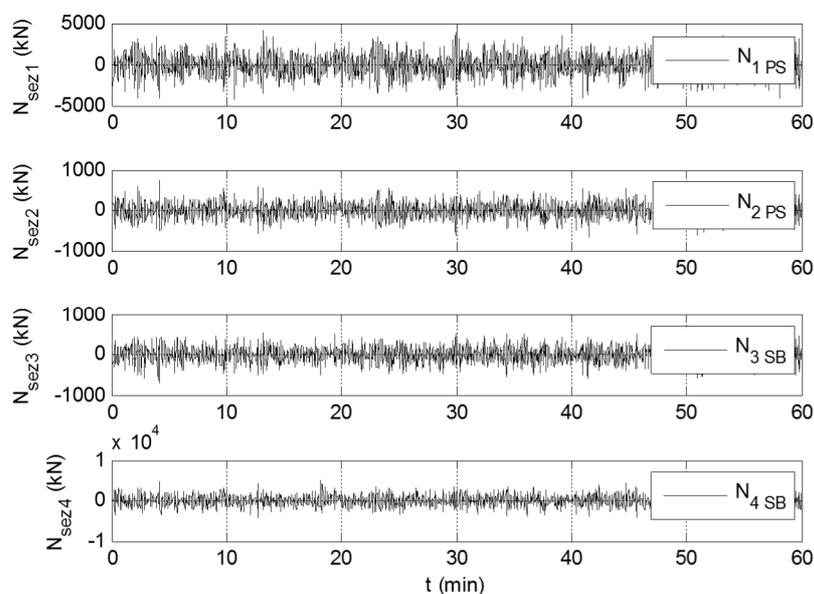
**Tabella 2.** Azioni di progetto dell' SPM

		Condizione di carico nave: Full Load			Condizione di carico nave: Ballast		
		Tx (tonn)	Ty (tonn)	N (tonn)	Tx (tonn)	Ty (tonn)	N (tonn)
Caso 1	max	318	39	161	315	367	161
	min	-1388	-75	-73	-1582	-8	-65

L'azione sulla Colonna è ottenuta utilizzando le quattro forze assiali ricavate sulle sezioni monitorate (vedi Figura 2) attraverso la media delle quattro tensioni; queste azioni sono poi decomposte

rispetto ai tre assi utilizzando la posizione relativa fra lo yoke e la colonna utilizzando i dati inclinometrici.

A titolo di esempio si riportano i risultati ottenuti con la mareggiata del 14/03/2013, con  $H_s=6.7\text{m}$ .

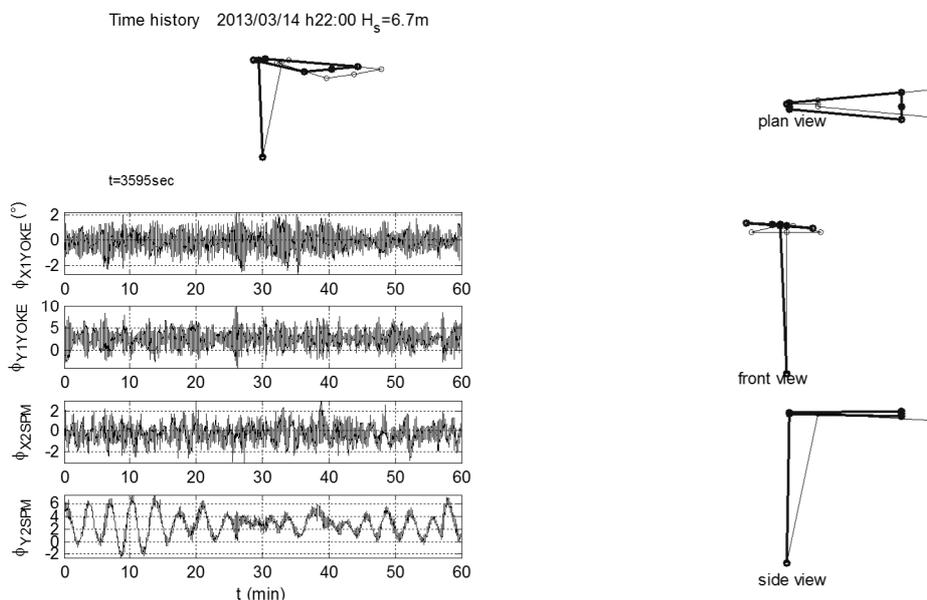


**Fig. 4.** Storia di carico delle quattro sezioni monitorate per la mareggiata del 14/03/2014 h22.

Le caratteristiche delle mareggiate che poi saranno analizzate anche nel seguito sono riportate nella Tabella 3. Nella Figura 4 possiamo vedere l'andamento dell'azione globale sulle aste dello yoke mentre in Figura 5 l'andamento delle inclinazioni dello yoke stesso.

