

# VERIFICA SPERIMENTALE DELLA RESISTENZA A FATICA DI BRACCI IN ALLUMINIO SALDATO PER IMBARCAZIONI DA CANOTTAGGIO

*S. Bettinelli<sup>1</sup>, A. Placido<sup>2</sup>, L. Susmel<sup>1</sup>, R.Tovo<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara, Via Saragat 1, 44100 Ferrara - Italy

<sup>2</sup>Cantiere Navale Filippi Lido Srl, Via Matteotti 113, 57024 Donoratico (LI) - Italy

E-mail: [stefano.bettinelli@unife.it](mailto:stefano.bettinelli@unife.it); [ufficio.tecnico@filippiboats.it](mailto:ufficio.tecnico@filippiboats.it)

## SOMMARIO

Il presente lavoro relaziona su alcune prove di fatica eseguite su bracci in alluminio saldati impiegati dal Cantiere Navale Filippi Lido Srl come scalmiere su imbarcazioni da canottaggio. In particolare, tali prove rappresentano la verifica ultima di un lungo studio che è stato portato avanti dall'azienda onde realizzare componenti di nuova concezione: con la presente indagine sperimentale si è voluto verificare se questi bracci di forma così particolare ed innovativa rispettassero la durata in esercizio prevista in sede di progetto.

I bracci sono costituiti da due tubolari saldati di sezione ellittica e possiedono una particolare forma ad ala all'estremità della quale è fissata la forcola porta remo. Essi vengono montati trasversalmente sui bordi dell'imbarcazione e, oltre a supportare i remi e la spinta pulsante della pala, fungono da irrigidimento trasversale dello scafo.

Nel presente studio sperimentale sono stati provati a fatica bracci sia per imbarcazioni di coppia che di punta, dove nel primo caso l'atleta agisce con entrambe le mani su un unico remo, il braccio è asimmetrico e la sezione è maggiore in corrispondenza degli attacchi, mentre nel secondo caso invece i bracci, due per atleta, sono a sezione costante e di dimensioni inferiori.

Le modalità di prova sono state inizialmente scelte sulla base di misurazioni di forza eseguite, in condizioni reali di utilizzo, mediante un sistema imbarcabile di acquisizione dati [1]. Successivamente, è stata ottimizzata un'attrezzatura di fissaggio dei bracci al banco in modo da riprodurre la rigidità dell'imbarcazione e la reale ripartizione dei carichi (e questo soprattutto nelle zone maggiormente caricate in prossimità delle saldature). Le prove condotte in laboratorio hanno dimostrato, infine, come questi bracci di nuova concezione utilizzati dall'azienda Filippi Lido Srl soddisfino pienamente, in termini di durata, ai requisiti di progetto.

## 1. INTRODUZIONE

I bracci oggetto di studio hanno geometria simile ad un'ala di sezione ellittica, e sono costruiti saldando tubolari in alluminio 6082-T4 deformati a freddo. Il fissaggio all'imbarcazione avviene con bulloni per mezzo di due flange in alluminio saldate al tubolare centrale. Le estremità poi sono ulteriormente irrigidite da tubolari cilindrici (*5° braccio*) fissati verso prua e nella parte superiore della forcola. La Figura 1 mostra, a titolo d'esempio, uno di questi bracci di nuova concezione montati su un singolo di coppia.

Per definire le modalità di svolgimento delle prove a fatica, nonché l'entità dei carichi da applicare, si è inizialmente proceduto con una analisi sistematica di dati acquisiti in acqua a regime di gara [1], e successivamente con lo studio di un attrezzatura di fissaggio dei bracci su un banco prova in acciaio.

Onde provare tali bracci in condizioni vicine a quelle reali di esercizio, si è cercato di riprodurre il più fedelmente possibile su banco le condizioni di utilizzo in acqua, e questo sia per quanto riguarda l'applicazione dei carichi, per il sistema di vincolo e per la distribuzione delle tensioni nel materiale.

