



AIAS '98  
XXVII Convegno Nazionale dell'Associazione  
Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni  
Università di Perugia – Istituto di Energetica



## Premio AIAS 1998

Perugia, 10 settembre 1998

Il Consiglio Direttivo, sentito il parere della Commissione istituita per l'analisi dei lavori segnalati per il Premio AIAS, conferisce all'unanimità il premio AIAS 1998, dedicato alla memoria del Prof. Lucio Lazzarino, al lavoro:

*"Analisi biomeccanica e simulazione numerica del movimento di pinneggiata subacquea"*

Autori: *Atzori, Petrone, Zanatta*

con la seguente motivazione:

*la commissione ha ritenuto premiare l'originalità del lavoro. Nel caso specifico ritiene di particolare validità le tecniche di analisi di sollecitazioni meccaniche per la valutazione delle prestazioni strutturali di attrezzi sportivi quali le pinne.*

Il Presidente si congratula con i vincitori.

*Il Presidente*

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

**FACOLTA' D'INGEGNERIA**

**DIPARTIMENTO D'INGEGNERIA MECCANICA**

**TESI DI LAUREA**

**ANALISI BIOMECCANICA DELLA PINNEGGIATA  
SUBACQUEA E VALUTAZIONE D'EFFICIENZA DELLE  
PINNE**

**Relatore: Ch.mo Prof. BRUNO ATZORI**

**Correlatore: Ing. NICOLA PETRONE**

**Laureando: DAVIDE ZANATTA**

**ANNO ACCADEMICO 1996-97**

Alla mia famiglia, con un augurio di serenità

## Ringraziamenti

In primo luogo ringrazio il Professor Bruno Atzori per avermi dato l'opportunità ed i mezzi per sviluppare la tesi su un argomento così inusuale ma a me caro.

Una nota di sincera riconoscenza all'Ing. Nicola Petrone per la collaborazione ed il sostegno dimostratomi costantemente.

Un particolare ringraziamento a Marco Bonfanti, titolare della ditta C4, per la consulenza e fornitura delle pale in composito da lui ideate e fabbricate.

Un affettuoso grazie ai miei genitori per avermi dato la possibilità di raggiungere questo traguardo e aver contribuito alla realizzazione di questo lavoro.

Un grazie di tutto cuore alla Sonia per il costante supporto morale e per aver contribuito alla realizzazione di questo lavoro.

Ringrazio Piero, responsabile delle piscine comunali di Montebelluna e Gino per la loro disponibilità.

Ringrazio inoltre il Prof. Antonio Dal Monte per la condivisione dei risultati dei lavori da lui svolti presso l'Istituto di Scienza dello Sport del CONI di Roma, il Prof. R. Basso per la consulenza, Davide e Laura per i consigli e tutti i meccanici dell'officina dell'istituto.

Ringrazio infine Roberto, Clara, Alba, Ilario, Gabriella, per la fiducia dimostratami.

# INDICE

<b>Cap. 1</b>	<b>Introduzione.....</b>	<b>1</b>
1.1	Tipi di pinne e materiali.....	2
<b>Cap. 2</b>	<b>Obiettivi e modalità di svolgimento.....</b>	<b>13</b>
2.1	Rilevamento della pinneggiata.....	15
2.2	Analisi biomeccanica.....	16
2.3	Costruzione del modello numerico.....	16
2.4	Prove statiche delle pinne.....	17
2.5	Prove dinamiche delle pinne.....	17
2.6	Simulazioni numeriche della pinneggiata.....	18
2.7	Analisi dei risultati delle simulazioni.....	18
2.8	Ottimizzazione delle pinne.....	18
<b>Cap. 3</b>	<b>Rilevamento e valutazione della pinneggiata.....</b>	<b>19</b>
3.1	Definizioni.....	21
3.2	Caratteristiche degli atleti e delle pinne.....	23
3.3	Rilevamento della pinneggiata.....	25
3.4	Valutazioni sul piano sagittale.....	28
3.5	Valutazioni sui restanti piani.....	45

<b>Cap. 4 Analisi biomeccanica della pinneggiata.....</b>	<b>53</b>
4.1 Analisi delle modificazioni dei rapporti fra i diversi segmenti corporei e le variazioni articolari.....	55
4.2 Comportamento del piede e della caviglia.....	57
4.3 Comportamento della gamba e del ginocchio.....	59
4.4 Comportamento della coscia e dell'anca.....	60
4.5 Comportamento del bacino e della colonna vertebrale.....	62
<b>Cap. 5 Analisi numerica del problema meccanico e biomeccanico.....</b>	<b>67</b>
5.1 Costruzione del corpo di Flipper.....	67
5.2 Costruzione delle pinne di Flipper.....	70
5.3 Costruzione dei vincoli interni.....	71
5.4 Costruzione dei vincoli esterni.....	73
5.5 Definizione delle leggi di moto.....	74
5.6 Definizione dei campi di forze.....	88
5.4.1 Prima valutazione dei coefficienti di resistenza idrodinamica.....	91
<b>Cap. 6 Prove statiche.....</b>	<b>93</b>
6.1 Costruzione del banco di prova.....	96
6.2 Condizioni di prova.....	102
6.3 Prove di rigidezza.....	104
6.4 Analisi dei risultati.....	114

<b>Cap. 7 Prove dinamiche.....</b>	<b>123</b>
7.1 Costruzione del banco di prova.....	131
7.2 Condizioni di prova.....	137
7.3 Prove sulla pinna con pala in tecnopolimero.....	141
7.4 Prove sulla pinna con pala in composito.....	152
<b>Cap. 8 Analisi dei risultati delle prove dinamiche.....</b>	<b>163</b>
8.1 Cicli di isteresi e loro caratteristiche.....	163
8.2 Confronto dei risultati sperimentali per tratto di pinna e materiale.....	170
8.3 Valutazioni delle caratteristiche “lineari” effettive delle pinne.....	175
8.4 Valutazioni delle caratteristiche “angolari” effettive delle pinne.....	184
8.5 Effetto dell’errore di discretizzazione delle pinne di Flipper.....	192
8.6 Valutazione delle caratteristiche da imporre alle pinne di Flipper.....	195

<b>Cap. 9 Simulazioni.....</b>	<b>201</b>
9.1 Condizioni di simulazione.....	201
9.2 Risultati della prima simulazione e taratura del modello.....	203
9.3 Verifica della correttezza dei coefficienti di resistenza idrodinamica.....	207
9.4 Avvio delle simulazioni ed andamento dei risultati.....	209
<b>Cap. 10 Conclusioni.....</b>	<b>213</b>
10.1 Risultati, analisi critica e prospettive d'indagine.....	215
<b>Bibliografia.....</b>	<b>227</b>
<b>Appendici</b>	
Appendice A : analisi articolare.....	231
Appendice B : angoli relativi e “medici” che definiscono la posizione degli arti durante la pinneggiata.....	237
Appendice C : teoria idrodinamica.....	243
Appendice D : rilievi sperimentali delle prove a carico statico.....	249
Appendice E : grafici di confronto sui risultati delle prove dinamiche.....	277



Appendice F : analisi dell'incremento del n° di elementi discretizzanti le pinne.....	295
--	-----

## CAP. 1 INTRODUZIONE

Fin dai tempi antichi l'uomo si è immerso sott'acqua per raccogliere coralli, perle, spugne, per pulire gli scafi delle navi e per pescare. Si ha notizia di un pescatore greco di spugne Georgios Haggi Statti [1] che nel 1913 riuscì ad agganciare una cima all'ancora divelta della corazzata italiana Regina Margherita alla profondità di circa 77 metri. Nonostante questo, negli anni trenta la subacquea era ancora riservata a professionisti od a pochi temerari.

Negli ultimi cinquant'anni grazie alle acquisite conoscenze di medicina iperbarica, alla divulgazione da parte dei mass media di documentari, alla capillare distribuzione di centri di formazione didattica ed alle attrezzature sempre di più facile uso, l'elemento liquido non appare più così ostile permettendo a tutti di frequentare quest'affascinante mondo.

L'introduzione di nuovi materiali (neoprene, silicone, tecnopolimeri, gomme sintetiche, ...) ha permesso la realizzazione d'attrezzature sempre più confortevoli, leggere, resistenti ed economiche.

Negli ultimi anni sono comparsi nel mercato materiali composti da fibre di vetro, carbonio, kevlar in matrice polimerica, caratterizzati [2,3] da un'elevata leggerezza, rigidità e resistenza. Per le loro caratteristiche fisiche, meccaniche e chimiche hanno trovato applicazioni in campo militare, aeronautico, spaziale, automobilistico, marino e nelle attrezzature sportive. In ambito sportivo sono impiegati per la costruzione di racchette da tennis, mazze da golf e hockey, canne da pesca, telai da bicicletta e moto, sci, surf, kayak, archi, giavellotti, caschi e altri attrezzi.

Questi materiali cominciano ora a trovare impiego anche nelle attrezzature subacquee, infatti, è recente l'uscita nel mercato di pinne con la pala (vedi fig.1.1-1) in fibra di carbonio, kevlar e vetro già adottate dai migliori agonisti della pesca subacquea e dell'apnea profonda. Altra interessante applicazione di questi materiali

è nella costruzione di bombole, con la tecnologia del filament winding [2], che riduce il peso complessivo facilitandone quindi il trasporto. Oltre che nella subacquea queste bombole potrebbero essere utilizzate in altri settori come lo spegnimento di incendi, scalate in alta quota, pronto soccorso o altro.

Per quanto riguarda le pinne subacquee, ci si propone con il presente lavoro di dare un contributo alla comprensione del loro funzionamento e alla valutazione di possibili soluzioni d'ottimizzazione. A tale scopo si possono individuare alcune fasi: rilevare e valutare la biomeccanica della pinneggiata, creare un modello al computer per un'analisi del problema meccanico e biomeccanico, rilevare da prove sperimentali statiche e dinamiche le caratteristiche d'alcuni tipi di pinne e infine simulare e analizzare sul modello varie soluzioni di pinne. La descrizione particolareggiata del piano di lavoro è sviluppata nel capitolo 2.

### **1.1 TIPI DI PINNE E MATERIALI**

In figura 1.1-1 si definiscono i principali elementi costituenti una generica pinna:

- scarpetta → generalmente è costituita da gomma di caratteristiche omogenee, nonostante l'attuale tendenza a fabbricarla con più tipi di gomma di diversa durezza assemblate in un unico stampo;
- pala → generalmente è costituita da gomma o tecnopolimero di caratteristiche omogenee, nonostante l'attuale tendenza a fabbricarla con più tipi di gomma di diversa durezza assemblate in un unico stampo oppure in materiale composto da fibra di carbonio, kevlar, vetro in matrice polimerica;
- longheroni (o nervature laterali) → generalmente sono solidali alla scarpetta e costituiti da gomma dura e resistente;

A seconda dei modelli ed usi, la pala può essere vincolata alla scarpetta con viti ed incastri oppure assemblata in un unico stampo.

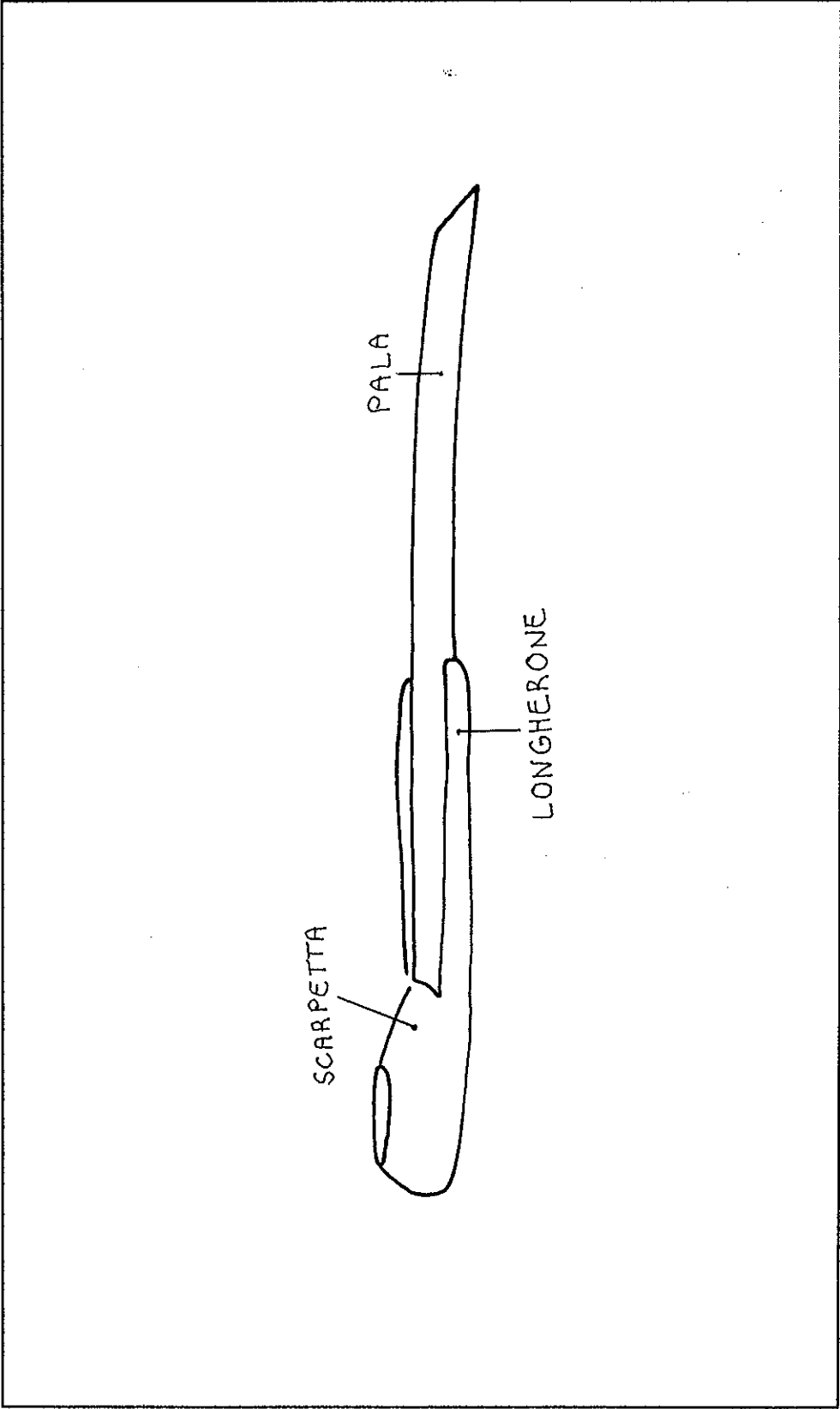
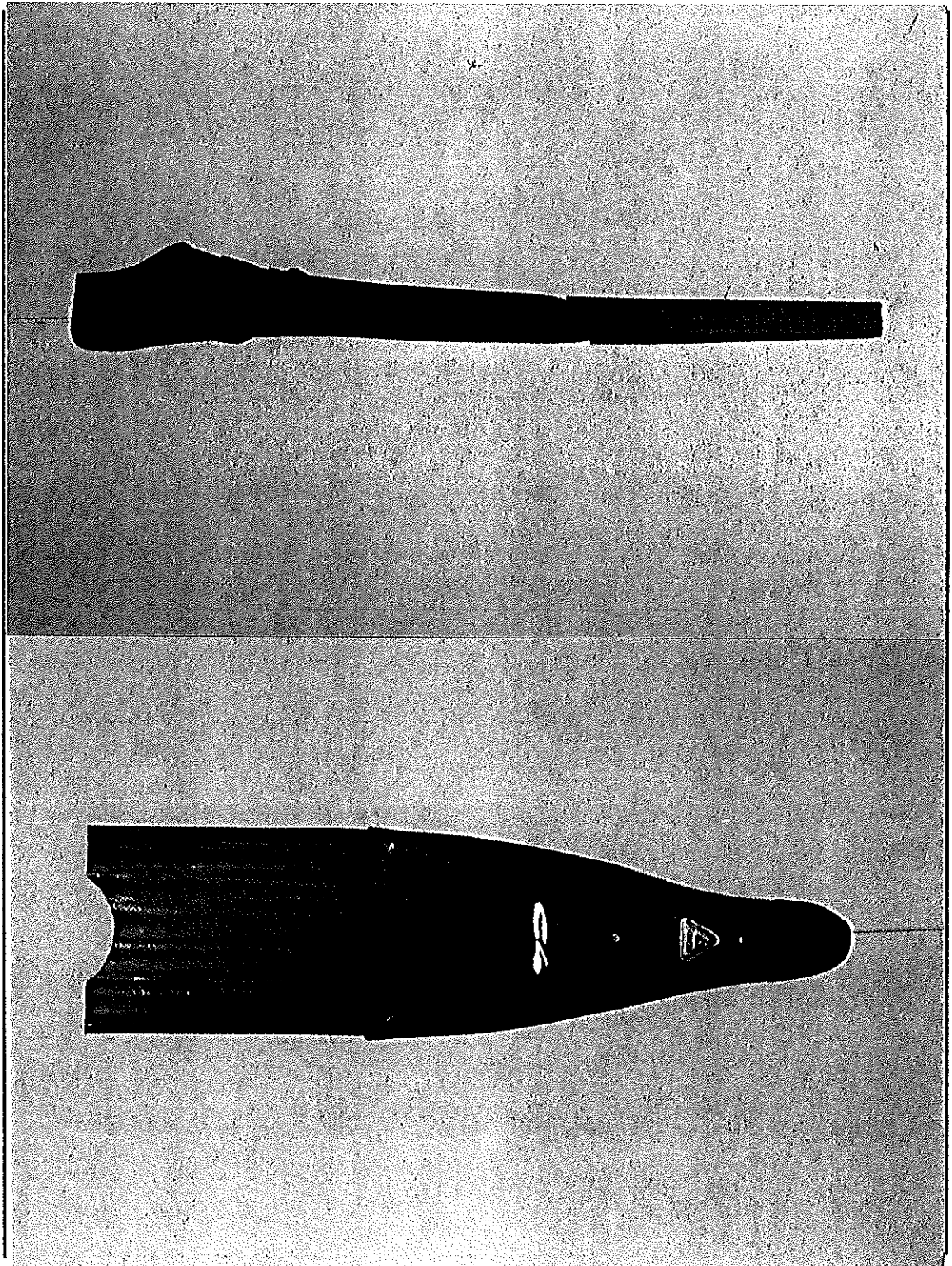


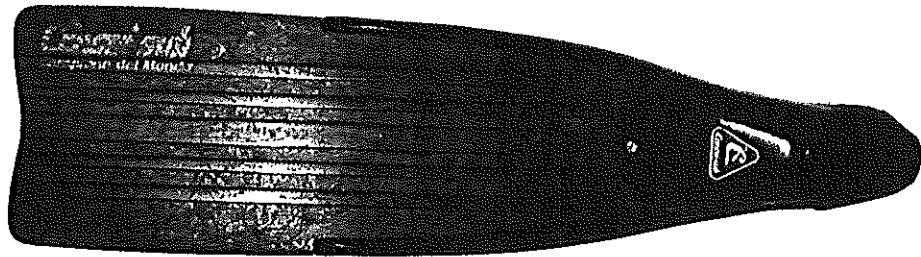
Figura 1.1-1 Principali elementi costituenti una generica pinna.

Di seguito sono riportati alcuni esempi rappresentativi di pinne:

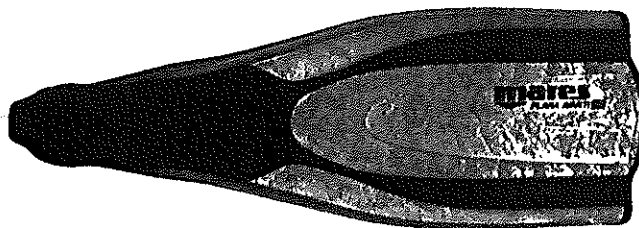


**Foto 1.1-1** Marca → C4; Modello → X\_25; Uso → apnea;

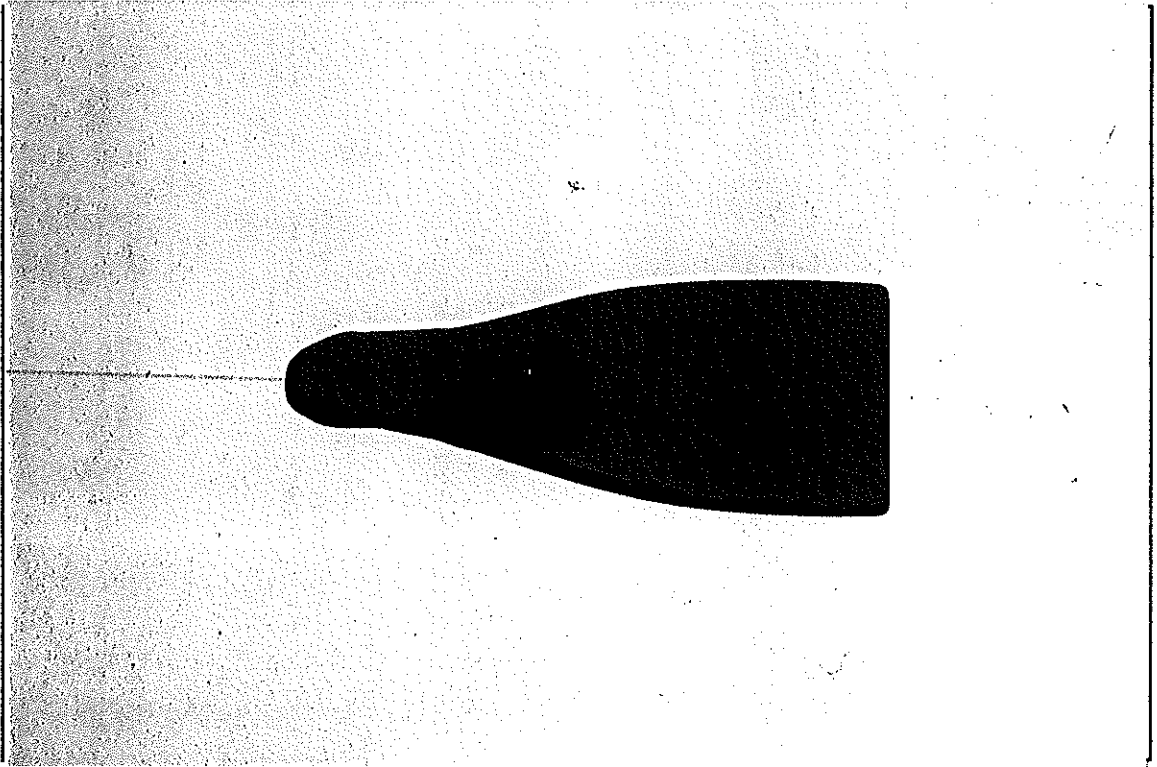
Materiale pala→ fibra di carbonio ; Materiale scarpetta→ unico tipo di gomma.



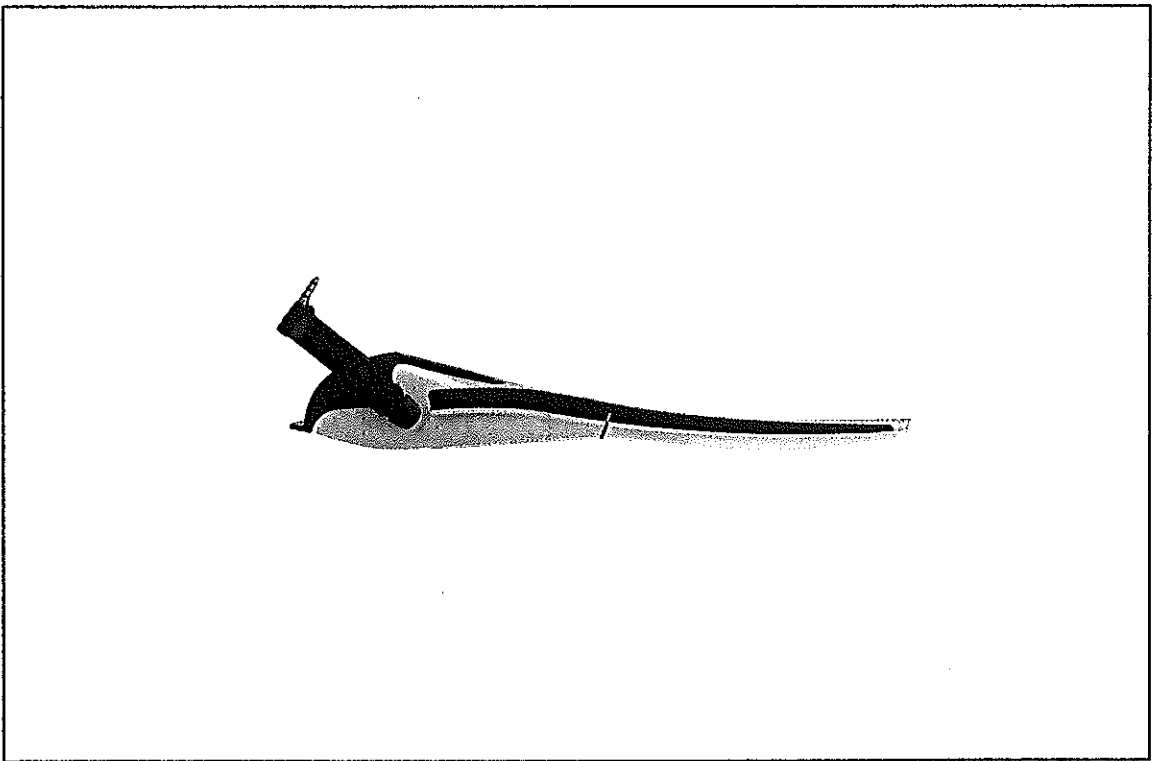
**Foto 1.1-2** Marca → Cressi-Sub; Modello → Rondine\_Gara; Uso → apnea;  
Materiale pala → tecnopolimero; Materiale scarpetta → unico tipo di gomma.



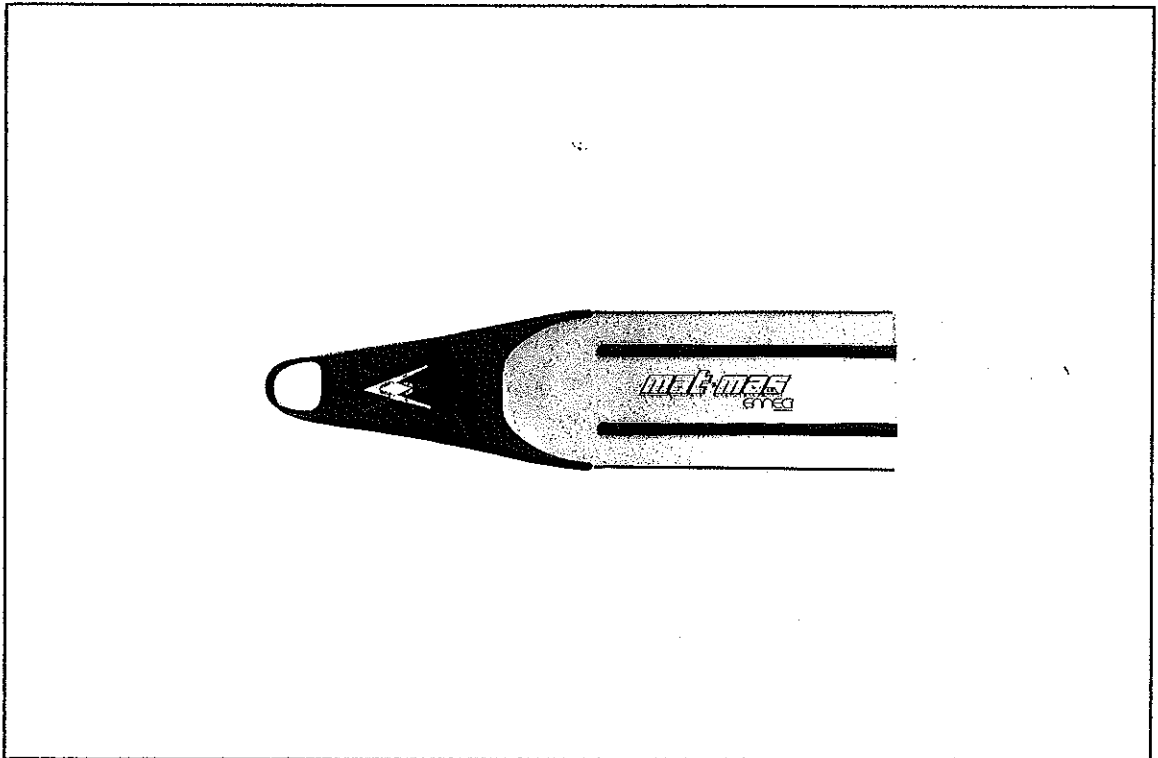
**Foto 1.1-3** Marca → Mares; Modello → Plana Avanti HP; Uso → vario;  
Materiale pala e scarpetta → diversi tipi di gomma.



**Foto 1.1-4** Marca → Cressi-Sub; Modello → Rondine Professional; Uso → vario;  
Materiale pala e scarpetta → unico tipo di gomma.



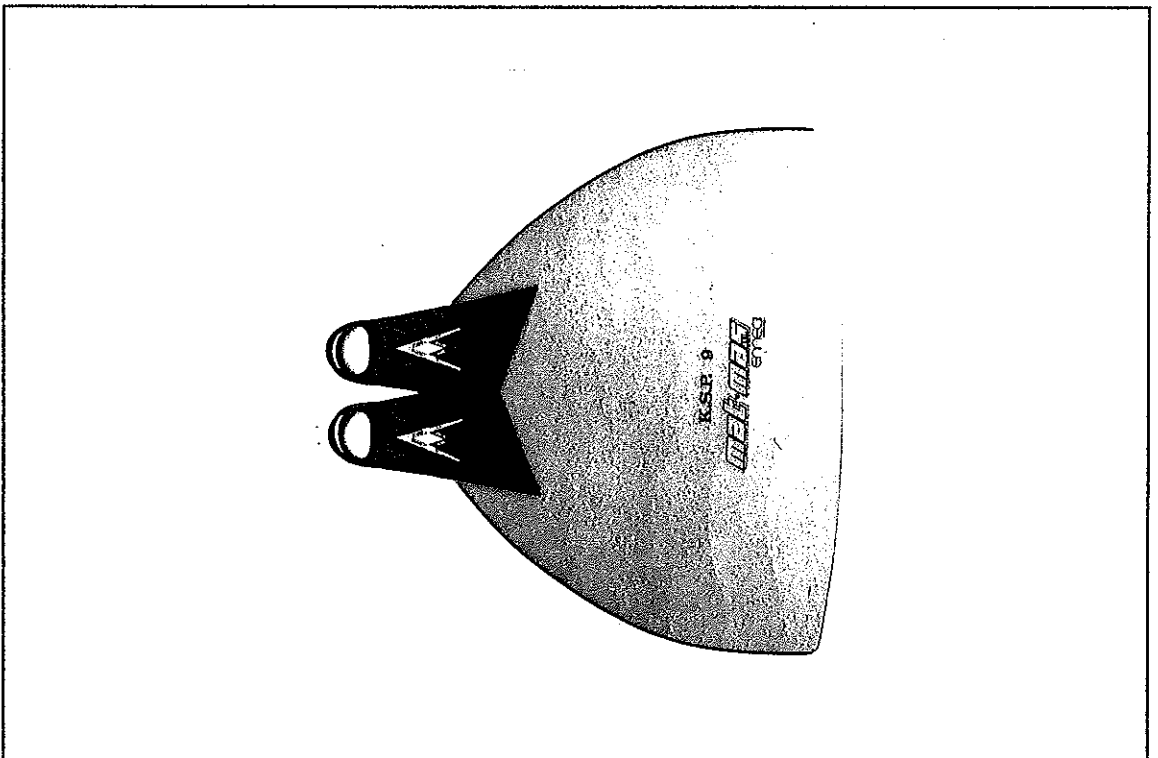
**Foto 1.1-5** Marca → Omer; Modello → Icarus; Uso → vario;  
Materiale pala e scarpetta → diversi tipi di gomma



**Foto 1.1-6**

Uso → nuoto pinnato;

Materiale pala → fibra di vetro ; Materiale scarpetta → unico tipo di gomma.



**Foto 1.1-7**

Modello → Monopinna; Uso → nuoto pinnato;

Materiale pala → fibra di vetro ; Materiale scarpetta → unico tipo di gomma.



## CAP. 2 OBIETTIVI E FASI DI SVOLGIMENTO

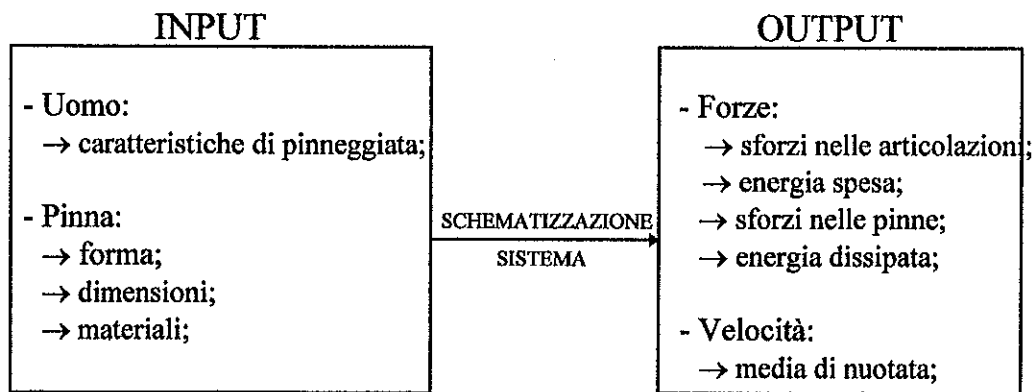
Il principale scopo di questo lavoro di tesi è la realizzazione di un modello numerico per la valutazione, attraverso analisi comparative, dell'efficienza di pinne costruite con materiali, forme e dimensioni diverse.

Le principali variabili che intervengono nella modellazione numerica del complesso fenomeno della pinneggiata, sono:

- a) l'uomo;
- b) la pinna;
- c) la schematizzazione del sistema;
- d) le forze e le velocità del fenomeno;

più precisamente (fig.2-1):

- ⇒ le variabili uomo e pinna rappresentano gli input;
- ⇒ la schematizzazione del sistema rappresenta il mezzo;
- ⇒ le variabili forze e velocità rappresentano gli output.



**Figura 2-1** Input ed output del problema.

Scendendo più nel dettaglio, la soluzione del problema può essere così schematizzata (fig.2-2) e riassunta:

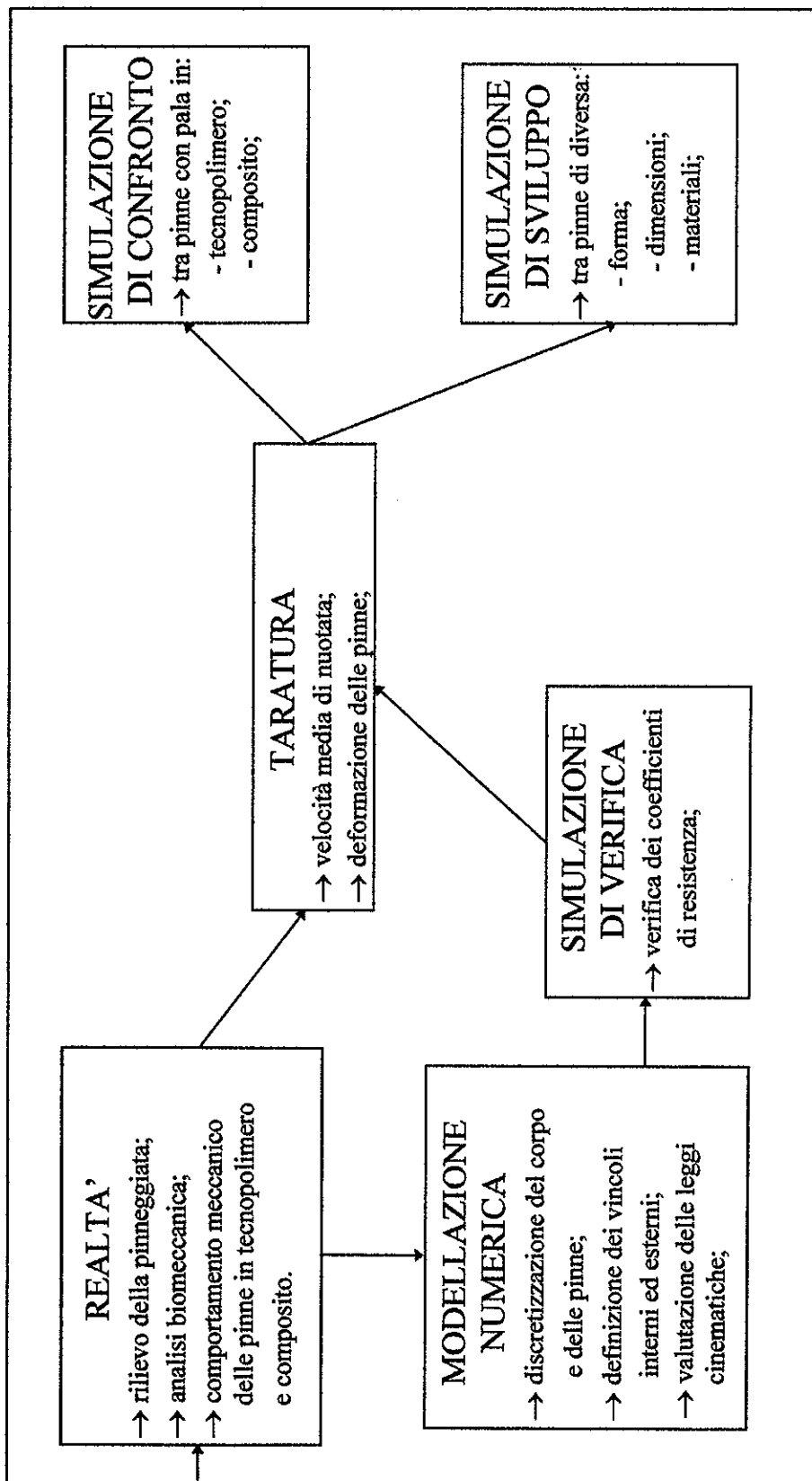


Figura 2-2 Schema a blocchi della soluzione del problema.

⇒ dalla realtà si ottengono le caratteristiche, cinematiche della pinneggiata e meccaniche delle pinne, da imporre al modello numerico. Una prima simulazione di verifica consente di tarare il modello su dei parametri, velocità media di nuotata e deformazione della pinna, rilevati sperimentalmente in vasca. Il modello così tarato permette l'esecuzione di simulazioni, di confronto e di sviluppo, che forniscono gli elementi di giudizio per la definizione dell'efficienza di diverse soluzioni di pinne.

Nei seguenti paragrafi si descrivono brevemente i contenuti delle varie fasi sviluppate nei successivi capitoli.

### **2.1 RILEVAMENTO DELLA PINNEGGIATA**

Rilevare una pinneggiata significa registrare sia la posizione relativa tra gli arti che la deformazione della pinna, con intervalli di tempo tali da poterne ricostruire il comportamento in ogni istante. Tale operazione è possibile analizzando i fotogrammi di una video registrazione del gesto atletico. Questa video registrazione è stata realizzata direttamente sul fondo di una piscina mentre l'atleta pinneggiava. Si sono eseguiti più rilevamenti variando l'atleta, le pinne e l'andatura. Parallelamente si sono valutate le velocità medie di nuotata poi utilizzate per tarare il modello numerico. Per quantificare gli angoli che descrivono la posizione relativa tra gli arti, si è usato un programma CAD (Autocad\_13).

## **2.2 ANALISI BIOMECCANICA**

Si è sviluppato questo tipo d'analisi per meglio capire la cinematica della pinneggiata anche da un punto di vista fisiologico, esprimendo inoltre gli angoli che definiscono la posizione relativa tra gli arti rispetto riferimenti usati in medicina ("angoli medici"). Tale analisi ha confermato che i rilievi precedentemente eseguiti sulla pinneggiata rientrano nei limiti fisiologici articolari.

## **2.3 COSTRUZIONE DEL MODELLO NUMERICO**

Per simulare numericamente la pinneggiata reale si è usato un programma di modellazione dinamica bidimensionale (*Working\_Model*). Sono stati creati i vari elementi costituenti il corpo del nuotatore e le pinne, definendone le relative caratteristiche (forma, dimensioni, peso, momento d'inerzia, ...). Tali elementi sono stati assemblati applicando degli opportuni vincoli interni (vincoli rigidi, motori, molle, smorzatori). Usando un programma che approssima dati (*Kaleidagraph*), si sono valutate le leggi cinematiche degli arti che generano la pinneggiata. Per simulare le forze idrodinamiche sui corpi in movimento si è creato un campo di forze agente sull'intero modello, imponendo i relativi coefficienti di resistenza idrodinamica.

## **2.4 PROVE STATICHE DELLE PINNE**

Su un apposito banco prova si è analizzato il comportamento di più sezioni di pinna sollecitate da carichi statici. In particolare, per le pinne con pala in tecnopolimero, si è rilevato un comportamento viscoelastico non trascurabile. Essendo il coefficiente di smorzamento isteretico legato alla frequenza di carico, i risultati delle prove statiche non rappresenteranno il reale comportamento delle pinne durante la pinneggiata. Però, sono servite per capire il comportamento del materiale costituente le pinne e giustificare le più complesse e costose prove dinamiche.

## **2.5 PROVE DINAMICHE DELLE PINNE**

Per valutare il comportamento della pinna in condizioni che si avvicinano il più possibile a quelle che si verificano durante la pinneggiata, si è costruito un articolato banco prova caratterizzato da un attuatore di spostamento (macchina per prove di fatica), da una cella di carico e da un sistema per l'analisi dei segnali. Variando l'ampiezza e la frequenza di sollecitazione, si sono determinati, per le varie sezioni della pinna, i relativi cicli d'isteresi che definiscono i coefficienti di smorzamento isteretico e le rigidità. I risultati hanno fornito, oltre ai dati necessari per la modellazione numerica, un reale termine di confronto per i materiali di costruzione delle pale.

## **2.6 SIMULAZIONI NUMERICHE DELLA PINNEGGIATA**

Una prima serie di simulazioni di verifica ha fornito la velocità media di nuotata e la deformazione della pinna durante la pinneggiata, in seguito usate per la taratura del modello numerico. Realizzata la taratura si sono valutati, tramite simulazioni di confronto e di sviluppo, i parametri necessari per la definizione dell'efficienza di diverse soluzioni di pinne.

## **2.7 ANALISI DEI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI**

Dai risultati delle simulazioni si sono valutati dei parametri d'efficienza relativa, riferiti all'energia spesa per un ciclo di pinneggiata, all'energia dissipata dalle pinne e alla velocità media di nuotata.

## **2.8 OTTIMIZZAZIONE DELLE PINNE**

In base ai parametri d'efficienza relativa ricavati dalla modellazione numerica e dall'osservazione dei rilievi sperimentali della pinneggiata e delle pinne, si sono evidenziate quelle che potrebbero essere delle possibili migliorie nella realizzazione delle pinne.

## CAP. 3 RILEVAMENTO E VALUTAZIONE DELLA PINNEGGIATA

La pinneggiata è il principale sistema di locomozione del subacqueo nell'elemento liquido. Similmente al cammino [4], la pinneggiata è innata, ma richiede in ogni caso delle informazioni sensoriali che ciascun subacqueo acquisisce con la pratica. Differisce nei singoli individui in rapporto a molti fattori, in parte anatomici (altezza, rapporti tra i vari segmenti corporei, distribuzione delle masse e loro sviluppo, mobilità articolari, ...), in parte funzionali (tono muscolare, schemi posturali, ...), dal tipo di pinne (più o meno lunghe, rigide, ...), dall'effetto desiderato (elevata velocità, poco sciacquo, ...). E' perciò arduo descrivere e definire una pinneggiata "normale" valida per tutti gli individui e le possibili situazioni. Possiamo comunque definire una pinneggiata alla quale far riferimento per studiare razionalmente il problema.

