



# MONITORAGGIO CONTINUO DELLE GRANDI STRUTTURE

*Autori:* Eddy Dascotte<sup>(1)</sup>, Jacques Strobbe<sup>(1)</sup>, Ulf T. Tygesen<sup>(2)</sup>

*Traduzione e adattamento:* Francesco Palloni, SmartCAE srl

<sup>(1)</sup>Dynamic Design Solutions (DDS) NV, Belgium - <sup>(2)</sup>Rambøll Oil and Gas, Denmark

## IL CASO DI STUDIO DELLA PIATTAFORMA OFFSHORE VALDEMAR

Normalmente le piattaforme offshore sono progettate per una durata specifica in base a norme e standard con approcci conservativi. La possibilità di estendere la durata operativa delle piattaforme può essere valutata mediante l'implementazione di Sistemi di Monitoraggio Strutturale (SMS)

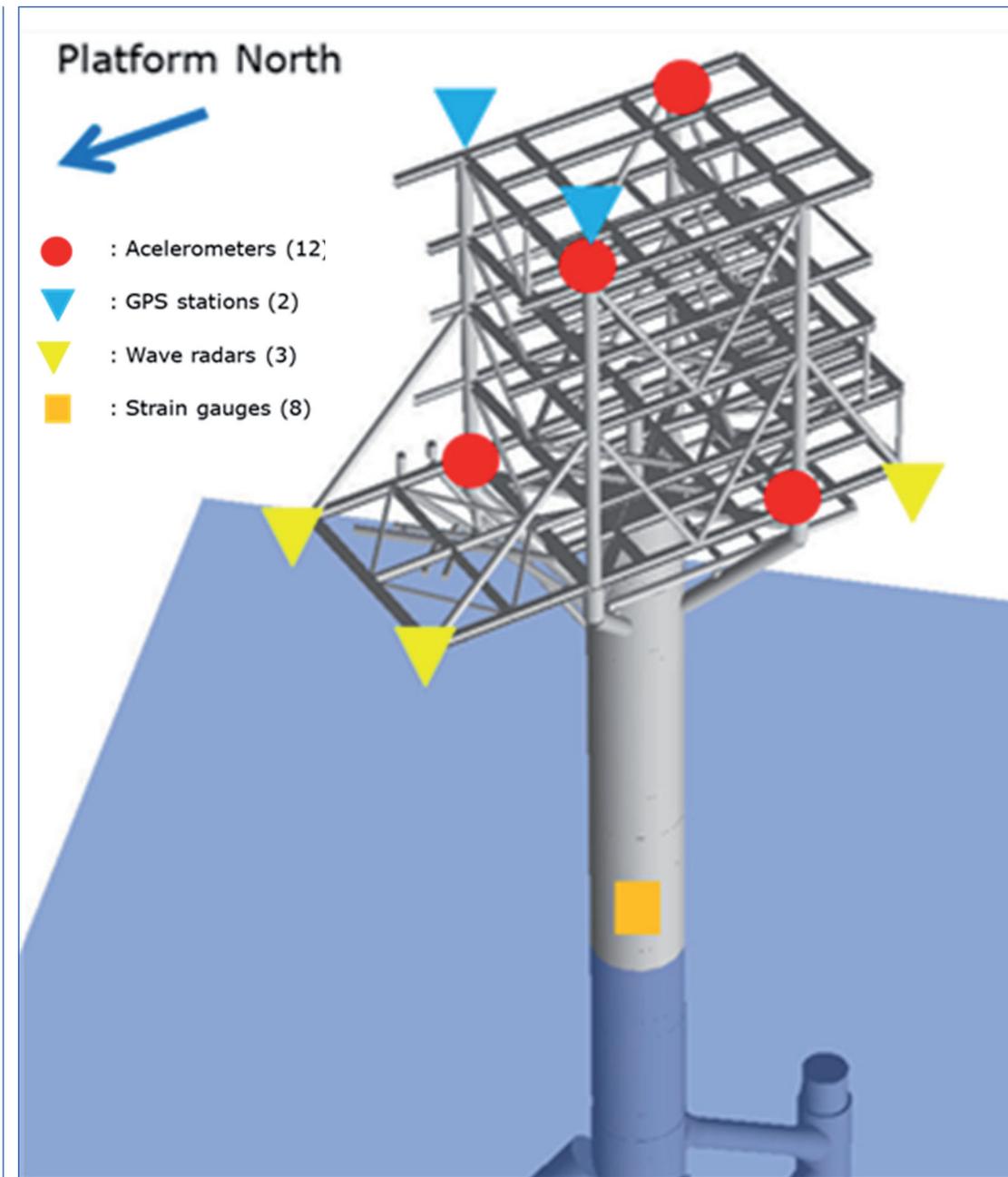


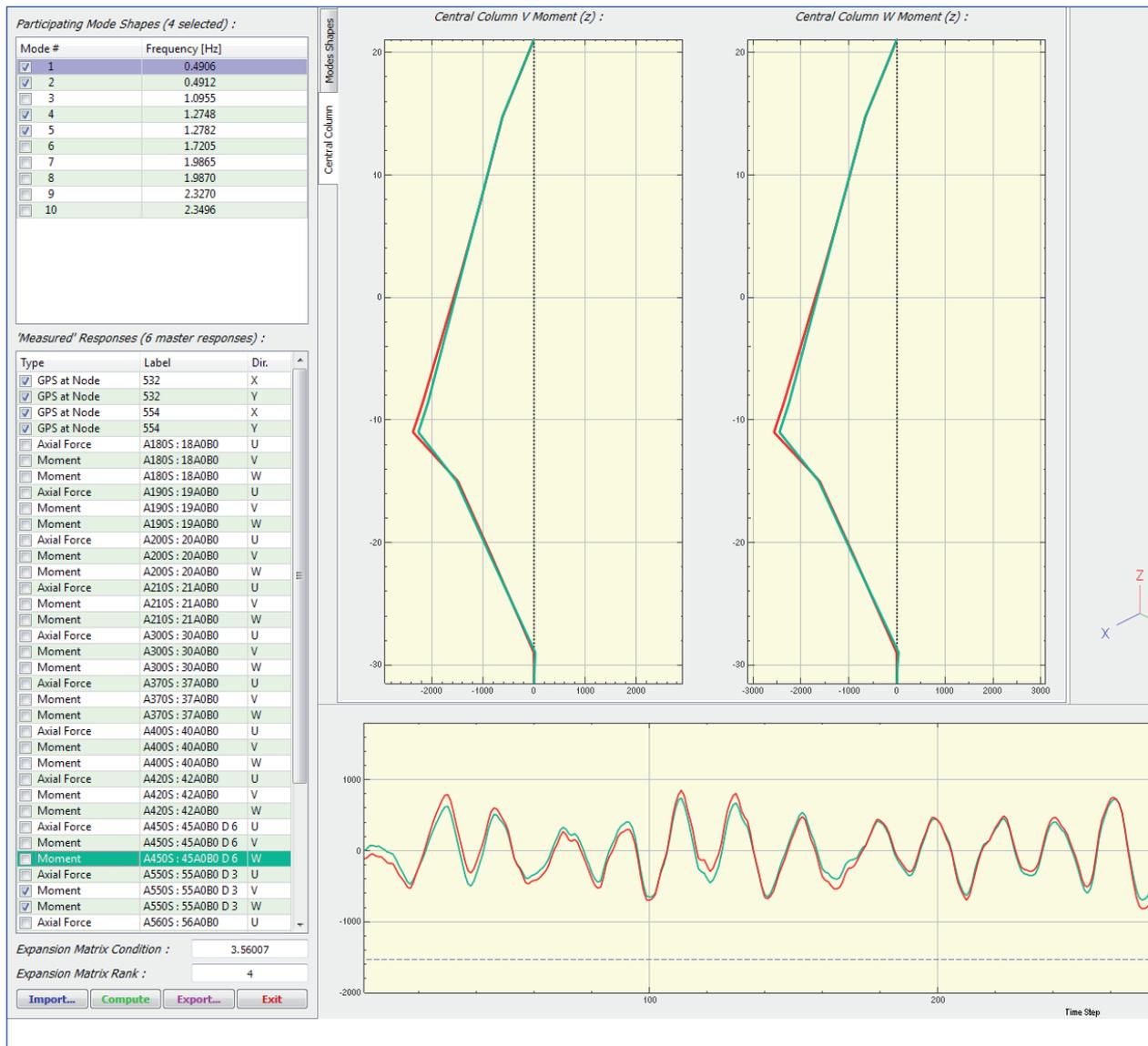
Figura 1 - La piattaforma offshore Valdemar VBA (sx) e il layout dei sensori (dx).