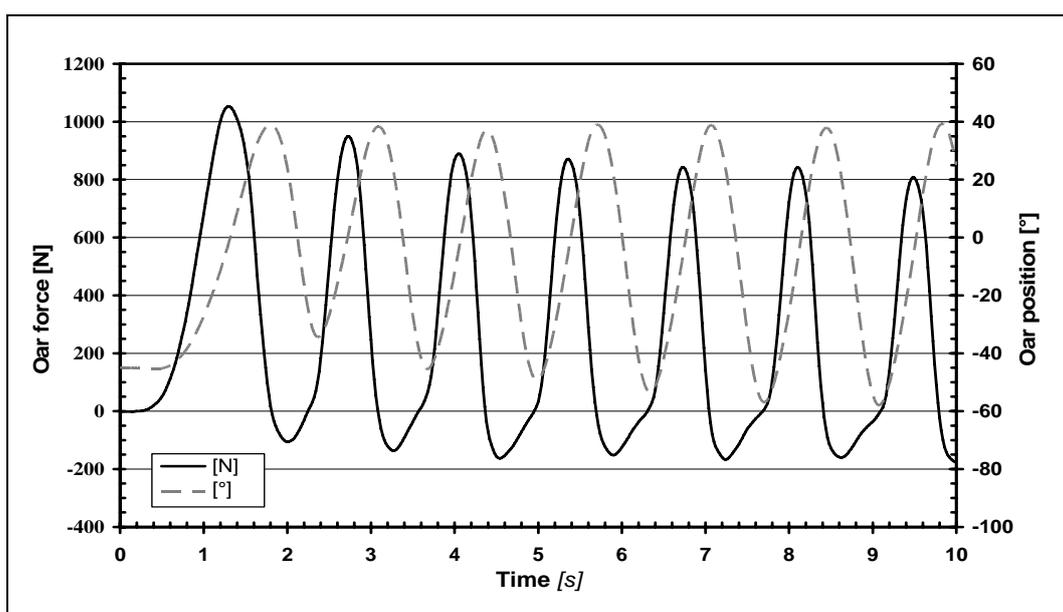


**Figura 1:** Esempio di imbarcazione singolo di coppia con braccio ad ala in alluminio

I dati di forza che sono stati utilizzati per impostare le condizioni di prova sono relativi ad una sessione di allenamento di atleti professionisti su un'imbarcazione di coppia a due rematori [1]. Il sistema di acquisizione ha registrato tutte le grandezze nei punti di lavoro del vogatore, ovvero: le forze applicate all'estremità del braccio, la forza applicata alla pedana del puntapiedi, la forza perpendicolare al seggiolino, le posizioni angolari del remo e quella del seggiolino. Tutti i sensori sono stati tarati a montaggio avvenuto: i sensori di forza sono stati calibrati con una cella di carico HBM<sup>®</sup> (fondo scala di 2kN) applicando un carico nella direzione longitudinale dello scafo (secondo il moto dell'imbarcazione).

In Figura 2 è riportato, a titolo d'esempio, l'andamento delle grandezze di forza e rotazione del remo destro del vogatore di poppa durante la fase di partenza (i dati del remo sinistro e dell'altro componente dell'equipaggio non risultano significativamente diversi).

La frequenza di campionamento in acqua è stata di 100Hz e tutti i dati successivamente rianalizzati sono stati registrati su file e suddivisi per *run* da 2000m ciascuno.



**Figura 2:** Esempio di andamento temporale delle grandezze caratteristiche del remo [1]

## 2. PROVE SPERIMENTALI

### 2.1 Ottimizzazione dell'attrezzatura di prova

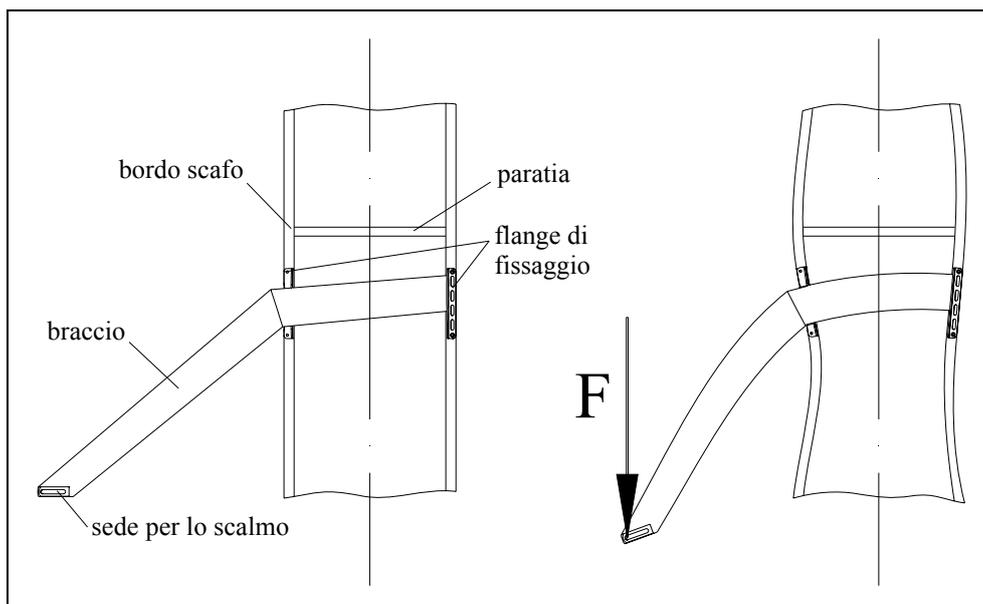
Le acquisizioni fatte in acqua sono state indispensabili per definire i carichi e i tempi di esecuzione dei test in laboratorio, tuttavia, onde riuscire ad eseguire prove che fossero realmente significative, si è reso necessario condurre uno studio preliminare onde valutare l'esatta influenza dello scafo sulla distribuzione delle tensioni nei bracci, e questo soprattutto nel caso asimmetrico delle imbarcazioni di punta. Per meglio comprendere le reali condizioni di impiego, si fa presente che i bracci sono fissati sui bordi dello scafo che sono costruiti interamente in materiale composito (*sandwich*), dove le *skins* del fasciame sono realizzate per sovrapposizione di tessuti in fibra di carbonio e kevlar ( $0^\circ/90^\circ$ ), mentre l'anima è costituita da un *honeycomb* in poliuretano.