L'analisi approfondita del movimento di pinneggiata e conseguente deformazione della pinna è possibile solo registrando con una ripresa video subacquea l'atleta mentre pinneggia.

Le fasi di rilievo e valutazione della pinneggiata si possono così schematizzare (fig.3-1) e riassumere:

⇒ posizionati degli opportuni segnali di riferimento in corrispondenza dell'anca, del ginocchio, della caviglia, dell'avampiede (fig.3.3-4) e delle pinne (fig.3.3-5b), si sono effettuate delle riprese subacquee dell'atleta in azione mentre un cronometrista sul bordo della vasca rilevava i tempi di passaggio. Dalla riproduzione a rallentatore delle riprese, si sono rilevati nel piano sagittale (fig.3.1-3) e nei restanti piani, gli angoli relativi (fig.3.4-8) descrittivi la cinematica della pinneggiata ed il comportamento delle pinne rispettivamente.

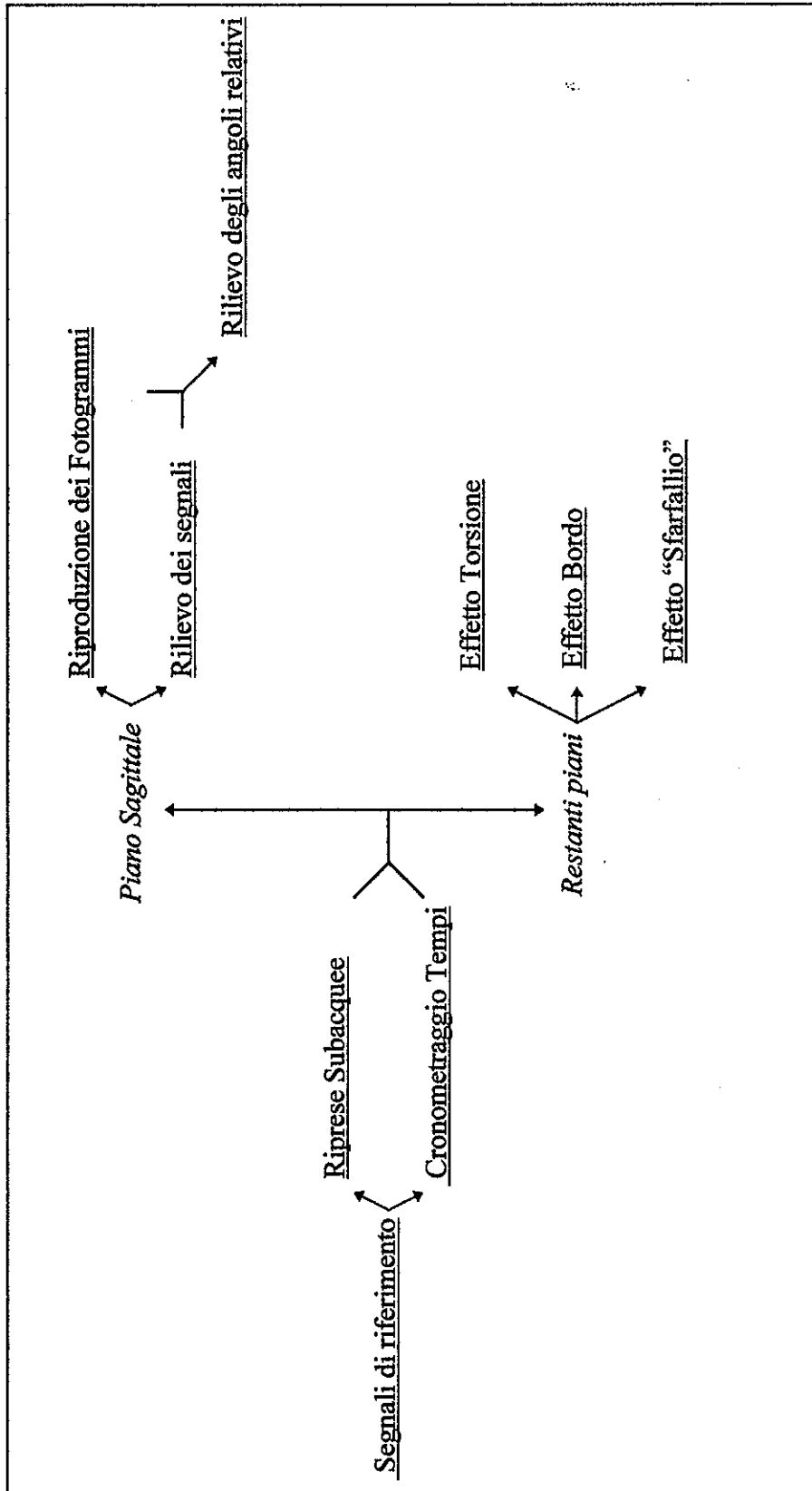


Figura 3-1 Schematizzazione delle fasi per il rilievo e la valutazione della pinneggiata.



### 3.1 DEFINIZIONI

Nell'analisi della pinneggiata si sono usati i seguenti riferimenti:

- ◆ X-Y-Z : terna di riferimento fissa solidale al fondo della vasca (fig.3.1-1);

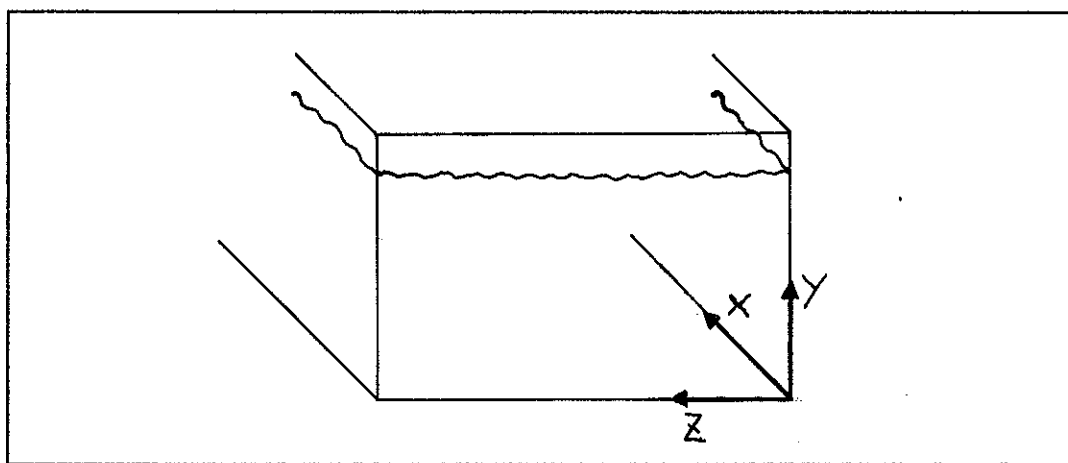


Figura 3.1-1 Terna di riferimento fissa solidale al fondo della piscina;

- ◆ senso di rotazione e segno degli angoli come in fig.3.1-2;

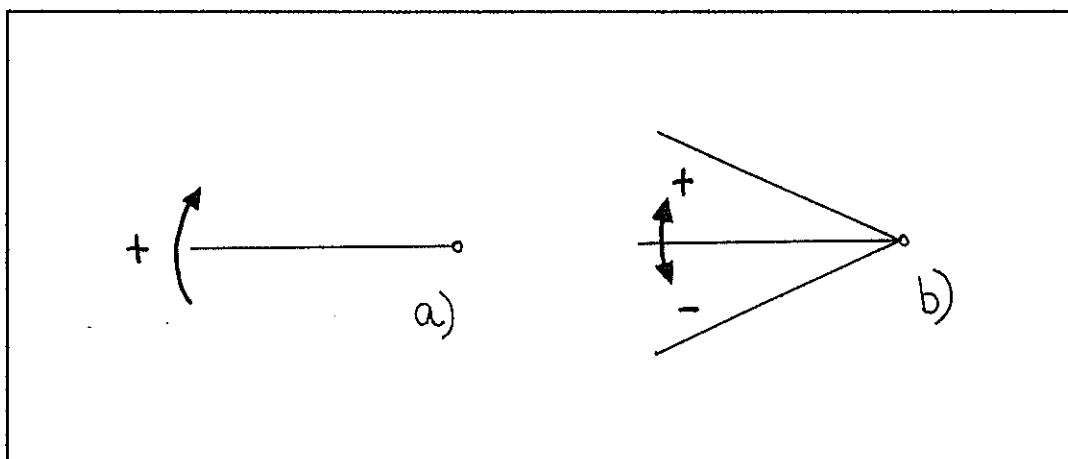
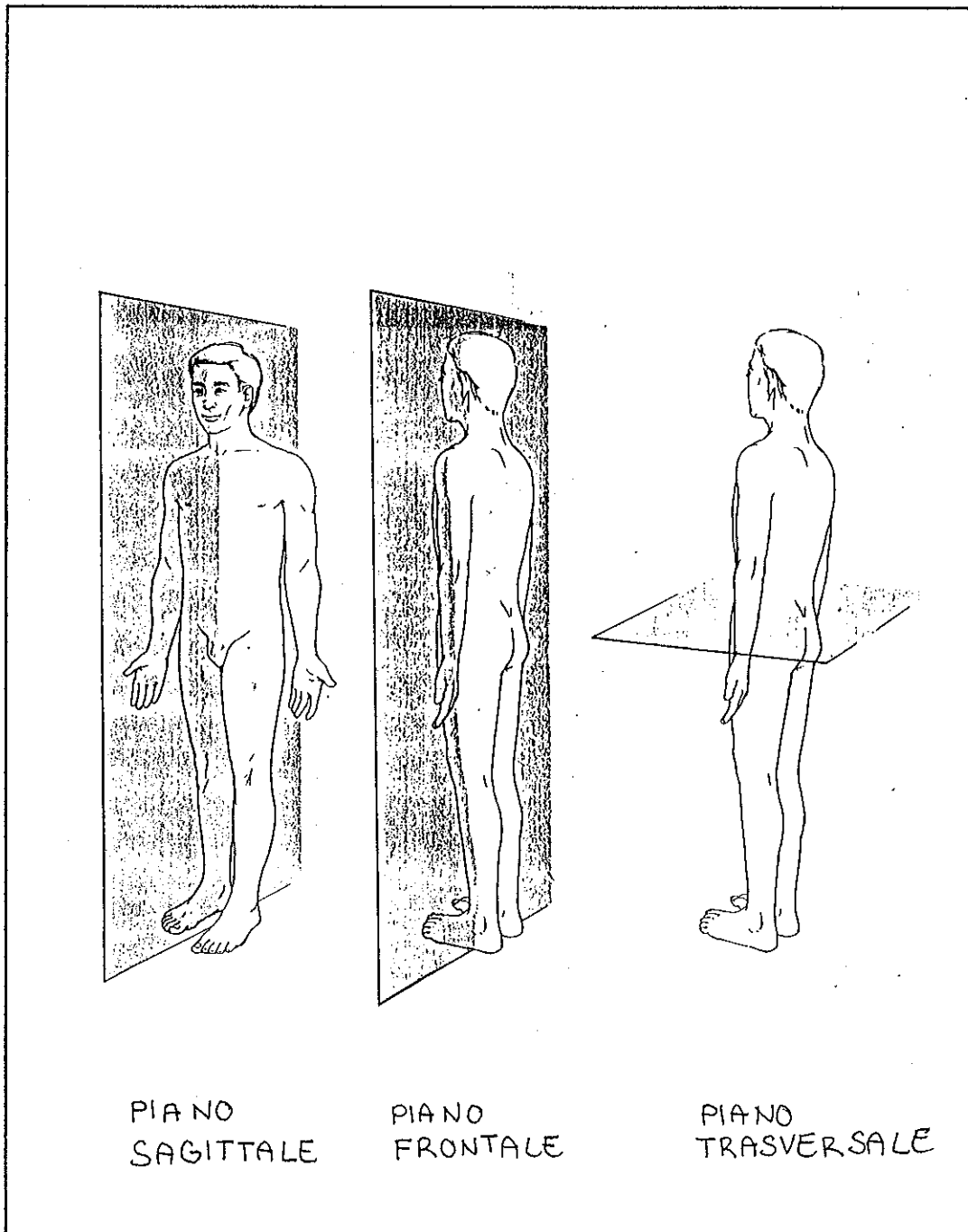


Figura 3.1-2 a) Senso di rotazione; b) Segno degli angoli.

◆ piani e assi di riferimento come in fig.3.1-3;



**Figura 3.1-3** Piani ed assi di riferimento.

◆ arti ed articolazioni schematizzati come in fig.3.1-4;

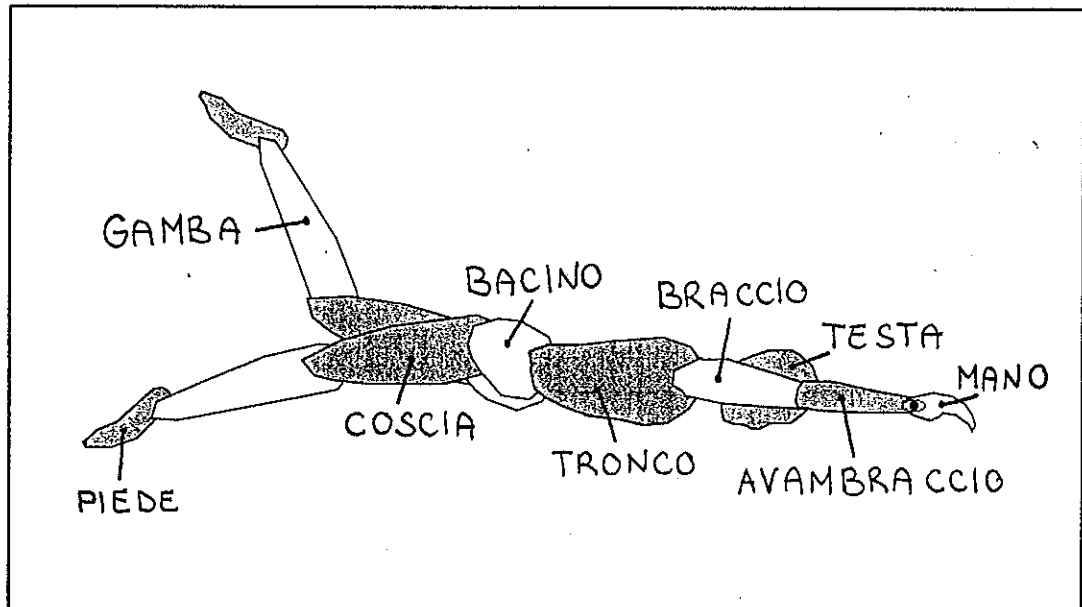


Figura 3.1-4 Schematizzazione degli arti e delle articolazioni.

### **3.2 CARATTERISTICHE DEGLI ATLETI E DELLE PINNE**

Per definire le caratteristiche fisiche degli atleti (tab.3.2-1), è stato necessario fare un'analisi articolare [5] degli angoli interessati dall'azione di pinneggiata. Tale analisi, eseguita da personale specializzato (Terapista della Riabilitazione), è sviluppata in appendice A.

### Capitolo 3

	<b>Atleta S</b>	<b>Atleta D</b>
Età	26 anni	27 anni
Sesso	femmina	maschio
Altezza	1.65	1.83 [m]
Peso	60 [Kg]	78 [Kg]
Esame articolare	nella norma	nella norma
Competenze	esperta nuotatrice ed apneista	istruttore di nuoto, assistente bagnante, esperto nuotatore ed apneista

**Tabella 3.2-1** Caratteristiche degli atleti che si sono prestati per il rilievo della pinneggiata.

Le principali caratteristiche delle pinne usate dagli atleti sono riassunte in tabella 3.2-2.

	<b>Pinna 1</b>	<b>Pinna 2</b>	<b>Pinna 3</b>	<b>Pinna 4</b>
Indossata dall'atleta	D	D	S	S
Foto di riferimento	1.1-2	1.1-4	1.1-2	1.1-3
Marca	Cressi-Sub	Cressi-Sub	Cressi-Sub	Mares
Modello	Rondine Gara	Rondine Prof.	Rondine Gara	Plana Avanti HP
Lunghezza	0.84 [m]	0.57 [m]	0.84 [m]	0.59 [m]
Peso	1.075 [Kg]	1.010 [Kg]	1.075 [Kg]	0.565 [Kg]
Classificazione L→(>0.75 m) C→(<0.75 m)	L	C	L	C

**Tabella 3.2-2** Caratteristiche principali delle pinne usate durante le riprese.

### 3.3 RILEVAMENTO DELLA PINNEGGIATA

La ripresa video è un ottimo sistema per analizzare nel dettaglio un gesto atletico quale è la pinneggiata. La videocamera usata è una Sony Hi8 scafandrata, con l'otturatore tarato ad un cinquantesimo di secondo (un frame ogni 0.02 secondi). Le riprese video si sono svolte in piscina, con l'operatore video e la videocamera opportunamente ancorati sul fondo della vasca (fig. 3.3-1).

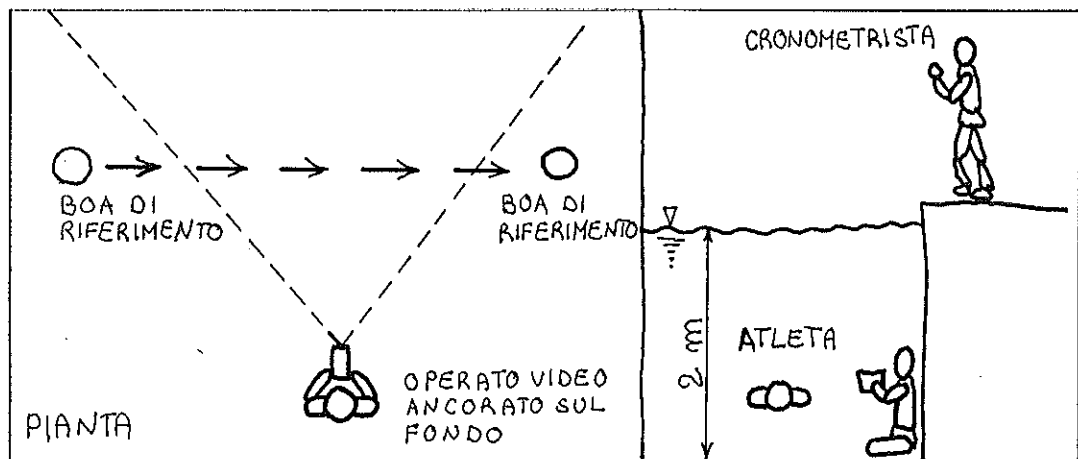
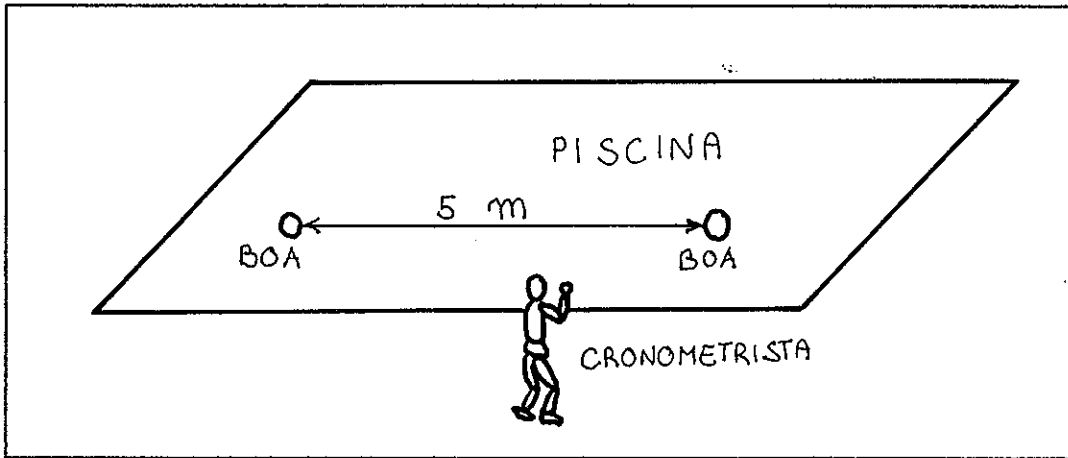


Figura 3.3-1 Condizioni sperimentali di ripresa

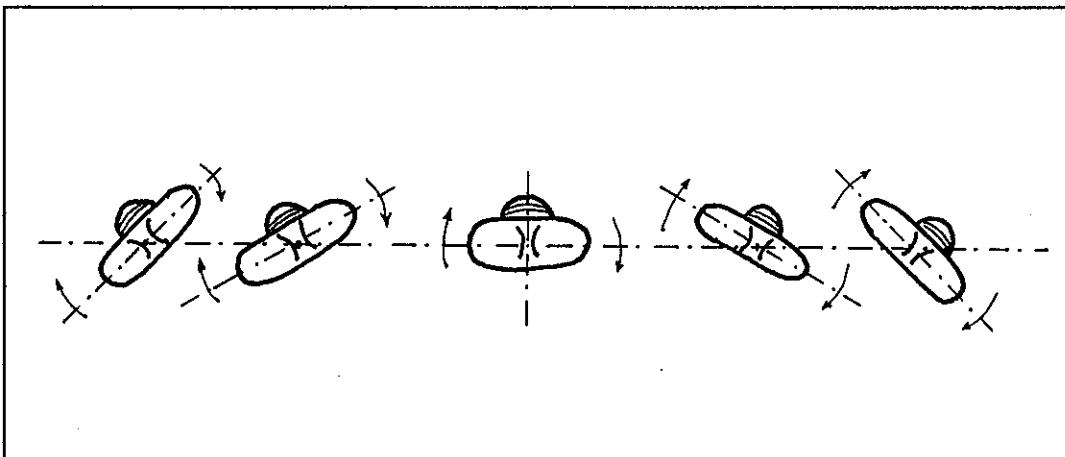
In parallelo alle riprese subacquee, un cronometrista dal bordo della vasca ha rilevato i tempi di passaggio dell'atleta tra due riferimenti di distanza nota (fig.3.3-2).



**Figura 3.3-2** Condizioni di rilievo dei tempi di passaggio tra i due riferimenti

Da una prima serie di riprese si è notato che per ciascun atleta:

- la pinneggiata varia in ampiezza e frequenza al variare del tipo di pinna e tipo d'andatura (lenta o veloce);
- è difficoltoso rilevare le posizioni che le articolazioni occupano durante il ciclo di gambata, perché mancano dei punti di riferimento precisi;
- durante la pinneggiata vi è un rollio del bacino (fig.3.3-3);



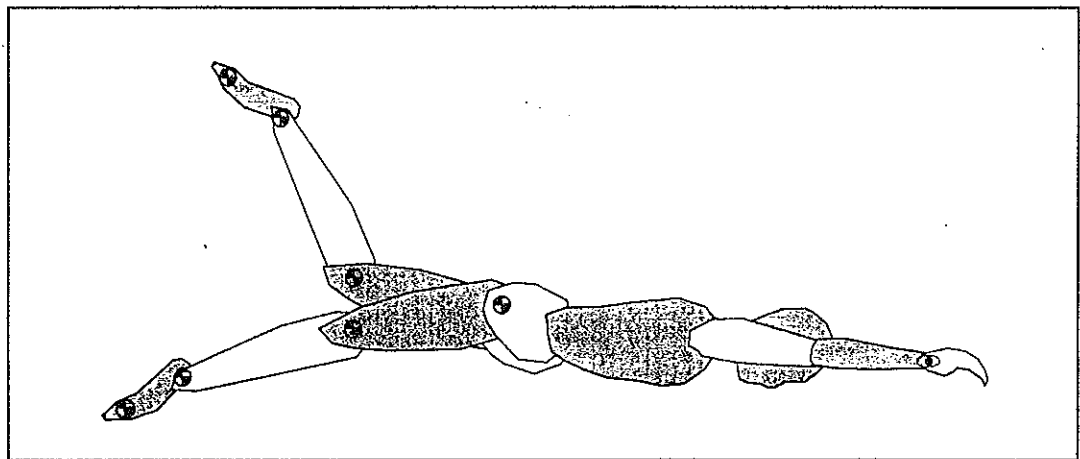
**Figura 3.3-3** Effetto di rollio del bacino

## Rilevamento e valutazione della pinneggiata

In base all'esperienza acquisita, la seconda serie di riprese si è realizzata su più atleti variando:

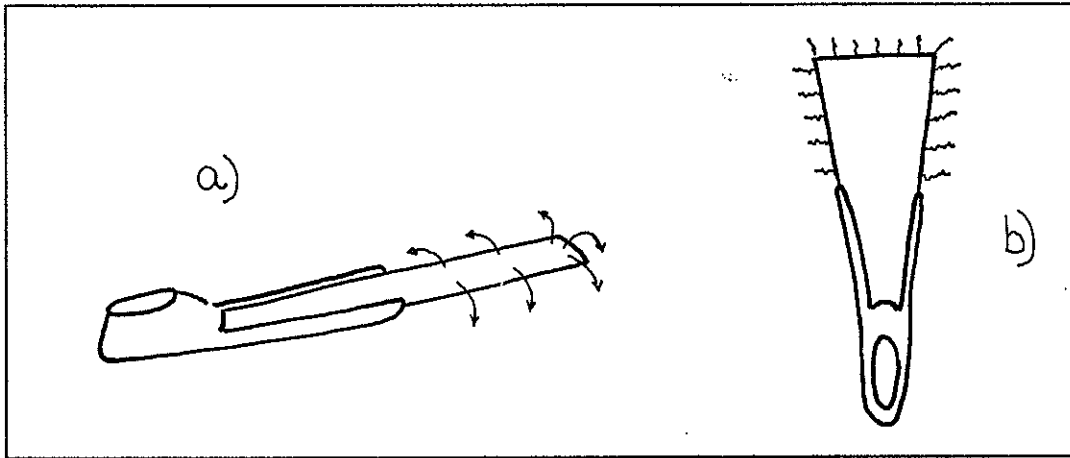
- ⇒ il tipo di pinna: corta (< di 0.75 m), lunga (> di 0.75 m);
- ⇒ il tipo di andatura: economica (basso consumo di energia), di massima potenza (massimo consumo di energia e massima velocità);

Per individuare univocamente le posizioni delle articolazioni durante il ciclo di gambata, si è dotato ogni atleta d'appositi riferimenti in corrispondenza dell'anca, del ginocchio, della caviglia e dell'avampiede (fig.3.3-4).



**Figura 3.3-4** Disposizione dei segnali di riferimento per una univoca determinazione delle posizioni delle articolazioni .

Per evidenziare prevedibili fughe d'acqua trasversali alla direzione longitudinale della pinna durante la pinneggiata (fig.3.3-5a), si sono applicati dei segnalatori (fili di lana) distribuiti uniformemente lungo i bordi della pinna (fig.3.3-5b).

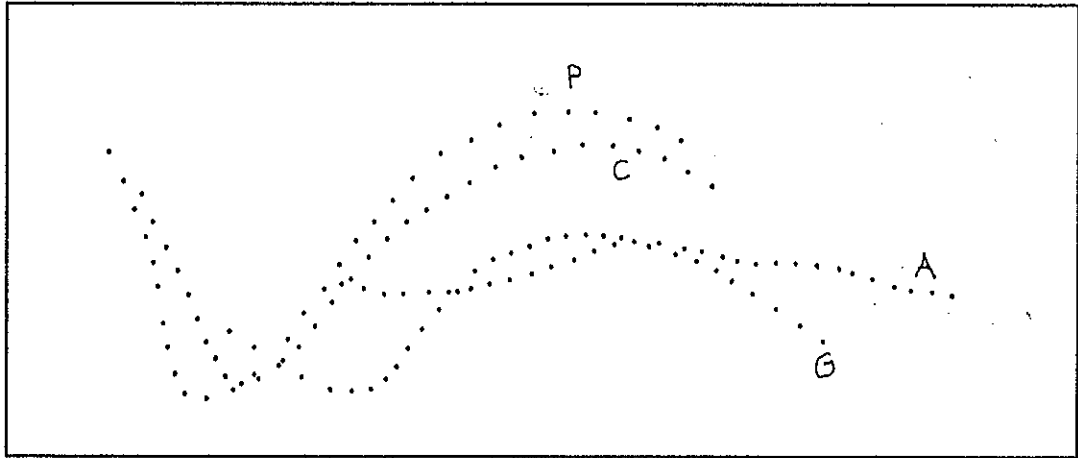


**Figura 3.3-5** a) Fughe d'acqua laterali previste; b) Pinna con applicati dei segnalatori ( fili di lana ) per evidenziare eventuali fughe d'acqua laterali.

### **3.4 VALUTAZIONI SUL PIANO SAGITTALE**

Usando un video registratore Hitachi Super\_Vhs, da ogni ripresa si è estratto un intero ciclo di gambata. Essendo l'otturatore della videocamera tarato ad un cinquantesimo di secondo si disponeva di un fotogramma ogni 0.02 secondi ma per non appesantire inutilmente l'analisi si sono rilevate le caratteristiche geometriche del gesto atletico ogni due fotogrammi, perciò ogni 0.04 secondi. Così facendo per ogni ciclo di pinneggiata si sono rilevati da trenta a sessanta fotogrammi a seconda della velocità di esecuzione. Su dei fogli trasparenti, direttamente dal video collegato al videoregistratore, si sono impresse le posizioni occupate nel tempo dai segnali relativi all'anca, ginocchio, caviglia ed avampiede (fig.3.4-1).



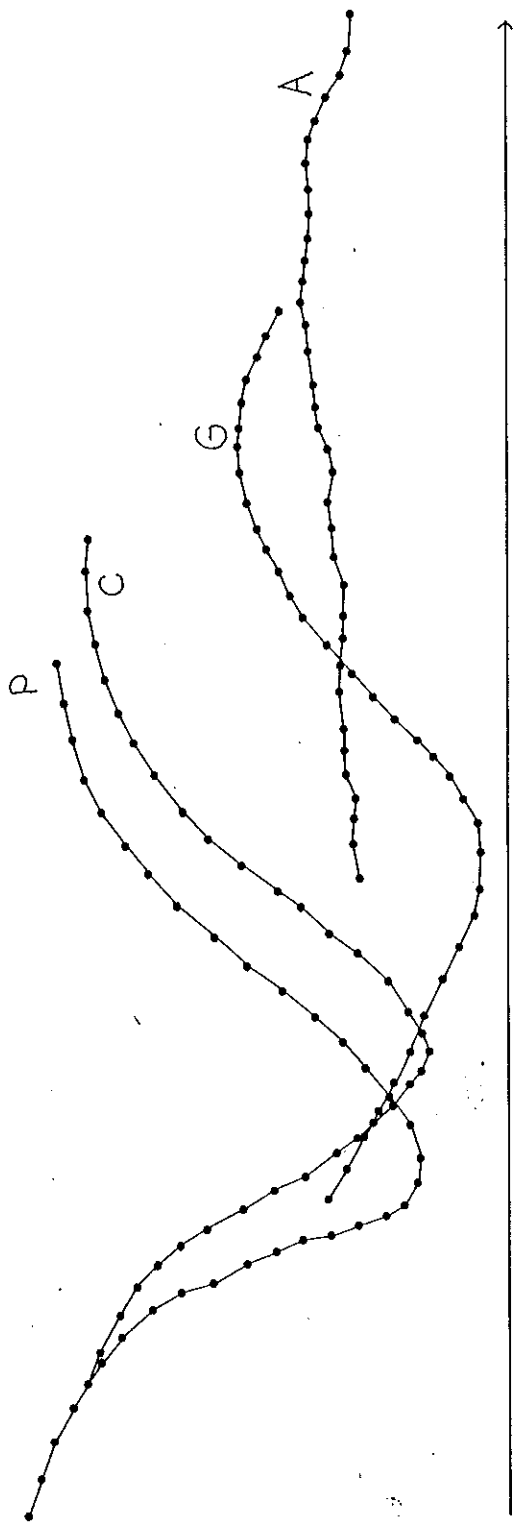


**Figura 3.4-1** Posizioni occupate ogni 0.04 secondi dall'anca, ginocchio caviglia ed avampiede, rilevate su un foglio trasparente.

Per ogni tipologia di prova si sono:

- ⇒ rilevate le posizioni occupate dalle articolazioni ogni 0.04 secondi per un ciclo di pinneggiata, rispetto un sistema di riferimento fisso solidale al fondo della vasca (X-Y-Z);
- ⇒ cronometrati i tempi di quattro passaggi;
- ⇒ valutate le frequenze di pinneggiata;
- ⇒ valutate le velocità medie di passaggio e relative deviazioni standard.

Di seguito sono riportati i rilievi di posizione ed i tempi di percorrenza delle varie pinneggiate (grafici 3.4-1,2,3,4,5,6,7,8).

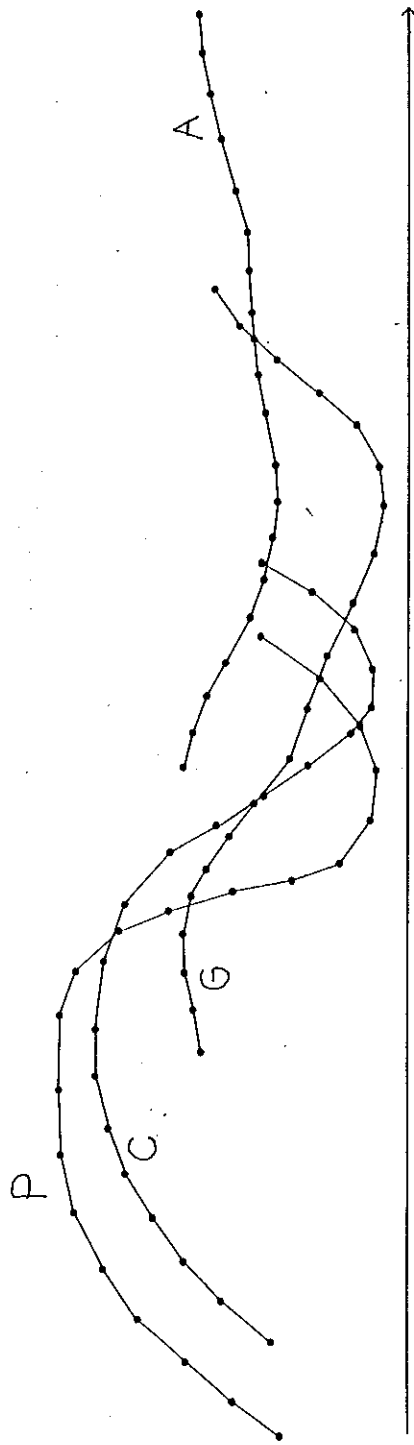


**Grafico 3.4-1** Posizioni occupate dalle articolazioni ogni 0.04 secondi, rispetto un sistema di riferimento fisso (X-Y-Z), riportate in scala 1:10, dove: A = anca, G = ginocchio, C = caviglia, P = avampiede. Valide per:  
 ATLETA → S (femmina, h=1.67 [m])

TIPO DI PINNE → C (corte con pala in gomma) ; ANDATURA → E (economica) .

TEMPI DI PASSAGGIO → 1° P.= 5.98 [s] ; 2° P.= 5.89 [s] ; 3° P.= 6.26 [s] ; 4° P.= 6.03 [s] .

FREQUENZA DI PINNEGGIATA → **0.71** [Hz] ; VELOCITA' MEDIA → **0.828** [m/s] ; DEVIAZIONE STANDARD → **0.021**



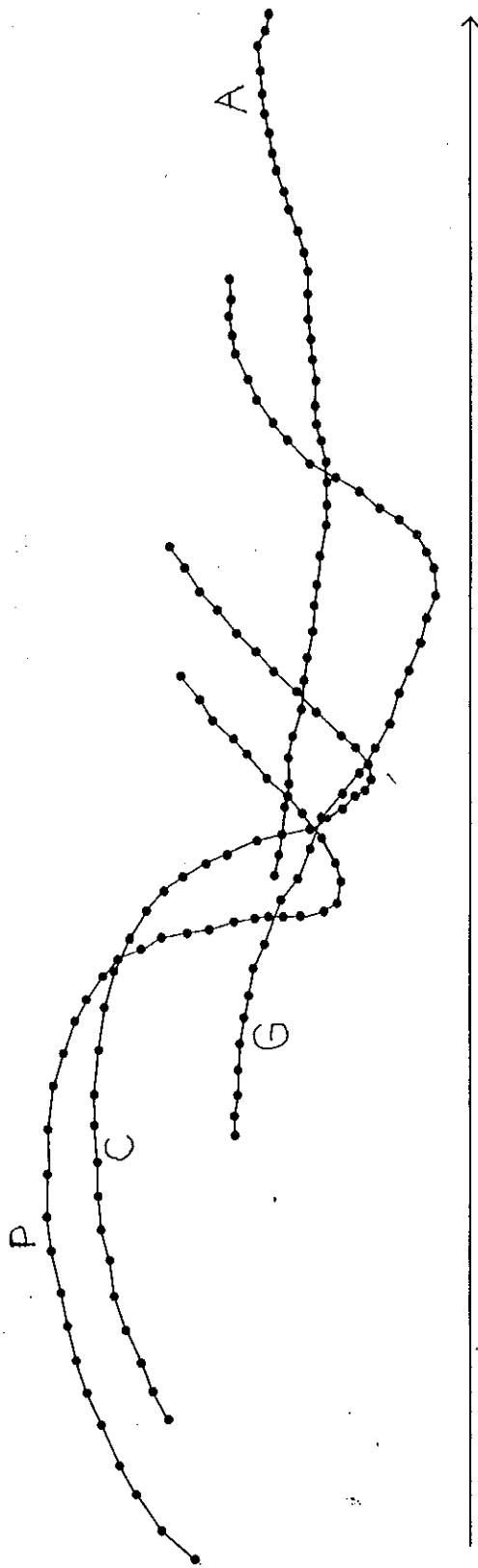
**Grafico 3.4-2** Posizioni occupate dalle articolazioni ogni 0.04 secondi, rispetto un sistema di riferimento fisso (X-Y-Z), riportate in scala 1:10, dove: A = anca , G = ginocchio , C = caviglia , P = avampiede. Valide per:

ATLETA → S (femmina, h=1.67 [m])

TIPO DI PINNE → C (corte con pala in gomma) ; ANDATURA → V (veloce).

TEMPI DI PASSAGGIO → 1° P.= 3.7 [s] ; 2° P.= 3.9 [s] ; 3° P.= 3.98 [s] ; 4° P.= 3.75 [s] .

FREQUENZA DI PINNEGGIATA → **1.25 [Hz]** ; VELOCITA' MEDIA → **1.306 [m/s]** ; DEVIAZIONE STANDARD → **0.044**



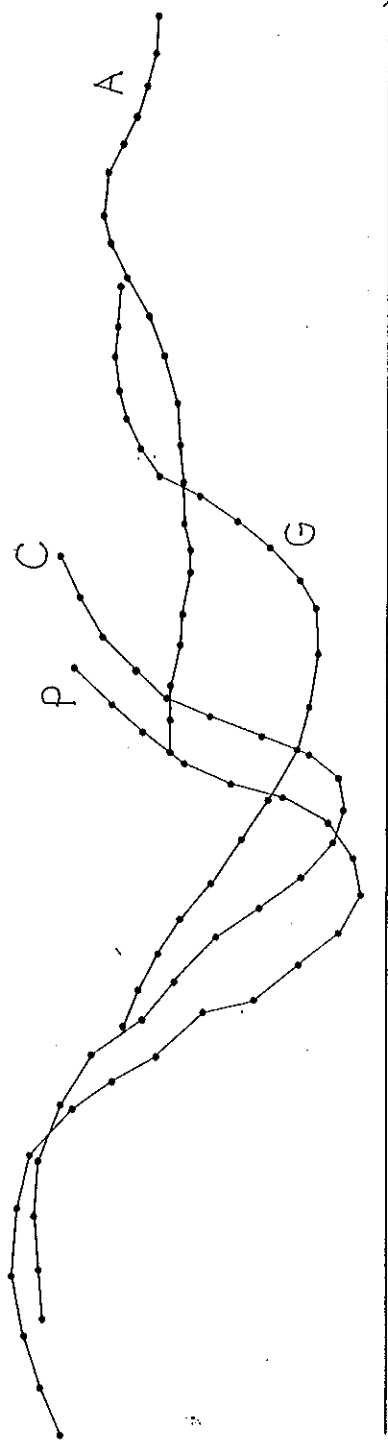
**Grafico 3.4-3** Posizioni occupate dalle articolazioni ogni 0.04 secondi, rispetto un sistema di riferimento fisso (X-Y-Z), riportate in scala 1:10, dove: A = anca , G = ginocchio , C = caviglia , P = avampiede. Valide per:

ATLETA → S (femmina, h=1.67 [m])

TIPO DI PINNE → L (lunghe con pala in tecnopolimero) ; ANDATURA → E (economica) .

TEMPI DI PASSAGGIO → 1° P.= 6.32 [s] ; 2° P.= 5.76 [s] ; 3° P.= 6.39 [s] ; 4° P.= 6.82 [s] .

FREQUENZA DI PINNEGGIATA → **0.63** [Hz] ; VELOCITA' MEDIA → **0.794** [m/s] ; DEVIAZIONE STANDARD → **0.056**



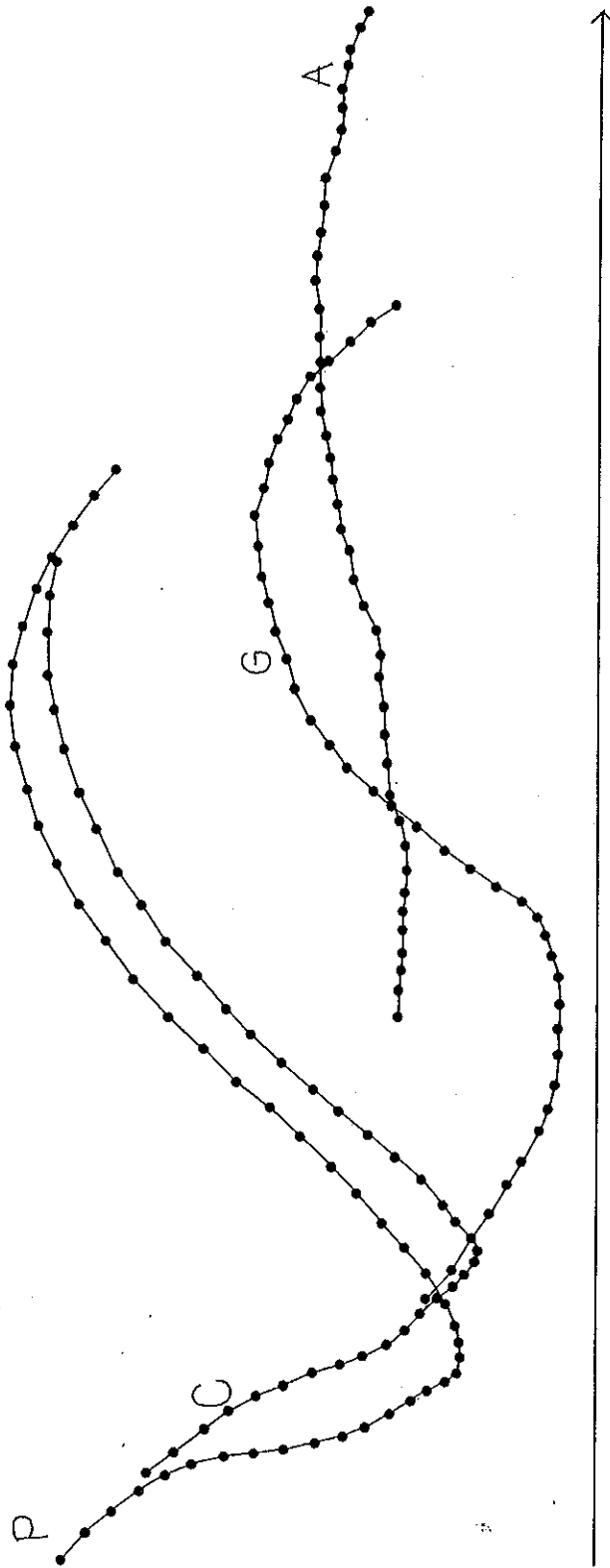
**Grafico 3.4-4** Posizioni occupate dalle articolazioni ogni 0.04 secondi, rispetto un sistema di riferimento fisso (X-Y-Z), riportate in scala 1:10, dove: A = anca , G = ginocchio , C = caviglia , P = avampiede. Valide per:

ATLETA → S (femmina, h=1.67 [m])

TIPO DI PINNE → L (lunghe con pala in tecnopolimero) ; ANDATURA → V(veloce) .