per misurare e valutare l'effettiva durata delle stesse. La piattaforma offshore Valdemar è una piattaforma tripode, che si trova nel Mare del Nord a 250 km a ovest della Danimarca. La piattaforma è stata installata nel 2006 e progettata come Piattaforma Not Normed-Manned (NNMP). Il proprietario e l'operatore della piattaforma è Maersk Oil & Gas. Rambøll Oil & Gas (ROG) è il consulente tecnico che sta preparando le specifiche tecniche per il sistema SMS, la post-elaborazione dei dati, l'analisi e la documentazione. La piattaforma Valdemar è mostrata in Figura 1.

## PRE-TEST E LAYOUT DEI SENSORI

Nella fase di preparazione delle specifiche tecniche per l'SMS, viene eseguita una pre-verifica della disposizione dei sensori basata sull'elaborazione di dati di misurazione sintetici. Il layout dei sensori è costituito da stazioni GPS, accelerometri, estensimetri e radar per le onde, come illustrato nella Figura 1. Utilizzando il software FEM ROSAP sviluppato in casa da ROG, i dati sintetici vengono replicati attraverso un'analisi FEM transitoria simulando l'evoluzione nel tempo della

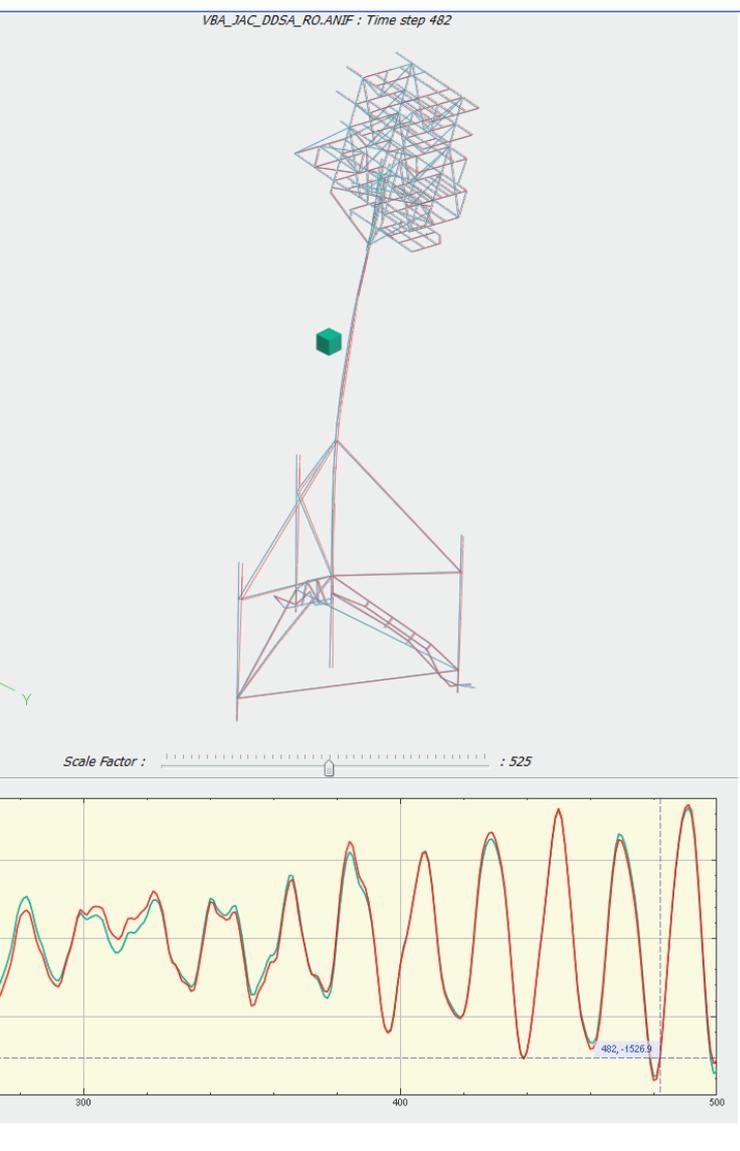
Figura 2 - Pre-test  
 - Le forze calcolate nel processo di espansione sono confrontate con i dati sperimentali di partenza per l'ottimizzazione del layout dei sensori.