I bordi (o parpelle) su cui vengono fissati i bracci sono realizzati da prolungamenti delle *skins*, dove l'anima in *honeycomb* è sostituita con lamine di poliuretano espanso. Lo spessore al bordo risulta in media di 5-6 mm e le fibre del materiale sono localmente disposte nella direzione longitudinale e trasversale.

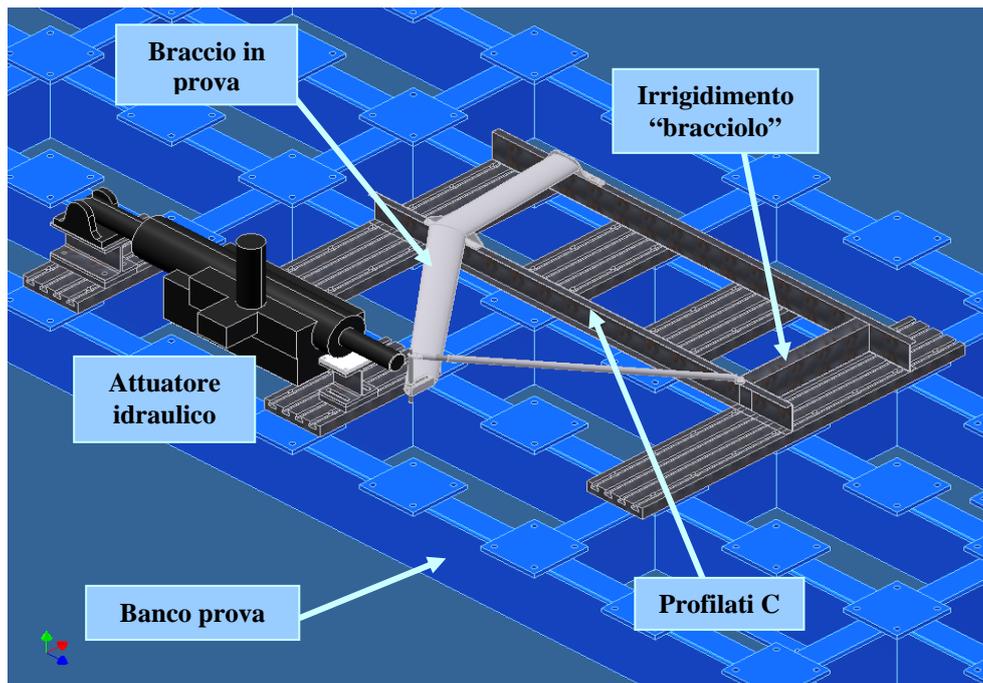
Per aumentare ulteriormente la rigidità trasversale e a torsione della barca vengono normalmente disposte all'interno dello scafo un certo numero di paratie (dette "braccioli") realizzate interamente in materiale composito. Nel caso di imbarcazioni con bracci ad ala non solo il numero dei braccioli è inferiore rispetto a quelli presenti in imbarcazioni convenzionali, ma la spaziatura tra essi aumenta e questo soprattutto in prossimità dei bracci, visto che in una tale configurazione sono i bracci stessi a fungere da irrigidimenti. Questo accorgimento costruttivo ha consentito di diminuire notevolmente il peso complessivo della barca, con evidenti benefici per le prestazioni delle imbarcazioni da competizione.