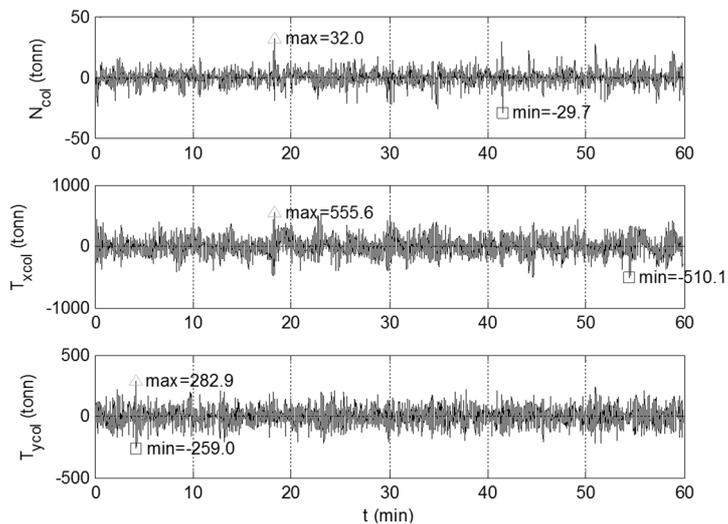
**Tabella 3.** Valori per  $H_s$  e grandezze correlate nelle mareggiate considerate (dati da VEGA)

Giorno:ora	$H_s$ (m)	$H_{max}$ (m)	$T_z$ (s)	$T_s$ (s)	$T_{hmax}$ (s)	$D_m$ (degN)	$W$ (m/s)	$D_w$ (degN)
01/01/14:17	1.2	1.8	5.3	5.4	5.2	34	9.42	297
06/01/14:21	1.2	1.9	6.7	7.8	7.2	256	8.99	6
18/01/14:00	1.2	2.3	5.1	5.2	5.4	51	7.38	169
01/01/14:02	2.4	3.6	6.4	6.8	6.7	64	13.82	310
05/01/14:23	2.4	3.5	6.7	7.4	7.1	54	8	321
20/01/14:10	2.4	4.5	6.2	6.7	6.6	230	17.68	219
02/02/14:05	3.6	5.1	8.8	10.2	9.8	170	4.5	65
02/02/14:13	3.6	5.1	8.8	10.2	9.8	170	4.5	65
12/02/14:13	3.6	5.8	6.8	7.5	8.3	49	19.93	283
18/05/14:23	4.9	8.9	4.9	6.7	4.9	301	8.48	74
22/10/14:18	4.8	6.9	7.6	8.4	8.1	59	24.29	326
28/12/14:19	4.9	8.8	7.5	8.8	8.4	123	18.15	279
14/03/13:22	6.7	9.9	9.0	9.8	9.3	307	-	-



**Fig. 5.** Storia delle inclinazioni per la mareggiata del 14/03/2014 h22.

In Figura 6 sono mostrate le azioni massime sulla Colonna dovute alla mareggiata in esame. Attraverso analisi di questo tipo è possibile ricavare i valori estremi delle azioni al fine di confrontarli con quelli di progetto del sistema; in Figura 7 sono mostrati i valori di trend delle azioni globali.



**Fig. 6.** Azioni sulla colonna Tx, Ty, N per la mareggiata del 14/03/2014 h22.

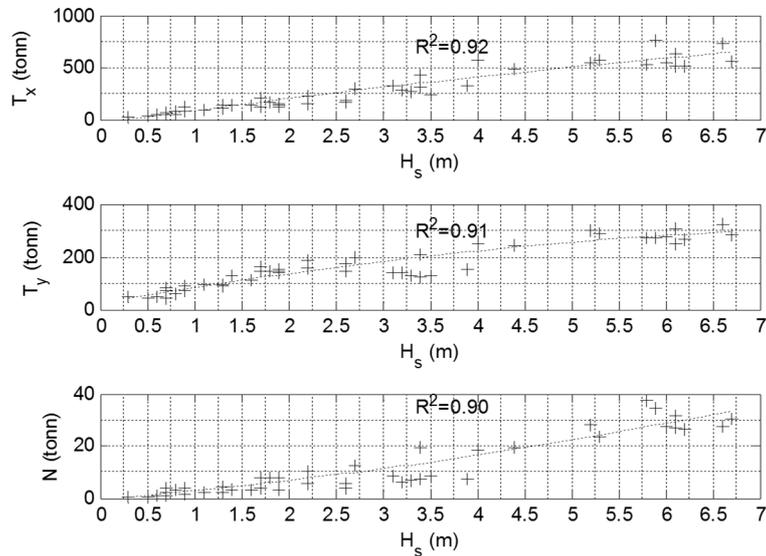


Fig. 7. Azioni sulla colonna Tx, Ty, N vs Hs. - - quadratic trend line.