risposta sotto l'azione del moto ondoso. Per ciascuna posizione dei sensori viene estratta la storia temporale della misura virtuale attraverso il modello ad elementi finiti. Utilizzando l'espansione modale della storia temporale degli spostamenti misurati in due punti sul lato superiore e l'evoluzione nel tempo di stress e strain misurati in una posizione sulla colonna centrale è possibile ricostruire la storia temporale di deformazione e sollecitazione mediante l'uso di il modello FEM per tutti gli elementi e i giunti della struttura. Le tensioni ottenute dal processo di espansione in ogni elemento della struttura possono ora essere confrontate con i dati del modello FEM sintetico originale, consentendo la valutazione della qualità del processo di espansione e la valutazione della posizione ottimale dei sensori. È possibile valutare la sensibilità dei dati SMS e determinare i criteri di accettabilità per le incertezze nelle misurazioni. In Figura 2 viene mostrato un esempio di presentazione dei risultati del processo di espansione confrontato con i dati sintetici originali. Le conoscenze acquisite da questi studi costituiscono la base per le specifiche tecniche dell'SMS.

## SPOSTAMENTI MEDIANTE COMBINAZIONE DI GPS E ACCELEROMETRI

La gestione di misure degli spostamenti tra la stazione base GPS a terra e le due stazioni GPS off-shore a 250 km di distanza è una sfida impegnativa. A questo scopo sono stati sviluppati e testati degli algoritmi avanzati. I ricevitori GPS sono ideali nella gamma delle basse frequenze, ma in-



cludono rumore nel segnale per la gamma delle frequenze più alte. Per contro, gli accelerometri sono ideali per determinare le frequenze naturali e gli spostamenti nella gamma di frequenze più alte, tuttavia nella gamma di frequenze più basse il rumore del segnale può essere elevato.

Un metodo per migliorare la qualità delle misurazioni di spostamento mediante l'uso di ricevitori GPS è stato sviluppato combinando i dati dei GPS con i dati degli accelerometri. Il metodo è stato presentato nel riferimento [2]. Inoltre, sulla base delle informazioni derivate dalla gamma di frequenze sovrapposte tra i due tipi di sensori, è possibile dimostrare che la precisione nella rilevazione degli spostamenti è migliore di +/- 3-4 mm con la base GPS a terra alla distanza di 250 km. I risultati sono stati presentati nel riferimento [3]. La frequenza di campionamento per il GPS è di 20 Hz e per gli accelerometri di 128 Hz.

## OPERATIONAL MODAL ANALYSIS

Sulla base dei segnali degli accelerometri, è stata eseguita l'analisi modale operativa (OMA). Uno studio di correlazione dei parametri modali rispetto agli stati del mare mostra che i fattori di smorzamento dipendono dagli stati marini. Lo studio mostra anche che le frequenze naturali sono anch'esse correlate agli stati marini (altezza d'onda). Le

analisi condotte si basano su metodi di identificazione lineari del sistema. Sebbene per la piattaforma di Valdemar i metodi lineari sono risultati adeguati, questo potrebbe non essere il caso per altre strutture. Algoritmi e metodi per l'identificazione di sistemi non lineari per questo tipo di grandi strutture saranno sviluppati in un futuro progetto di ricerca.

## AGGIORNAMENTO DEL MODELLO FEM – PARAMETRI MODALI (ACCELEROMETRI)

L'aggiornamento del modello FE può essere eseguito a diversi livelli. Il primo livello viene eseguito rispetto ai parametri modali misurati utilizzando il metodo del Bayesian Parameter Estimator. Per ogni parametro che deve essere aggiornato, viene espressa l'incertezza in termini, ad es. di una distribuzione normale con valor medio e deviazione standard. Se applicabile, è possibile definire un legame tra parametri. Questo approccio è superiore a qualsiasi metodo trial-&-error utilizzato in precedenza in quanto fornisce nuove informazioni sul comportamento strutturale. Per la piattaforma Valdemar è emerso che, in particolare, la posizione del COG e i parametri del suolo hanno un impatto sui parametri modali della piattaforma.

Nella Figura 3 è presentato un esempio dei risultati di un aggiornamento del modello FE della piattaforma. Il grafico per questo caso mostra che le coordinate per il COG (parametri 2-6) e i parametri che si riferiscono al suolo (parametri 7-9) sono stati corretti fino al 30%. Le masse e le rigidità di elementi e giunti sono state corrette solo di pochi punti percentuali.