TEMPI DI PASSAGGIO → 1° P.= 3.78 [s] ; 2° P.= 3.7 [s] ; 3° P.= 3.89 [s] ; 4° P.= 3.93 [s] .

FREQUENZA DI PINNEGGIATA → 1.14 [Hz] ; VELOCITA' MEDIA → 1.308 [m/s] ; DEVIAZIONE STANDARD → 0.036



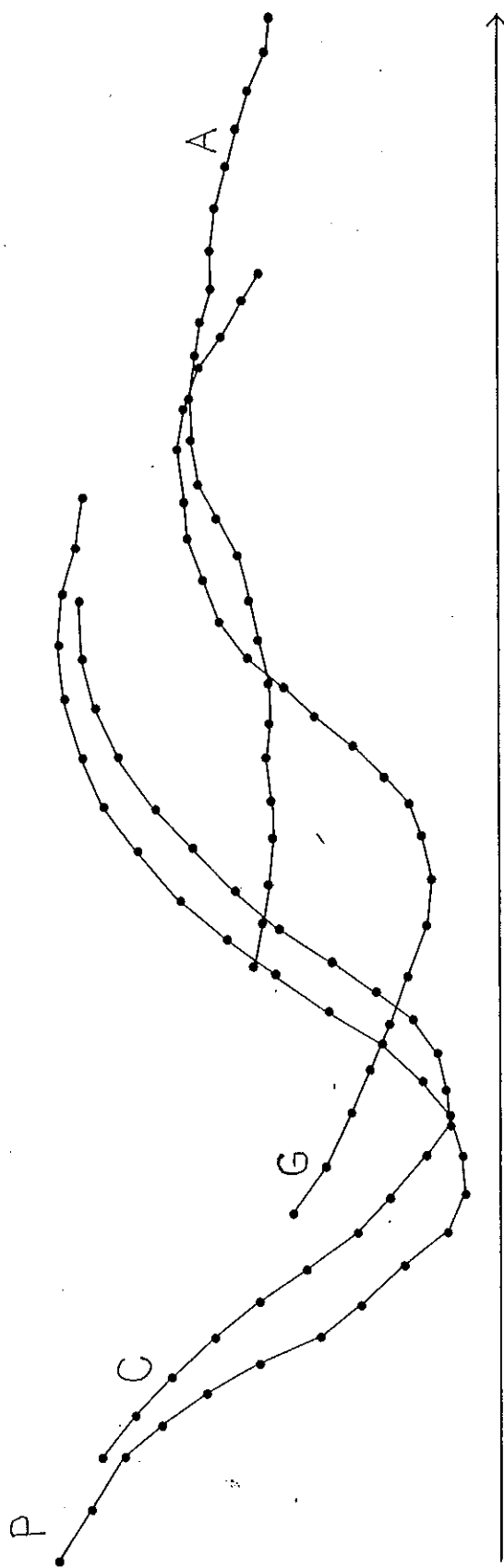
**Grafico 3.4-5** Posizioni occupate dalle articolazioni ogni 0.04 secondi, rispetto un sistema di riferimento fisso (X-Y-Z), riportate in scala 1:10, dove: A = anca , G = ginocchio , C = caviglio , P = avampiede. Valide per:

ATLETA → **D** (maschio, h=1.83 [m])

TIPO DI PINNE → C (corte con pala in gomma) ; ANDATURA → E (economica) .

TEMPI DI PASSAGGIO → 1° P.= 6.35 [s] ; 2° P.= 6.54 [s] ; 3° P.= 6.82 [s] ; 4° P.= 6.45 [s] .

FREQUENZA DI PINNEGGIATA → **0.58** [Hz] ; VELOCITA' MEDIA → **0.765** [m/s] ; DEVIAZIONE STANDARD → **0.023**



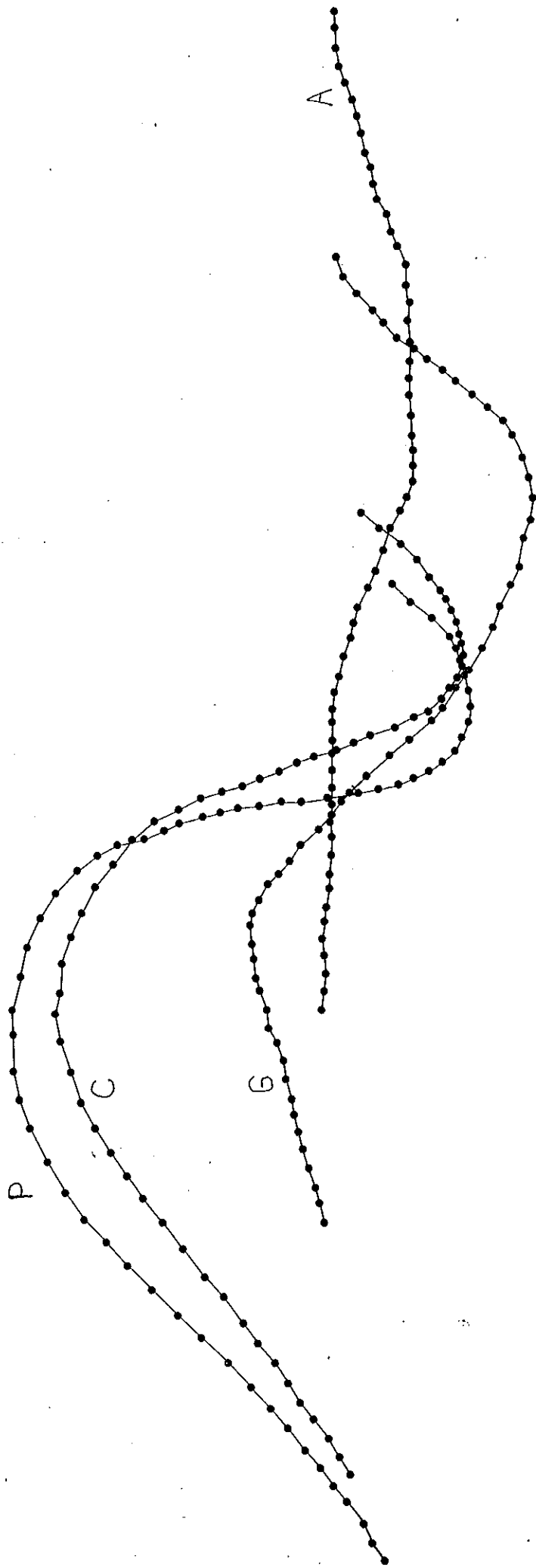
**Grafico 3.4-6** Posizioni occupate dalle articolazioni ogni 0.04 secondi, rispetto un sistema di riferimento fisso (X-Y-Z), riportate in scala 1:10, dove: A = anca , G = ginocchio , C = caviglia , P = avampiede. Valide per:

ATLETA → D (maschio, h=1.83 [m])

TIPO DI PINNE → C (corte con pala in gomma) ; ANDATURA → V(veloce) .

TEMPI DI PASSAGGIO → 1° P.= 4.05 [s] ; 2° P.= 3.83 [s] ; 3° P.= 3.55 [s] ; 4° P.= 4.15 [s] .

FREQUENZA DI PINNEGGIATA → 1 [Hz] ; VELOCITA' MEDIA → 1.288 [m/s] ; DEVIAZIONE STANDARD → 0.091



**Grafico 3.4-7** Posizioni occupate dalle articolazioni ogni 0.04 secondi, rispetto un sistema di riferimento fisso (X-Y-Z), riportate in scala 1:10, dove: A = anca , G = ginocchio , C = caviglia , P = avampiede. Valide per:

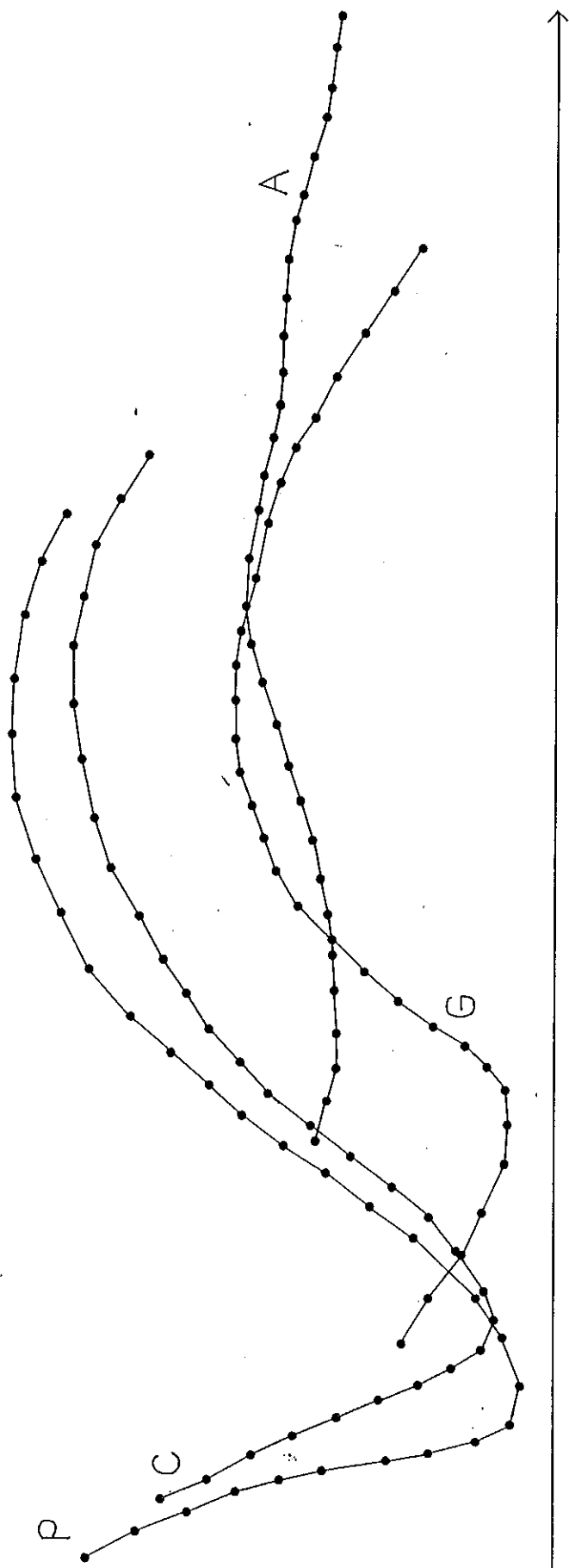
ATLETA → D (maschio, h=1.83 [m])

TIPO DI PINNE → L (lunghe con pala in tecnopolimero) ; ANDATURA → E (economica).

TEMPI DI PASSAGGIO → 1° P.= 6.04 [s] ; 2° P.= 6.27 [s] ; 3° P.= 6.57 [s] ; 4° P.= 6.56 [s] .

FREQUENZA DI PINNEGGIATA → **0.42** [Hz] ; VELOCITA' MEDIA → **0.787** [m/s] ; DEVIAZIONE STANDARD → **0.032**





**Grafico 3.4-8** Posizioni occupate dalle articolazioni ogni 0.04 secondi, rispetto un sistema di riferimento fisso (X-Y-Z), riportate in scala 1:10, dove: A = anca , G = ginocchio , C = caviglia , P = avampiede. Valide per:  
 ATLETA → D (maschio, h=1.83 [m])

TIPO DI PINNE → L (lunghe con pala in tecnopolimero) ; ANDATURA → V(veloce) .

TEMPI DI PASSAGGIO → 1° P.= 3.9 [s] ; 2° P.= 3.93 [s] ; 3° P.= 3.76 [s] ; 4° P.= 3.71 [s] .

FREQUENZA DI PINNEGGIATA → **0.81** [Hz] ; VELOCITA' MEDIA → **1.308** [m/s] ; DEVIAZIONE STANDARD → **0.037**

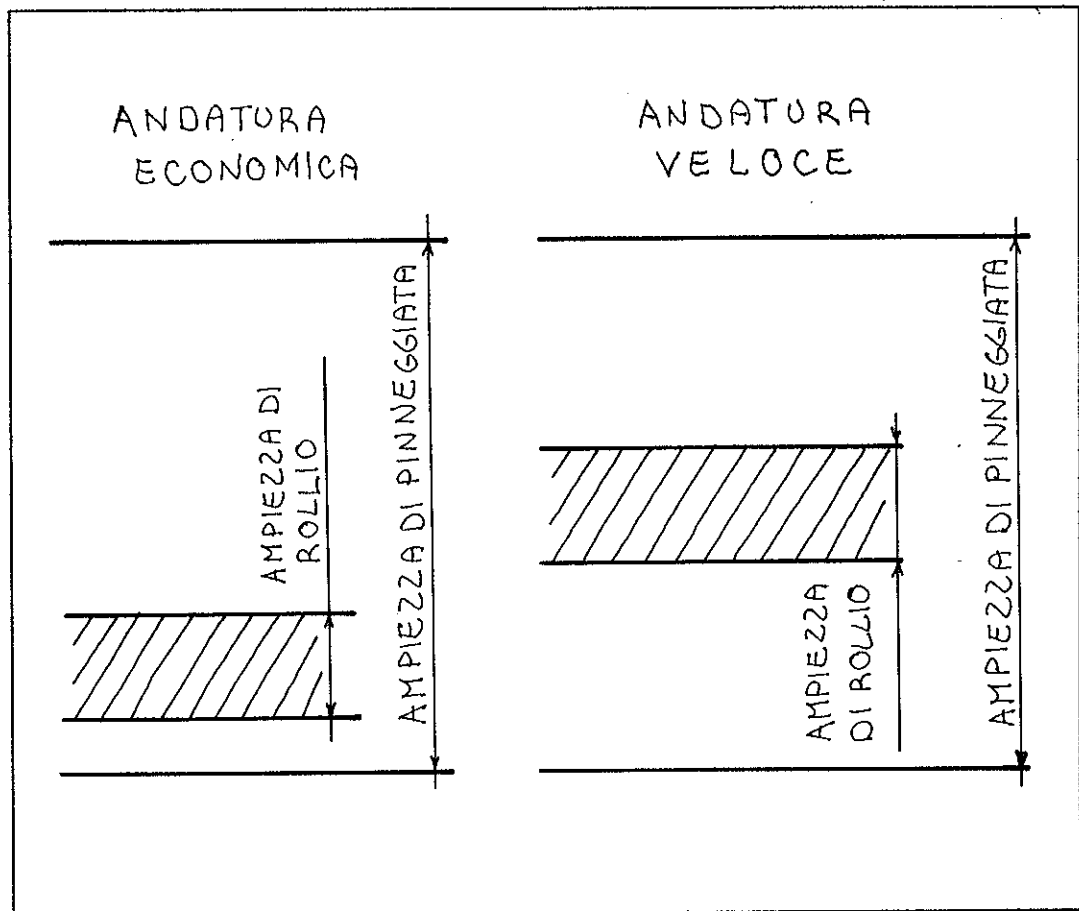
Capitolo 5

Atleta	Tipo di pinne	Andatura	Tempi [s]	Velocità	Velocità	Deviazione	Deviazione
				medie [m/s]	per tipologia [m/s]	standard	standard %
S	C	E	5.98	0.836	<b>0.828</b>	<b>0.021</b>	<b>2.572</b>
S	C	E	5.89	0.849			
S	C	E	6.26	0.799			
S	C	E	6.03	0.829			
S	C	V	3.7	1.351	<b>1.306</b>	<b>0.044</b>	<b>3.382</b>
S	C	V	3.9	1.282			
S	C	V	3.98	1.256			
S	C	V	3.75	1.333			
S	L	E	6.32	0.791	<b>0.794</b>	<b>0.056</b>	<b>7.026</b>
S	L	E	5.76	0.868			
S	L	E	6.39	0.782			
S	L	E	6.82	0.733			
S	L	V	3.78	1.323	<b>1.308</b>	<b>0.036</b>	<b>2.752</b>
S	L	V	3.7	1.351			
S	L	V	3.89	1.285			
S	L	V	3.93	1.272			
D	C	E	6.35	0.787	<b>0.765</b>	<b>0.023</b>	<b>3.038</b>
D	C	E	6.54	0.765			
D	C	E	6.82	0.733			
D	C	E	6.45	0.775			
D	C	V	4.05	1.235	<b>1.288</b>	<b>0.091</b>	<b>7.027</b>
D	C	V	3.83	1.305			
D	C	V	3.55	1.408			
D	C	V	4.15	1.205			
D	L	E	6.04	0.828	<b>0.787</b>	<b>0.032</b>	<b>4.060</b>
D	L	E	6.27	0.797			
D	L	E	6.57	0.761			
D	L	E	6.56	0.762			
D	L	V	3.9	1.282	<b>1.308</b>	<b>0.037</b>	<b>2.792</b>
D	L	V	3.93	1.272			
D	L	V	3.76	1.330			
D	L	V	3.71	1.348			

Tabella 3.4-1 Riassunto delle velocità medie per le varie tipologie di pinneggiata.

Osservazioni sui dati rilevati

a) Si nota che al crescere della velocità media di spostamento longitudinale, l'ampiezza di pinneggiata e l'ampiezza di rollio non variano, mentre varia la loro posizione relativa (fig.3.4-2).



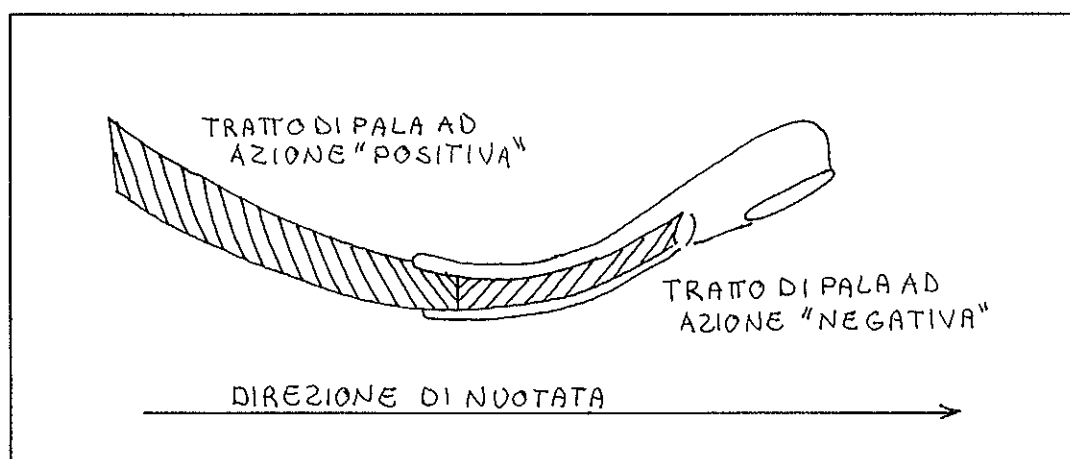
**Figura 3.4-2** Relazioni tra le ampiezze di pinneggiata e di rollio al variare della velocità media di spostamento longitudinale.

b) Le principali differenze che si riscontrano usando le pinne lunghe rispetto le pinne corte, sono (vedi graf.3.4-1,2,3,4,5,6,7,8):

- frequenza di pinneggiata minore del 25 ÷ 45 % ;
- ampiezza di pinneggiata maggiore del 15 ÷ 45 % ;

mentre, nelle velocità medie non si rilevano sostanziali differenze (tab.3.4-1).

c) In alcune fasi del ciclo di pinneggiata, si nota che la pinna si dispone come in fig.3.4-3 rispetto la direzione della nuotata.



**Figura 3.4-3** Posizione che la pinna assume rispetto la direzione della nuotata in alcune fasi della pinneggiata.

*Nel tratto di pinna definito "negativo" la componente di spinta parallela alla direzione della nuotata tende a frenare l'avanzamento del nuotatore. Questa osservazione è ripresa nel paragrafo 10.8.*

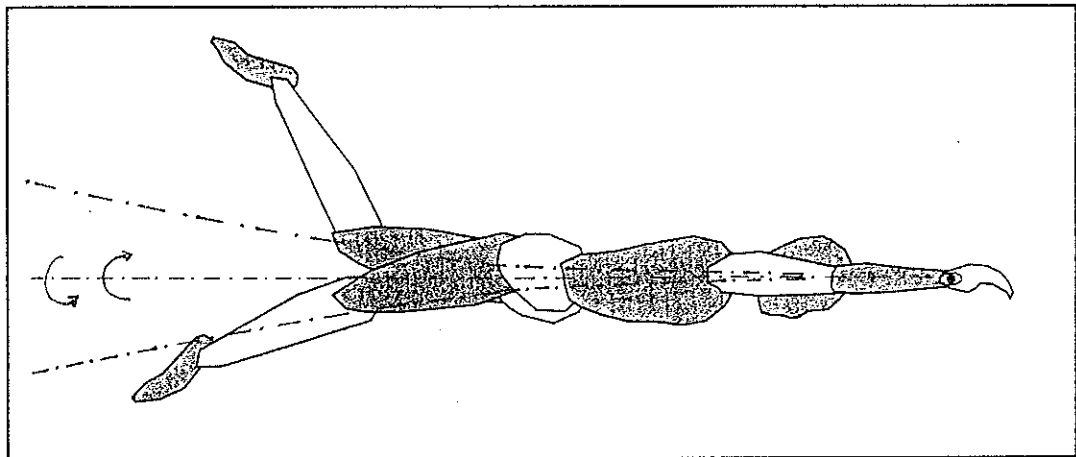
Per la successiva fase di modellazione numerica del problema, si è presa in considerazione una sola tipologia di pinneggiata: andatura lenta con pinne lunghe. Tale scelta è così motivata:

⇒ andatura lenta, perché per un uso normale rappresenta il tipo di andatura preferenziale;

⇒ pinne lunghe, perché le pinne in materiale composito rese disponibili dalla ditta fornitrice C4 sono del tipo lungo.

Dopo un primo impreciso tentativo manuale di rilevazione degli angoli relativi agli arti inferiori si è optato per l'uso di un programma CAD. Con un processo inverso a quello usato per impressionare le posizioni occupate dalle articolazioni nel ciclo di pinneggiata in un foglio trasparente, su Autocad\_13 si sono ridigitalizzate tali posizioni (fig. 3.4-1).

Come già osservato nel paragrafo 3.3 durante la pinneggiata vi è un rollio del bacino (fig.3.3-3) che si smorza lungo l'asse longitudinale del corpo fino ad annullarsi in corrispondenza degli arti superiori (fig.3.4-4).



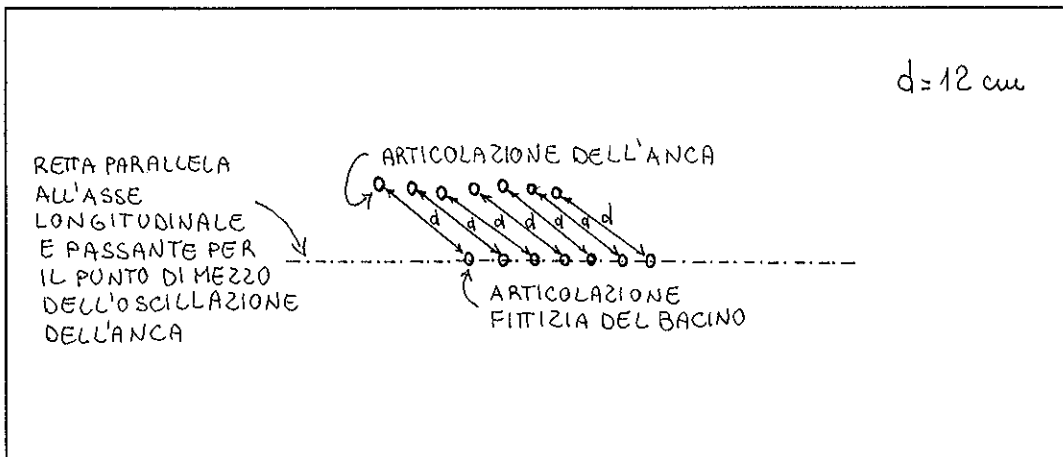
**Figura 3.4-4** Smorzamento dell'effetto di rollio lungo il corpo.

Il rollio influisce sulla traiettoria delle pinne nel piano sagittale, quindi se ne deve quantificare l'effetto sulla complessiva pinneggiata. Per non appesantire inutilmente l'analisi, si è schematizzato che tutto lo smorzamento avvenga in un solo punto situato lungo la colonna vertebrale verso la parte superiore del corpo. Dalle riprese subacquee, si stima che l'ampiezza di rollio si riduce notevolmente a circa dodici centimetri dall'anca (fig.3.4-4). In ogni caso, essendo la valutazione degli angoli relativi tra gli arti fatta solo per riprodurre la cinematica della nuotata, il

posizionamento di questa articolazione fittizia non influisce significativamente sulla successiva modellazione dinamica al calcolatore.

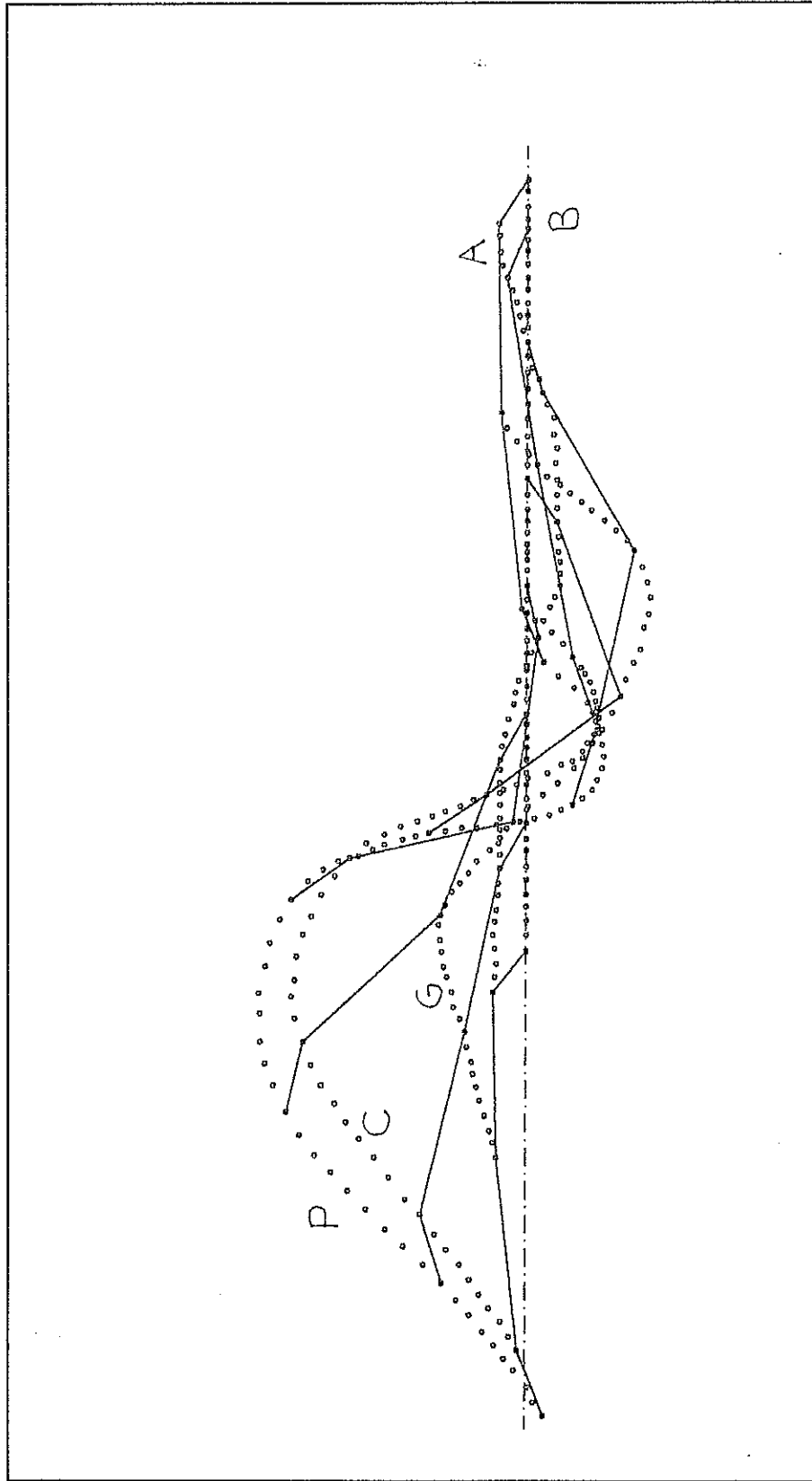
Le posizioni occupate dall'articolazione fittizia in ogni fotogramma rispetto l'anca si sono valutate imponendo:

- ⇒ una distanza dall'anca costante di dodici centimetri;
- ⇒ l'appartenenza alla retta parallela all'asse longitudinale e passante per il punto di mezzo dell'oscillazione dell'anca (fig.3.4-5).

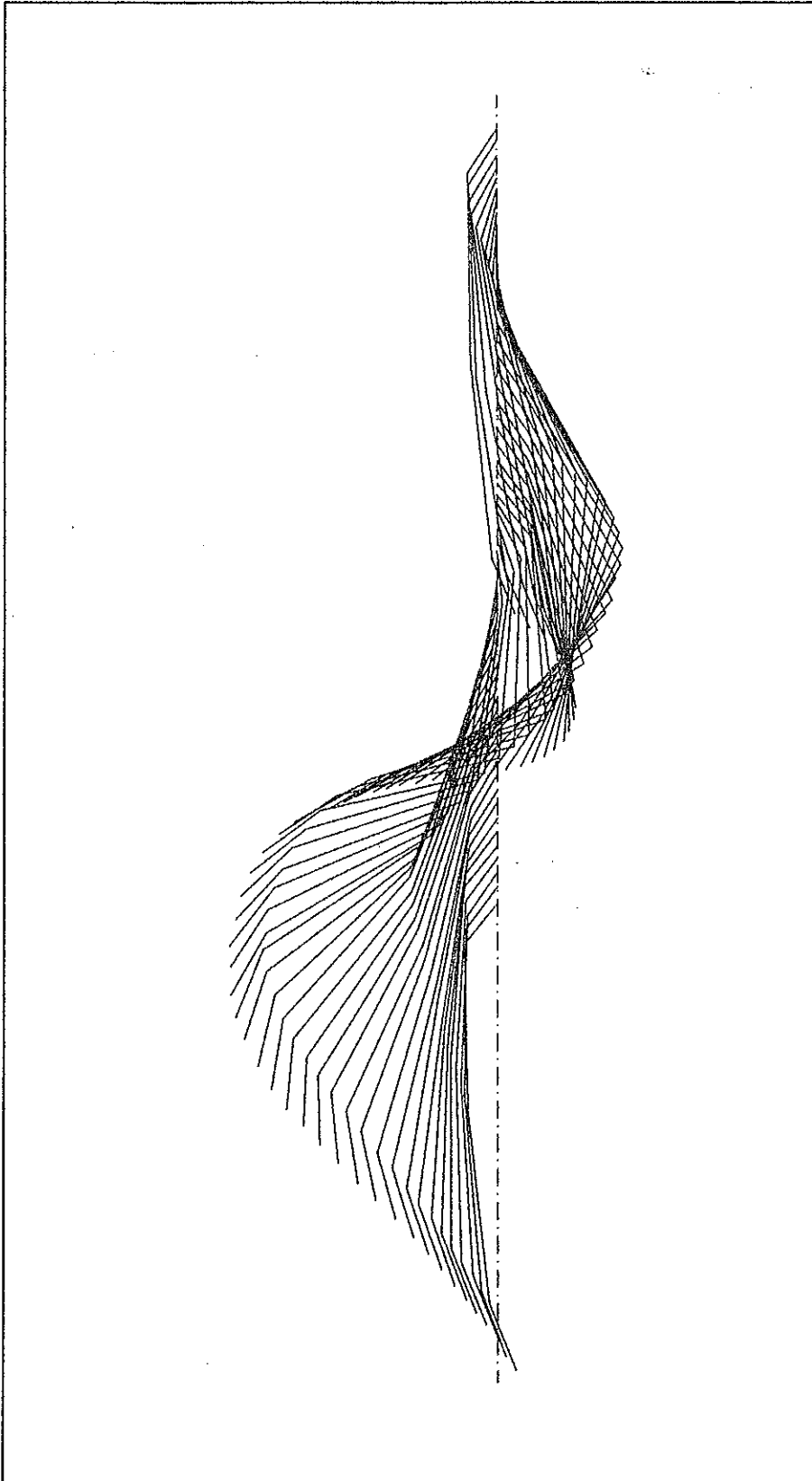


**Figura 3.4-5** Valutazione della posizione occupata dall'articolazione fittizia rispetto l'anca.

Digitalizzando su Autocad\_13 le posizioni occupate dall'articolazione fittizia e collegandole opportunamente con le restanti articolazioni si riproduce la complessiva disposizione degli arti inferiori durante il ciclo di pinneggiata (fig.3.4-6 e fig.3.4-7).



**Figura 3.4-6** Posizioni occupate dall'avampiede (P), caviglia (C), ginocchio (G), anca (A) e articolazione fittizia del bacino (B), ogni 0.04 secondi per un ciclo di pinneggiata.



**Figura 3.4-7** Posizioni occupate dal bacino, dalla coscia, dalla gamba e dal piede, ogni 0.04 secondi per il ciclo di pinneggiata ad andatura economica con pinne lunghe presa a riferimento.



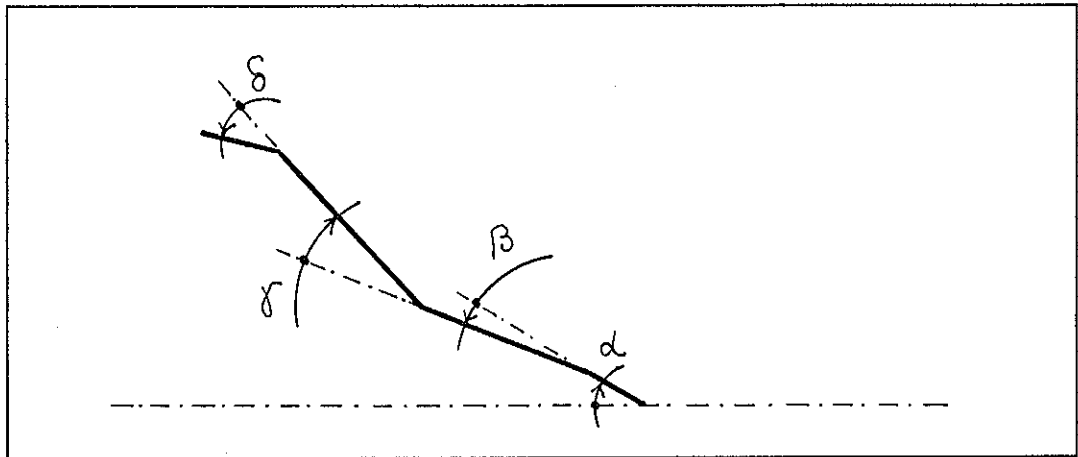
Con Autocad\_13 si sono valutati i seguenti angoli relativi (fig.3.4-8):

$\alpha$  = angolo del bacino rispetto la direzione del moto;

$\beta$  = angolo della coscia rispetto il bacino;

$\gamma$  = angolo della gamba rispetto la coscia;

$\delta$  = angolo del piede rispetto la gamba.

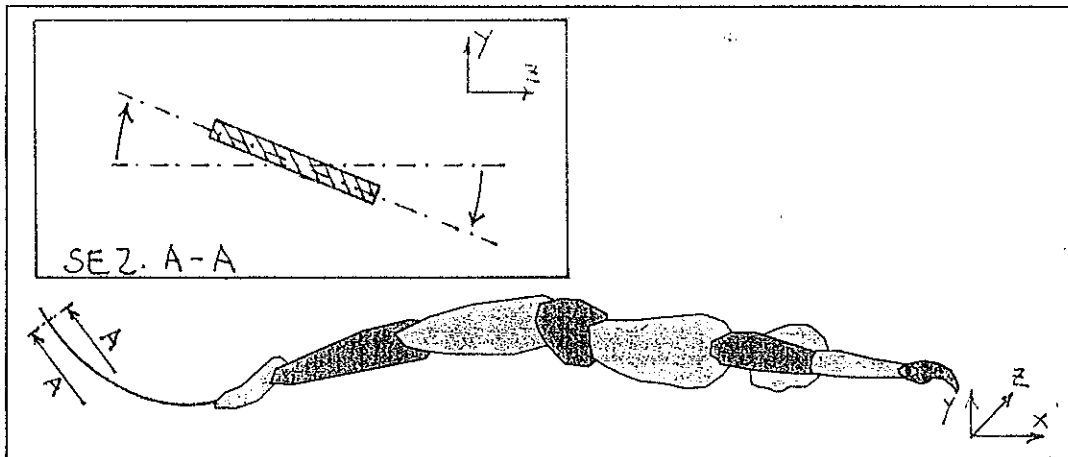


**Figura 3.4-8** Angoli relativi per la definizione della posizione degli arti.

Tali angoli, per tutti i fotogrammi contenuti in un ciclo della pinneggiata studiata, sono raccolti in tabella B-1 situata in Appendice B.

### **3.5 VALUTAZIONI SUI RESTANTI PIANI**

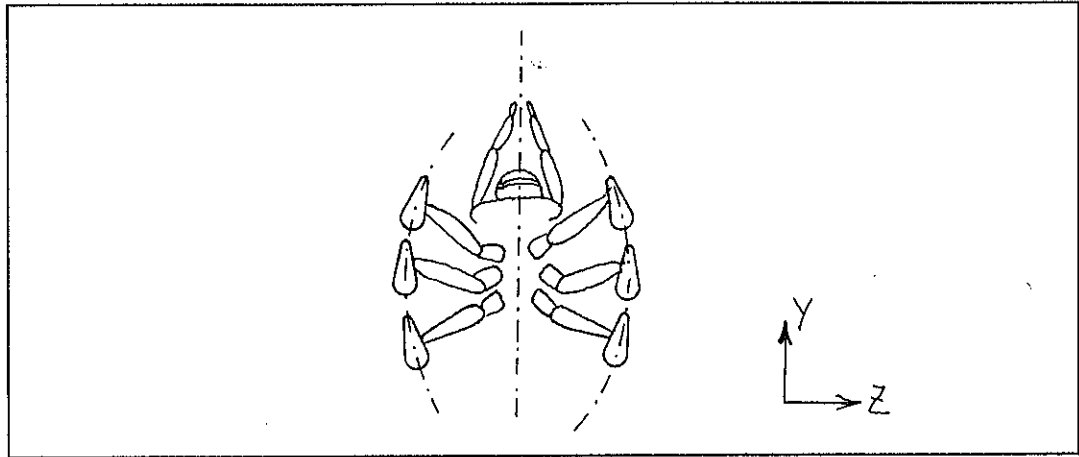
Nelle riprese effettuate seguendo posteriormente l'atleta durante la pinneggiata, si nota una torsione dell'estremità della pinna nella fase di massima spinta (fig.3.5-1).



**Figura 3.5-1** Torsione dell'estremità della pinna durante la fase di massima spinta.

Le concause di questa torsione potrebbero essere:

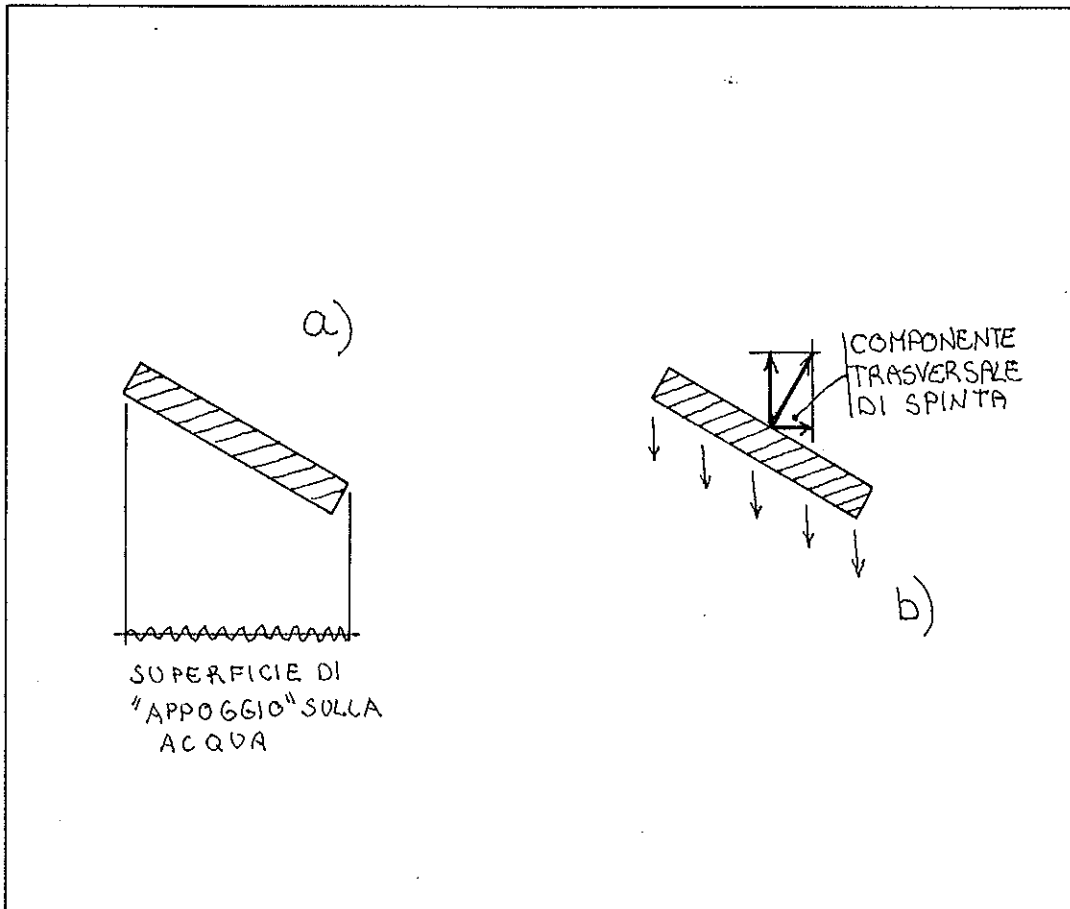
- ⇒ fisiologiche: alternarsi di rotazione interna ed esterna dell'anca durante il movimento di gambata (fig.3.5-2);
- ⇒ adattative: capacità dell'uomo di modificare la propria azione di pinneggiata per compensare delle possibili forze che ne destabilizzerebbero il movimento;
- ⇒ strutturali: insufficiente rigidità torsionale della pinna nella fase di massima spinta.