Onde definire il comportamento strutturale delle imbarcazioni, nella parte preliminare del presente studio si è inizialmente considerata la sola azione di spinta del remo nella direzione di moto della barca, ovvero trascurando le componenti verticali rispetto alla superficie dell'acqua e le sollecitazioni di torsione indotte dal 5° tubo. L'effetto di tale azione è schematizzato in Figura 3.

Successivamente, per riprodurre su banco la cedevolezza della parpella nel punto in cui sono montati i bracci si è pensato di adottare dei profilati alleggeriti in acciaio con sezione a "C".



**Figura 3:** Schema della deformata del bordo nel piano di spinta sotto l'azione della spinta del remo.



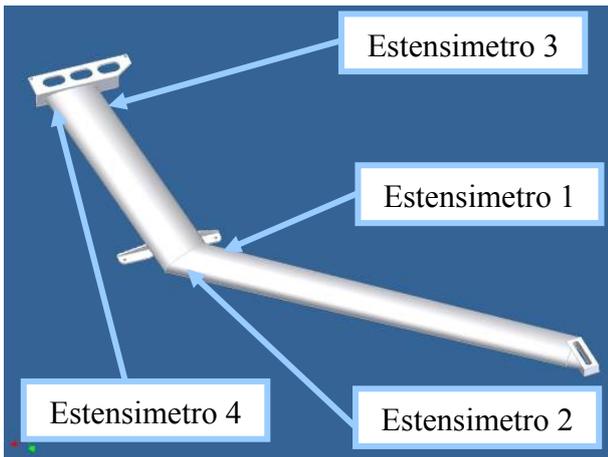
**Figura 4:** Layout dell'attrezzatura per prove meccaniche su bracci ad ala (caso braccio di punta).

I profilati in acciaio sono stati fissati al banco tramite bulloni ed è stato aggiunto un tubolare trasversale per riprodurre l'effetto di un bracciolo realmente presente in corrispondenza dell'attacco del 5° tubo. Il braccio è stato quindi fissato come sulla barca e sollecitato orizzontalmente da un attuttore servocomandato con carichi ciclici definiti sulla base dei dati acquisiti in acqua. In Figura 4 si riporta lo schema dell'attrezzatura per le prove sui bracci di punta.

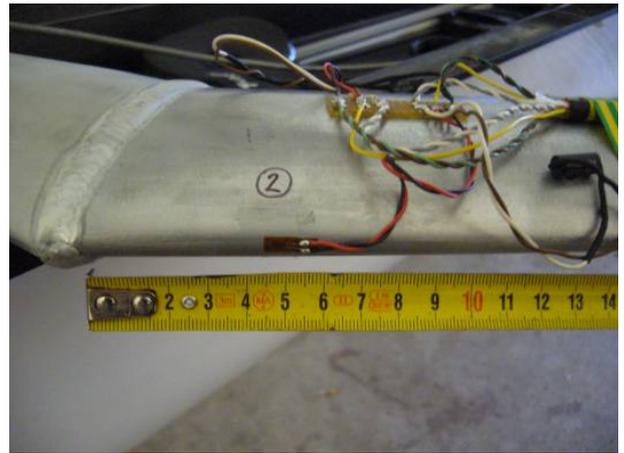
È interessante osservare anche come sia stata condotta un'analisi preliminare onde ricavare le dimensioni del profilato più adatte a riprodurre il reale sistema di vincolo per i bracci. Il problema principale risiedeva nel fatto che, a differenza delle barche con bracci tradizionali (in cui i punti di fissaggio sono sul fianco e all'esterno dello scafo in corrispondenza delle paratie), in questo tipo di imbarcazioni la forza propulsiva del remo viene trasmessa unicamente tramite i bordi. Trascurando in prima istanza l'influenza del fasciame sottostante la parcella, si è da ultimo optato per un profilato di sezione a "C" di spessore 2mm, altezza 100mm e ali di larghezza 25mm.

Visto l'importante ruolo giocato, da un punto di vista strutturale, dal collegamento bullonato imbarcazione/braccio, sono state anche effettuate delle prove estensimetriche per confrontare le deformazioni indotte da un carico noto, prima su un braccio montato su un'imbarcazione e poi sull'attrezzatura del banco. A tale scopo sono stati incollati quattro estensimetri in posizioni diametralmente opposte (schema di Figura 5) e secondo il piano di carico sopra menzionato, due estensimetri a 60mm dalla giunzione saldata dei due tubolari (Figura 6) e, infine, altri due a 25mm dalla flangia di attacco opposta allo scalmio.