### **AGGIORNAMENTO DEL MODELLO FEM – STRESS (ESTENSIMETRI)**

Nel caso in cui sia installata una quantità sufficiente di estensimetri, è possibile correlare il modello FEM aggiornato sulla base delle storie temporali di spostamento, con le storie temporali di stress/strain misurate. L'aggiornamento del modello FEM può quindi essere eseguito nel dominio del tempo. Il metodo è simile a quello visto nella fase di pre-test vista in precedenza, con la differenza che ora i dati FEM vengono sostituiti da i dati di misurazione effettivi. Il processo di espansione comprende le misurazioni di spostamento in due posizioni nella parte superiore della piattaforma e le misurazioni di deformazione in una posizione nella colonna centrale, che vengono utilizzate per calcolare l'evoluzione nel tempo della sollecitazione per tutti gli elementi nella struttura. L'aggiornamento del modello FEM può essere eseguito tarando i parametri in modo tale che gli stress/strain calcolati nel processo di espansione corrispondano agli stress/strain misurati.

### **AGGIORNAMENTO DEL MODELLO FEM – CARICHI DEL MOTO ONDOSO (RADAR)**

La calibrazione dei carichi ambientali generati dal moto ondoso può essere eseguita utilizzando modello FEM aggiornato in combinazione con dati di misurazione dai tre radar per le onde installati sulla parte superiore della piattaforma Valdemar. Le prime indagini indicano che i fenomeni di diffrazione dell'onda (McCamy-Fuchs) hanno un effetto significativo sul carico d'onda risultante sulla struttura.

In un progetto parallelo, utilizzando i dati del modello aggiornato, è stata migliorata la formulazione avanzata dei carichi dati dalle onde all'interno del software ROSAP sviluppato da ROG. Dai tre radar per le onde che misurano l'elevazione della superficie del mare in tre punti, viene derivata una serie di informazioni come l'altezza significativa dell'onda, la direzione dell'onda media, la diffusione dell'onda, diversi spettri d'onda, la correlazione con una serie di altri dati al fine di stimare il carico effettivo. Utilizzando la formulazione del carico dell'onda migliorata e le storie temporali misurate da tutti i sensori, è possibile eseguire un aggiornamento finale del modello FEM nel dominio del tempo mediante l'applicazione di algoritmi di ottimizzazione avanzati risolti direttamente o risolti mediante un approccio di superficie di risposta. Con questo approccio è possibile eseguire una valutazione aggiornata della fatica della struttura per stimare l'estensione della vita della piattaforma. È inoltre possibile determinare il coefficiente di variazione per il carico dell'onda (COVwave) attraverso il quale ridurre i tempi e i costi delle verifiche ispettive delle piattaforme.

### **MONITORAGGIO DELLA FATICA ACCUMULATA**

Il sistema SMS implementato sulla piattaforma Valdemar è predisposto per il monitoraggio continuo del danno da fatica. Il monitoraggio dell'accumulo della fatica richiede a) un modello FEM aggiornato utilizzando parametri modali, b) misurazioni degli spostamenti della piattaforma in due posizioni e c) misure degli allungamenti in una posizione. Non è richiesta alcuna informazione sul carico delle onde. I dati misurati in pochi punti sulla struttura vengono espansi attraverso le forme modali del modello FEM aggiornato della piattaforma. Per ogni istante temporale dei dati campionati, vengono determinate le coordinate modali da usare nel processo di espansione. Le tensioni in tutti gli elementi e giunti della struttura possono ora essere calcolati attraverso i coefficienti di partecipazione modale calcolati indipendentemente per ogni istante temporale. Non sono adottati metodi di sovrapposizione. La misurazione del danno da fatica accumulato si riduce ora al conteggio del rain flow sulle storie temporali dello stress e analizzando il danno da fatica. Il vantaggio di questo approccio è permette di stimare il danno da fatica a partire dal