**Figura 3.5-2** Rotazione interna ed esterna dell'anca durante la gambata.

Gli effetti di questa torsione sono:

- ⇒ minore effetto propulsivo a causa della diminuita superficie di appoggio della pinna sull'acqua (fig.3.5-3a);
- ⇒ instabilità della pinneggiata a causa dell'insorgere di una componente trasversale di spinta (fig.3.5-3b);

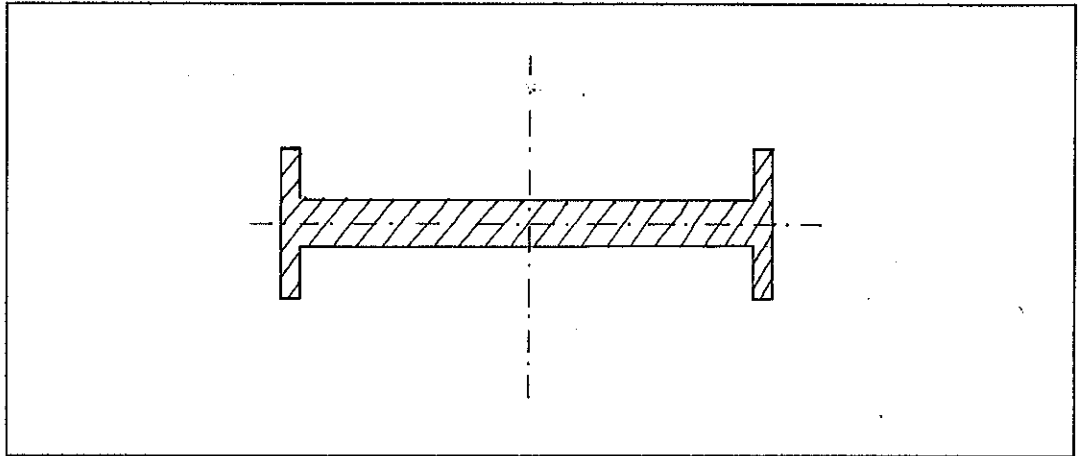


**Figura 3.5-3** a) Diminuzione della superficie di appoggio della pinna sull'acqua; b) Insorgere di una componente trasversale di spinta.

Per aumentare la rigidità torsionale delle pinne si può:

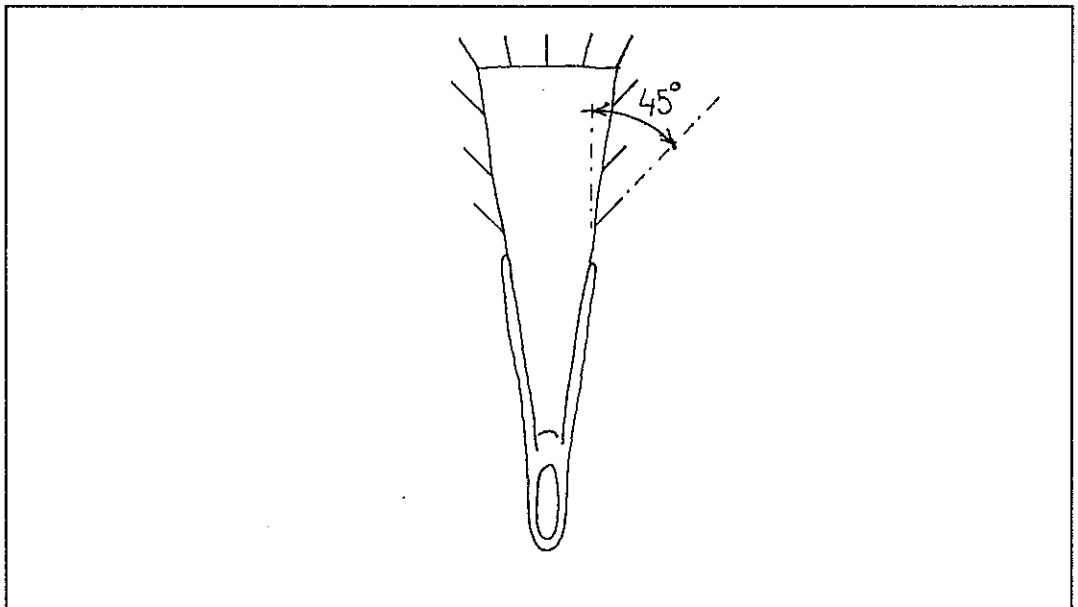
- ⇒ sagomare opportunamente la pala per incrementare il momento d'inerzia polare della sua sezione trasversale (fig.3.5-4);
- ⇒ usare materiali isotropi con moduli elastici a tensione tangenziale maggiore o materiali compositi con le fibre opportunamente disposte.

Si nota che tali soluzioni hanno delle conseguenze non trascurabili sulla rigidità flessionale.



**Figura 3.5-4** Sezione trasversale caratterizzata da un maggiore momento d'inerzia polare.

Nelle riprese effettuate sulla sola pinna si nota che durante la fase di spinta i segnalatori (fili di lana), distribuiti uniformemente lungo i bordi (fig.3.3-5a), si dispongono come in figura:

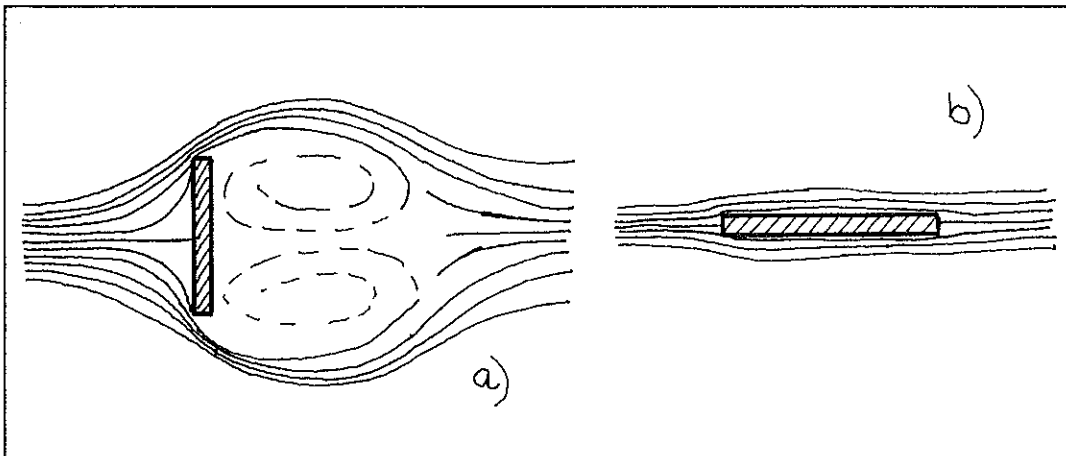


**Figura 3.5-5** Disposizione dei fili di lana durante la fase di spinta.

Nella zona di bordo della pinna, assimilabile ad una lastra piana, sono presenti le seguenti correnti fluide [6]:

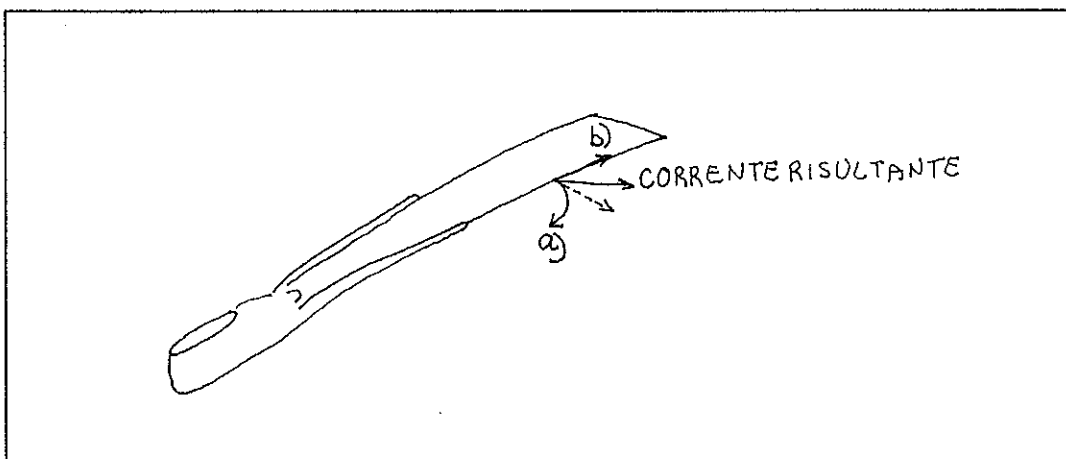
⇒ corrente che investe trasversalmente una lastra piana (fig.3.5-6a);

⇒ corrente che investe parallelamente una lastra piana (fig.3.5-6b);



**Figura 3.5-6** a) Corrente che investe trasversalmente una lastra piana; b) Corrente che investe parallelamente una lastra piana.

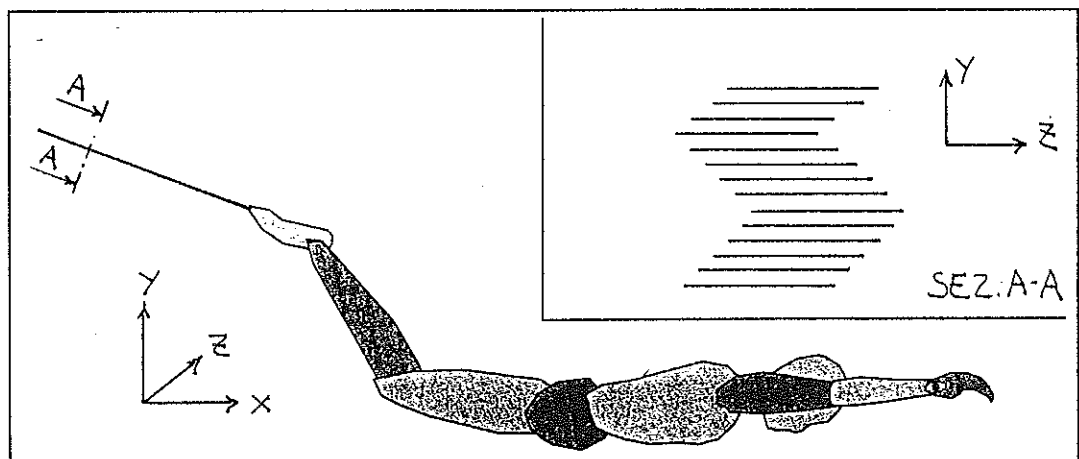
La corrente risultante (fig.3.5-7) giustifica l'orientamento rilevato dai segnalatori (fili di lana).



**Figura 3.5-7** Corrente complessiva nella zona di bordo della pinna.

In particolare si nota che, la corrente fluida di direzione parallela all'asse longitudinale della pinna è responsabile della resistenza idrodinamica d'attrito ( $R_a$ ), mentre quella di direzione trasversale all'asse longitudinale della pinna è responsabile della resistenza idrodinamica di forma ( $R_p$ ), detta anche resistenza idrodinamica di pressione (vedi appendice C).

Durante la pinneggiata si notano fenomeni di "sfarfallio" (fig.3.5-8b) particolarmente evidenti nelle pinne con pale in composito che essendo più rigide sono meno soggette ai fenomeni di torsione dell'estremità della pala nella fase di massima spinta (fig.3.5-1). Tale "sfarfallio" rende instabile la pinneggiata rendendo più probabili gli urti tra le pinne.

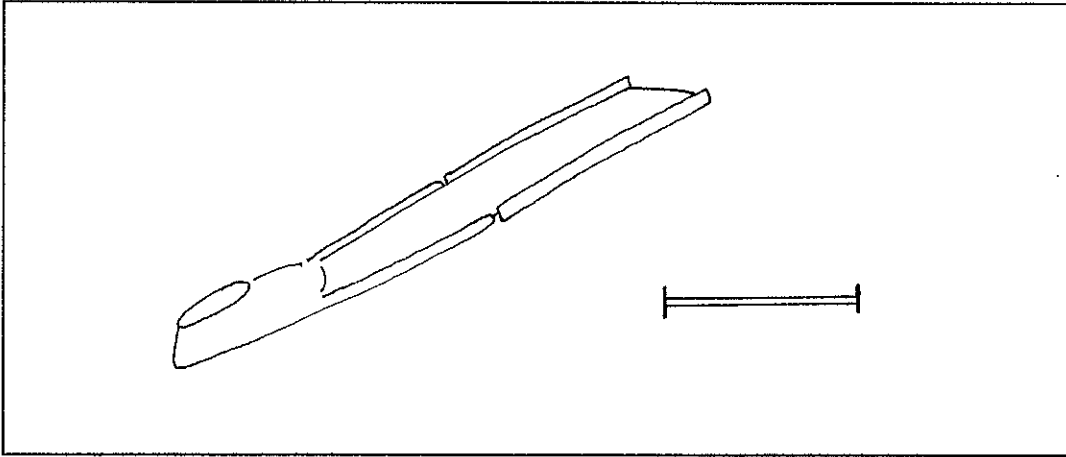


**Figura 3.5-8 a)** Sezione della pala della pinna rispetto la direzione di corrente; **b)** Fenomeno di "sfarfallio".

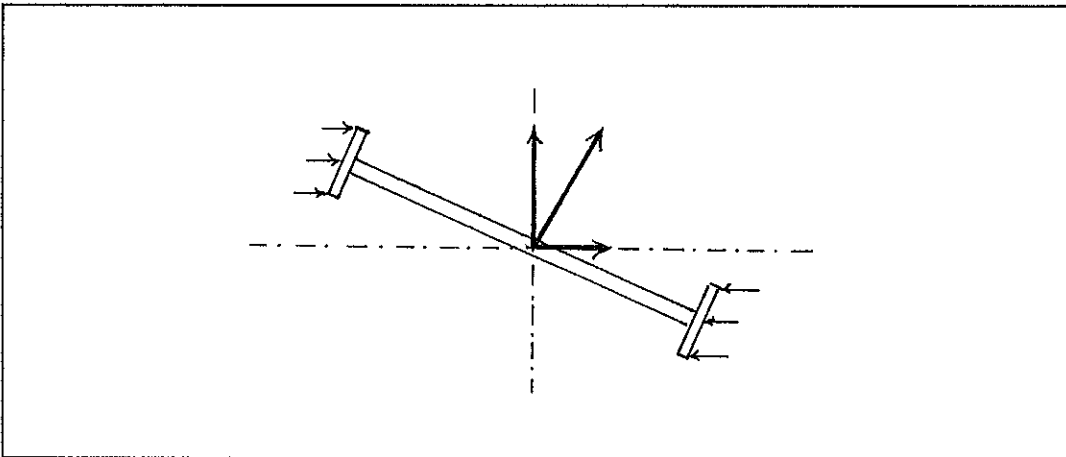
Allo scopo di:

- ⇒ rendere le pinne più stabili e direzionali → minore "sfarfallio"(fig.3.5-10);
- ⇒ contenere le fughe laterali dei filetti fluidi (fig.3.5-7);
- ⇒ proteggere da eventuali urti i bordi delle pale (in particolare quelle in composito);

si possono usare dei bordi laterali opportunamente sagomati( fig.3.5-9).



**Figura 3.5-9** Pinne con bordi laterali sagomati.



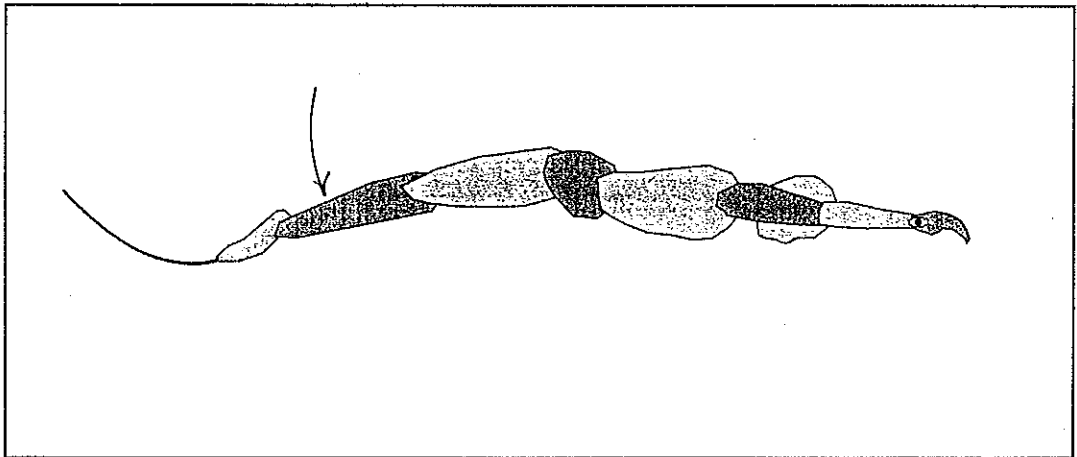
**Figura 3.5-10** Effetto dei bordi laterali sulla stabilità delle pinne.



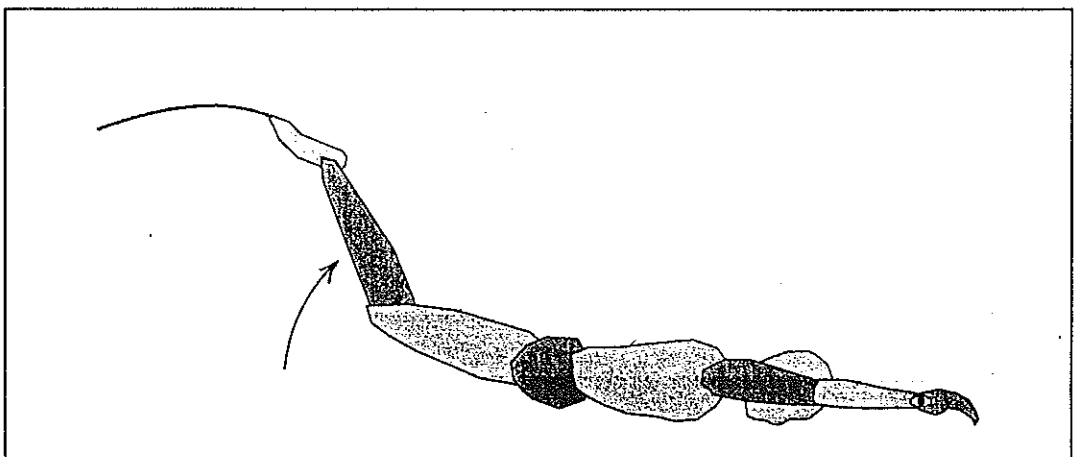
## CAP. 4 ANALISI BIOMECCANICA DELLA PINNEGGIATA

La pinneggiata è un movimento prodotto dal sommarsi di movimenti angolari di singoli membri, il cui fine è far avanzare nella direzione del moto l'intero corpo.

Per ognuno dei due arti inferiori si distinguono una fase di "calcio in basso" detta Kich Down (fig.4-1) e una fase di "calcio in alto" detta Kich Up (fig.4-2).



**Figura 4-1** Fase di "calcio in basso", detta kich down.



**Figura 4-2** Fase di "calcio in alto", detta kich up.

## Capitolo 4

Complessivamente, la fase di kich down implica:

- ⇒ la flessione plantare del piede (fig.4.2-1a).
- ⇒ l'estensione della gamba (fig.4.3-1a);
- ⇒ la flessione della coscia (fig.4.4-1a);
- ⇒ la rotazione oraria del bacino (fig.4.5-2a);

Complessivamente, la fase di kich up implica:

- ⇒ la flessione dorsale del piede (fig.4.2-1b).
- ⇒ la flessione della gamba (fig.4.3-1b);
- ⇒ l'estensione della coscia (fig.4.4-1b);
- ⇒ la rotazione antioraria del bacino (fig.4.5-2b);

Più precisamente, per l'intero ciclo di gambata vale il seguente:

	Periodo di pinneggiata [s]					
	0		1		2	
Piede	F.D.		F.P.		F.D.	
Gamba	F.	E.		F.		
Coscia	E.		F.		E.	
Bacino	R.A.	R.O.		R.A.		
dove:						
F.D.	=	Flessione Plantare				
F.P.	=	Flessione Dorsale				
F.	=	Flessione				
E.	=	Estensione				
R.A.	=	Rotazione Antioraria				
R.O.	=	Rotazione Oraria				

**Tabella 4.1-1** Riassunto dei movimenti dei vari membri durante un ciclo di pinneggiata.

Per interpretare correttamente le caratteristiche di una pinneggiata occorre definirne i seguenti parametri:

- ampiezza di pinneggiata: è la distanza trasversale tra le posizioni estreme assunte dalla caviglia rispetto la colonna vertebrale (fig.2-3); a velocità normale è funzione dell'altezza del soggetto ed del tipo di pinna;

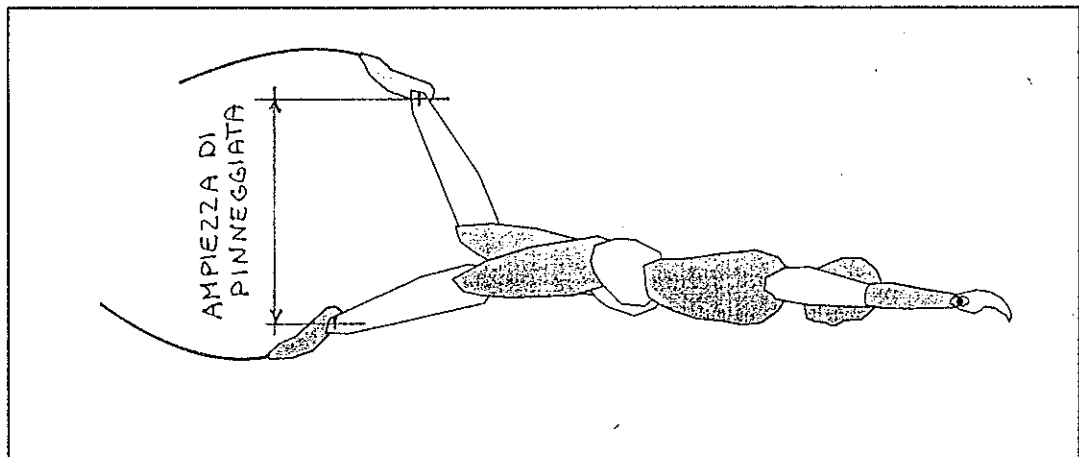


Figura 4-3 Ampiezza di pinneggiata.

- periodo di pinneggiata: cambia al variare della velocità e dell'ampiezza di pinneggiata; generalmente è compreso tra  $0.5 \div 2.5$  secondi;
- frequenza di pinneggiata: è il numero di pinneggiate eseguite in un secondo; coincide con l'inverso del periodo di pinneggiata;
- velocità media: è la velocità media dell'intero corpo in direzione del moto;

#### **4.1 ANALISI DELLE MODIFICAZIONI DEI RAPPORTI FRA I DIVERSI SEGMENTI CORPOREI E LE VARIAZIONI ARTICOLARI**

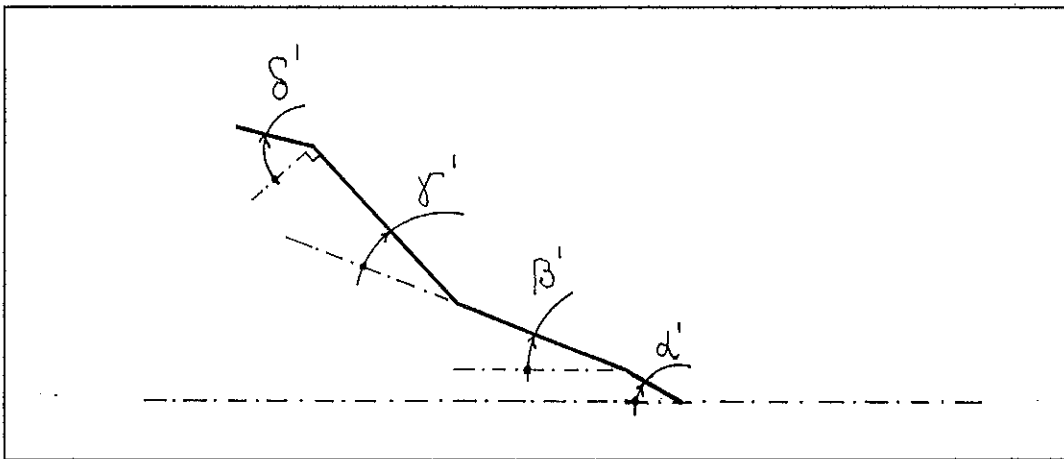
Nel paragrafo 3.4, in previsione della successiva fase di modellazione numerica, gli angoli che definiscono la posizione degli arti, sono stati valutati come specificato nella figura 3.4-8. Per un'analisi biomeccanica è più corretto esprimerli rispetto i seguenti assi (fig.4.1-1):

$\alpha'$  = angolo del bacino, attorno l'articolazione fittizia, rispetto un asse parallelo alla colonna vertebrale;

$\beta'$  = angolo della coscia rispetto un asse parallelo alla colonna vertebrale;

$\gamma'$  = angolo della gamba rispetto un asse parallelo alla coscia;

$\delta'$  = angolo del piede rispetto un asse normale alla gamba.



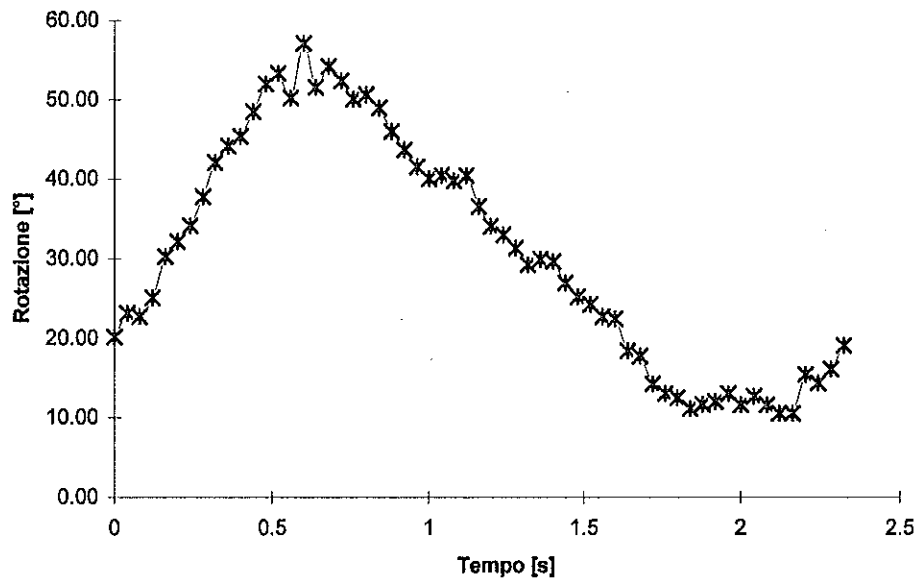
**Figura 4.1-1** Angoli “medici” per la definizione della posizione degli arti.

Tali angoli, detti angoli “medici”, per tutti i fotogrammi contenuti in un ciclo della pinneggiata studiata, sono raccolti in tabella B-2 situata in Appendice B.

Nei successivi paragrafi si descrive il comportamento biomeccanico degli arti ed articolazioni, elencando i principali muscoli [7,8] che intervengono nei fondamentali movimenti che caratterizzano la pinneggiata. Si noter  che gli angoli massimi e minimi rilevati sperimentalmente rientrano nei limiti fisiologici articolari [5], raccolti in appendice A nelle figure A-1, A-2, A-3, A-4.

## 4.2 COMPORTAMENTO DEL PIEDE E DELLA CAVIGLIA

La rotazione del piede rispetto un asse normale alla gamba, per il ciclo di pinneggiata studiato (andatura lenta con pinne lunghe), ha il seguente andamento:



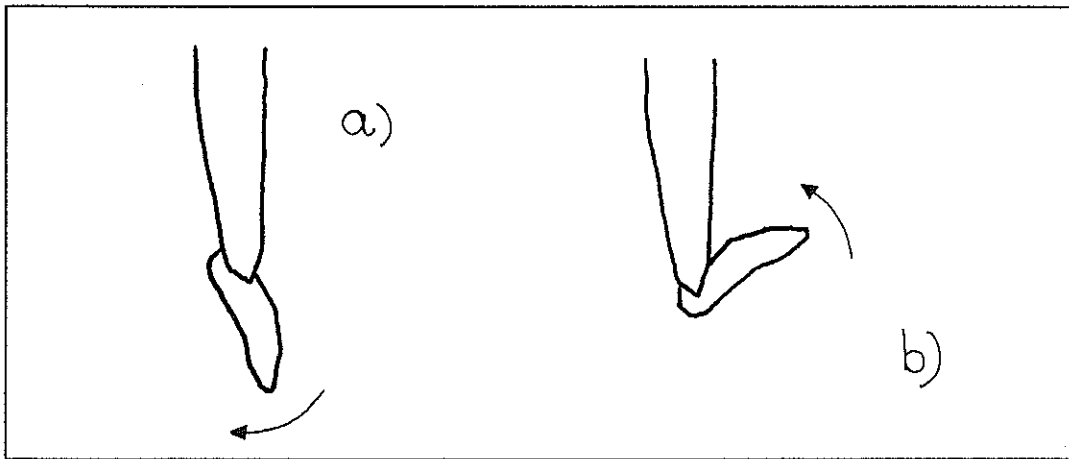
**Grafico 4.2-1** Rotazione sperimentale del piede rispetto un asse normale alla gamba, definita in figura 3.4-8 come angolo  $\delta$ .

Nella fase di kick down:

- si ha, complessivamente, la flessione plantare del piede (fig.4.2-1a) e raggiungimento della massima rotazione anatomica di  $57^\circ$  sperimentali;
- i principali muscoli che intervengono sono: tricipite surale, tibiale posteriore, peronei lungo e breve, flessore lungo dell'alluce, flessore lungo delle dita;

Nella fase di kick up:

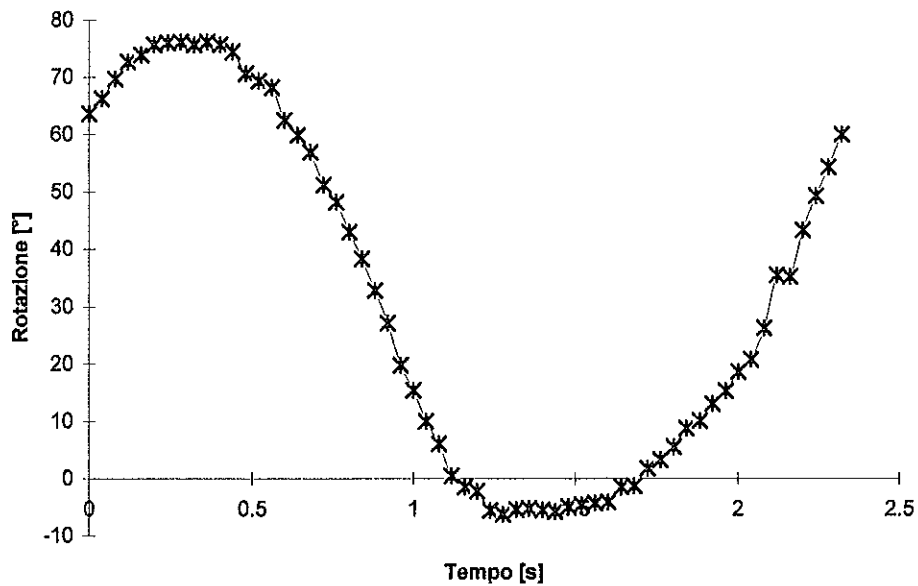
- si ha, complessivamente, la flessione dorsale del piede (fig.4.2-1b) con una rotazione minima di  $10.5^\circ$  sperimentali;
- i principali muscoli che intervengono sono: tibiale anteriore, estensore lungo dell'alluce, estensore lungo delle dita, peroneo anteriore.



**Figura 4.2-1** a) Flessione plantare del piede; b) Flessione dorsale del piede.

### 4.3 COMPORTAMENTO DELLA GAMBA E DEL GINOCCHIO

La rotazione della gamba rispetto un asse parallelo alla coscia, per il ciclo di pinneggiata studiato (andatura lenta con pinne lunghe), ha il seguente andamento:



**Grafico 4.3-1** Rotazione sperimentale della gamba rispetto un asse parallelo alla coscia, definita in figura 3.4-8 come angolo  $\gamma$ .

Nella fase di kich down:

- si ha, complessivamente, l'estensione della gamba (fig.4.3-1a) e raggiungimento della massima rotazione anatomica di  $-5.8^\circ$  sperimentali;
- i principali muscoli che intervengono sono: quadricipite;

Nella fase di kich up:

- si ha, complessivamente, la flessione della gamba (fig.4.3-1b) con una rotazione massima di  $76.1^\circ$  sperimentali;
- i principali muscoli che intervengono sono: gastrocnemi, semitendinoso, semimembranoso, bicipite femorale, popliteo, gracile, sartorio.

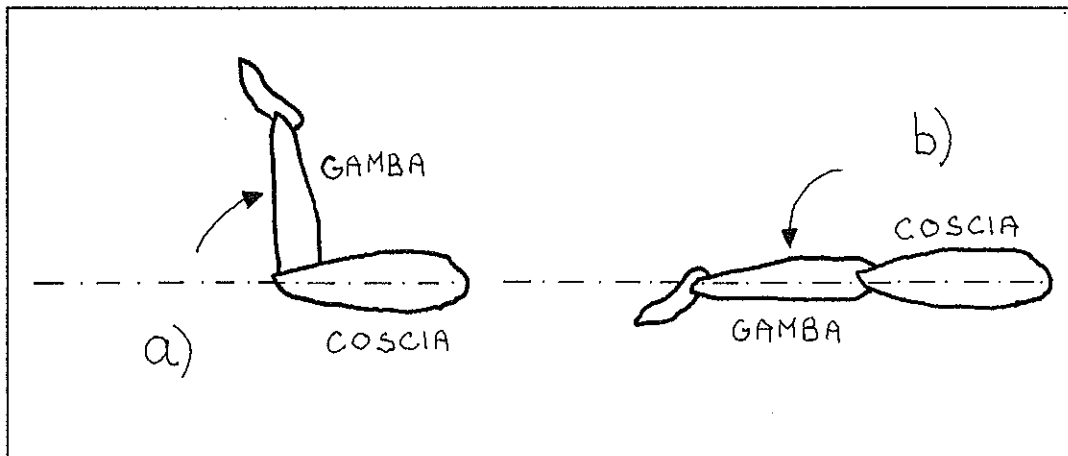
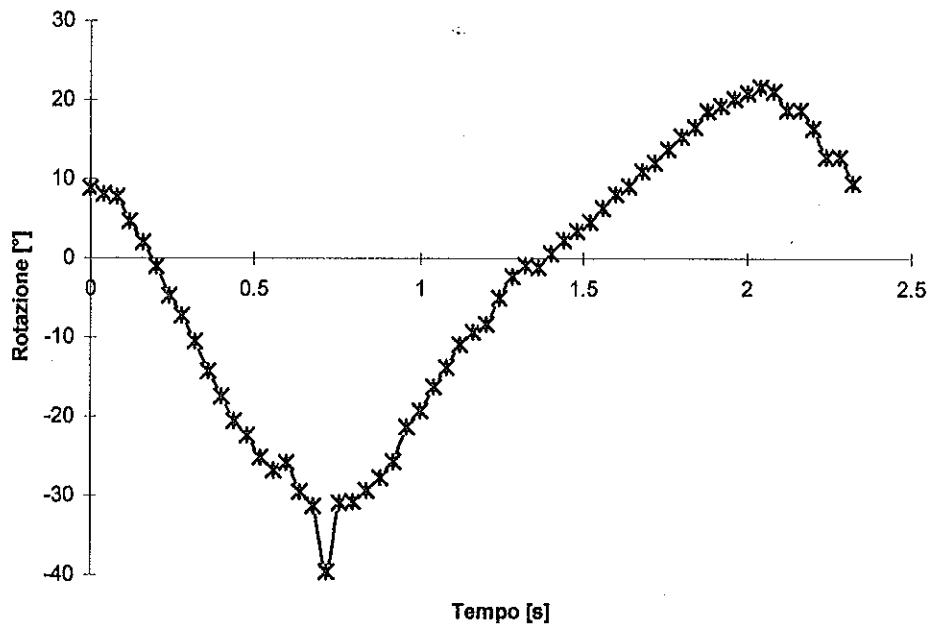


Figura 4.3-1 a) Flessione della gamba; b) Estensione della gamba.

#### 4.4 COMPORTAMENTO DELLA COSCIA E DELL'ANCA

La rotazione della coscia rispetto un asse parallelo alla colonna vertebrale, per il ciclo di pineggiata studiato (andatura lenta con pinne lunghe), ha il seguente andamento:





**Grafico 4.4-1** Rotazione sperimentale della coscia rispetto un asse parallelo alla colonna vertebrale, definita in figura 3.4-8 come angolo  $\beta$ .

Nella fase di kick down:

- si ha, complessivamente, la flessione della coscia (fig.4.4-1a) con una rotazione massima di  $-39.6^\circ$  sperimentali;
- i principali muscoli che intervengono sono: ileo-psoas, retto femorale, sartorio, tensore della fascia lata, fasci anteriori del medio gluteo, pettineo, breve e lungo adduttore, gracile.

Nella fase di kick up:

- si ha, complessivamente, l'estensione della coscia (fig.4.4-1b) con una rotazione massima di  $21^\circ$  sperimentali;

- i principali muscoli che intervengono sono: capo lungo del bicipite femorale, semitendinoso e semimembranoso, grande gluteo, fibre posteriori del grande adduttore.

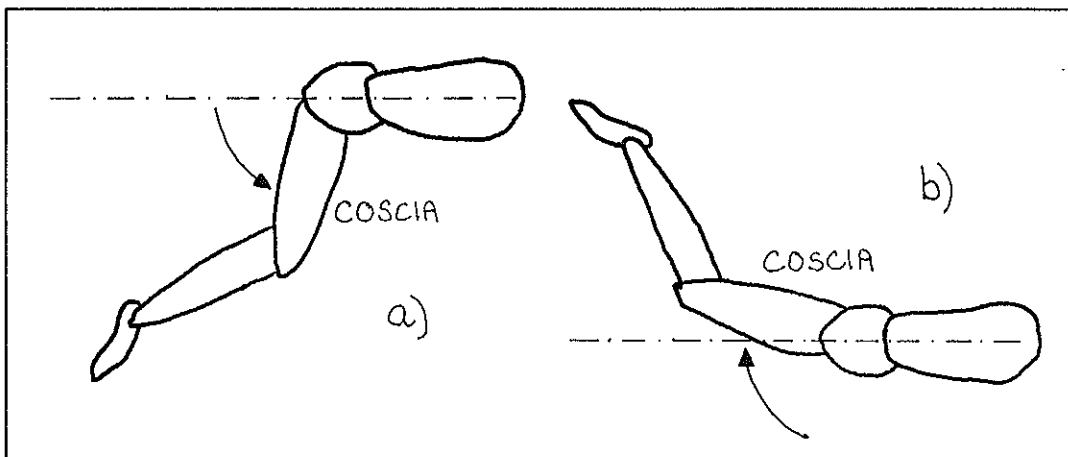
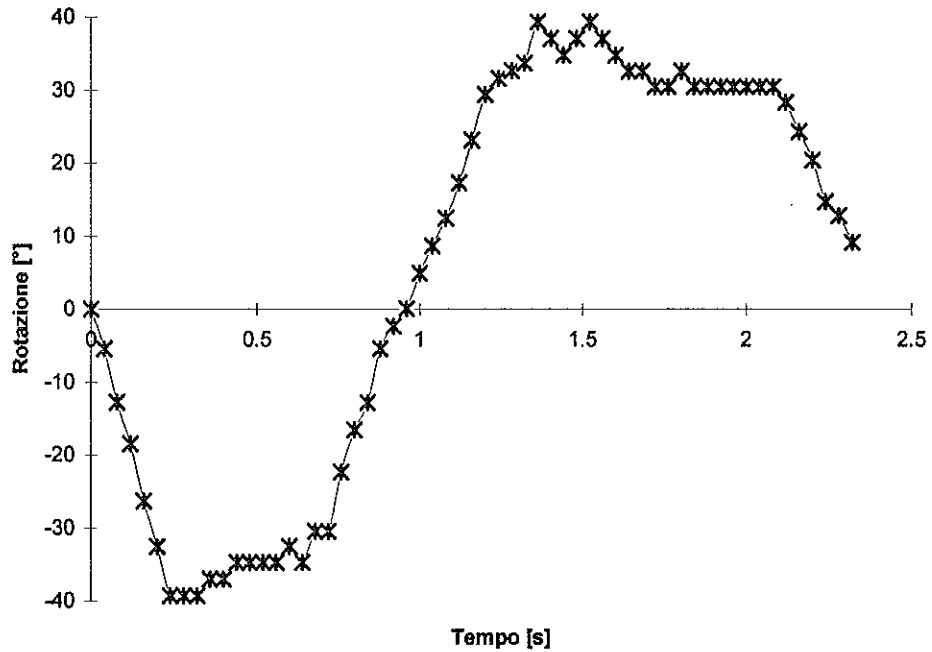


Figura 4.4-1 a) Flessione della coscia; b) Estensione della coscia.

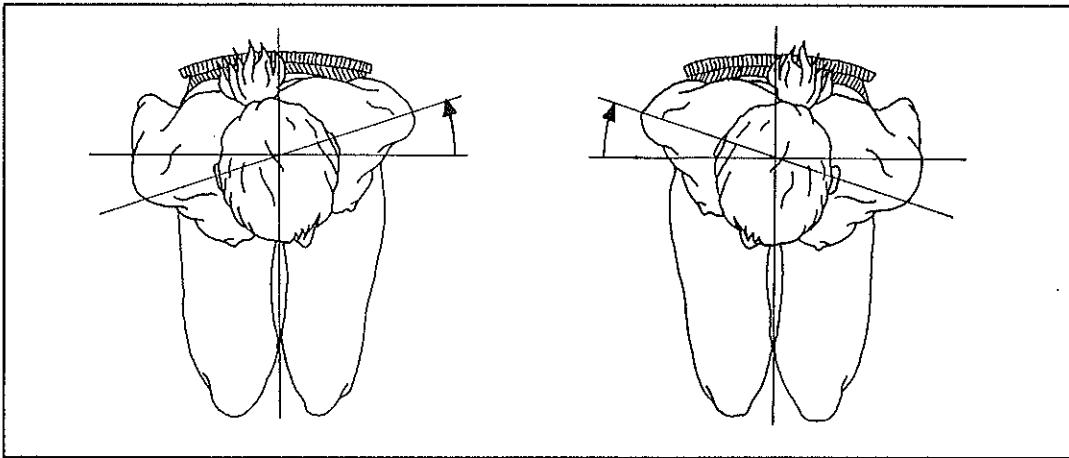
#### **4.5 COMPORTAMENTO DEL BACINO E DELLA COLONNA VERTEBRALE**

La rotazione del bacino, attorno l'articolazione fittizia, rispetto un asse parallelo alla colonna vertebrale, ha il seguente andamento:



**Grafico 4.5-1** Rotazione del bacino, attorno l'articolazione fittizia, rispetto un asse parallelo alla colonna vertebrale, definita in figura 3.4-8 come angolo  $\alpha$ .

Per semplificare l'esposizione si è assunto che sia il bacino a ruotare, ma in realtà essendo il bacino collegato rigidamente alla colonna vertebrale, è la colonna vertebrale a ruotare rispetto il suo asse longitudinale (fig.4.5-1).