Nelle Figure 7 e 8 è mostrata l'attrezzatura utilizzata nelle prove per caricare l'estremità della scalmiera e riprodurre la spinta propulsiva della pala. Il carico è stato progressivamente applicato, misurando la sua entità tramite una cella di carico HBM® (fondo scala di 2kN), in direzione orizzontale e parallela allo scafo. I dati di deformazione sono stati registrati con una centralina Spider8 HBM® e riportati su un grafico (Figura 9).



**Figura 5:** Schema della disposizione degli estensimetri.



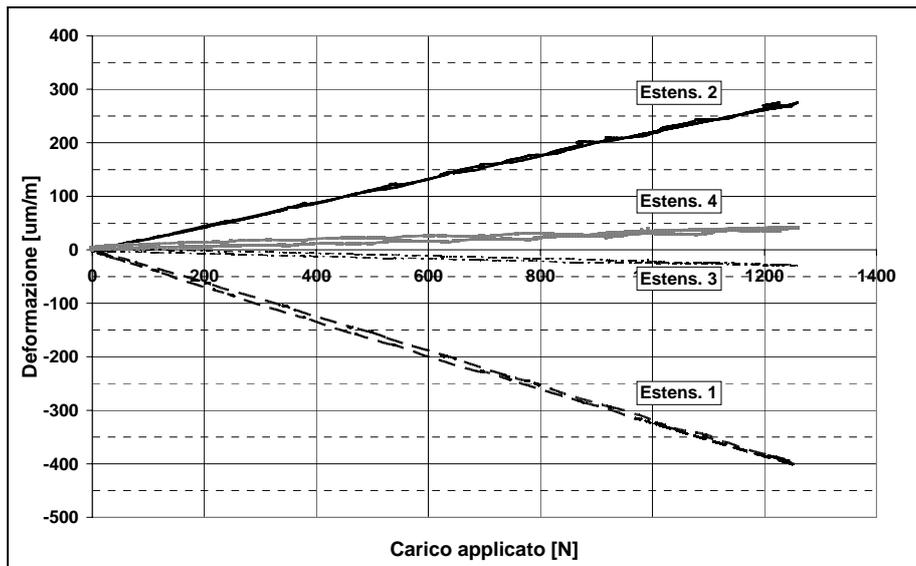
**Figura 6:** Particolare dell' estensimetro n°2 (sollecitato a trazione durante le prove).