### 3 ANALISI A FATICA

Attraverso i dati tensionali del monitoraggio è possibile effettuare una analisi a fatica della sezione dello yoke più sollecitata, in particolare utilizzando gli eventi in Tabella 3 si è potuto stimare il danno dovuto alle mareggiate in esame. Infatti per carichi irregolari, contraddistinti da ampiezze variabili, al fine di valutare il tempo di vita a fatica si può utilizzare le curve S-N con un metodo di conteggio dei cicli ('rainflow method', Matsuishi and Endo in [3]) attraverso la regola di accumulo lineare del danno di Palmgren-Miner. Pertanto, utilizzando i metodi precedentemente richiamati, l'analisi è condotta secondo le istruzioni presenti negli Eurocodici [6] e a livello computazionale utilizzando le WAFO routines [4].

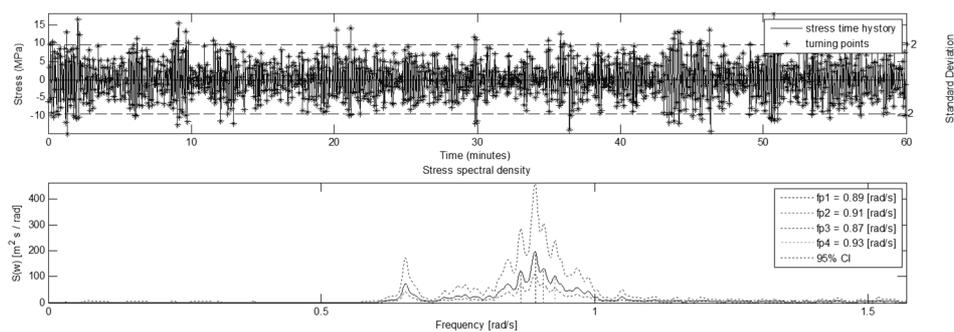
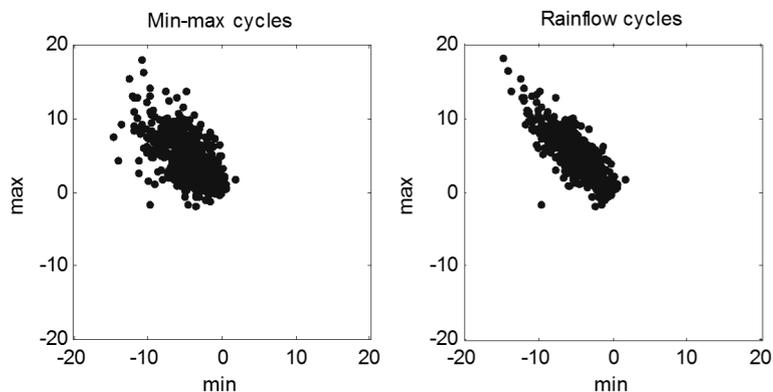
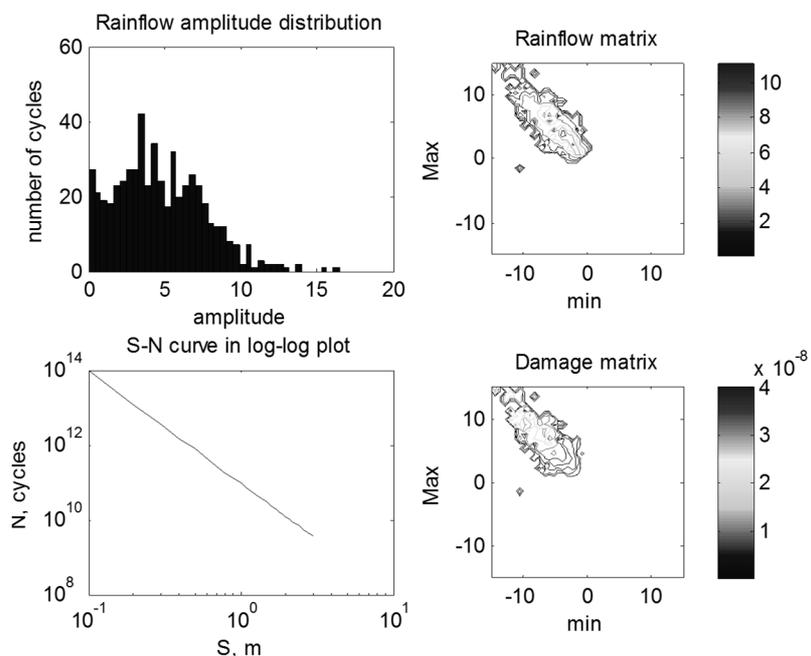


Fig. 8. Andamento tensione, 'turning points' e densità spettrale per la mareggiata del 06/01/14 h21.