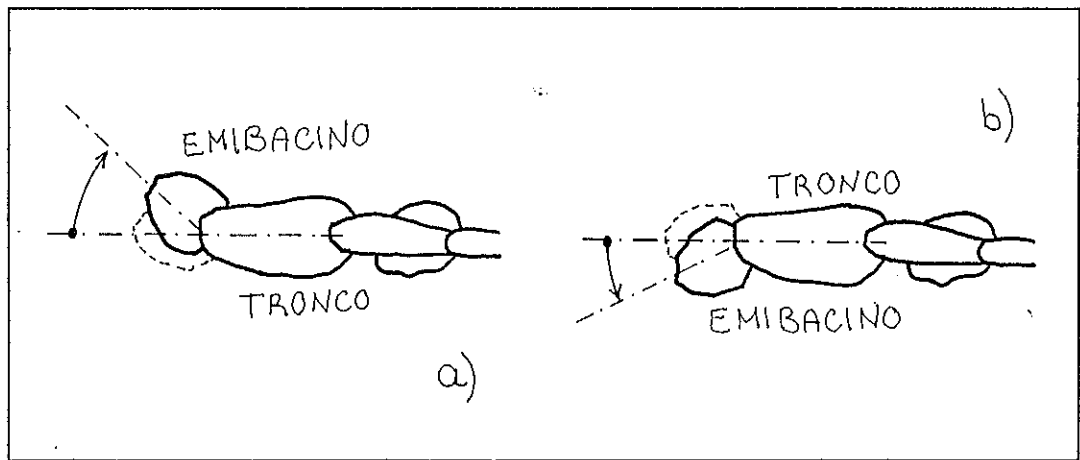
**Figura 4.5-1** Rotazione della colonna vertebrale rispetto il suo asse longitudinale.

Nella fase di kich down:

- si ha, complessivamente, la rotazione oraria del bacino (fig.4.5-2a) con una rotazione massima di  $39.3^\circ$  sperimentali;
- i principali muscoli che intervengono sono: obliquo interno sinistro dell'addome, obliquo esterno destro dell'addome, trasverso sinistro dell'addome, sacro-spinale sinistro, trasverso-spinoso destro.

Nella fase di kich up:

- si ha, complessivamente, la rotazione antioraria del bacino (fig.4.5-2b) con una rotazione massima di  $-39.4^\circ$  sperimentali;
- i principali muscoli che intervengono sono: obliquo interno destro dell'addome, obliquo esterno sinistro dell'addome, trasverso destro dell'addome, sacro-spinale destro, trasverso-spinoso sinistro.



**Figura 4.5-2** a) Rotazione oraria del bacino; b) Rotazione antioraria del bacino.

## **CAP. 5 ANALISI NUMERICA DEL PROBLEMA MECCANICO E BIOMECCANICO**

In questo capitolo, s'intende riportare la costruzione del modello matematico utilizzato nelle simulazioni della pinneggiata ad andatura economica con pinne lunghe rilevata in vasca.

A tale scopo si è usato un programma di modellazione bidimensionale chiamato *Working\_Model*, capace di riprodurre il mondo della meccanica newtoniana simulando l'azione di sistemi di forze (forze lineari, momenti, campi di forze, ...) e vincoli (molle, smorzatori, pulegge, cerniere, guide, ...).

L'analisi, essendo *Working\_Model* (WM) bidimensionale, è eseguita sul piano sagittale, però, mediante opportuni artifici si tenuto conto anche della terza dimensione (profondità).

L'atleta modellato al calcolatore utilizzato per la simulazione della pinneggiata, è indicato per semplicità con il nome di FLIPPER.

### **5.1 COSTRUZIONE DEL CORPO DI FLIPPER**

In base alle caratteristiche anatomiche dell'atleta D, preso a riferimento per la pinneggiata ad andatura economica con pinne lunghe, si sono disegnati direttamente su WM dei poligoni rappresentanti le sezioni sagittali di ciascun membro (fig.5.1-1), definendone:

- forma;

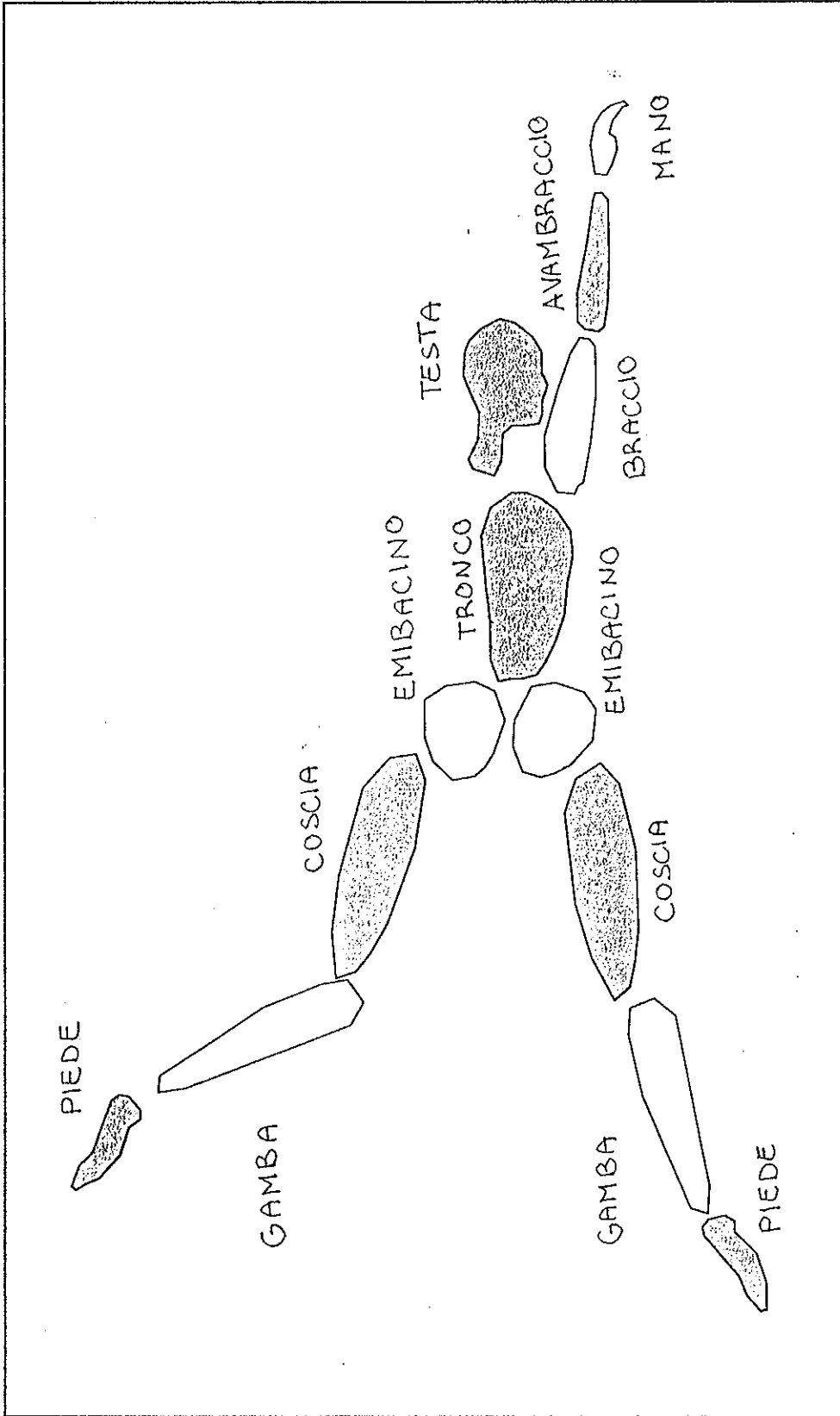


Figura 5.1-1 Poligoni rappresentanti le sezioni sagittali dei membri componenti il corpo di Flipper.

- dimensioni;
- massa;
- momento d'inerzia.

Una approfondita ricerca bibliografica ha fornito i seguenti valori di massa e momento d'inerzia dei membri appartenenti ad una persona di peso, età, sesso, coincidenti a quelli dell'atleta D preso a riferimento [9]:

	<b>Massa M [Kg]</b>	<b>Momento d'inerzia I<sub>z</sub> [Kg*m<sup>2</sup>]</b>
<b>Mano</b>	0.4165	0.001
<b>Avambraccio</b>	1.268	0.00895
<b>Spalla con braccio</b>	4.313	0.0298
<b>Testa</b>	4.537	0.0337
<b>Torace</b>	19.803	0.3302
<b>Bacino</b>	9.614	0.0541
<b>Coscia</b>	8.7365	0.16775
<b>Gamba</b>	3.827	0.07725
<b>Piede</b>	1.0435	0.0051

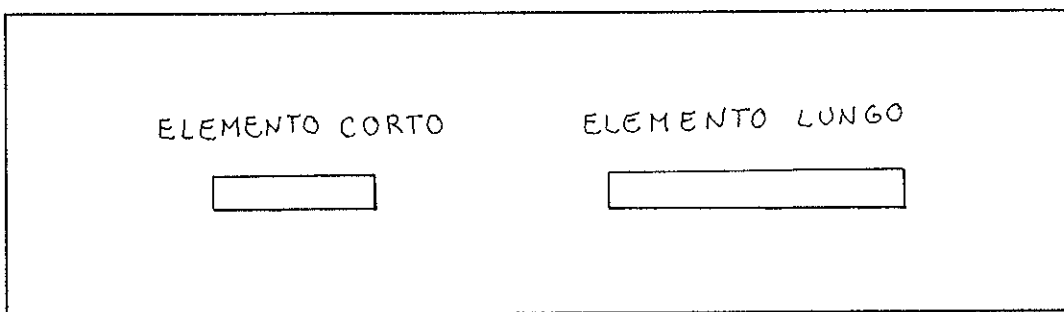
**Tabella 5.1-1** Valori delle masse e dei momenti d'inerzia rispetto un asse ortogonale al piano sagittale, secondo lo studio di H.Hatze (1980).



## 5.2 COSTRUZIONE DELLE PINNE DI FLIPPER

In base alle caratteristiche geometriche delle pinne lunghe usate per le pinneggiate ad andatura economica presa a riferimento (vedi tab 3.2-2, pinna 1), si sono disegnati direttamente su WM dei rettangoli rappresentanti le sezioni sagittali degli elementi discretizzanti le pinne (fig.5.2-1), definendone:

- forma;
- dimensioni;
- massa;
- momento d'inerzia.



**Figura 5.2-1** Poligoni rappresentanti le sezioni sagittali degli elementi discretizzanti le pinne di Flipper.

Da rilievi sperimentali sulle pinne si ottiene:

	<b>Massa M [Kg]</b>	<b>Momento d'inerzia I<sub>z</sub> [Kg*m<sup>2</sup>]</b>
<b>Elemento corto</b>	0.0476	0.00002
<b>Elemento lungo</b>	0.0884	0.000125

**Tabella 5.2-1** Valori delle masse e dei momenti d'inerzia rispetto un asse ortogonale al piano sagittale.

### **5.3 COSTRUZIONE DEI VINCOLI INTERNI**

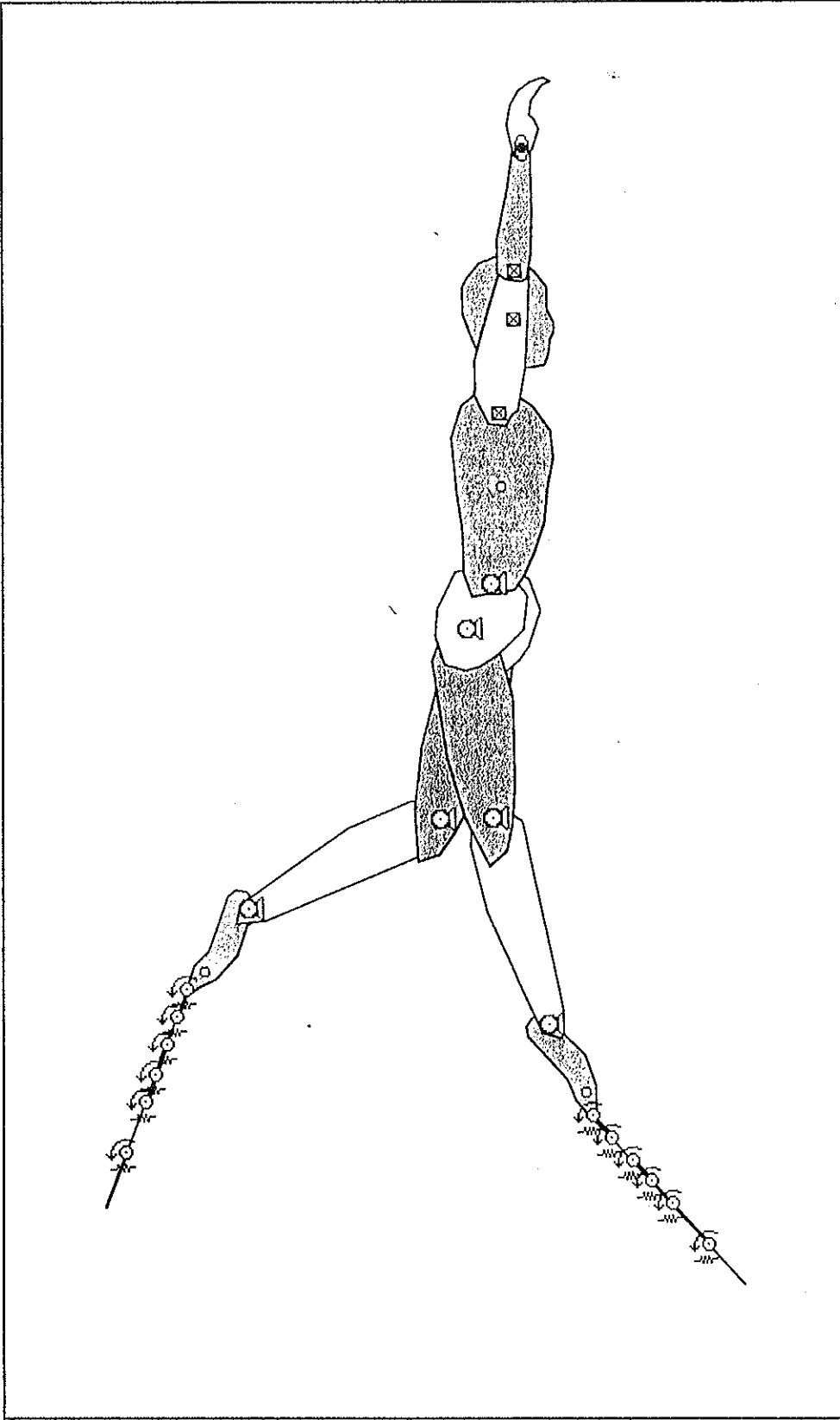
Il corpo di Flipper si è assemblato imponendo dei legami, detti interni, tra membri consecutivi (fig.5.3-1):

- ⇒ vincolo rigido (Rigid Joint) tra la mano e l'avambraccio;
- ⇒ vincolo rigido tra l'avambraccio ed il braccio;
- ⇒ vincolo rigido tra il braccio ed il torace;
- ⇒ vincolo rigido tra il torace e la testa;
- ⇒ cerniera (Pin Joint) tra il torace ed il bacino;
- ⇒ cerniera tra il bacino e la coscia;
- ⇒ cerniera tra la coscia e la gamba;
- ⇒ cerniera tra la gamba ed il piede.

Per non appesantire inutilmente l'analisi, l'insieme dei membri costituito da mano, avambraccio, braccio, torace e testa, si è schematizzato come unico, anche perché durante la pinneggiata ha solo una funzione stabilizzatrice e non propulsiva.

Similmente a quanto fatto per il corpo di Flipper, le sue pinne si sono assemblate imponendo delle molle rotazionali (Rotational Springs) e degli smorzatori rotazionali (Rotational Dampers), tra membri consecutivi (fig.5.3-1). Le costanti elastiche e di smorzamento di tali vincoli, sono state quantificate con le prove dinamiche di laboratorio (cap.7,8) e raccolte in tab.8.6-2.

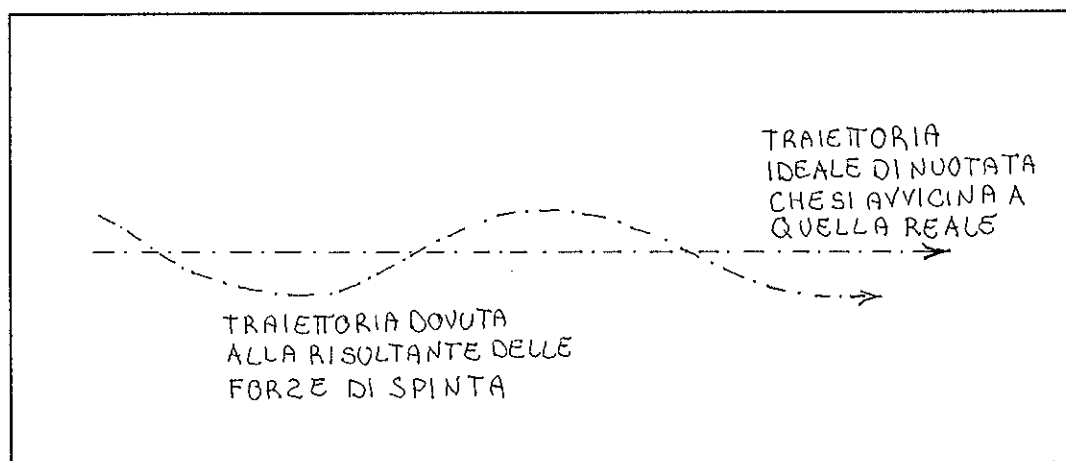
Infine, si sono unite le pinne ai piedi di Flipper con un vincolo rigido (fig.5.3-1).



**Figura 5.3-1** Risultato dell'assemblaggio di Flipper con le sue pinne tramite degli opportuni vincoli interni.

## 5.4 COSTRUZIONE DEI VINCOLI ESTERNI

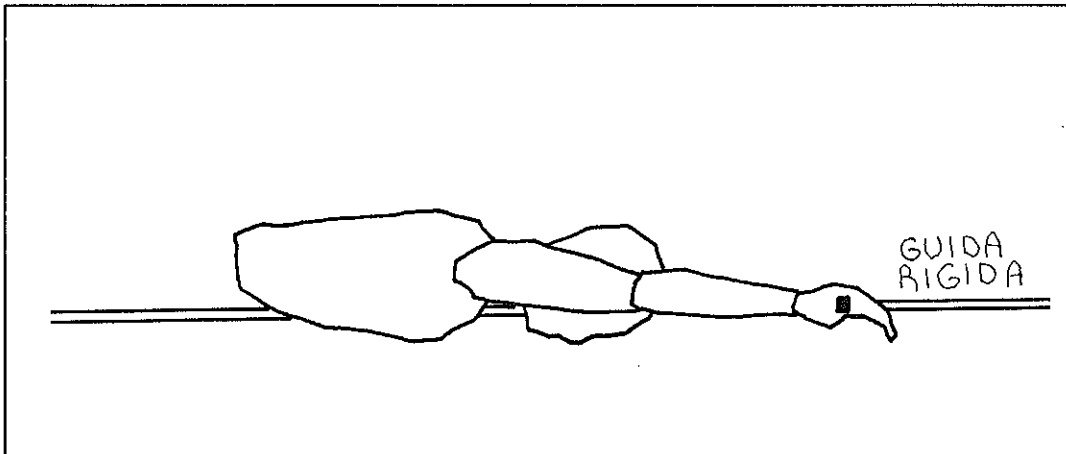
Sperimentalmente si osserva che, durante la pinneggiata reale, l'atleta che intende seguire una traiettoria rettilinea di nuotata (traiettoria ideale), varia attivamente la forma che il suo corpo assume nell'acqua con dei continui movimenti degli arti superiori, per compensare le forze di spinta non parallele a tale traiettoria ideale (fig.5.4-1). In altre parole, se la spinta della pinneggiata tende a farlo salire verso la superficie dell'acqua, l'atleta reagisce inclinando le mani e la testa verso il fondo della piscina, ritornando così alla quota di profondità iniziale.



**Figura 5.4-1** Confronto tra la traiettoria seguita dalla forza di spinta della pinneggiata e quella ideale di nuotata.

Essendo i membri superiori del corpo di Flipper vincolati con dei vincoli rigidi, questi movimenti di compensazione non sono possibili (anche perché complessi da trattare), per questa ragione si è deciso di vincolare l'insieme dei membri costituito da mano, avambraccio, braccio, torace e testa, a scorrere su una guida orizzontale rigida (Keyed Slot Joint). Tale guida blocca rigidamente gli spostamenti trasversali e le

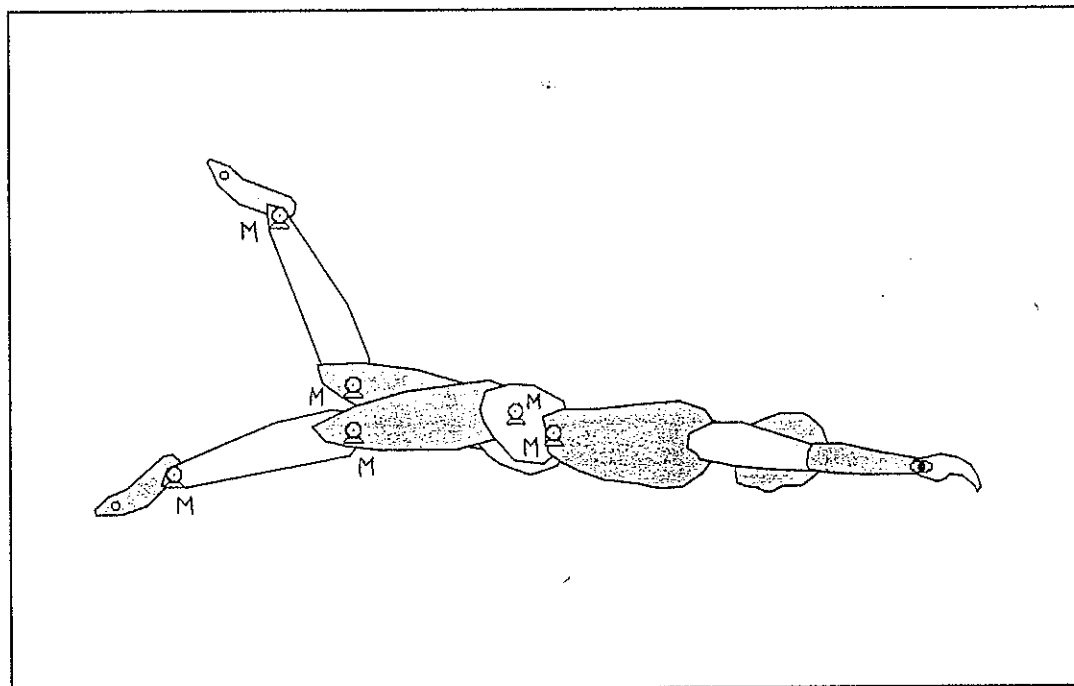
rotazioni, mentre consente gli spostamenti longitudinali senza opporre nessun attrito (fig.5.4-2).



**Figura 5.4-2** Applicazione della guida rigida ai membri rigidamente vincolati.

## **5.5 DEFINIZIONE DELLA LEGGE DI MOTO**

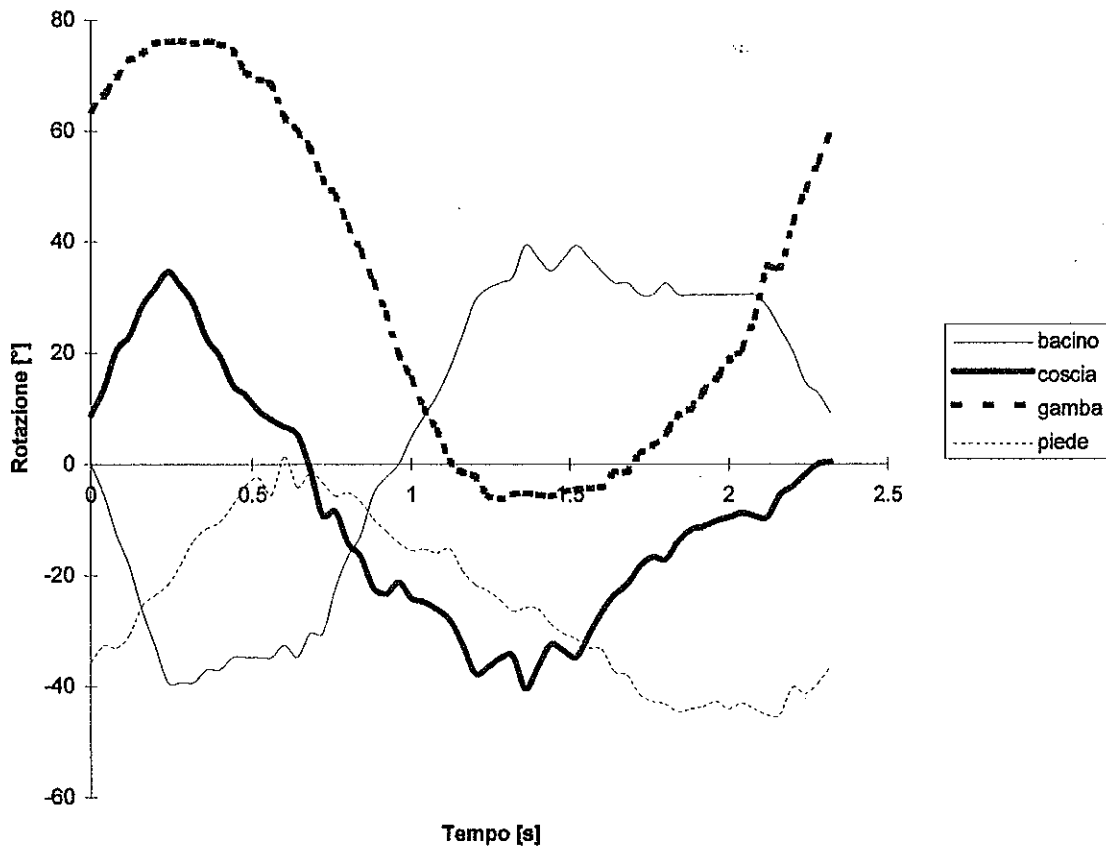
Dovendo imporre a Flipper la cinematica della pinneggiata, in corrispondenza delle cerniere collegate alle articolazioni dei membri mobili si sono posizionati dei motori (Motor), come mostra la figura 5.5-1.



**Figura 5.5-1** Posizionamento dei motori (Motor) in corrispondenza delle articolazioni mobili di Flipper.

Ad ogni motore si è imposta una legge di rotazione nel tempo che approssima gli angoli che definiscono la posizione relativa tra gli arti del ciclo di pinne studiato (andatura lenta con pinne lunghe).

Tali angoli relativi, raccolti in tab.B-1, sono riportati nel grafico 5.5-1.



**Grafico 5.5-1** Angoli sperimentali relativi di rotazione del bacino( $\alpha$ ), coscia( $\beta$ ), gamba( $\gamma$ ), piede( $\delta$ ), definiti come in figura 3.4-8.

Assumendo come angoli relativi iniziali quelli del fotogramma numero uno (tempo = 0), si ha (fig.5.5-2):

$$\alpha_0 = 0.03 [^\circ] ; \beta_0 = 8.8 [^\circ] ; \gamma_0 = 63.69 [^\circ] ; \delta_0 = -35.62 [^\circ].$$

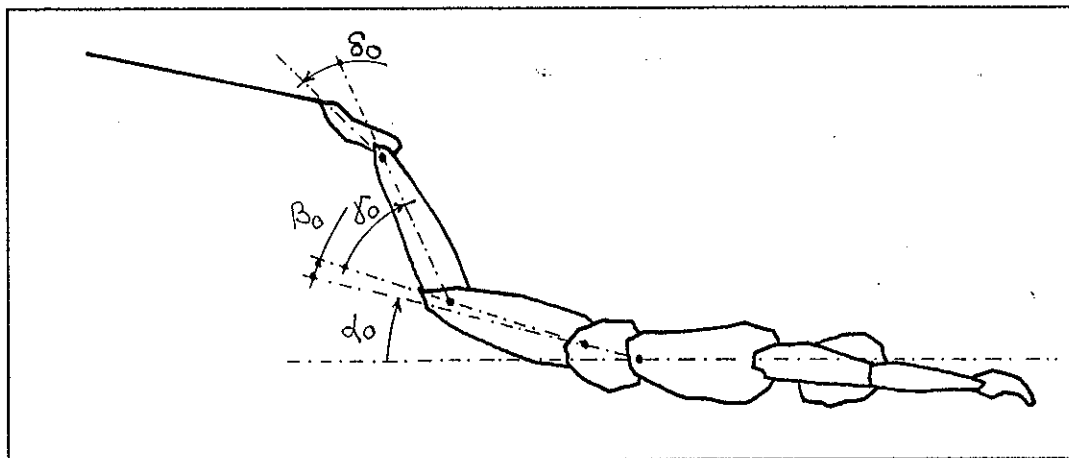


Figura 5.5-2 Configurazione del fotogramma numero uno per  $t=0$ .

quindi gli angoli da approssimare per determinare le leggi di rotazione dei motori valgono:

$$\alpha' = \alpha - \alpha_0$$

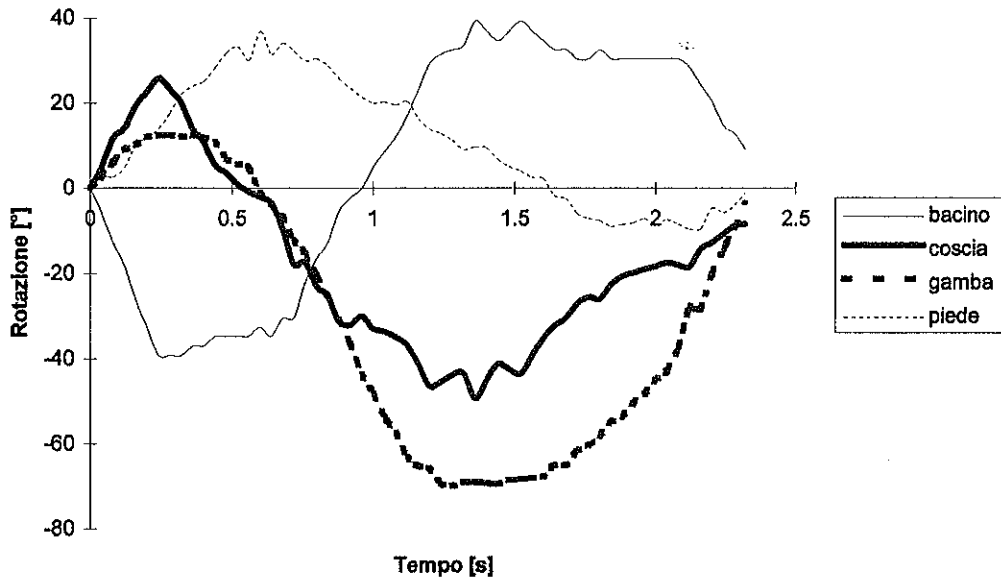
$$\beta' = \beta - \beta_0$$

$$\gamma' = \gamma - \gamma_0$$

$$\delta' = \delta - \delta_0$$

e sono riportati nel grafico 5.5-2.





**Grafico 5.5-2** Angoli relativi di rotazione del bacino( $\alpha'$ ), coscia( $\beta'$ ), gamba( $\gamma'$ ), piede( $\delta'$ ), traslati all'origine degli assi.

Le funzioni approssimanti gli angoli che definiscono la posizione relativa tra gli arti durante la pinneggiata, devono essere periodiche, di periodo pari alla durata sperimentale del ciclo di pinneggiata analizzato.

Il periodo si calcola conoscendo il numero di fotogrammi che compongono il ciclo di pinneggiata analizzato e l'intervallo di tempo tra un fotogramma ed il successivo:

$$T = \boxed{\text{N}^\circ \text{ dei fotogrammi che compongono un ciclo di pinneggiata}} * \boxed{\text{Intervallo di tempo tra un fotogramma ed il successivo}}$$

$$= 59 \cdot 0.04 = 2.36 \text{ [s]}$$

Dalla teoria [10,11] si sa che quando di una funzione periodica si conoscono N punti equispaziati nel periodo, la serie di Fourier che la interpola è caratterizzata da (N/2 -1) armoniche:

$$X(t) = \left(\frac{C_0}{2}\right) + \sum_n [C_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t - \varphi_n)] \quad n = 1, \dots, [N/2-1]$$

dove:

$\omega = (2 \cdot \Pi) / T$  , detta pulsazione;

$\varphi_n \rightarrow$  fase dell'armonica n-esima;

$C_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t - \varphi_n) \rightarrow$  armonica n-esima.

Nel caso in analisi, le funzioni trovate sono composte al massimo da tre armoniche per i seguenti motivi:

- 1) essendo gli angoli rilevati sperimentalmente affetti errore di difficile determinazione, le funzioni da imporre ai motori devono essere approssimanti e non interpolanti;
- 2) il programma di modellazione usato, WM, non accetta espressioni matematiche più lunghe di duecentocinquantacinque caratteri e numeri troppo piccoli ;
- 3) sperimentalmente si osserva che le rotazioni degli arti mobili durante un ciclo di pinneggiata sono caratterizzate da:
  - $\Rightarrow$  un massimo assoluto;
  - $\Rightarrow$  un minimo assoluto;
  - $\Rightarrow$  dei possibili punti di flesso orizzontale;

## Capitolo 5

⇒ nessun massimo o minimo relativo significativo.

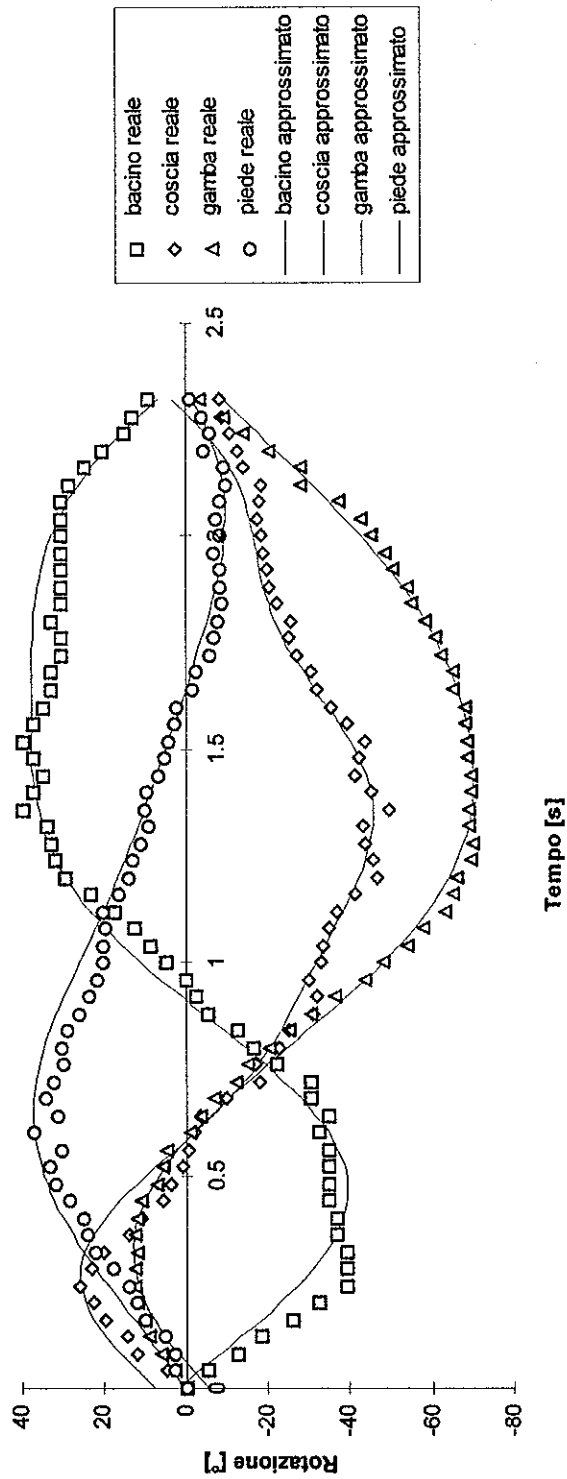
Per l'approssimazione ai minimi quadrati, che rende minima la somma dei quadrati degli scarti tra i valori approssimanti ed i valori misurati, si è usato un apposito programma chiamato Kaleidagraph che permette inoltre di trattare dati e costruire grafici in modo veloce e flessibile. L'unica variabile definibile a priori è la pulsazione, che nel caso in esame è risultata:

$$\omega = (2 * \pi) / T = (2 * \pi) / 2.36 = 2.662 \text{ [Hz]}$$

Tale valore è costante per tutte le armoniche di tutte e quattro le funzioni approssimanti.

La valutazione dei restanti coefficienti caratterizzanti le funzioni approssimanti, al fine di soddisfare i suddetti requisiti ( 1), 2), 3) ) ed ottenere il maggiore coefficiente di correlazione, ha richiesto un lungo e pesante lavoro di analisi per tentativi.

Il confronto tra le funzioni approssimanti trovate (espresse anche analiticamente) e gli angoli relativi rilevati dalle riprese subacquee, è evidenziato in figura 5.5-3.



$$\alpha' = 7.8 + 38.545 * \cos(t * 2.662 + 1.913) + 8.681 * \cos(t^2 * 2.662 + 19.492) \quad R=0.983$$

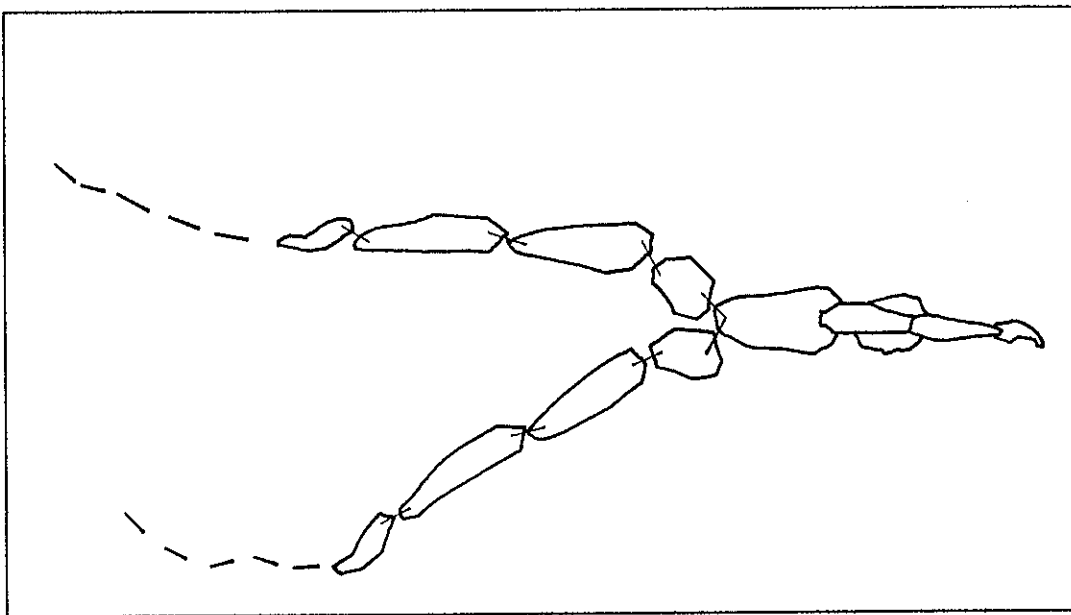
$$\beta' = -14.5 + 30.5 * \cos(t * 2.662 - 0.544) - 6.525 * \cos(t^2 * 2.662 + 20.034) - 4.833 * \cos(t^3 * 2.662 + 1.189) \quad R=0.984$$

$$\gamma' = -32.245 + 41.255 * \cos(t * 2.662 + 18.048) - 4.122 * \cos(t^2 * 2.662 + 19.937) \quad R=0.995$$

$$\delta' = 12.66 + 22.26 * \cos(t * 2.662 + 16.892) - 3.964 * \cos(t^2 * 2.662 + 19.329) \quad R=0.987$$

Figura 5.5-3 Funzioni approssimanti gli angoli relativi al bacino, coscia, gamba, piede.

Se si imponessero tali leggi di rotazione ai motori collegati alle articolazioni dei membri mobili, per  $t = 0$  si passerebbe istantaneamente alle posizioni definite dalle  $\alpha'(t = 0)$ ,  $\beta'(t = 0)$ ,  $\gamma'(t = 0)$ ,  $\delta'(t = 0)$ , che non sono nulle (fig.5.5-3), generando delle accelerazioni, delle forze d'inerzia e dei momenti torcenti di valore infinito. Ciò si traduce in un deassemblaggio degli organi mobili del corpo di Flipper dovuto al cedimento dei vincoli interni (fig.5.5-4).



**Figura 5.5-4** Deassemblaggio degli organi mobili del corpo di Flipper dovuto al cedimento dei vincoli interni.

Questa discontinuità iniziale è dovuta all'inevitabile errore con cui le funzioni trovate approssimano gli angoli che definiscono la posizione relativa tra gli arti durante la pinneggiata.

Il problema si potrebbe risolvere o traslando l'asse delle ascisse rispetto le ordinate o traslando l'asse delle ordinate rispetto le ascisse.

Le conseguenze di queste due azioni su due generiche funzioni sono trattate in figura 5.5-5 e 5.5-6.

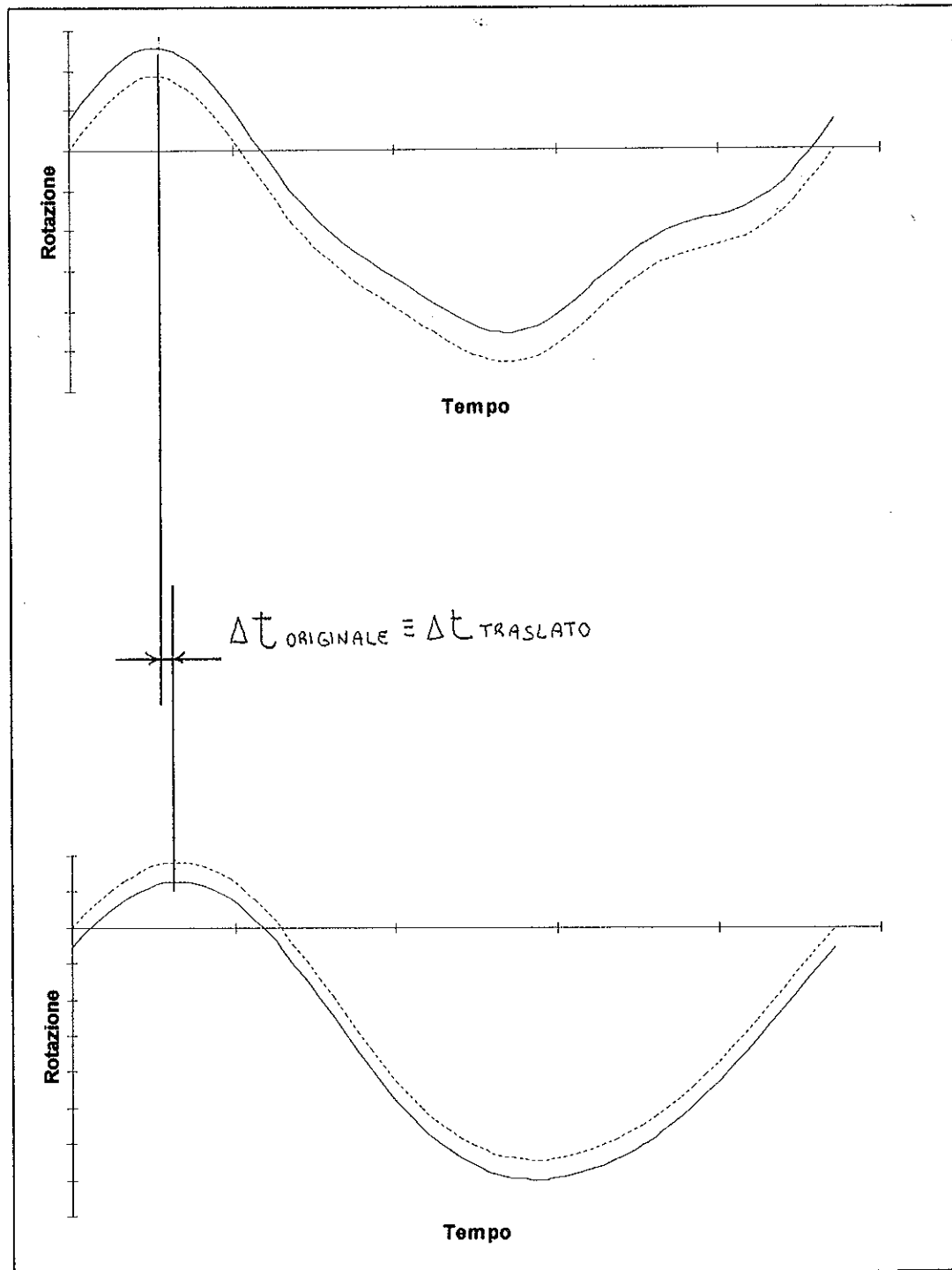


Figura 5.5-5 Traslazione dell'asse delle ascisse rispetto alle ordinate di due funzioni generiche.