**Figura 7:** Braccio estensimetrato.



**Figura 8:** Particolare della cella di carico.

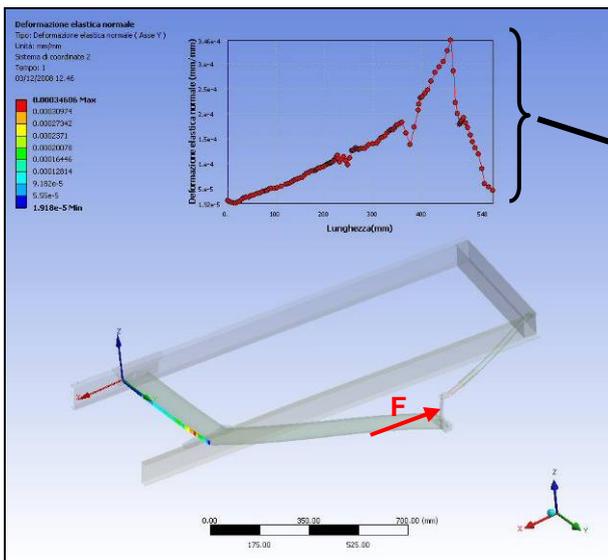


**Figura 9:** Curve delle deformazioni acquisite con braccio fissato al banco.

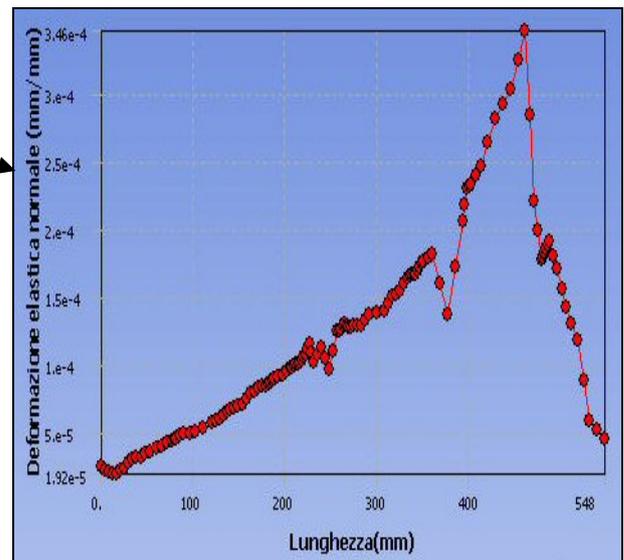
Si è proceduto successivamente con un'analisi agli elementi finiti del sistema braccio/vincolo, allo scopo di ottimizzare le geometrie del profilato e confrontare le deformazioni calcolate con quelle acquisite sulla barca. Nelle Figure 10 e 11 è riportata la mappa e l'andamento delle deformazioni normali sul lato teso del tubolare centrale. Nella simulazione il braccio è stato posizionato solidale all'attrezzatura, mentre il 5° tubo incernierato alle estremità e i profilati vincolati alla base.

La simulazione ha fornito deformazioni in corrispondenza degli estensimetri molto inferiori a quelle riscontrate con le acquisizioni sulla barca, (circa 150  $\mu\text{m}/\text{m}$  contro i 260  $\mu\text{m}/\text{m}$ , con 1200N applicati all'estremità), suggerendo che il sistema di fissaggio reale risultava essere molto più cedevole del previsto (come se la maggior parte della forza si scaricasse attraverso il 5° tubo).

Il punto più sollecitato è risultato in ogni caso quello in corrispondenza della saldatura della flangia a lato scalmo (Figura 11, 346  $\mu\text{m}/\text{m}$ ).



**Figura 10:** Mappa della deformazione normale sulla superficie del tubolare interno.



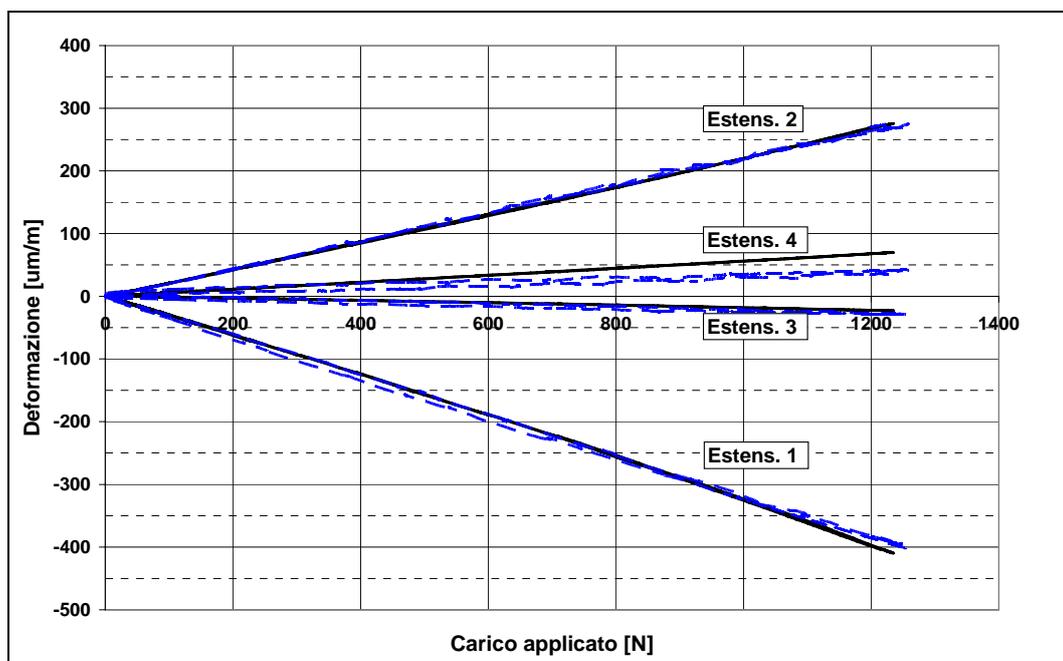
**Figura 11:** Andamento delle tensioni lungo il tubolare interno.