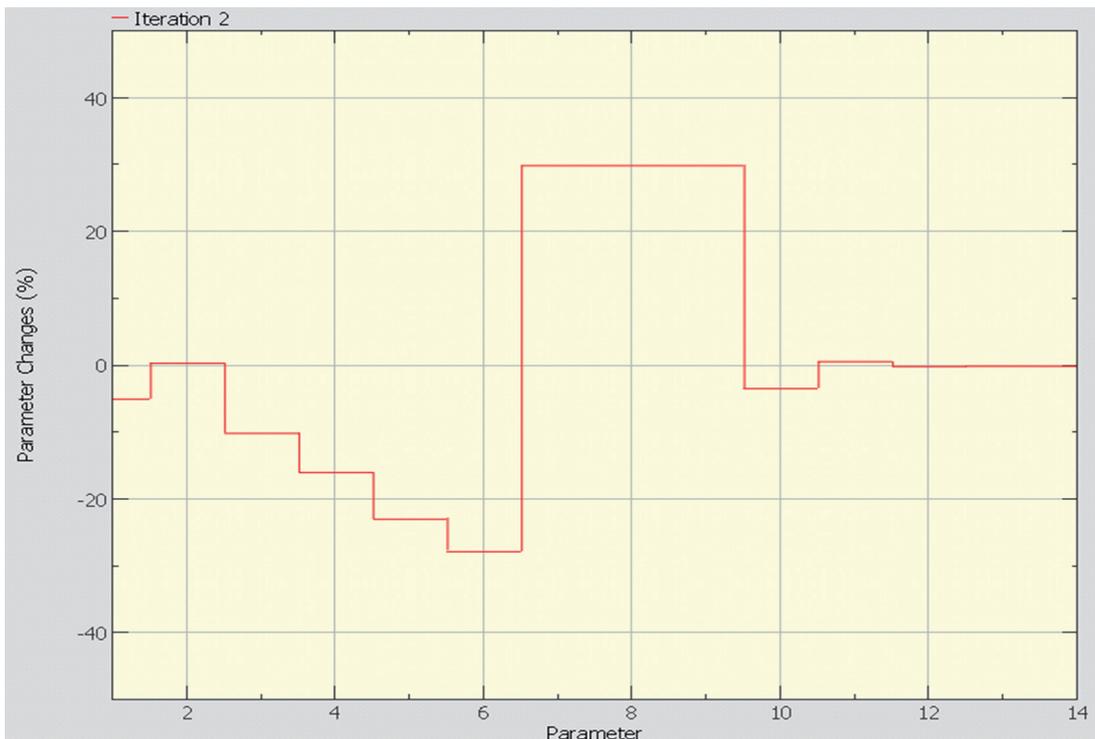


Figura 3 – Esempio di risultati dall'aggiornamento del modello FEM

momento dell'installazione dei sensori e di decidere l'eventuale estensione di vita operativa della piattaforma. Dato che sono soltanto i movimenti effettivi della piattaforma che contribuiscono alla stima del danno da fatica, questo metodo permette di non superare gli approcci conservativi delle norme e degli standard.

## CONCLUSIONI

In questa serie di articoli è stato presentato un sistema innovativo per il monitoraggio continuo dello stress di grandi strutture. Il sistema utilizza misurazioni di spostamenti (GPS), storie temporali di stress/strain in poche posizioni e un modello di elementi finiti validato e aggiornato. Queste informazioni vengono combinate utilizzando un metodo di espansione modale per ottenere la storia di stress in tutti gli elementi e i giunti della struttura.

Il processo è stato implementato su un ponte strallato e una piattaforma petrolifera offshore. Questi esempi mostrano le potenzialità del metodo per il suo utilizzo a diversi livelli per il monitoraggio strutturale, dalla pianificazione pre-test delle posizioni dei sensori e la valutazione della precisione delle misure, all'aggiornamento del modello FE, al monitoraggio della fatica accumulata e alla stima della durata residua.

Il lavoro svolto finora costituisce la base per ulteriori sviluppi, tra cui tecniche per il miglioramento della qualità dei dati dalle stazioni GPS a grande distanza dalla base a terra, l'identificazione e l'aggiornamento del modello FEM soggetto a fenomeni non lineari, maggiore precisione nella determinazione delle storie di carico reali da usare in sede di progetto.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] E. Dascotte, J. Strobbe, U. Tygesen, Continuous Stress Monitoring of Large Structures. Presented at the 5th International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC), May 2013, Guimaraes, Portugal.
- [2] Hansen J.B., Brincker R., Mathiasen S., Jørgensen A., Knudsen M.B., Tygesen U.T. (2011), Combining GPS and Integrated Sensor Signals, Proc. International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC 2011), Istanbul, Turkey.