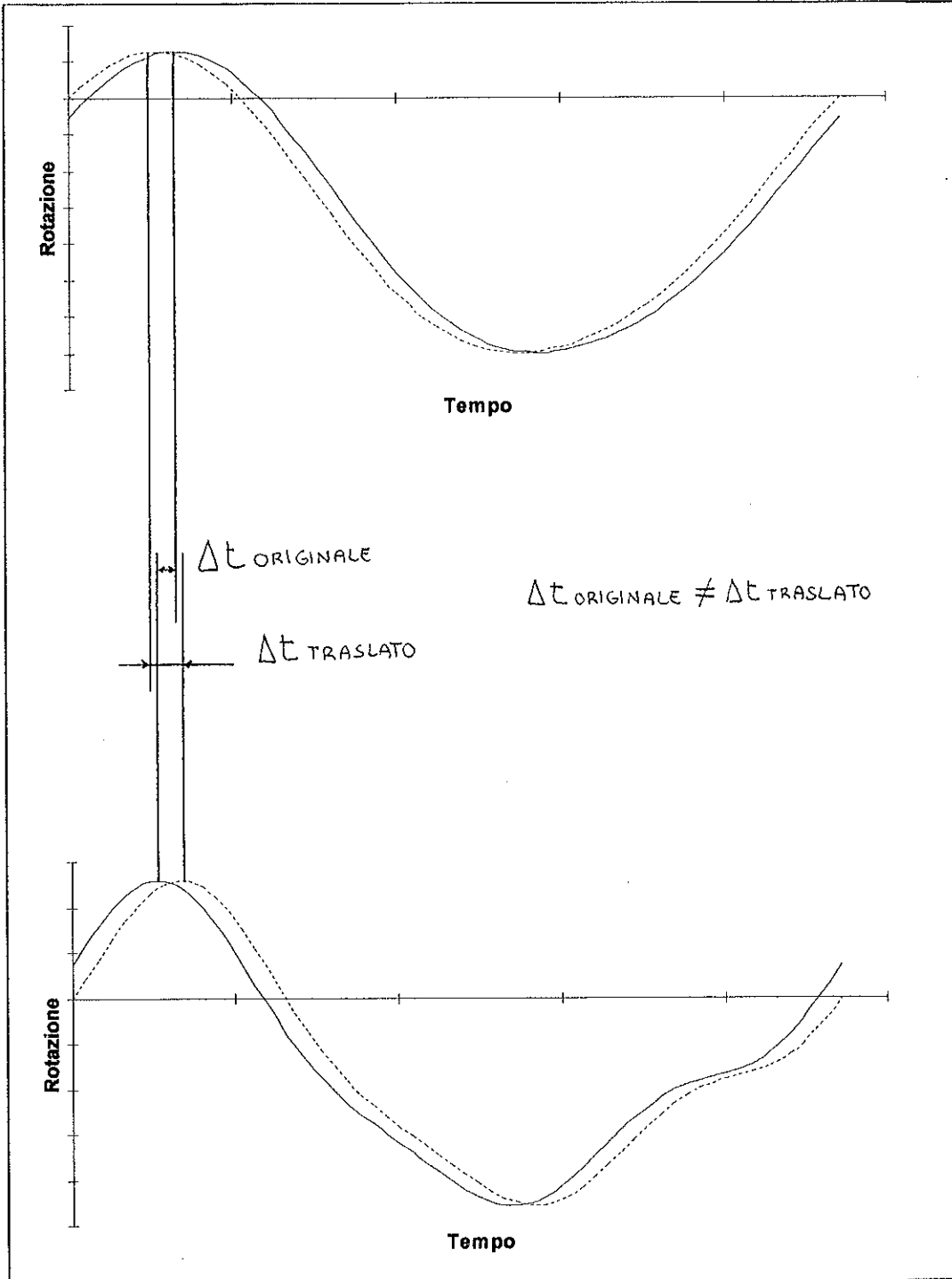


Figura 5.5-6 Traslazione dell'asse delle ordinate rispetto alle ascisse di due funzioni generiche.

Si nota che:

⇒ traslare l'asse delle ascisse rispetto alle ordinate affinché  $\varphi(t=0)$ , significa:

- a) imporre a ciascuna funzione uno sfasamento  $\Delta t_{\varphi}$ ;
- b) per funzioni diverse tale sfasamento non coincide;
- c) quando si impongono tali sfasamenti viene meno la sincronia che precedentemente legava le diverse funzioni.

⇒ traslare l'asse delle ordinate rispetto alle ascisse affinché  $\varphi(t=0)$ , significa:

- a) sommare a ciascuna funzione una costante  $\Delta\varphi$ ;
- b) per funzioni diverse tale costante non coincide;
- c) quando si sommano tali costanti non viene meno la sincronia che precedentemente legava le diverse funzioni.

Gli sfasamenti e le costanti necessarie affinché, le funzioni approssimanti trovate, per  $t=0$  passino per l'origine degli assi, valgono:

$\Delta t_{\alpha'} = 0.01447$ [s]	$\Delta r_{\alpha'} = 1.81058$ [°]
$\Delta t_{\beta'} = -0.06890$ [s]	$\Delta r_{\beta'} = 7.37193$ [°]
$\Delta t_{\gamma'} = 0.05840$ [s]	$\Delta r_{\gamma'} = -5.45264$ [°]
$\Delta t_{\delta'} = -0.01160$ [s]	$\Delta r_{\delta'} = 0.74095$ [°]

Come previsto, gli sfasamenti  $\Delta t_{\varphi}$  delle varie funzioni approssimanti non coincidono, quindi la soluzione di traslare l'asse delle ordinate rispetto alle ascisse, determinerebbe una perdita di sincronia tra i movimenti del bacino, della coscia, della gamba e del piede. Tale conseguenza rende l'analisi cinematica del movimento della gambata completamente errata, perciò questa soluzione è stata scartata.



Adottare correttamente la soluzione di traslare l'asse delle ascisse rispetto alle ordinate, significa aggiornare gli angoli iniziali (fig.5.5-2) relativi al fotogramma numero uno (tempo = 0):

$$\begin{aligned}\alpha''_0 &= \alpha_0 + \Delta r_{\text{bacino}} = 0.03 + 1.81058 = 1.8406 \quad [^\circ] \\ \beta''_0 &= \beta_0 + \Delta r_{\text{anca}} = 8.826 + 7.37193 = 16.1980 \quad [^\circ] \\ \gamma''_0 &= \gamma_0 + \Delta r_{\text{ginocchio}} = 63.69 - 5.45264 = 58.2374 \quad [^\circ] \\ \delta''_0 &= \delta_0 + \Delta r_{\text{caviglia}} = -35.62 + 0.74095 = -34.8791 \quad [^\circ]\end{aligned}$$

è rivalutare le funzioni approssimanti nel seguente modo:

$$\begin{aligned}\alpha''(t) &= \alpha(t) - \Delta r_{\text{bacino}} \\ \beta''(t) &= \beta(t) - \Delta r_{\text{anca}} \\ \gamma''(t) &= \gamma(t) - \Delta r_{\text{ginocchio}} \\ \delta''(t) &= \delta(t) - \Delta r_{\text{caviglia}}\end{aligned}$$

Sperimentalmente si nota uno sfasamento pari ad un semiperiodo ( $T/2$ ) tra la gambata sinistra e la gambata destra, quindi, riassumendo, le leggi di rotazione da imporre ai motori (Motor) collegati alle articolazioni dei membri mobili che determinano la cinematica della pinneggiata e gli angoli iniziali relativi al fotogramma numero uno (tempo = 0), sono raccolte in tabella 5.5-1.

### Gambata destra

$$\begin{aligned} \alpha''(t) &= 5.989 + 38.545 \cdot \cos(t \cdot 2.662 + 1.913) + 8.681 \cdot \cos(t^2 \cdot 2.662 + 19.492) & [^\circ] \\ \beta''(t) &= -21.872 + 30.5 \cdot \cos(t \cdot 2.662 - 0.544) - 6.525 \cdot \cos(t^2 \cdot 2.662 + 20.034) - 4.833 \cdot \cos(t^3 \cdot 2.662 + 1.189) & [^\circ] \\ \gamma''(t) &= -26.792 + 41.255 \cdot \cos(t \cdot 2.662 + 18.048) - 4.122 \cdot \cos(t^2 \cdot 2.662 + 19.937) & [^\circ] \\ \delta''(t) &= 11.919 + 22.26 \cdot \cos(t \cdot 2.662 + 16.892) - 3.964 \cdot \cos(t^2 \cdot 2.662 + 19.329) & [^\circ] \\ \alpha''_o &= 1.8406 [^\circ] ; \beta''_o = 16.1980 [^\circ] ; \gamma''_o = 58.2374 [^\circ] ; \delta''_o = -34.8791 [^\circ] \end{aligned}$$

### Gambata sinistra

$$\begin{aligned} \alpha''(t) &= -19.876 + 38.545 \cdot \cos((t+1.18) \cdot 2.662 + 1.913) + 8.681 \cdot \cos((t+1.18)^2 \cdot 2.662 + 19.492) & [^\circ] \\ \beta''(t) &= 26.703 + 30.5 \cdot \cos((t+1.18) \cdot 2.662 - 0.544) - 6.525 \cdot \cos((t+1.18)^2 \cdot 2.662 + 20.034) - 4.833 \cdot \cos((t+1.18)^3 \cdot 2.662 + 1.189) & [^\circ] \\ \gamma''(t) &= 30.613 + 41.255 \cdot \cos((t+1.18) \cdot 2.662 + 18.048) - 4.122 \cdot \cos((t+1.18)^2 \cdot 2.662 + 19.937) & [^\circ] \\ \delta''(t) &= -4.893 + 22.26 \cdot \cos((t+1.18) \cdot 2.662 + 16.892) - 3.964 \cdot \cos((t+1.18)^2 \cdot 2.662 + 19.329) & [^\circ] \\ \alpha''_o &= 27.7058 [^\circ] ; \beta''_o = -32.3766 [^\circ] ; \gamma''_o = 0.8324 [^\circ] ; \delta''_o = -18.0667 [^\circ] \end{aligned}$$

**TABELLA 5.5-1** Leggi di rotazione da imporre ai motori (Motor) collegati alle articolazioni e relativi angoli iniziali .

## 5.6 DEFINIZIONE DEI CAMPI DI FORZE

Si è imposto che il campo gravitazionale agente su Flipper sia nullo perché durante le prove in acqua, gli atleti hanno dimostrato una disposizione, rispetto il fondo della vasca, pressoché neutra.

Per simulare l'effetto idrodinamico dell'acqua, si è creato un campo di forze che agisce sui membri costituenti il corpo di Flipper e sugli elementi costituenti le sue pinne. Dalla teoria che descrive le forze idrodinamiche agenti sui corpi in movimento [6], la resistenza all'avanzamento di un corpo completamente immerso nell'acqua, vale:

$$R = \frac{1}{2} \cdot C_R \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

dove:

$C_R$  → coefficiente di resistenza idrodinamico, dato dalla somma del coefficiente d'attrito  $C_a$  e del coefficiente di forma (o di pressione)  $C_p$ ;

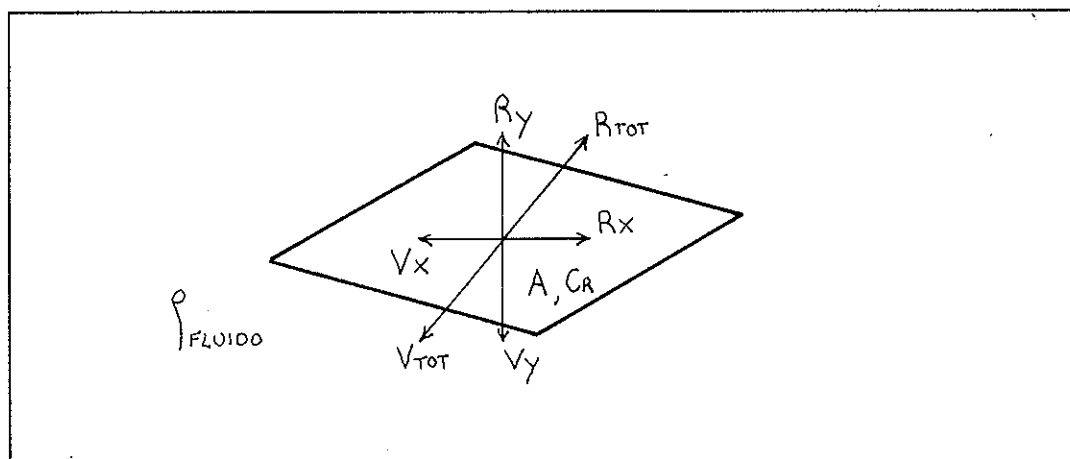
$\rho$  → densità dell'acqua;

$A$  → proiezione del corpo solido su un piano normale alla direzione del moto, detta sezione maestra;

$v$  → velocità del corpo solido lungo la direzione del moto.

Un esauriente approfondimento della teoria che descrive le forze idrodinamiche agenti sui corpi in movimento, è sviluppato in appendice C.

Lo spostamento di un membro di Flipper o di un elemento delle sue pinne in questo campo di forze ( $\rightarrow$  azione), genera una reazione che secondo la sua direzione e verso può tradursi in una forza che contribuisce positivamente o negativamente all'avanzamento nella direzione della nuotata (fig.5.6-1).



**Figura 5.6-1** Effetto del principio di azione e reazione in un elemento di pinna che ruota.

Scomponendo l'azione del campo di forze lungo la direzione longitudinale e trasversale, si scrive:

$$F_x = -\left(\frac{1}{2} \cdot C_{RX} \cdot \rho \cdot A_x \cdot v_x^2\right)$$

$$F_y = -\left(\frac{1}{2} \cdot C_{RY} \cdot \rho \cdot A_y \cdot v_y^2\right)$$

dove il segno negativo al secondo membro è giustificato dal principio di azione e reazione, mentre:

## Capitolo 5

- $C_{Rx}$  e  $C_{Ry}$  , sono i coefficienti di resistenza idrodinamici di ciascun corpo quando è investito da una corrente fluida di direzione longitudinale e trasversale rispettivamente;
- $A_x$  e  $A_y$  , sono le sezioni maestre di ciascun corpo riferite l'asse longitudinale e trasversale;
- $v_x$  e  $v_y$  , sono le velocità di spostamento di ciascun corpo lungo la direzione longitudinale e trasversale rispettivamente.

Nel linguaggio di programmazione usato dal programma di modellazione WM, il campo di forze, espresso in Newton, agente su tutti i corpi facenti parte del sistema, si scrive:

$$F_x = -\left(\frac{1}{2} \cdot self.staticfric \cdot self.v.x \cdot abs(self.v.x) \cdot self.elasticity \cdot 998.3\right)$$

$$F_y = -\left(\frac{1}{2} \cdot self.kineticfric \cdot self.v.y \cdot abs(self.v.y) \cdot self.charge \cdot 998.3\right)$$

dove:

`self. ...` → è una funzione che chiama ogni corpo condizionato dal campo di forze;

`.staticfric` → è la variabile corrispondente alla sezione maestra riferita all'asse longitudinale del corpo  $i$ -esimo di profondità  $Z$ , valutata con la seguente funzione :

$$\text{section}(\text{body}[i], \text{vector}(1.0, 0.0)) * Z \quad [\text{m}^2]$$

.kineticfric → è la variabile corrispondente alla sezione maestra riferita all'asse trasversale del corpo i-esimo di profondità Z, valuta con la seguente funzione:

$$\text{section}(\text{body}[i], \text{vector}(0.0, 1.0)) * Z \quad [\text{m}^2]$$

.v.x e .v.y → sono le velocità di spostamento del corpo i-esimo lungo la direzione longitudinale e trasversale rispettivamente, [m/s];

.elasticity e .charge → sono le variabili corrispondenti ai coefficienti di resistenza idrodinamici del corpo i-esimo quando è investito da una corrente fluida di direzione longitudinale e trasversale rispettivamente;

998.3 → è densità dell'acqua a 15°C espressa in  $[(\text{N} \cdot \text{s}^2) / \text{m}^4]$ .

### **5.6.1 PRIMA VALUTAZIONE DEI COEFFICIENTI DI RESISTENZA IDRODINAMICA**

In appendice E, sono raccolti i grafici e le tabelle che forniscono i valori dei coefficienti di resistenza idrodinamica  $C_R$  in base alla forma dei corpi solidi in moto nel campo fluido ed ai relativi numeri di Reynolds della corrente indisturbata.

Non conoscendo, in questa fase dello studio, le velocità di spostamento di tutti gli elementi mobili che costituiscono il corpo di Flipper e le sue pinne, non si possono determinare con precisione i relativi numeri di Reynolds necessari per valutare i coefficienti di resistenza idrodinamica che caratterizzano il campo di forze simulante l'azione dell'acqua sul modello.

## Capitolo 5

Assumendo come ipotesi di tentativo che i numeri di Reynolds di tutti gli elementi mobili siano maggiori di  $10^5$ , i coefficienti di resistenza letti sulle tabelle C-1 e C-2 sono raccolti in tabella 5.6.1-1.

Elemento	Corpo solido semplice preso a riferimento	Coefficiente di resistenza idrodinamico	
		CRX	CRY
Insieme di membri rigidamente vincolati	Cilindro parallelo alla corrente	0.928	-
Bacino	Cilindro trasversale alla corrente	0.658	0.658
Coscia	Cilindro trasversale alla corrente	0.662	0.734
Gamba	Cilindro trasversale alla corrente	0.725	0.725
Piede	Cilindro trasversale alla corrente	0.664	0.673
Generico tratto di pinna	Lastra trasversale alla corrente	1.1636	1.1636

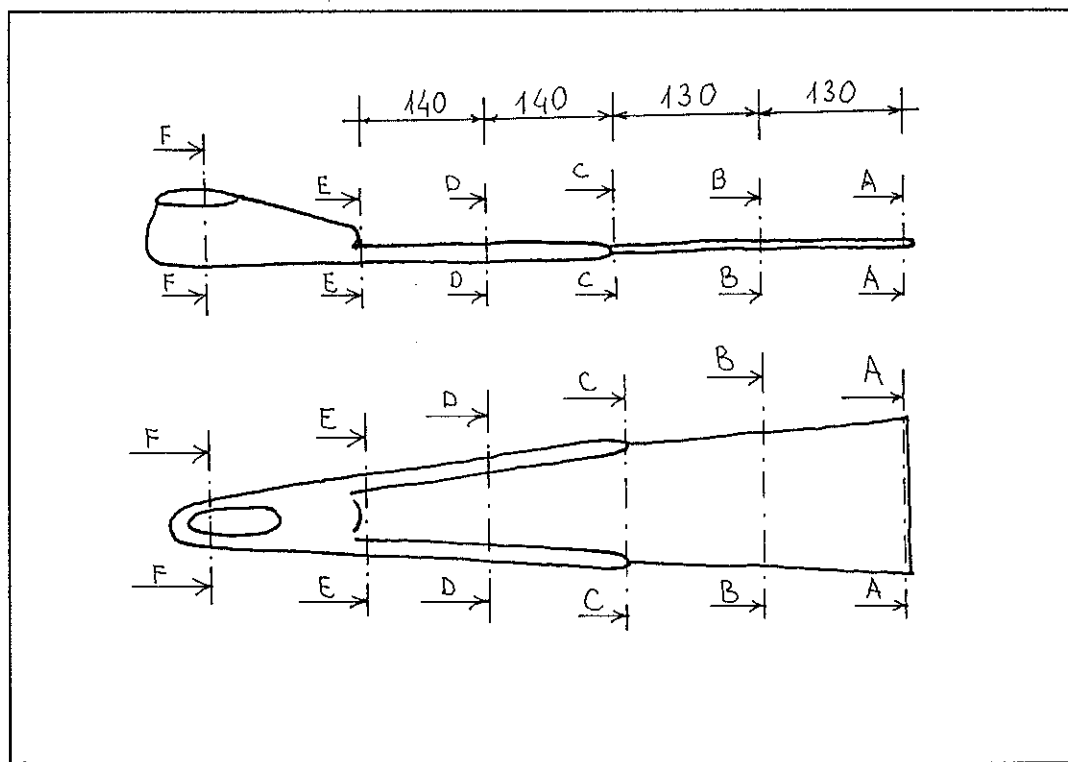
**Tabella 5.6.1-1** Coefficienti di resistenza degli elementi mobili che costituiscono il corpo di Flipper e le sue pinne valutati supponendo che i relativi numeri di Reynolds siano maggiori di  $10^5$ .

In sede di taratura del modello (par.9.2), si verificherà se l'ipotesi assunta sul valore del numero di Reynolds sia o no aderente alla realtà.

## CAP. 6 PROVE STATICHE

Al fine di quantificare le caratteristiche meccaniche delle pinne usate nella pinneggiata ad andatura lenta con pinne lunghe, presa a riferimento nella costruzione del modello numerico, si sono inizialmente eseguite delle prove di rigidezza flessionale con carico applicato statico seguite poi da delle più complete prove con carico ciclicamente applicato dinamico (cap.7).

Per definire univocamente le sezioni della pinna da vincolare e/o caricare, valide sia per le prove statiche sia per le prove dinamiche, sono state tracciate e nominate delle linee di riferimento, come evidenziato in figura 6-1.



**Figura 6-1** Sezioni di riferimento usate sia nelle prove statiche sia nelle prove dinamiche.



## Capitolo 6

Sulla pinna le sezioni di riferimento sono state posizionate tenendo conto:

- a) dell'ingombro longitudinale degli strumenti di misura;
- b) di una distribuzione longitudinale uniforme;
- c) dei punti dove variano sensibilmente le caratteristiche meccaniche:
  - ⇒ variazione della sezione della pala;
  - ⇒ presenza o meno dei longheroni.

La rigidezza flessionale del tratto di pinna in analisi nelle prove a carico statico è stata così valutata (fig.6-3):

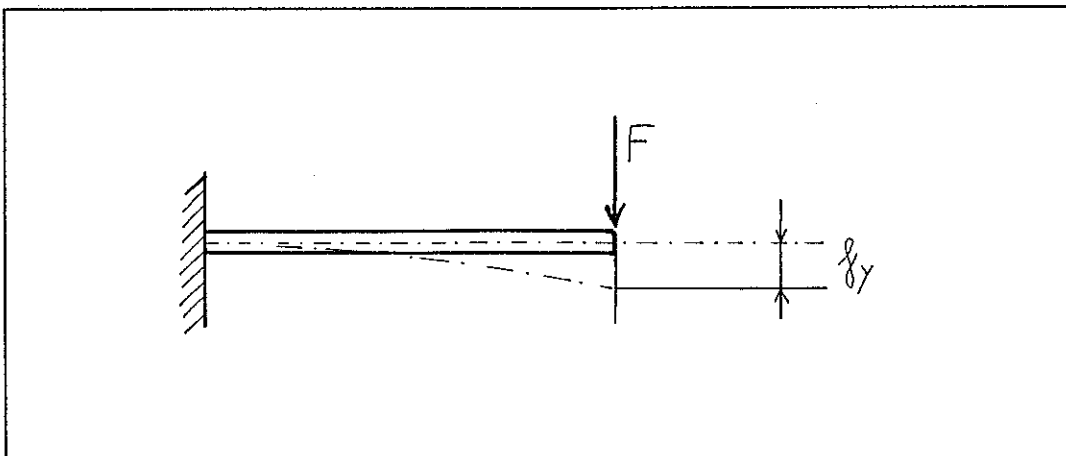
$$K = \frac{F}{f_y} \quad [\text{N/m}]$$

dove:

$K$  = coefficiente di rigidezza flessionale, di seguito chiamato coefficiente di rigidezza "lineare"  $K_x$  per distinguerlo dal coefficiente di rigidezza "rotazionale"  $K_\varphi = M_f / \varphi$ , dove  $M_f$  è il momento flettente all'incastro e  $\varphi$  è la rotazione media del tratto di pinna sollecitata;

$F$  = forza costante sollecitante, di seguito chiamata carico;

$f_y$  = freccia di deformazione.



**Figura 6-3** Schematizzazione delle condizioni di prova per il rilievo della rigidezza flessionale di un tratto di pinna.

Sperimentalmente:

- ⇒ la forza costante sollecitante è stata fornita da un cilindro d'acciaio di massa nota;
- ⇒ la freccia di deformazione è stata valutata come la media delle letture fatte su due comparatori disposti come in figura 6.4:

$$f_y = \frac{h_1 + h_2}{2}$$

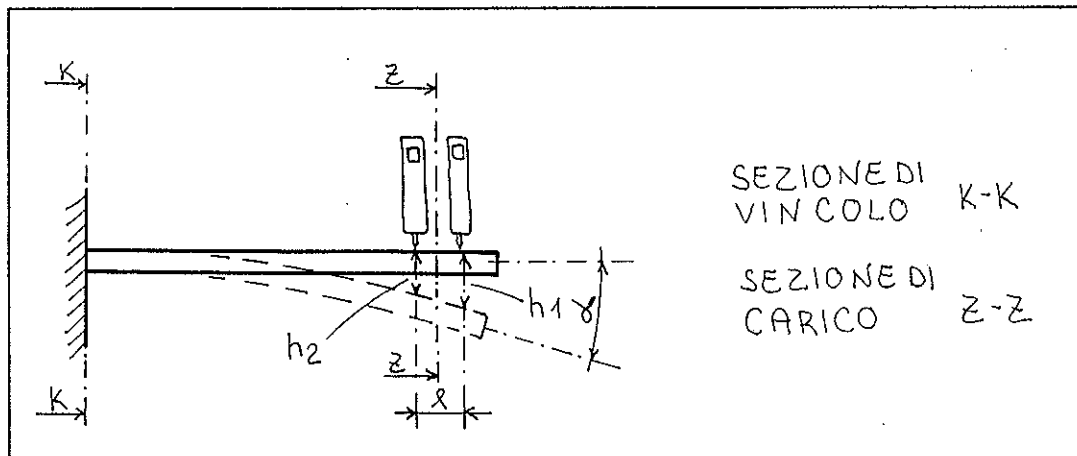


Figura 6.4 Disposizione dei due comparatori.

L'adozione dei due comparatori, posti a distanza nota, ha permesso anche di valutare l'inclinazione della pala ( $\alpha$ ) in corrispondenza della sezione di carico:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h_1 - h_2}{l}\right)$$

La conoscenza dell'inclinazione reale delle pinne, in corrispondenza della sezione di carico, è stata poi utile per giustificare l'errore di discretizzazione delle pinne di Flipper (vedi cap. 8.5).

## **6.1 COSTRUZIONE DEL BANCO DI PROVA**

Il banco di prova (foto 6.1-1,2), appositamente costruito per le prove statiche, è composto dai seguenti elementi (figura 6.1-1):

- a) due comparatori digitali centesimali con appositi sostegni;
- b) due torrette per sostenere i porta-comparatori magnetici;
- c) un cronometro;
- d) un'asta porta-pesi con relativi pesi;
- e) vari afferraggi, progettati e realizzati, per vincolare opportunamente la pala della pinna al castello orientabile;
- f) una forma di piede in plastica realizzata su misura, opportunamente attrezzata per vincolare la scarpetta della pinna al castello orientabile;
- g) vari afferraggi, progettati e realizzati, per vincolare opportunamente la pala della pinna all'asta porta-pesi;
- h) un castello orientabile, progettato e realizzato, per fissare gli afferraggi che vincolano le pinne;
- i) due torrette per sostenere il castello orientabile dal basamento;
- j) un basamento su cui sono fissate le due torrette per il castello orientabile.

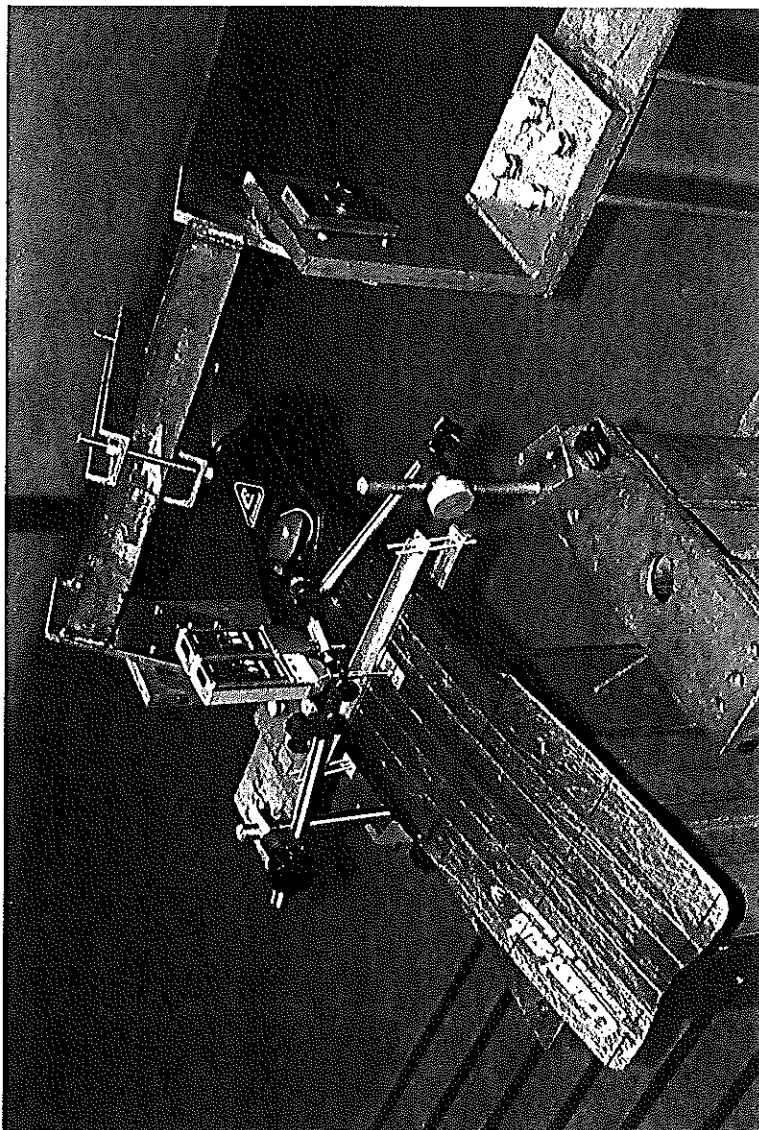


Foto 6.1-1 Prove statiche.

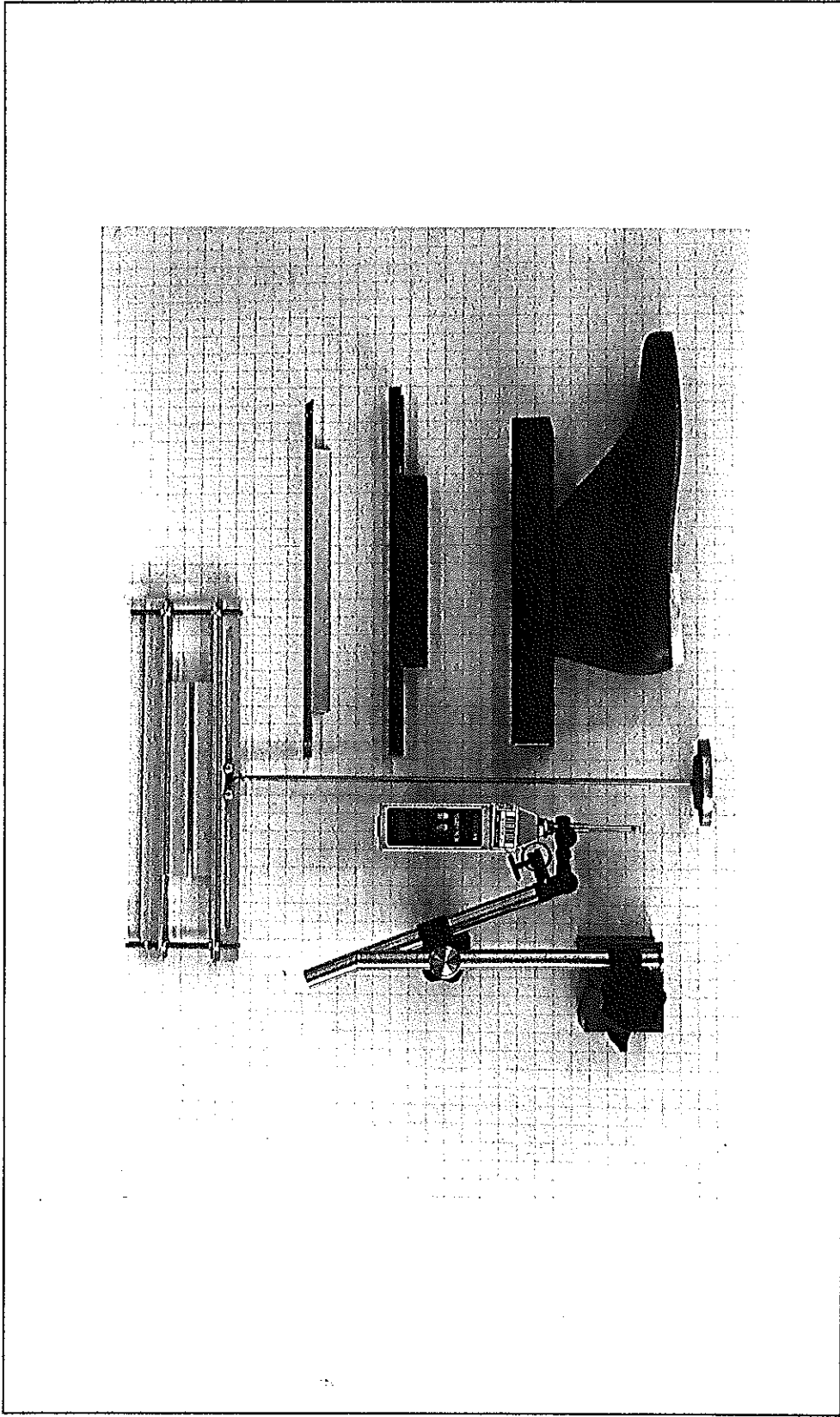
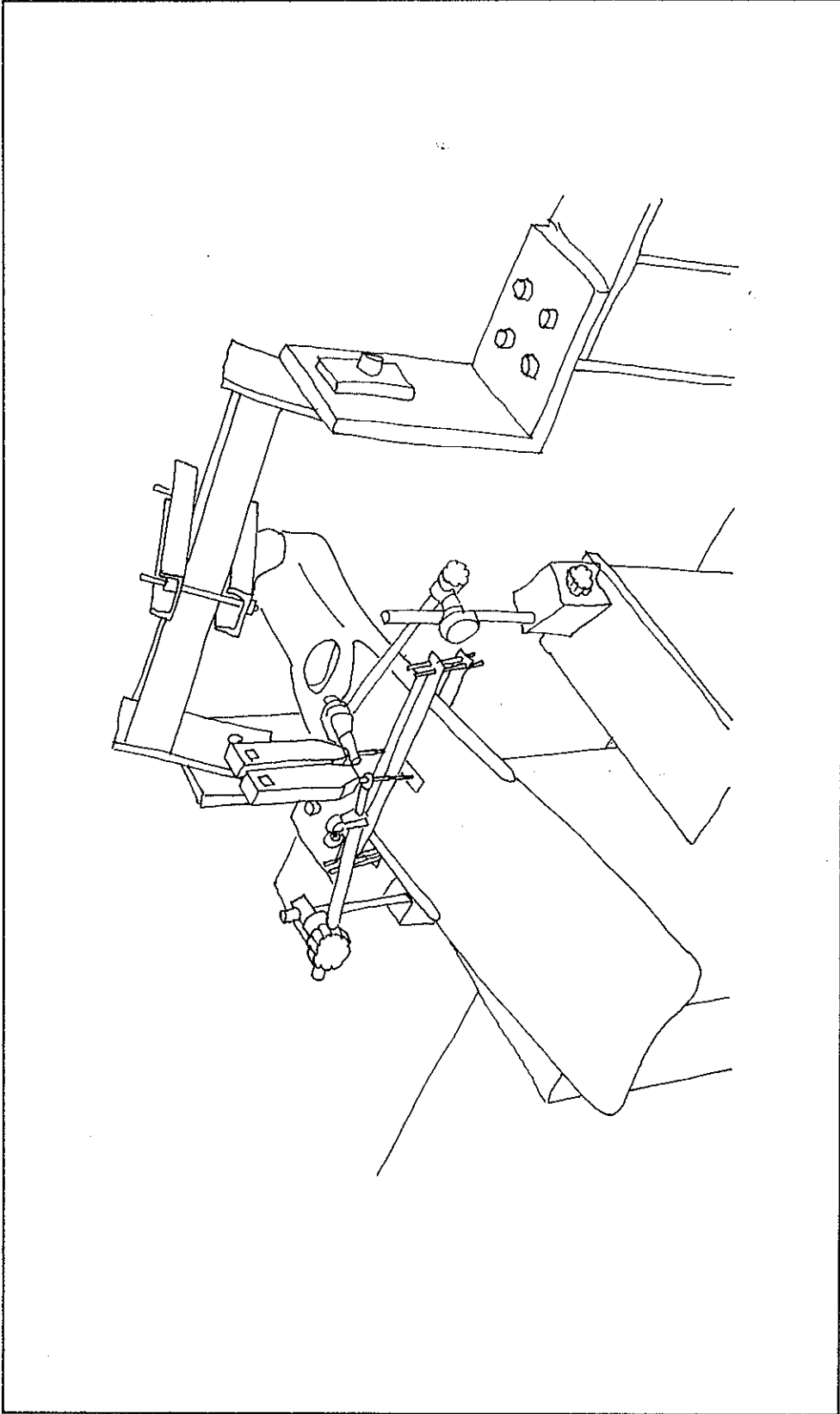


Foto 6.1-2 Parte dei vincoli e strumenti di misura usati nelle prove statiche.



**Figura 6.1-1** Elementi costituenti il banco per le prove statiche.

## 6.2 CONDIZIONI DI PROVA

La procedura seguita per la determinazione della rigidezza “lineare”  $K_x$ , può essere così riassunta:

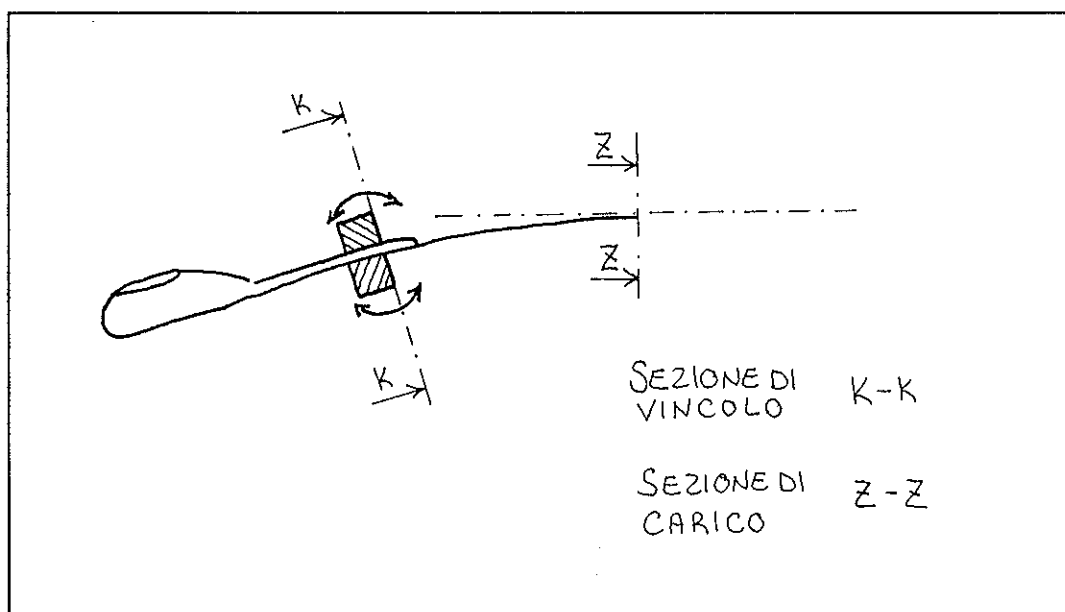
- a) definizione del tipo di prova attraverso l’individuazione della sezione da vincolare e della sezione da caricare della pinna:

Denominazione della prova	Sezione caricata	Sezione vincolata
AB	A	B
BC	B	C
CD	C	D
DF	D	F

**Tabella 6.2-1** Denominazione del tipo di prova.

- b) definizione dell’entità dei carichi da applicare, stimati in base alle caratteristiche del tratto di pinna da analizzare;
- c) definizione degli intervalli di tempo tra un rilievo della deformazione ed il successivo, stimati in base alle caratteristiche del tratto di pinna da analizzare;
- d) fissaggio della pinna al castello orientabile, mediante gli afferraggi richiesti dalla particolare sezione di vincolo;
- e) fissaggio della pinna all’asta porta-pesi, mediante gli afferraggi richiesti dalla particolare sezione di carico;
- f) orientazione del castello affinché la sezione da caricare sia perfettamente orizzontale (fig.6.2-2): questo per garantire che l’azione del carico sia

- inizialmente normale alla sezione di carico e che quindi il tratto di pinna analizzato sia inizialmente sollecitato a sola flessione;
- g) posizionamento dei comparatori ai lati opposti dell'afferraggio di carico (figura 6.4) e loro azzeramento;
  - h) inserimento del carico previsto nell'asta porta-pesi;
  - i) valutazione delle frecce di deformazione, ad intervalli di tempo definiti in c), mediante lettura dei comparatori;
  - j) prelievo del carico precedentemente inserito nell'asta porta-pesi;
  - k) pausa affinché la pinna ritorni alla posizione iniziale di riposo;
  - l) ripetizione delle fasi h), i), j), k), per i restanti carichi previsti in b);
  - m) ripetizione di tutte le precedenti fasi per le restanti sezioni in analisi.