Riguardo alle analisi FEM è interessante osservare come anche aggiungendo nel modello dei tubolari trasversali di irrigidimento il risultato non è cambiato. Questo evidenzia le difficoltà che sono state riscontrate nel modellare le giunzioni in analisi, visto che i vincoli in gioco risultavano essere tutti caratterizzati da una certa cedevolezza (non nota!). Per confermare la validità di tale analisi preliminare agli elementi finiti, nonché la rispondenza del vincolo con il comportamento delle parpelle, si è successivamente eseguita un'acquisizione estensimetrica al banco utilizzando lo stesso braccio precedentemente usato sulla barca per le prove in acqua (considerando anche l'effetto del 5° tubo). Il grafico di Figura 12 riporta il confronto fra deformazioni rilevate al banco e deformazioni misurate in acqua. Tale diagramma mostra come siano stato riscontrare variazioni poco sensibili nella zona compressa dell'estensimetro 1, mentre in quella tesa dell'estensimetro 4 si è misurata una deformazione maggiore di circa 60  $\mu\text{m}/\text{m}$ , equivalenti a  $60 \cdot 10^{-6} \cdot 71000 = 4 \text{ MPa}$  (dove, 71000 MPa è il modulo di elasticità del materiale del braccio).

Alla luce di tale validazione sperimentale, si può presumere che la differenza osservata tra le misurazioni e i risultati delle simulazioni numeriche non possa essere attribuita al profilato utilizzato come vincolo, ma alle assunzioni fatte per l'analisi agli elementi finiti. In particolare, si è osservato come non sia immediato simulare i vincoli di contatto del 5° tubo, che ha, oltretutto, la tendenza ad inflettersi per effetto di uno stato di compressione.

I risultati della simulazione numerica non sono, pertanto, da considerarsi attendibili perchè si è dimostrato non corretto l'assumere un comportamento lineare dell'intera struttura, ovvero il trascurare possibili non-linearità locali.

In conclusione, a prescindere dai problemi ancora aperti e relativi alla modellazioni agli elementi finiti dei vincoli in gioco, la procedura sperimentale seguita ha consentito di dimostrare la capacità dell'attrezzatura sperimentale realizzata presso i nostri laboratori di riprodurre le reali condizioni di vincolo dei bracci sull'imbarcazione.



**Figura 12:** Confronto tra le deformazioni rilevate con la prova sulla barca (linea continua) e quelle su banco (tratteggiata)

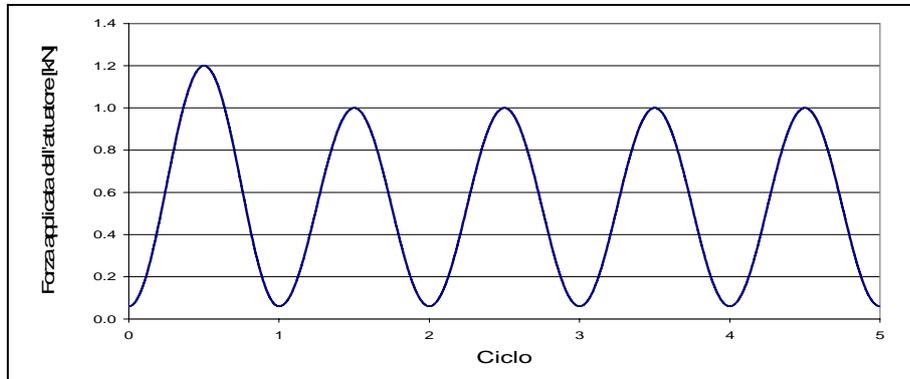
## 2.2 Definizione dei carichi di prova

Le forze applicate dall'attuatore sui perni delle forcole sono state definite attraverso una rianalisi dei dati acquisiti durante prove in acqua [1]. A ulteriore conferma della validità delle analisi sperimentali condotte è importante sottolineare come i valori ottenuti risultino conformi a quelli reperibili in letteratura e basati anche su modelli fisiologici di prestazione [2].

Per quanto riguarda la definizione della storia di carico è utile sottolineare inizialmente come sia possibile suddividere un *run* in tre fasi caratterizzate da diversa ampiezza e frequenza della forza applicata dal vogatore. In particolare, durante un *run* convenzionale si contano circa 220-250 colpi: alla partenza la frequenza è molto elevata (circa 40 colpi in 40-50 secondi) con uno sforzo di tipo anaerobico dove il vogatore applica un carico maggiore rispetto alle fasi successive (di tipo aerobico) e che tende a diminuire progressivamente [2]; nella seconda fase (della durata di 4-5 minuti) la frequenza e l'intensità dello sforzo diminuiscono; infine, nell'ultima fase (serrate finali) il vogatore aumenta nuovamente la frequenza dei colpi nel tentativo di aumentare la velocità dell'imbarcazione e di avvantaggiarsi sugli avversari, anche se l'intensità della forza non è la stessa della prima fase per effetto dell'affaticamento.