**Fig. 9.** Andamento cicli min-max e di 'rainflow' per la mareggiata del 06/01/2014 h21.



**Fig. 10.** Distribuzione delle ampiezze di 'rainflow', matrice di 'rainflow', curva S-N e matrice di danno per la mareggiata del 06/01/2014 h21.

Le analisi condotte per le classi individuate in Tabella 4 e desunte dal lavoro [5], consentono di stimare la vita a fatica che può essere ricavata come l' inverso dell' intensità del danno totale e pari a  $T_{life}=1/d_{int}= 149$  anni.

La Tabella mostra inoltre che il maggiore danno è dovuto dalle onde con altezza significativa minore, in particolare le classi di onde con  $H_s=1.2m$  portano ad una percentuale di danno pari al

76.49%, questo sia per il numero di onde con quella classe e sia per l'intensità del danno relativa a quella classe.

**Tabella 4.** Intensità del danno per le classi di onde

Hs (m)	n° onde nei 25 anni (VEGA)	pi	Intensità danno Di	pi*Di	% D
1,2	161.912.896	0,897	1,804E-10	1,618E-10	76,49
2,4	15.270.093	0,085	4,313E-10	3,649E-11	17,25
3,6	2.634.823	0,015	6,179E-10	9,020E-12	4,26
4,8	503.756	0,003	1,034E-09	2,887E-12	1,36
6,0	119.220	0,001	2,014E-09	1,330E-12	0,63
7,2	28.723	0,000		0,000E+00	0,00
8,4	7.648	0,000		0,000E+00	0,00
9,6	1.849	0,000		0,000E+00	0,00
10,8	584	0,000		0,000E+00	0,00
12,0	127	0,000		0,000E+00	0,00
13,2	43	0,000		0,000E+00	0,00
14,4	6	0,000		0,000E+00	0,00
15,6	1	0,000		0,000E+00	0,00
16,8	0	0,000		0,000E+00	0,00

### 3 CONCLUSIONI

Il lavoro svolto ha permesso di rilevare gli sforzi presenti nelle strutture in acciaio del sistema SPM, yoke-colonna, attraverso i dati del monitoraggio e l'analisi di numerose condizioni di mare. È stato possibile calcolare sia le intensità puntuali della tensione sugli elementi dello yoke, sia le azioni globali trasmesse sulla colonna allo scopo di confrontarle con quelle di progetto.

Con la tensione puntuale è stato quindi possibile effettuare una analisi a fatica e stimare la vita a fatica delle strutture in acciaio dello yoke.

Pertanto, attraverso il sistema di monitoraggio e l'elaborazione dei dati è possibile identificare la risposta dinamica del sistema SPM, conteggiare il numero di cicli di carico e condurre le verifiche a fatica nelle sezioni saldate della colonna e nei giunti a cerniera.

I risultati preliminari hanno permesso di valutare le condizioni di vento e mare assunte a progetto e di impostare un programma di controllo e manutenzione delle strutture in acciaio.

### RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia Edison SpA per la messa a disposizione dei dati ed il supporto alla ricerca.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Facchini L., Spadaccini O., Vignoli A., “Neural network based identification of offshore platform by ambient vibration data”, Proceedings of International Conference on “Engineering for Ocean & Offshore Structures and Coastal Engineering Development”, 18-20 Dec. 2001, Singapore, pp.175-183.
- [2] L. Facchini, M. Rizzo, O. Spadaccini, A. Vignoli, “Monitoring of a single point mooring in the VEGA field”, Proceedings of the Second Conference on Smart Monitoring, Assessment and rehabilitation of Civil Structures (SMAR2013), Istanbul, Turkey, 9-11 September, 2013, id.111.
- [3] M. Matsuishi and T. Endo. Fatigue of metals subject to varying stress. Paper presented to Japan Soc. Mech. Engrs, Jukvoka, Japan, 1968.
- [4] WAFO—a Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads, Tutorial for WAFO version 2.5 by the WAFO group, Lund University, faculty of engineering centre for mathematical sciences mathematical statistics.
- [5] DEAM, revisione dei valori estremi dei parametri meteo-marini e numero di onde singole, documento GD-VE-MM/1-2005 Edison SpA.
- [6] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue.

## **PAROLE CHIAVE**

Offshore, sistemi di ormeggio, monitoraggio, analisi dinamica, fatica.