**Tabella 6.2-2** Orientazione del castello affinché la sezione da caricare sia perfettamente orizzontale.

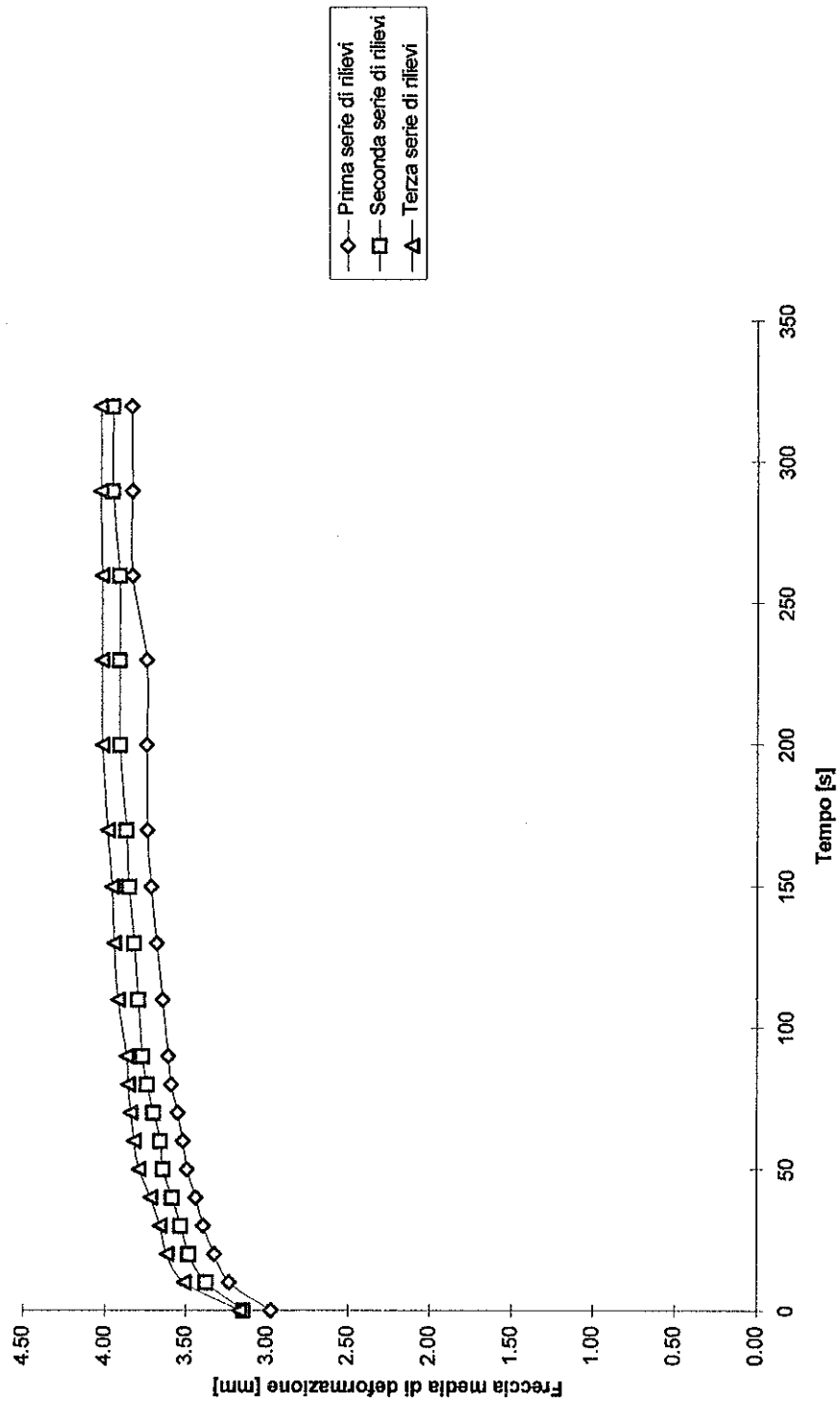
N.B. *Non si è eseguita nessuna prova sulla sezione BC perché è completamente identica alla sezione AB.*



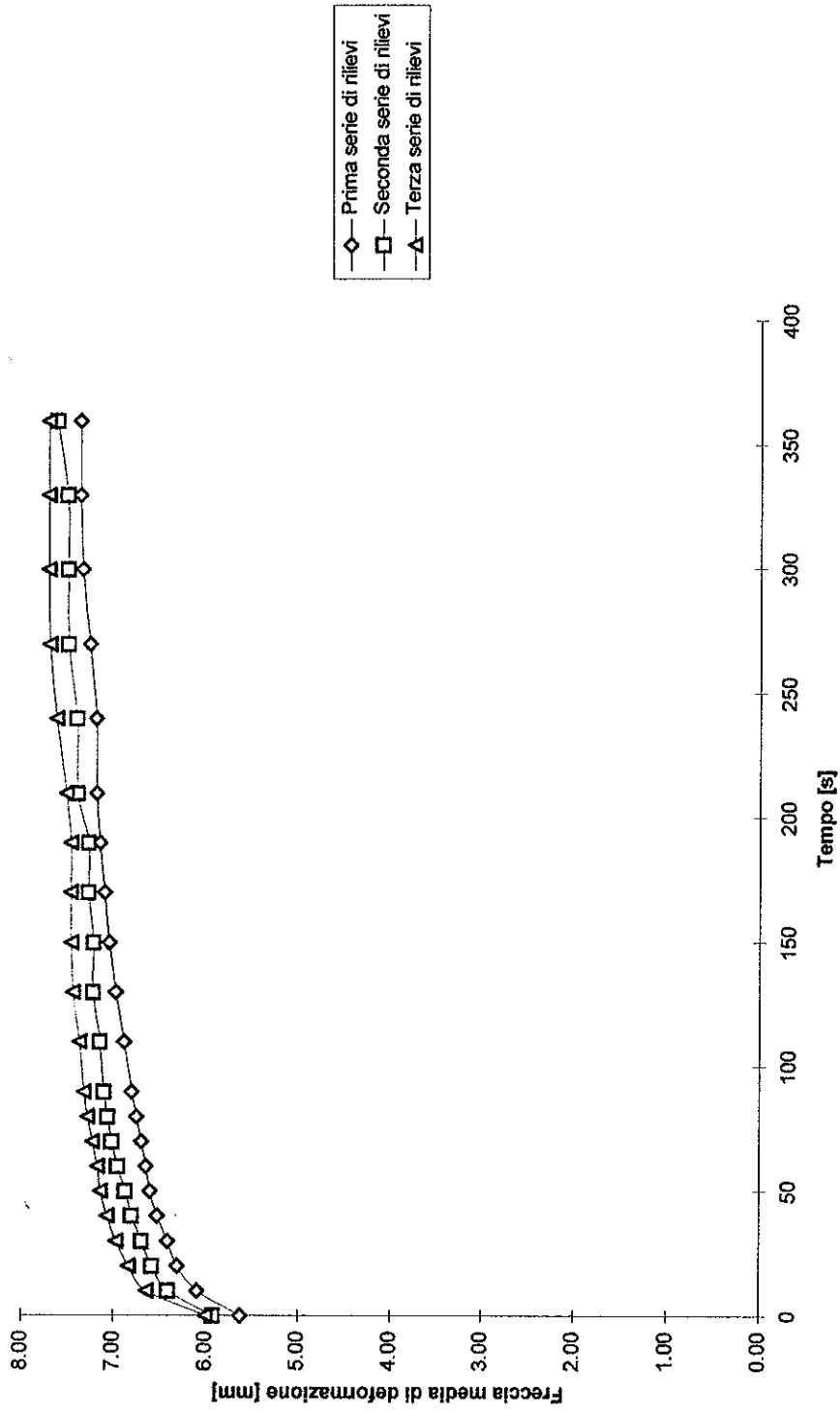
### **6.3 PROVE DI RIGIDEZZA**

La valutazione della rigidità con carichi statici si è fatta solo per le pinne con pala in tecnopolimero, in quanto le pinne con pala in carbonio non erano ancora disponibili. In ogni caso, le caratteristiche di rigidità per le pinne con pala in carbonio sono state valutate con le successive prove dinamiche (cap.7,8).

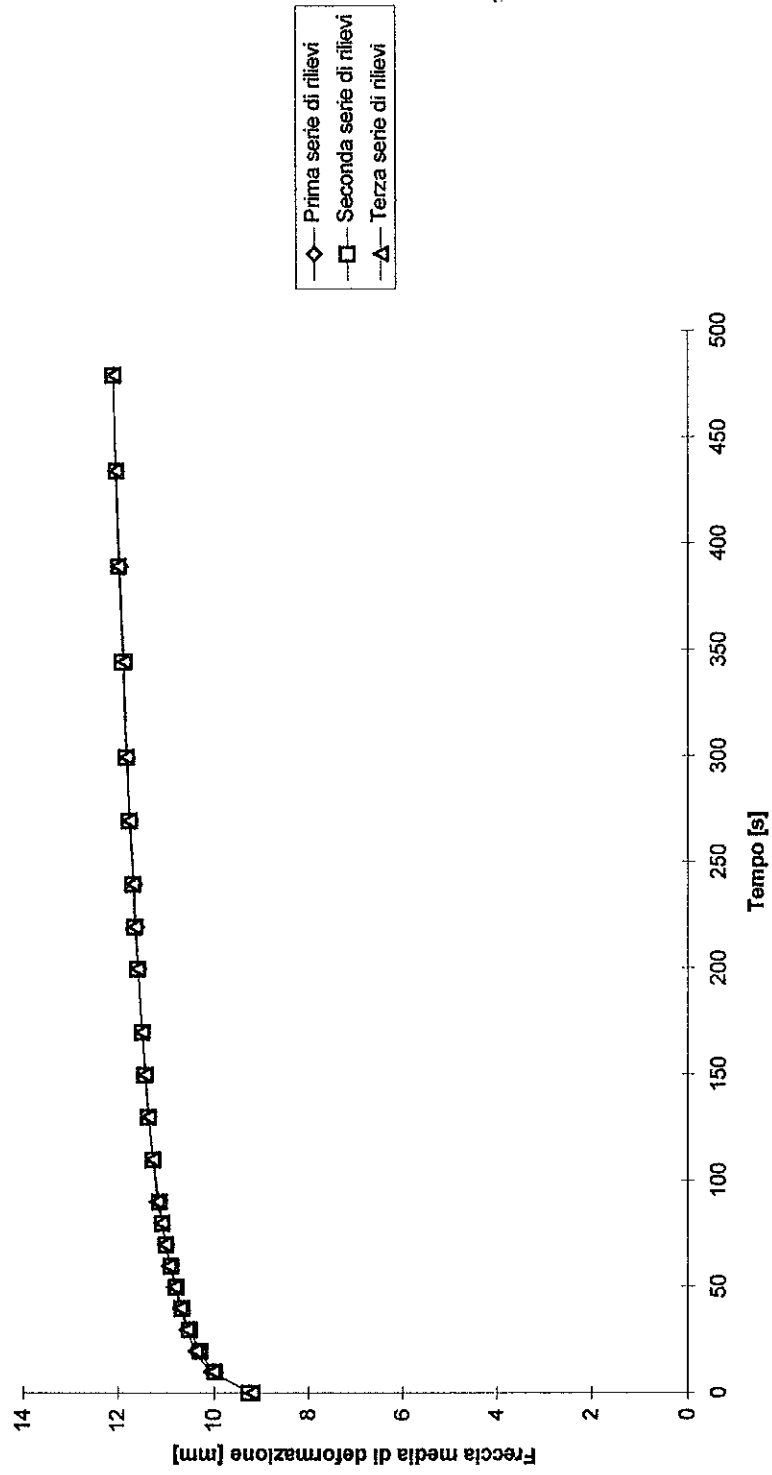
I rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulle pinne (tab.3.2-2, pinna1) usate nella pinneggiata (andatura lenta con pinne lunghe), presa a riferimento nella costruzione del modello numerico, sono raccolti in appendice F, mentre i loro andamenti sono esposti nei grafici seguenti:



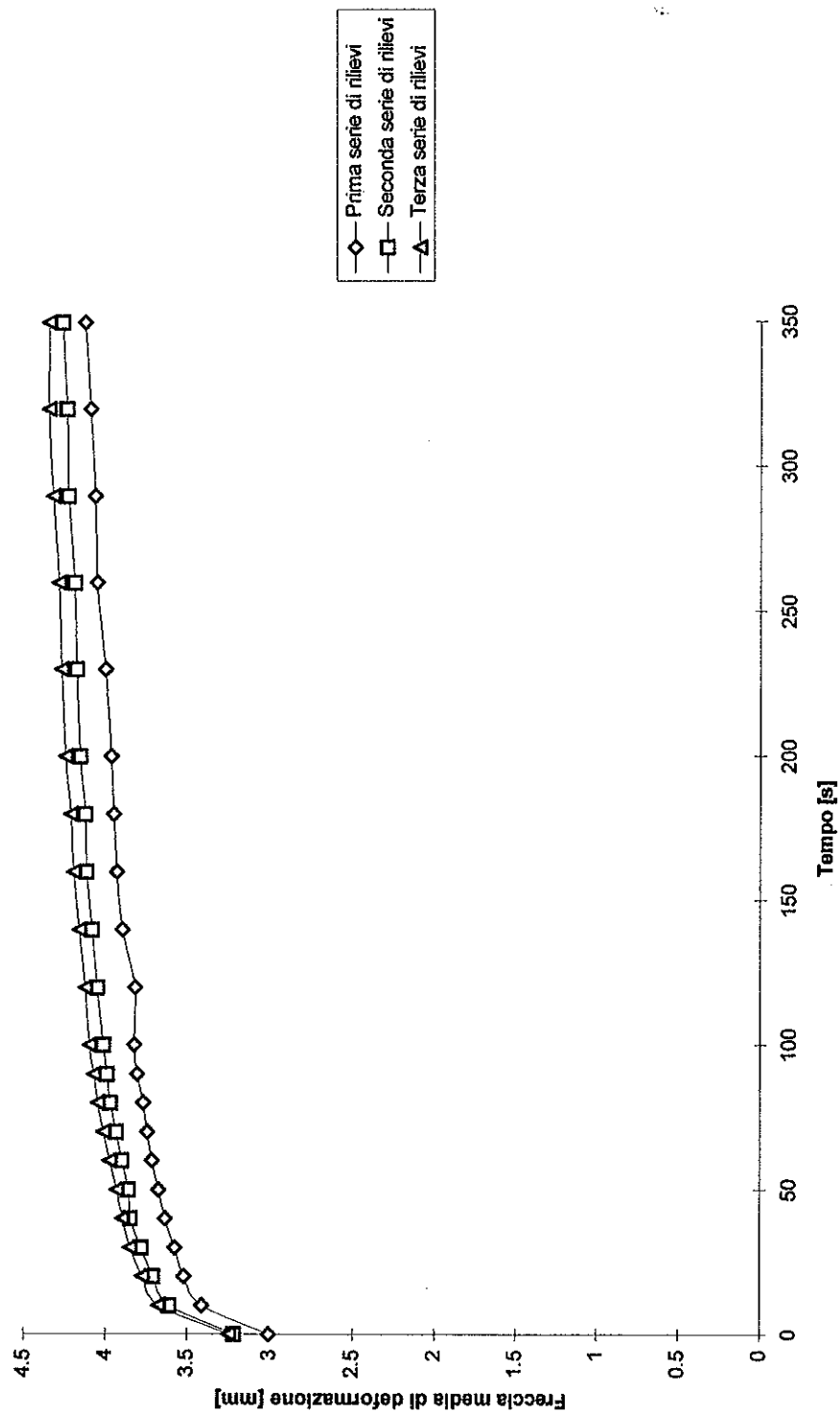
**Grafico 6.3-1** Andamenti dei rilievi sperimentali delle prove a carico statico valutati nel tratto AB, con un carico di 500 g.



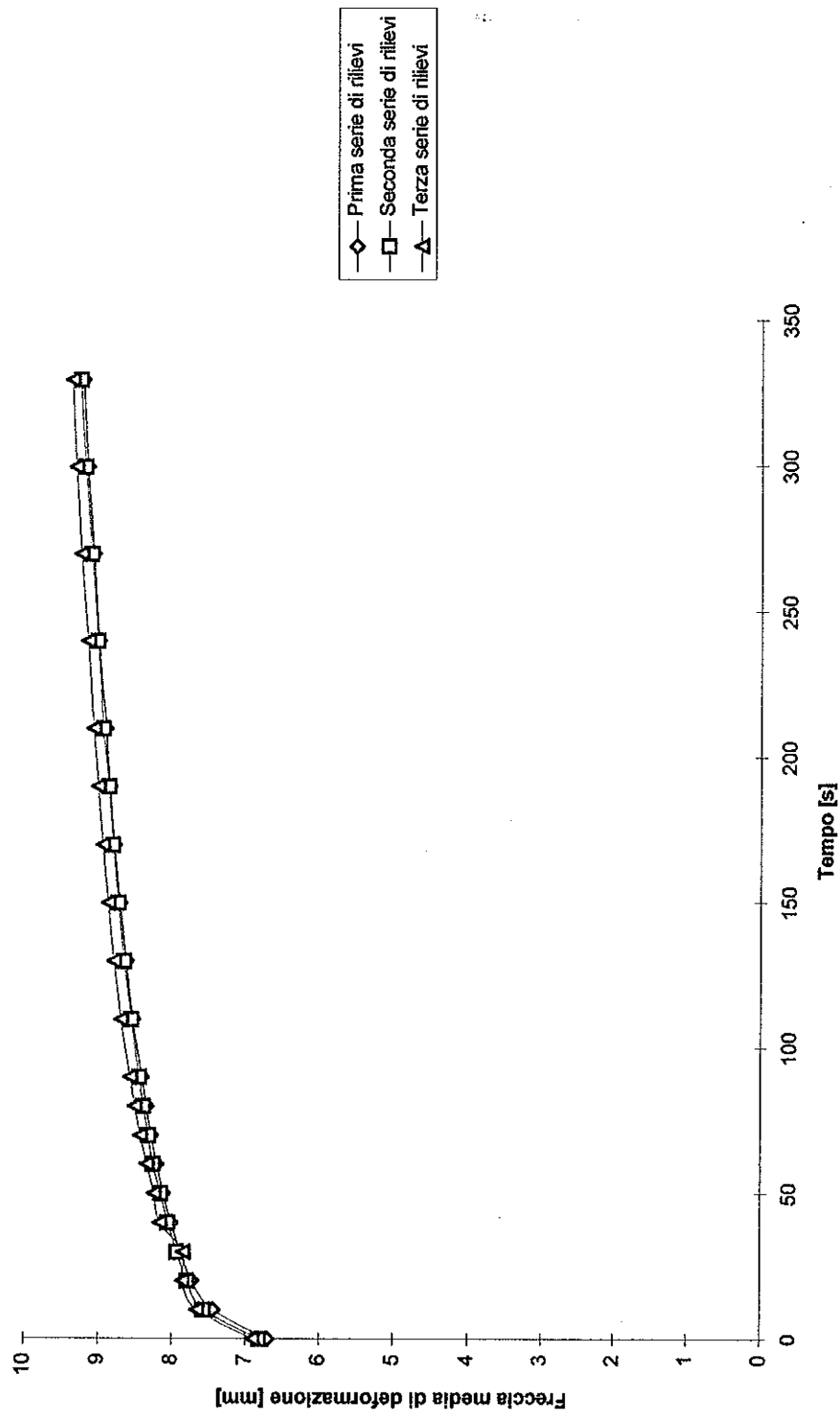
**Grafico 6.3-2** Andamenti dei rilievi sperimentali delle prove a carico statico valutati nel tratto AB, con un carico di 1000 g.



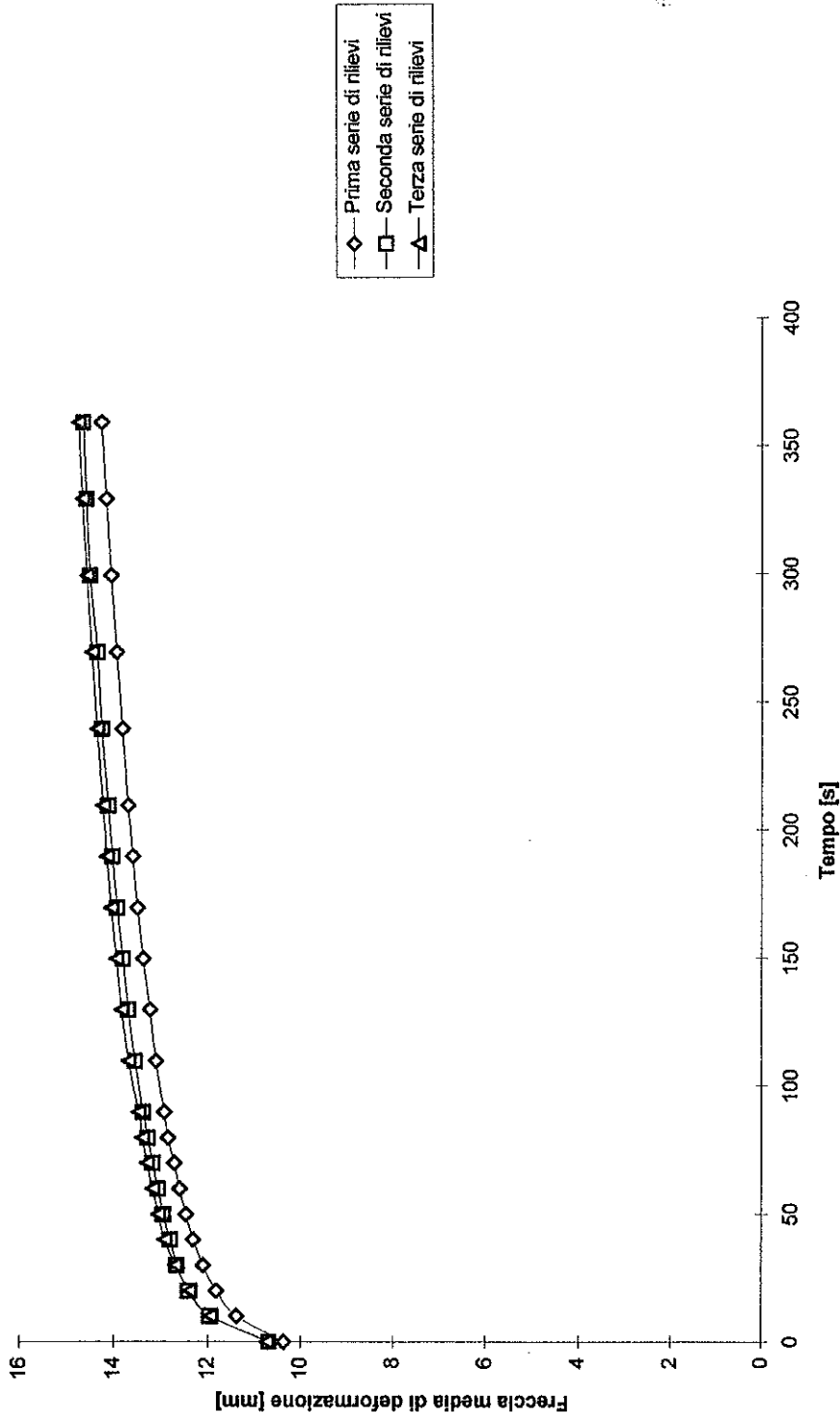
**Grafico 6.3-3** Andamenti dei rilievi sperimentali delle prove a carico statico valutati nel tratto AB, con un carico di 1500 g.



**Grafico 6.3-4** Andamenti dei rilievi sperimentali delle prove a carico statico valutati nel tratto CD, con un carico di 1000 g.



**Grafico 6.3-5** Andamenti dei rilievi sperimentali delle prove a carico statico valutati nel tratto CD, con un carico di 2000 g.



**Grafico 6.3-6** Andamenti dei rilievi sperimentali delle prove a carico statico valutati nel tratto CD, con un carico di 3000 g.

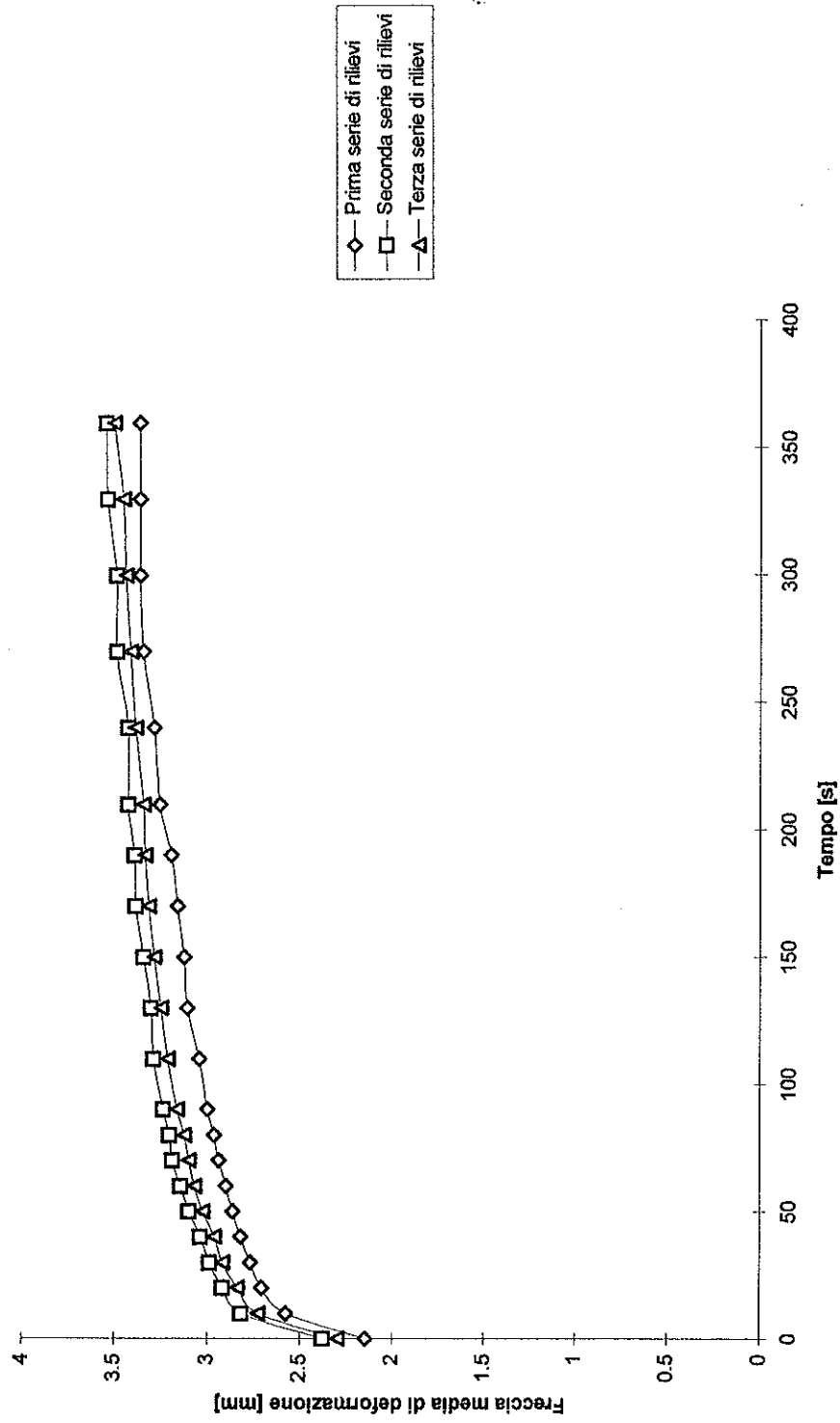
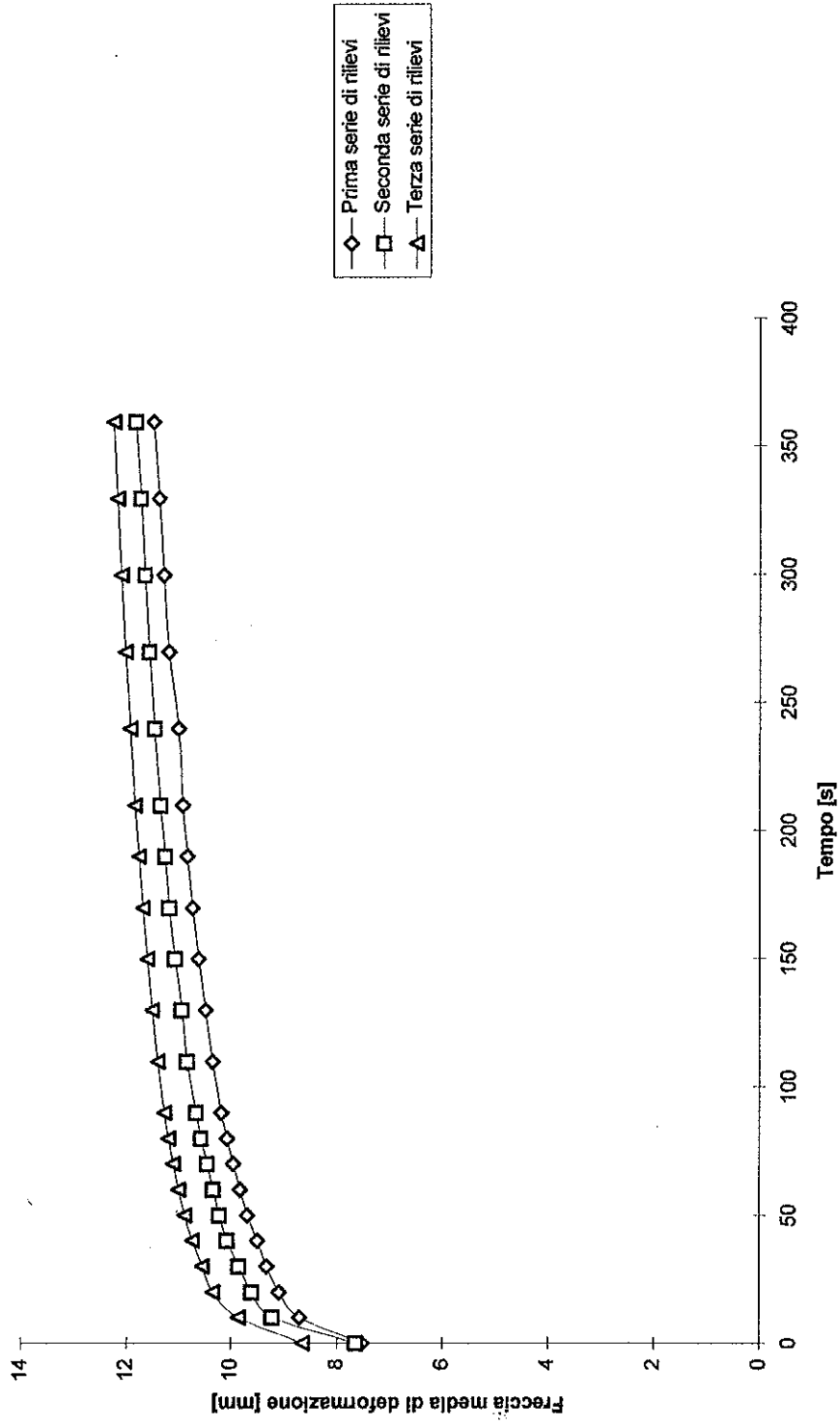
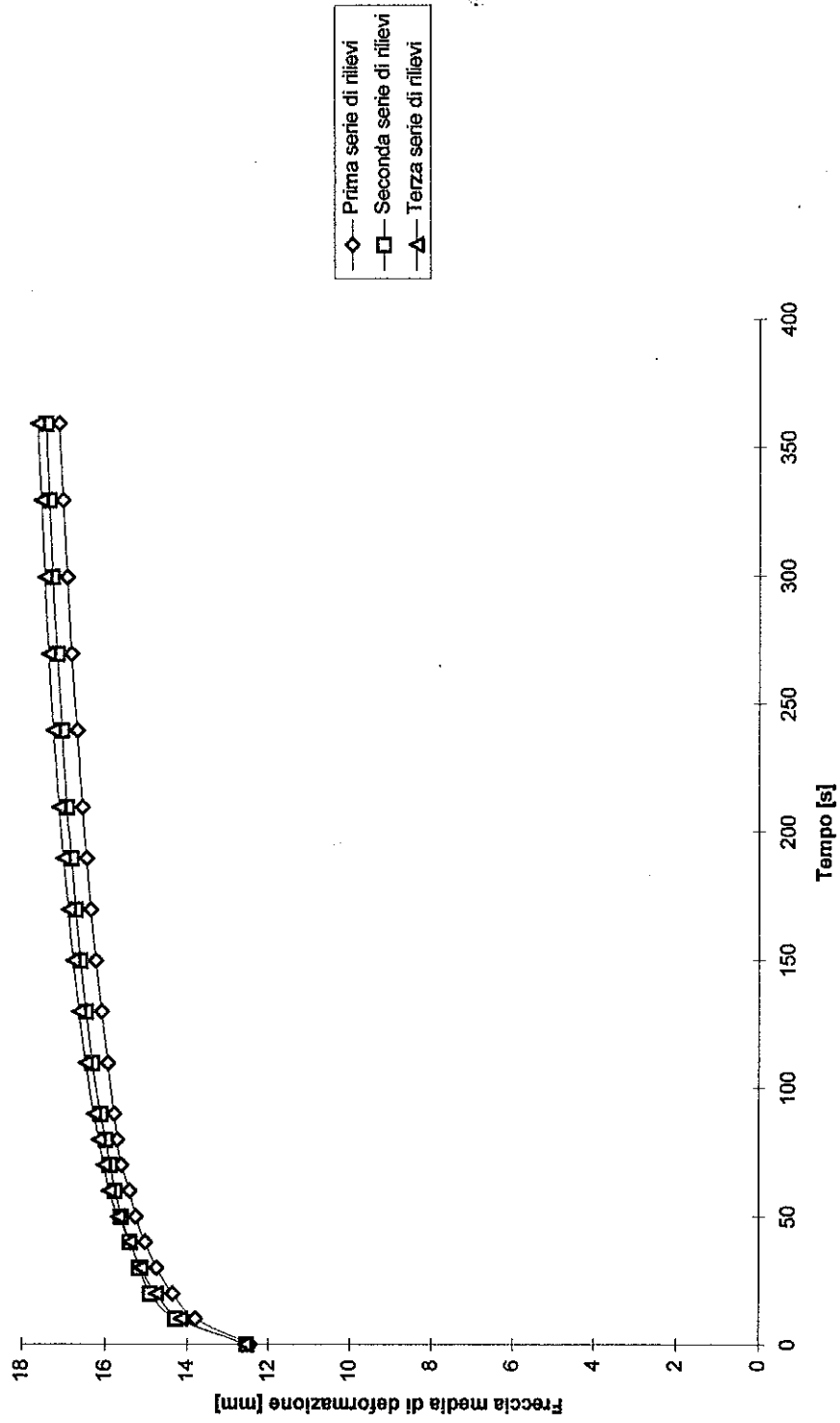


Grafico 6.3-7 Andamenti dei rilievi sperimentali delle prove a carico statico valutati nel tratto DF, con un carico di 500 g.





**Grafico 6.3-8** Andamenti dei rilievi sperimentali delle prove a carico statico valutati nel tratto DF, con un carico di 1500 g.



**Grafico 6.3-9** Andamenti dei rilievi sperimentali delle prove a carico statico valutate nel tratto DF, con un carico di 2000 g.

## 6.4 ANALISI DEI RISULTATI

Dai grafici esposti nel precedente paragrafo (graf.6.3-1,2,3,4,5,6,7,8,9), si possono fare le seguenti osservazioni.

- a) Per un dato carico, la freccia media di deformazione ( $f_v$ ) varia nel tempo, denunciando un consistente comportamento viscoelastico (♣) del materiale costituente le pinne in tecnopolimero analizzate (tab.3.2-2, pinna 1).

Nel materiale costituente una pinna, una gran viscosità ha sempre un'influenza negativa sull'efficienza della pinneggiata, infatti:

- ⇒ a parità di ampiezza di pinneggiata (fig.4-3) e rigidezza della pinna, gli angoli morti sono maggiori (fig.6.4-1), riducendo così il campo d'azione della pinna;
- ⇒ l'energia richiesta dal materiale per essere deformato è maggiore, quindi aumenta l'energia necessaria per la pinneggiata.

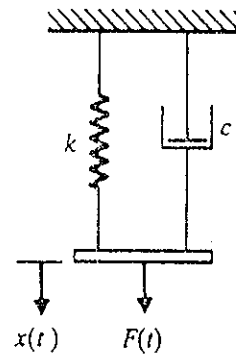
- 
- (♣) *Un comportamento viscoelastico implica uno smorzamento che può essere definito [11] come quella caratteristica che assolve alla funzione di dissipare energia del sistema. La forza dissipativa è direttamente proporzionale alla velocità e vale:*

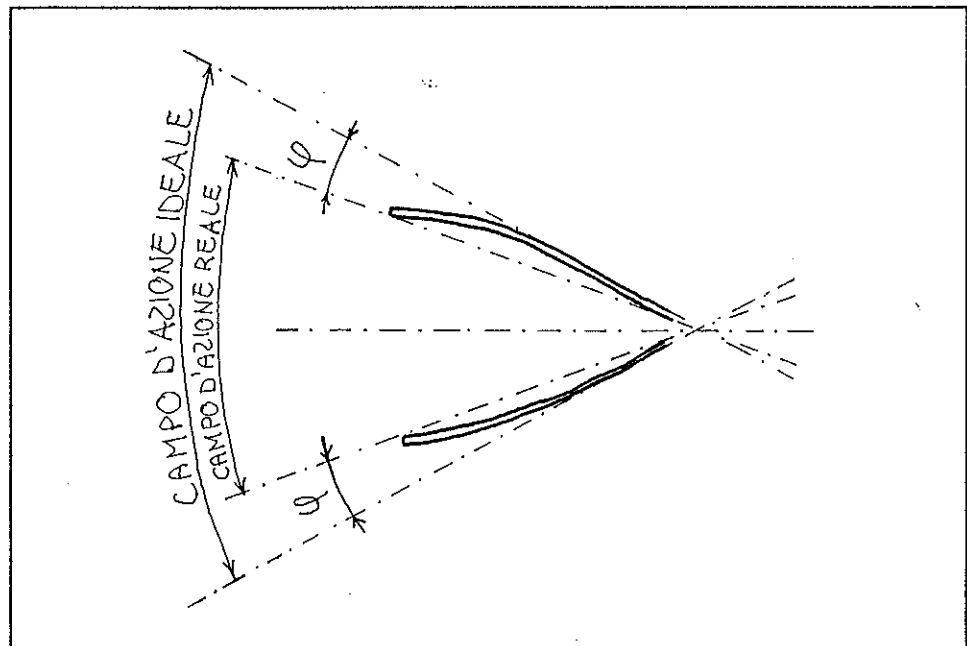
$$F_d = -c \cdot v \quad [N]$$

dove:

$c$  = coefficiente di smorzamento viscoso,  $[N \cdot s/m]$ ;

$v$  = velocità del sistema,  $[m/s]$ .





**Figura 6.4-1** Campo d'azione ed angoli morti della pinneggiata.

Durante la pinneggiata la pinna è sollecitata ciclicamente a carichi variabili, è quindi più corretto parlare di smorzamento isteretico la cui forza dissipativa è funzione della frequenza di sollecitazione. Tale fenomeno è stato opportunamente analizzato con delle prove dinamiche sviluppate nei capitoli 7,8.

- b)** Adimensionalizzando gli andamenti delle deformazioni rilevate nelle varie sezioni della pinna (graf.6.4-1,2,3), rispetto le relative frecce medie valutate a 90 secondi, si nota che l'andamento delle deformazioni nel tempo non è funzione del carico applicato.

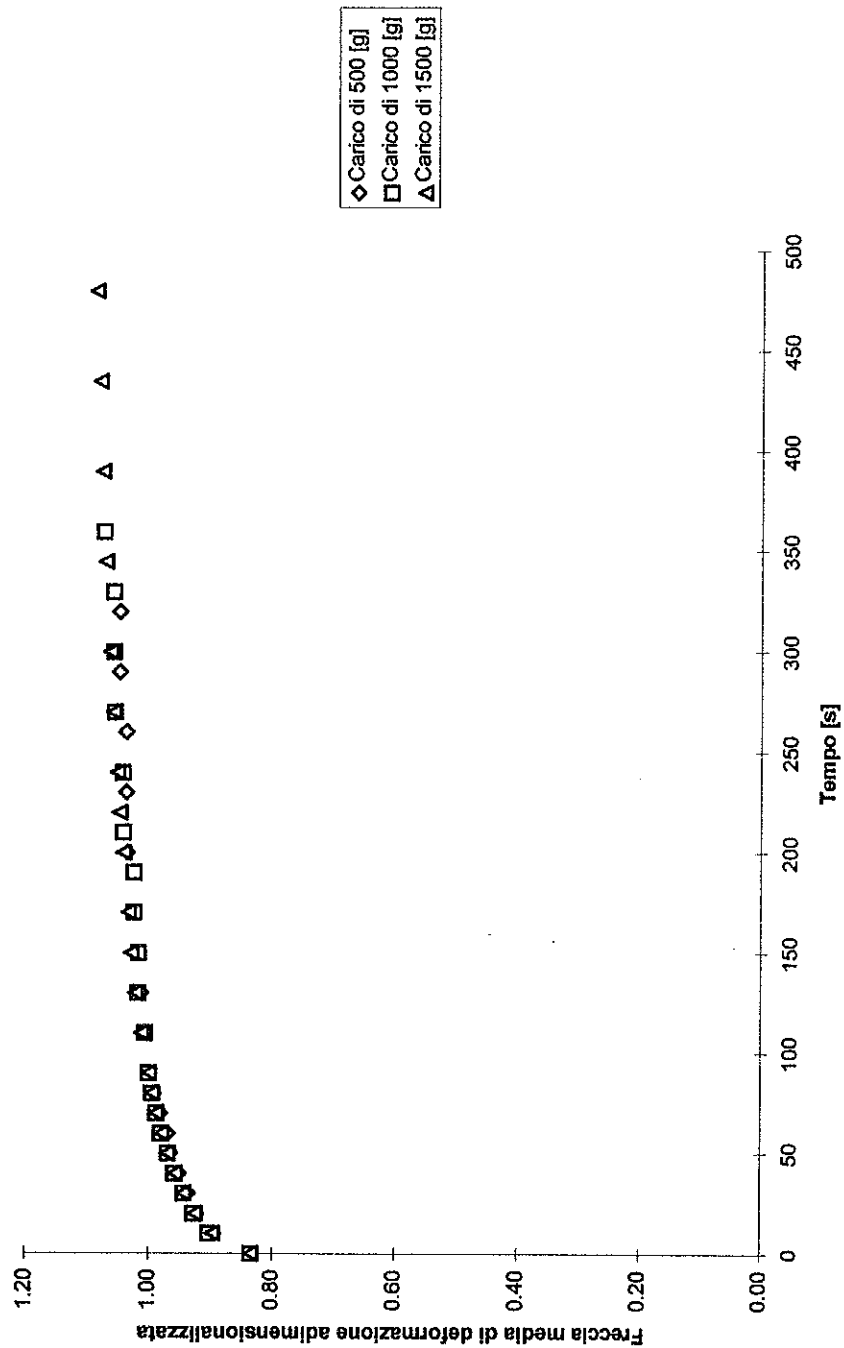
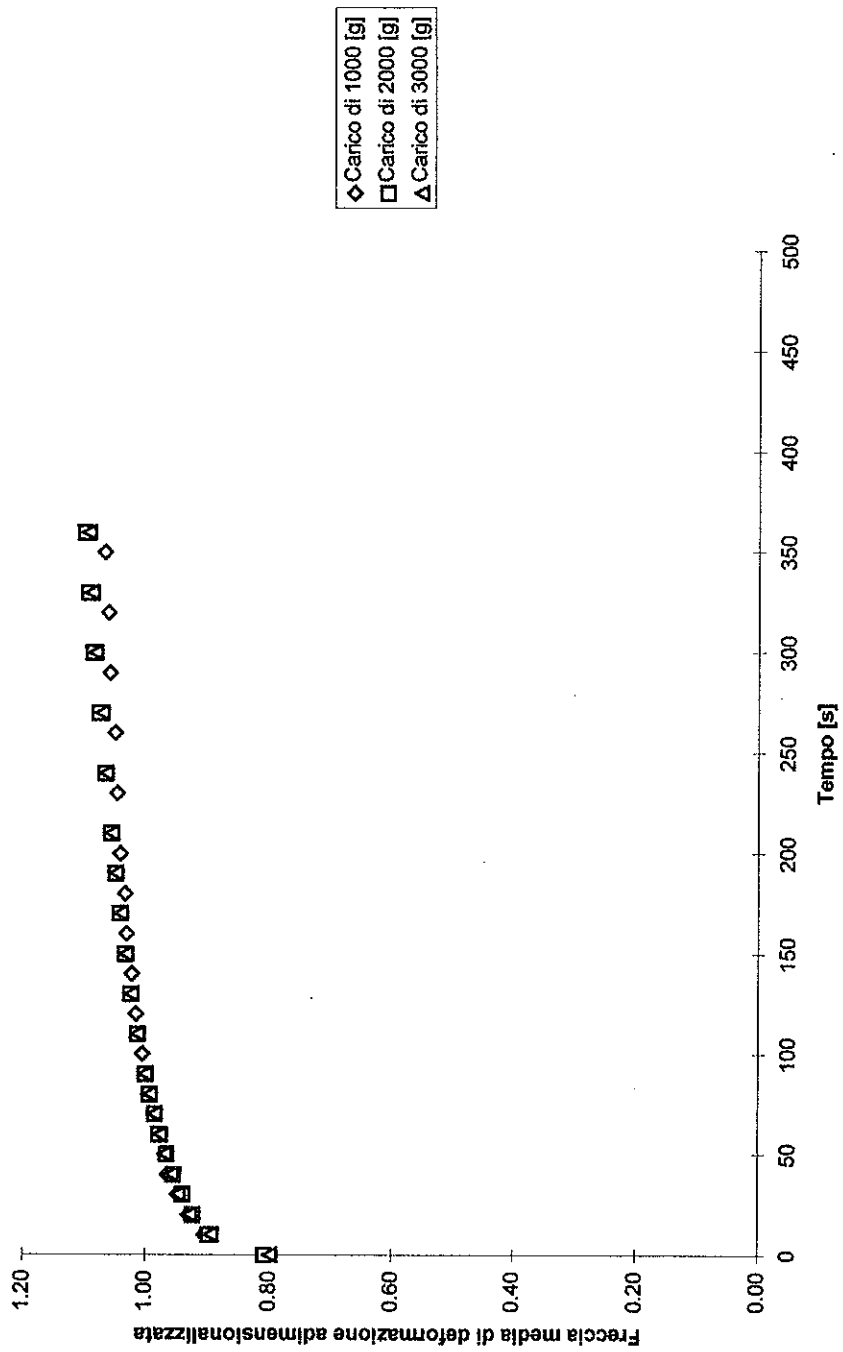


Grafico 6.4-1 Confronto adimensionale tra le deformazioni rilevate nella sezione AB, al variare dei carichi.