Alla luce delle considerazioni sopra riportate, le prove a fatica sono state eseguite applicando sui perni delle forcole blocchi di carico con rapporto di sollecitazione  $R=0$  (Figura 13), ciascuno costituito da 5 picchi di cui uno avente ampiezza superiore del 20%, ovvero 1.2 kN, rispetto al carico medio, ovvero 1.0 kN: una tale storia di carico ci ha così consentito di tenere in conto anche il sovraccarico che si ha nella fase di partenza, cioè nella fase anaerobica della vogata.

Infine, ipotizzando che un atleta professionista compia allenamenti in acqua da 6 run ciascuno per 330 giorni all'anno e osservando che la garanzia data dal costruttore sul componente è di due anni, si è assunto che un braccio conforme alle specifiche di progetto dovesse essere in grado di sostenere almeno 990000 cicli (39600 blocchi di carico) senza la formazione di nessuna cricca per fatica.



**Figura 13:** *Blocco di carico applicato dall'attuatore*

#### 2.4 Prove di fatica

Onde verificare sperimentalmente se i bracci in alluminio di nuova generazione rispettano la durata in esercizio prevista in sede di progetto, sono stati provati a fatica tre bracci per imbarcazioni di punta e tre di coppia (Figura 14). Tali bracci sono stati fissati al banco mediante i vincoli sopra descritti e sollecitati da una storia di carico ad ampiezza variabile avente come blocco elementare di carico quello descritto in Figura 13. In Tabella 1 si riportano il numero di cicli di carico a cui sono state interrotte tutte e sei le prove eseguite: tale tabella mostra chiaramente come tutti i componenti testati abbiano superato la prova, raggiungendo il milione di cicli senza che si innescassero cricche di fatica in corrispondenza delle giunzioni saldate.



**Figura 14:** *Istantanea della prova su un braccio di punta*

### 3. CONCLUSIONI

- 1) L'attrezzatura di prova, sviluppata confrontando sperimentalmente le deformazioni su un braccio montato prima su un'imbarcazione e poi in laboratorio, ha consentito di riprodurre al banco i carichi che sono comunemente osservati in esercizio quando imbarcazioni da canottaggio sono utilizzate da atleti esperti e fisicamente preparati;
- 2) Sfortunatamente, le analisi FEM semplificate che sono state condotte hanno potuto dare solo una indicazione approssimata sulla posizione dei punti ritenuti più critici per la resistenza a fatica del materiale;
- 3) Durante le prove al banco si sono osservate evidenti inflessioni del 5° tubo per effetto della compressione indotta: sarebbe, pertanto, estremamente interessante approfondire lo studio riguardo al comportamento strutturale di questo componente complesso, considerando anche problemi legati alle non-linearità, onde proporre all'azienda delle geometrie ottimizzate di bracci;
- 4) Le prove condotte al banco hanno dimostrato come i bracci utilizzati dall'azienda Filippi Lido Srl soddisfino pienamente, in termini di durata, ai requisiti di progetto.

**Tabella 1:** Riassunto dei cicli compiuti nelle prove

<b>Braccio di punta</b>	<b>Cicli</b>	<b>Esito</b>
<b>1</b>	<b>1190735</b>	<b>Non rotto</b>
<b>2</b>	<b>1674045</b>	<b>Non rotto</b>
<b>3</b>	<b>1229435</b>	<b>Non rotto</b>
<b>Braccio di coppia</b>	<b>Cicli</b>	<b>Esito</b>
<b>1</b>	<b>1047259</b>	<b>Non rotto</b>
<b>2</b>	<b>1267575</b>	<b>Non rotto</b>
<b>3</b>	<b>1250000</b>	<b>Non rotto</b>

### 4. RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare sia il Cantiere Navale Filippi Lido Srl per il supporto dato allo svolgimento del presente lavoro che il Centro Universitario Sportivo di canottaggio di Ferrara per la disponibilità offerta all'uso delle loro attrezzature.

### Bibliografia

- [1] S. Bettinelli, A. Placido, L. Susmel, R. Tovo, (2008) Analisi delle prestazioni di imbarcazioni da canottaggio e indici di efficienza. Convegno AIAS 2008, Roma.
- [2] Federazione Italiana Canottaggio, Centro Tecnico Nazionale Piediluco, (1997) I fondamenti del canottaggio italiano – Dal “Rudern” al Dott. La Mura.