**Grafico 6.4-2** Confronto adimensionale tra le deformazioni rilevate nella sezione CD, al variare dei carichi.

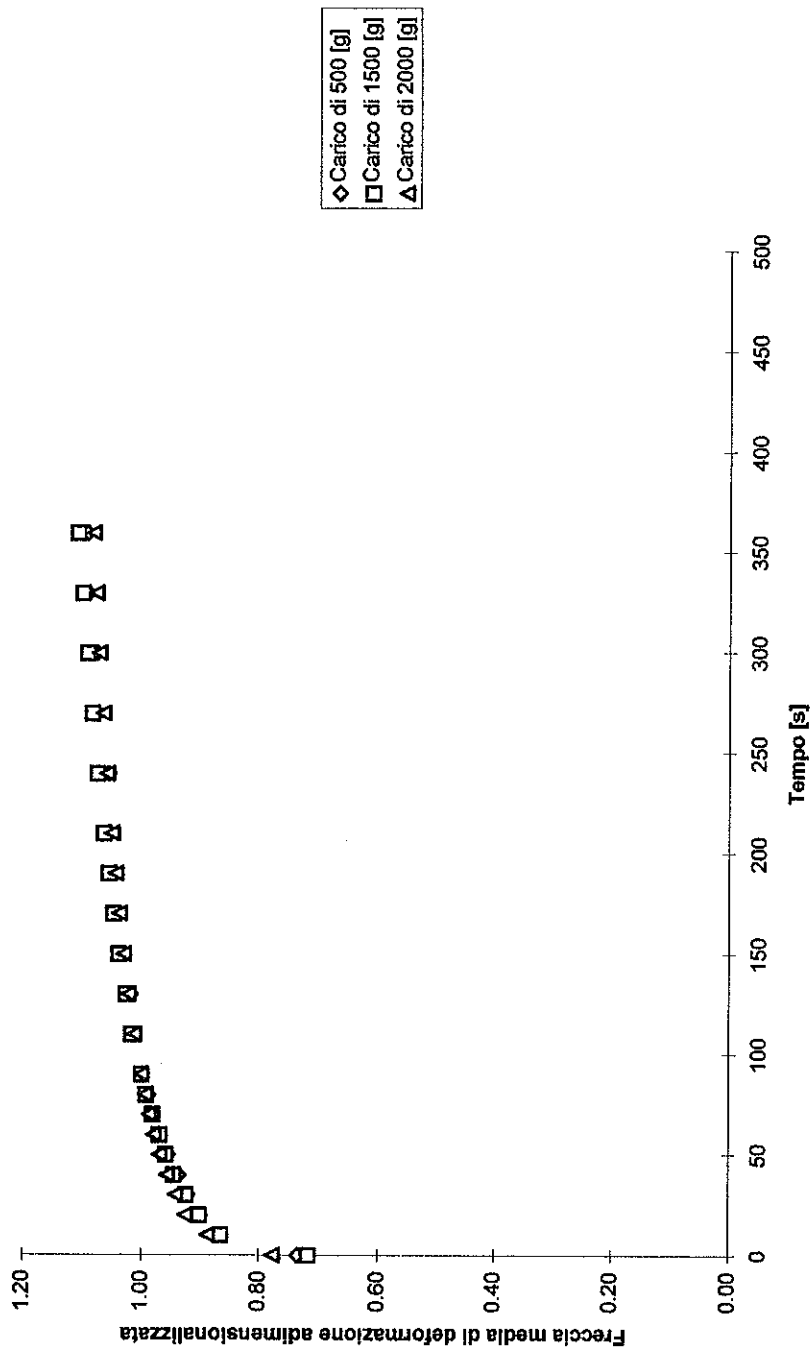


Grafico 6.4-3 Confronto adimensionale tra le deformazioni rilevate nella sezione DF, al variare dei carichi.

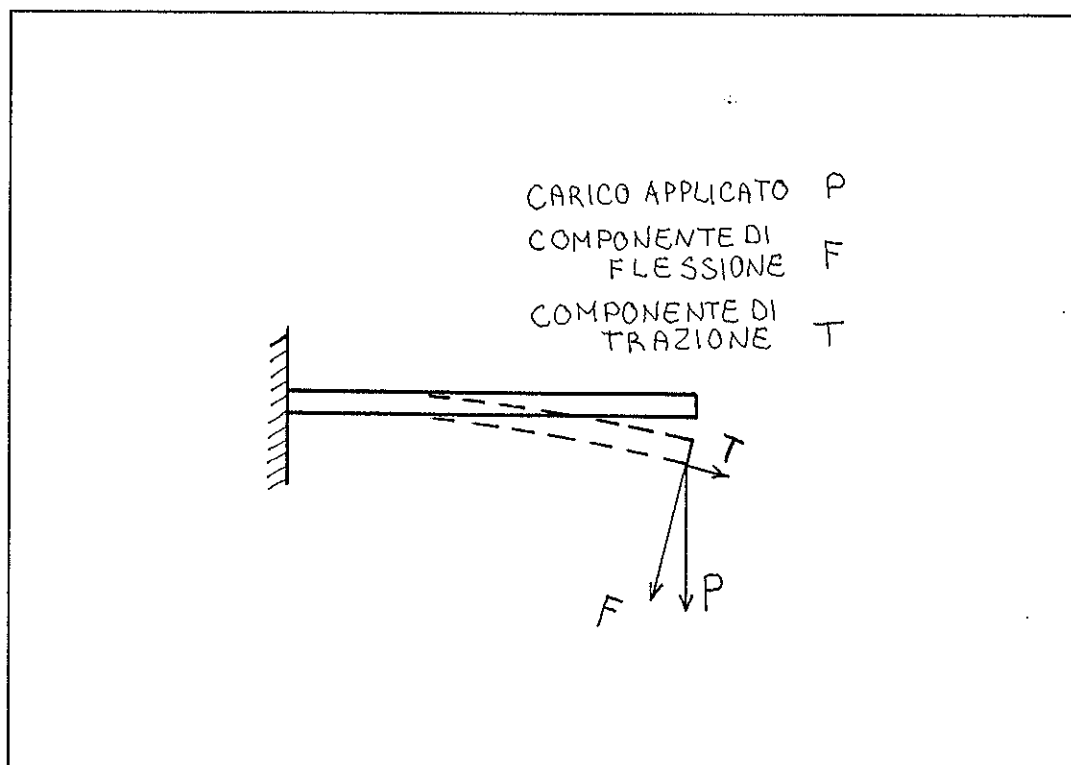
- c) La freccia media ha un andamento asintotico nel tempo e tende a stabilizzarsi mediamente dopo circa otto minuti dall'applicazione del carico. La rigidezza del tratto di pala in esame è stata valutata considerando la massima freccia di deformazione, con i seguenti risultati:

Tratto di pala in prova			Carico applicato [g]	Freccia massima [mm]	Coefficiente di rigidezza	
	Sezione caricata	Sezione vincolata			della prova [N/mm]	del tratto di pala [N/mm]
AB	A	B	500	4.03	1.216	<b>1.235</b>
AB	A	B	1000	7.71	1.271	
AB	A	B	1500	12.08	1.217	
CD	C	D	1000	4.35	2.253	<b>2.111</b>
CD	C	D	2000	9.41	2.083	
CD	C	D	3000	14.72	1.997	
DF	D	F	500	3.54	1.384	<b>1.234</b>
DF	D	F	1500	12.22	1.203	
DF	D	F	2000	17.6	1.114	

**Tabella 6.4-1** Tabella riassuntiva dei coefficienti di rigidezza rilevati sperimentalmente con le prove a carico statico.

E' importante notare che, le prove a carico statico, così realizzate, sono affette da un errore di non linearità geometrica non trascurabile. Dalla figura 6.4-2 risulta evidente che, durante la prova, la direzione della forza di carico non è normale al tratto di pinna caricato, dando origine ad una sollecitazione combinata di flessione e trazione. Quindi, le frecce di deformazione ed i relativi coefficienti di rigidezza rilevati (tab.6.4-1), sono dovuti alla combinazione di questi due tipi di sollecitazione, mentre lo scopo di queste prove è la valutazione dei coefficienti di sola rigidezza flessionale.

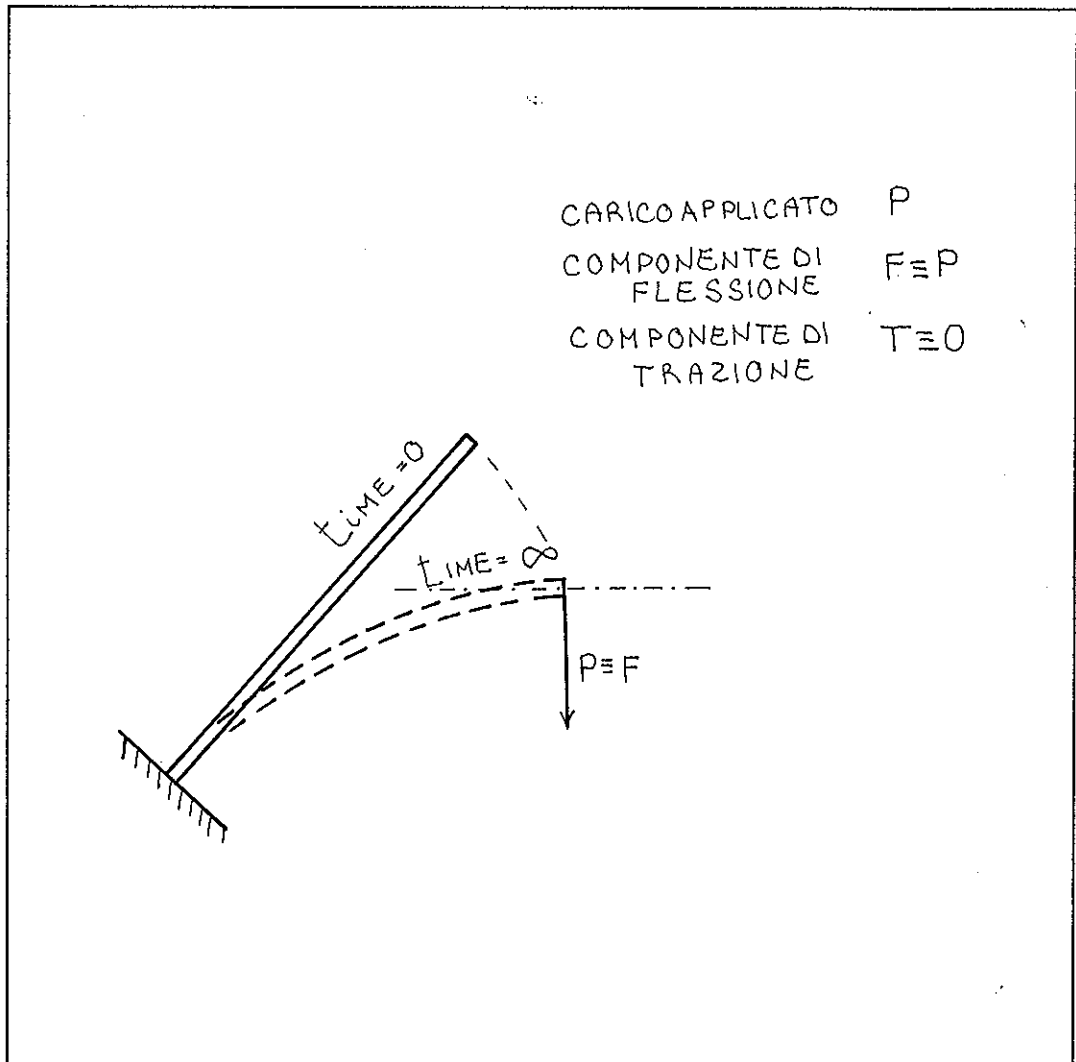




**Figura 6.4-2** Forze agenti sul tratto di pala in analisi durante le prove a carico statico eseguite in laboratorio.

Una possibile soluzione, è rifare le prove orientando (a tentativi) il castello affinché la sezione caricata sia perfettamente orizzontale in corrispondenza della massima deformazione (fig.6.2-3), in questo modo la freccia massima, utilizzata per la valutazione del coefficiente di rigidezza, è dovuta alla sola sollecitazione di flessione.

Le prove a carico statico non sono state rifatte perché i coefficienti di rigidezza flessionale risultano anche dalle prove dinamiche (cap.7,8) che in ogni caso bisognava fare per valutare gli effetti dello smorzamento isteretico.



**Figura 6.4-3** Modalità corretta per valutare i coefficienti di rigidezza flessionali con delle prove a carico statico.

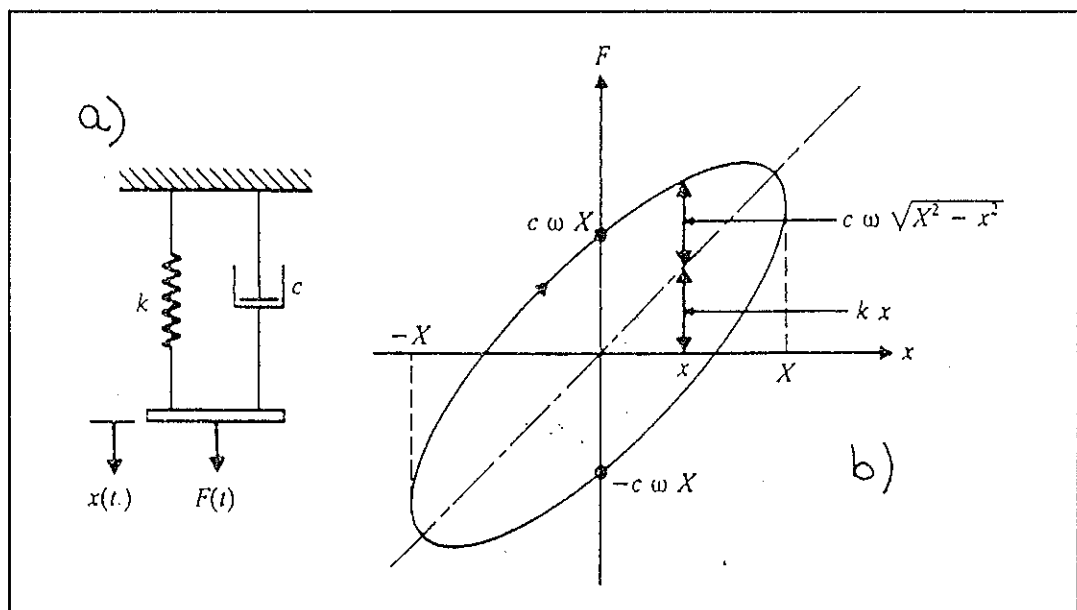
Le prove a carico statico sono in ogni caso servite per capire il comportamento del materiale costituente le pinne e giustificare le più complesse e costose prove dinamiche.

## CAP. 7 PROVE DINAMICHE

Dalle prove a carico costante (cap.6) è emerso il comportamento viscoso del materiale costituente le pinne (tab.3.2-2, pinna1) usate nella pinneggiata (andatura lenta con pinne lunghe) presa a riferimento nella costruzione del modello numerico.

Dalla teoria [11] si sa che per un sistema con smorzamento viscoso eccitato da una forza armonica (fig.7-1a) il relativo ciclo di isteresi (fig.7-1b) fornisce le informazioni necessarie per valutare le seguenti caratteristiche:

- ⇒ costante elastica  $K$ ;
- ⇒ coefficiente di smorzamento  $C$ ;
- ⇒ energia dissipata per ciclo  $A$ .



**Figura 7-1** a) Schematizzazione di un sistema con smorzamento viscoso eccitato; b) Ciclo di isteresi relativo ad un sistema viscoso eccitato da una forza armonica di pulsazione  $\omega$  con ampiezza  $X$ .

Durante la pinneggiata la pinna è sollecitata ciclicamente a carichi variabili, è quindi più corretto parlare di smorzamento isteretico, la cui forza dissipativa vale:

$$F_d = -\frac{\beta \cdot K}{\omega} \cdot v = -c \cdot v \quad [\text{N}]$$

dove:

$\beta$  = coefficiente adimensionale di smorzamento isteretico;

$K$  = costante di rigidità flessionale, [N/m];

$\omega = 2 \cdot \Pi \cdot f = \frac{2 \cdot \Pi}{T}$  = pulsazione di pinneggiata, dove:

$f$  = frequenza di pinneggiata;

$T$  = periodo di pinneggiata;

$c$  = coefficiente di smorzamento isteretico, [N\*s/m].

Si nota che la forza dissipativa dovuta allo smorzamento isteretico è funzione della frequenza di pinneggiata, quindi per determinare sperimentalmente il coefficiente di smorzamento isteretico è importante sollecitare il tratto di pala da analizzare a frequenze di carico che si avvicinano il più possibile a quelle che si verificano durante la pinneggiata.

Conoscendo il numero di fotogrammi che compongono il ciclo di pinneggiata analizzato e l'intervallo di tempo tra un fotogramma ed il successivo, il periodo di pinneggiata vale:

$$T = \boxed{\text{N}^\circ \text{ dei fotogrammi che compongono un ciclo di pinneggiata}} * \boxed{\text{Intervallo di tempo tra un fotogramma ed il successivo}}$$
$$= 59 * 0.04 = 2.36 \text{ [s]}$$

quindi la frequenza ideale a cui sollecitare sperimentalmente ogni tratto di pala vale:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2.36} = 0.424 \text{ [Hz]}$$

In laboratorio si è costruito un banco prova (foto 7-1,2) in cui:

- la pinna è sollecitata, da un attuatore di spostamento, con una frequenza che si avvicina a quella della pinneggiata in analisi;
- sono rilevati la forza e lo spostamento agenti sul tratto di pala sollecitato;
- è registrato il relativo ciclo di isteresi, utilizzato poi per quantificare la costante di rigidità flessionale, il coefficiente di smorzamento isteretico e l'energia dissipata per il ciclo.

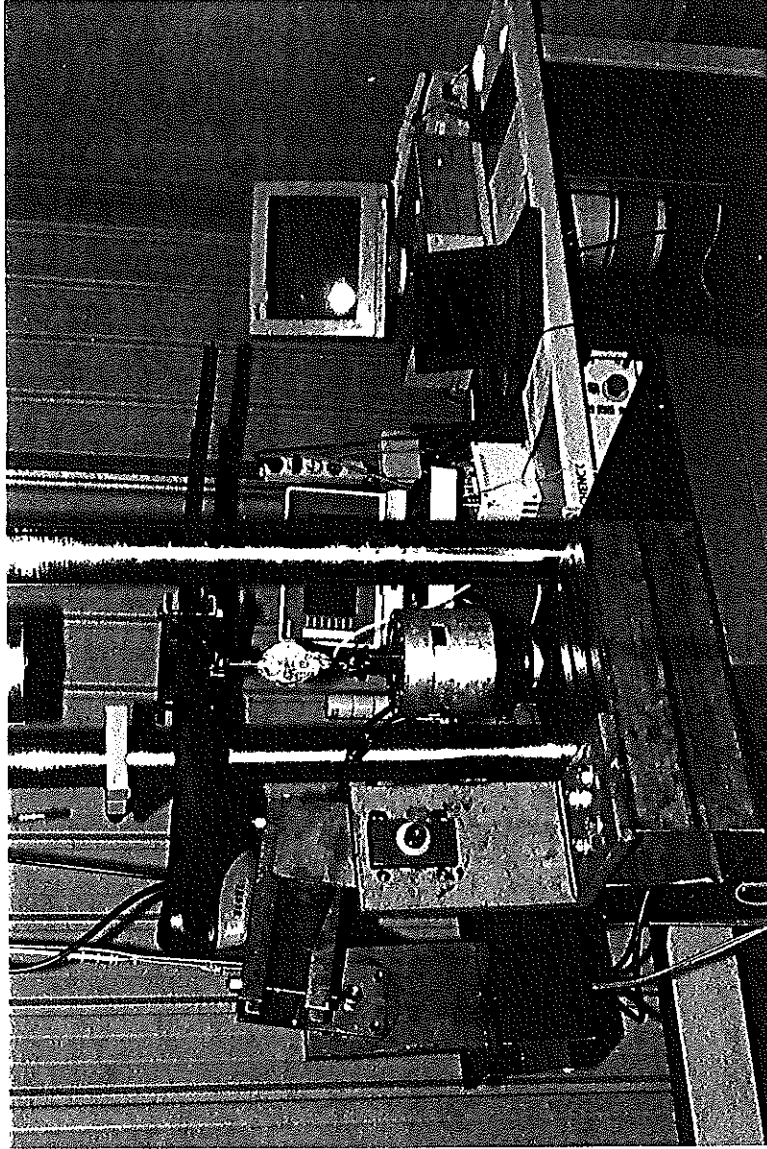
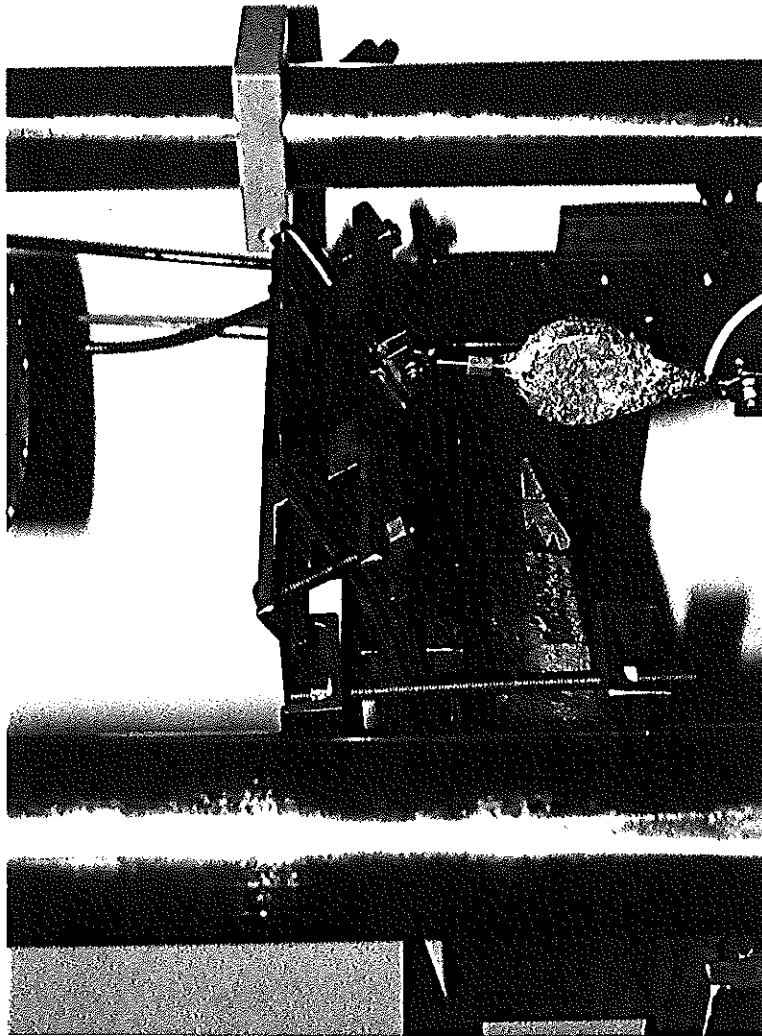


Foto 7-1 Prove dinamiche.



**Foto 7-2** Prove dinamiche.

## **7.1 COSTRUZIONE DEL BANCO DI PROVA**

Il banco prova, costruito per le prove dinamiche, è composto dai seguenti elementi (fig.7.1-1):

- a) un sistema ( PMS-1) che elabora e registra i segnali di forza e spostamento che sollecitano il tratto di pala in esame, forniti rispettivamente dalla cella di carico e da una macchina per prove di fatica (Schenck);
- b) un attuatore di spostamento, facente parte della Schenck, che sollecita il tratto di pinna in esame con una legge di spostamento sinusoidale di frequenza ed ampiezza programmabili;
- c) uno snodo sferico che collega l'attuatore di spostamento alla cella di carico;
- d) una cella di carico ad anello (foto 7.1-1), appositamente progettata e realizzata per resistere ad un carico massimo di 200 [N], che rileva la forza agente tra l'attuatore di spostamento ed il tratto di pala sollecitato;
- e) uno snodo sferico che collega la cella di carico agli afferraggi di carico della pinna;
- f) vari afferraggi di carico, appositamente progettati e realizzati, che fissano opportunamente la cella di carico al tratto di pala sollecitato;
- g) vari afferraggi di vincolo, appositamente progettati e realizzati, che fissano opportunamente il tratto di pala sollecitato al castello orientabile;
- h) una forma di piede in plastica realizzata su misura, opportunamente attrezzata per vincolare la scarpetta della pinna al castello orientabile;



## Capitolo 7

- i) un castello orientabile, progettato e realizzato, per fissare gli afferraggi che vincolano le pinne;
- j) vari afferraggi che vincolano opportunamente il castello orientabile al basamento della macchina per prove di fatica (Schenck).

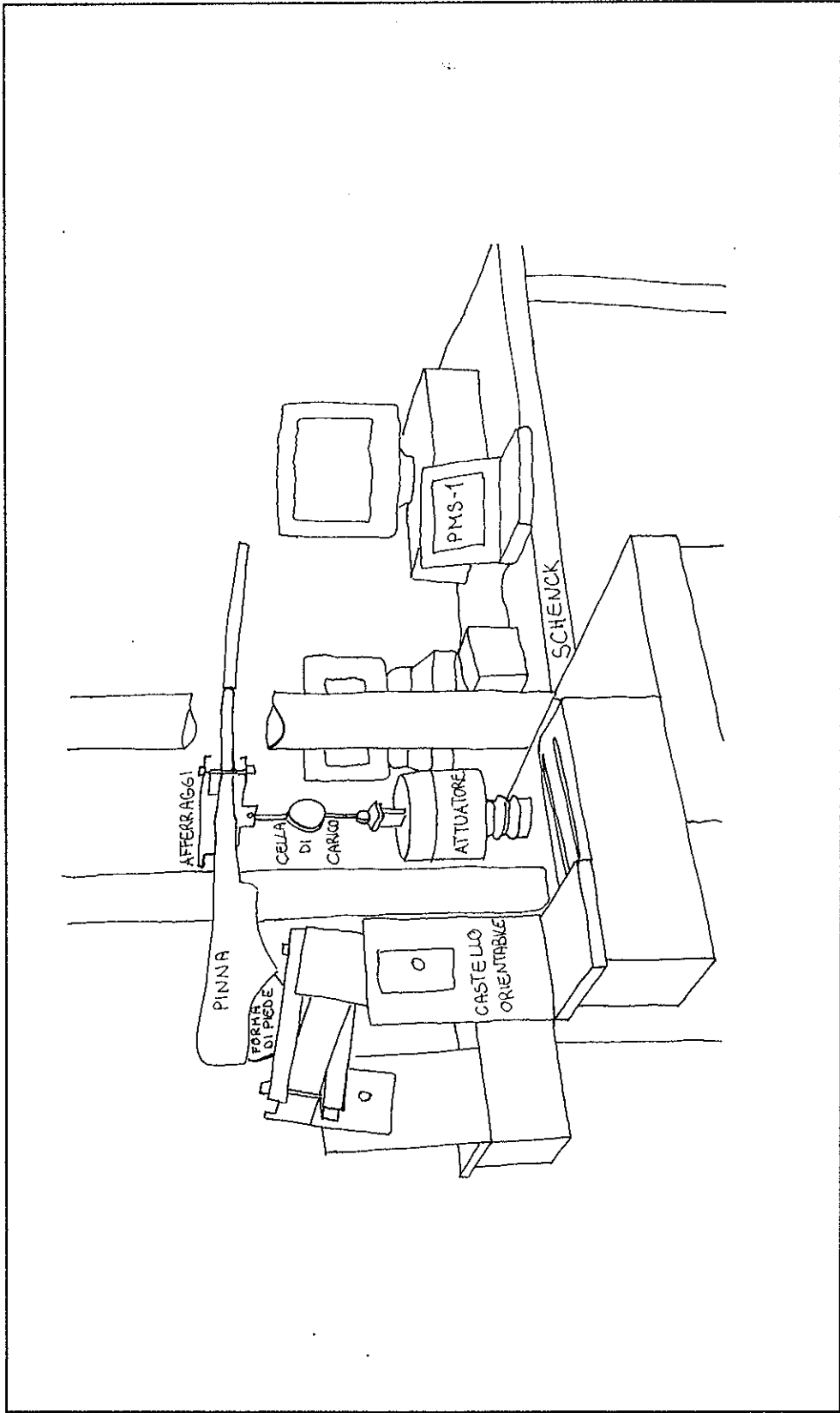
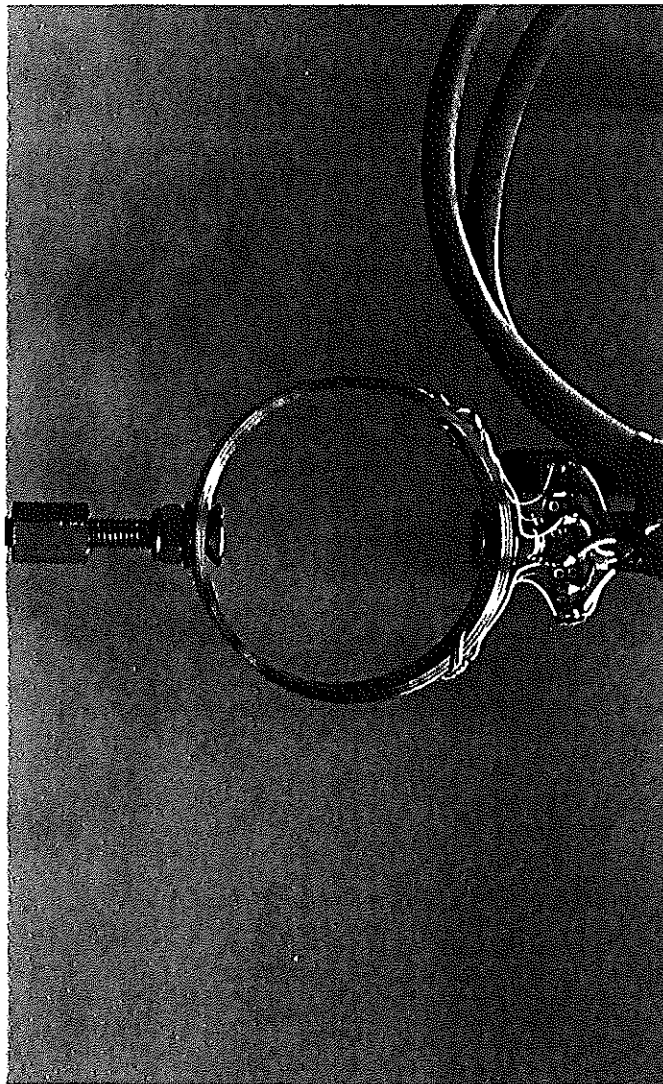


Figura 7.1-1 Elementi costituenti il banco per le prove dinamiche.



**Foto 7.1-1** Cella di carico.

## 7.2 CONDIZIONI DI PROVA

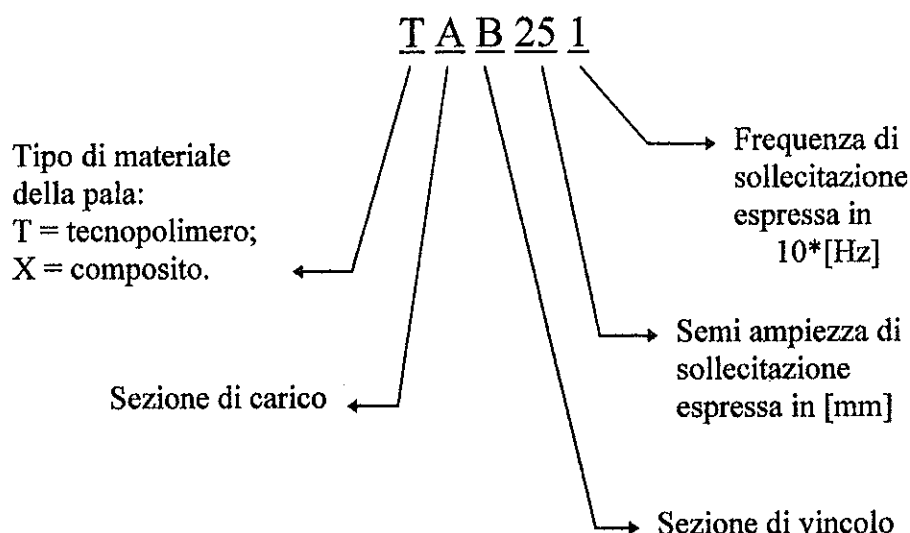
Tali prove sono state fatte, sia per ottenere le caratteristiche meccaniche da imporre alle pinne di Flipper nei vari tipi di simulazione sia a scopo di pura indagine, sulle pinne con pala in tecnopolimero, sulle pinne con pala in composito X\_15 e sulle pinne con pala in composito X\_40.

La procedura seguita per la determinazione dei cicli di isteresi dei vari tratti di pinna analizzati, può essere così riassunta:

a) definizione del tipo di prova (tab.7.2-1) attraverso l'individuazione:

- ⇒ del tipo di pinna da analizzare;
- ⇒ della sezione da vincolare e della sezione da caricare nella pinna;
- ⇒ dell'ampiezza di sollecitazione, stimata in base alle caratteristiche del tratto di pinna da analizzare;
- ⇒ della frequenza di sollecitazione, stimata in base alle caratteristiche del tratto di pinna da analizzare;

seguito la seguente designazione:



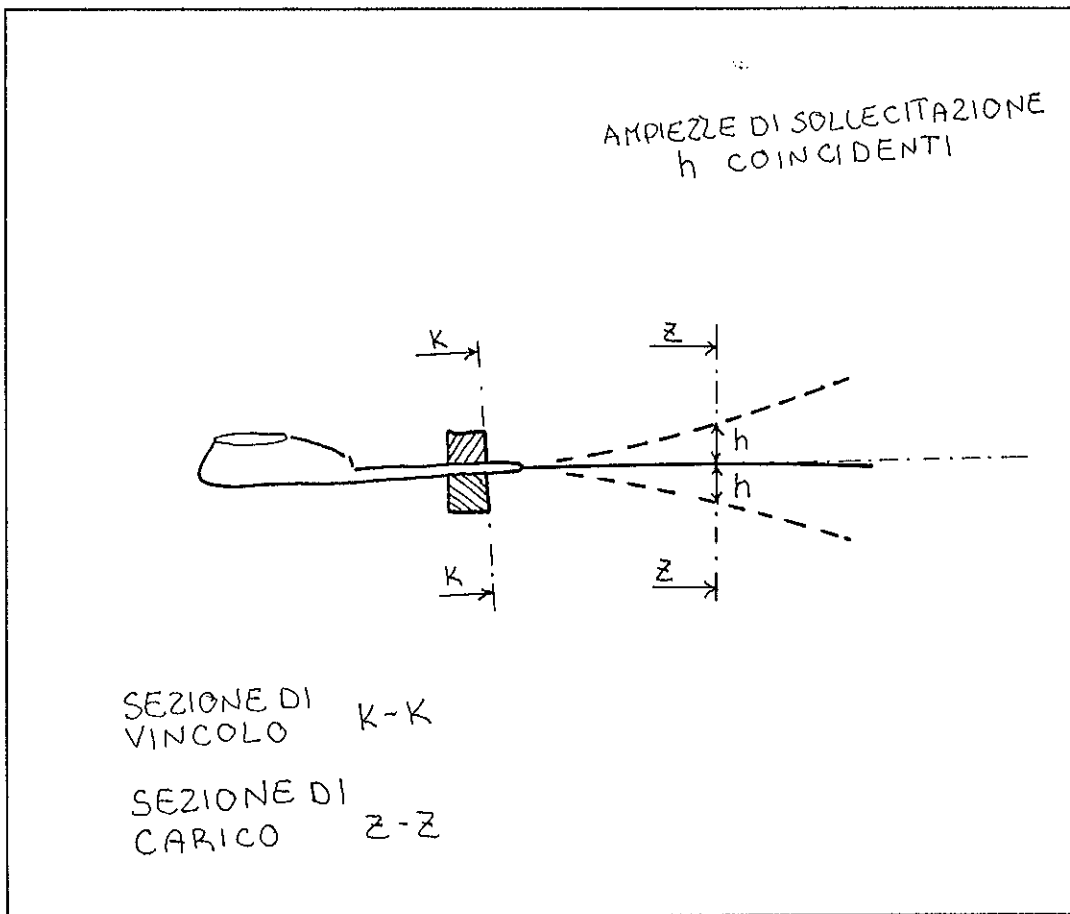
## Capitolo 7

Denominazione del tipo di prova	Tipo di materiale della pala	Sezione di carico	Sezione di vincolo	Ampiezza di	Frequenza di
				sollecitazione [mm]	sollecitazione [Hz]
<b>TAB251</b>	Tecnopolimero	A	B	50	0.1
<b>TAB252</b>	Tecnopolimero	A	B	50	0.2
<b>TAB253</b>	Tecnopolimero	A	B	50	0.3
<b>TAB254</b>	Tecnopolimero	A	B	50	0.4
<b>TAB351</b>	Tecnopolimero	A	B	70	0.1
<b>TAB352</b>	Tecnopolimero	A	B	70	0.2
<b>TAB353</b>	Tecnopolimero	A	B	70	0.3
<b>TAB354</b>	Tecnopolimero	A	B	70	0.4
<b>TAB451</b>	Tecnopolimero	A	B	90	0.1
<b>TAB452</b>	Tecnopolimero	A	B	90	0.2
<b>TAB453</b>	Tecnopolimero	A	B	90	0.3
<b>TCD101</b>	Tecnopolimero	C	D	20	0.1
<b>TCD103</b>	Tecnopolimero	C	D	20	0.3
<b>TCD105</b>	Tecnopolimero	C	D	20	0.5
<b>TCD252</b>	Tecnopolimero	C	D	50	0.2
<b>TCD352</b>	Tecnopolimero	C	D	70	0.2
<b>TDF151</b>	Tecnopolimero	D	F	30	0.1
<b>TDF451</b>	Tecnopolimero	D	F	90	0.1
<b>X1AB252</b>	Composito X15	A	B	50	0.2
<b>X1AB254</b>	Composito X15	A	B	50	0.4
<b>X1AB352</b>	Composito X15	A	B	70	0.2
<b>X1AB452</b>	Composito X15	A	B	90	0.2
<b>X1CD101</b>	Composito X15	C	D	20	0.1
<b>X1CD103</b>	Composito X15	C	D	20	0.3
<b>X1CD105</b>	Composito X15	C	D	20	0.5
<b>X1CD252</b>	Composito X15	C	D	50	0.2
<b>X1CD352</b>	Composito X15	C	D	70	0.2
<b>X1DF151</b>	Composito X15	D	F	30	0.1
<b>X1DF451</b>	Composito X15	D	F	90	0.1
<b>X4AB252</b>	Composito X40	A	B	50	0.2
<b>X4AB254</b>	Composito X40	A	B	50	0.4
<b>X4AB352</b>	Composito X40	A	B	70	0.2
<b>X4AB452</b>	Composito X40	A	B	90	0.2

Tabella 7.2-1 Denominazione del tipo di prova.

## Prove dinamiche

- b) fissaggio del castello orientabile al basamento della macchina per prove di fatica (Schenck), in base alle caratteristiche del tratto di pinna da analizzare;
- c) fissaggio della pinna al castello orientabile, mediante gli afferraggi richiesti dalla particolare sezione di vincolo;
- d) azzeramento (PMS-1) del segnale di forza rilevato dalla cella di carico in posizione di riposo;
- e) collegamento della cella di carico alla pinna, mediante gli afferraggi richiesti dalla particolare sezione di carico;
- f) collegamento della cella di carico all'attuatore di spostamento;
- g) orientazione del castello affinché la sezione da caricare sia perfettamente orizzontale (fig.7.2-1): questo per garantire che il tratto di pinna sia sollecitato simmetricamente da ambo le parti;
- h) regolazione (Schenck) delle caratteristiche di frequenza ed ampiezza dello spostamento sinusoidale imposto dall'attuatore di spostamento;
- i) attivazione dell'attuatore di spostamento (Schenck);
- j) rilevazione del ciclo di isteresi (PMS-1);
- k) disattivazione dell'attuatore di spostamento (Schenck);
- l) registrazione dei segnali di forza e spostamento relativi al ciclo di isteresi della prova effettuata, in un apposito file;
- m) ripetizione delle fasi a), h), i), j), k), l), per le restanti combinazioni di frequenza ed ampiezza relative al tratto di pinna analizzato;
- n) ripetizione di tutte le precedenti fasi, per i restanti tratti di pinna da analizzare;
- o) ripetizione di tutte le precedenti fasi, per i restanti tipi di pinna da analizzare.



**Figura 7.2-1** Orientazione del castello affinché la sezione da caricare sia perfettamente orizzontale: questo per garantire che il tratto di pinna sia sollecitato simmetricamente da ambo le parti.

N.B. *Non si è eseguita nessuna prova sulla sezione BC perché è completamente identica alla sezione AB.*

### 7.3 PROVE SULLA PINNA CON PALA IN TECNOPOLIMERO

Essendo la frequenza di campionamento dei segnali, di forza e di spostamento, di cento [Hz], per costruire i relativi cicli di isteresi sono stati utilizzati da duecento a mille rilievi, valutati nel seguente modo:

$$N^{\circ} \text{rilievi} = \frac{T_c}{T_s} = \frac{f_s}{f_c}$$

dove:

$T_c$  = periodo del ciclo da ricostruire;

$T_s$  = periodo tra un campionamento di segnale ed il successivo;

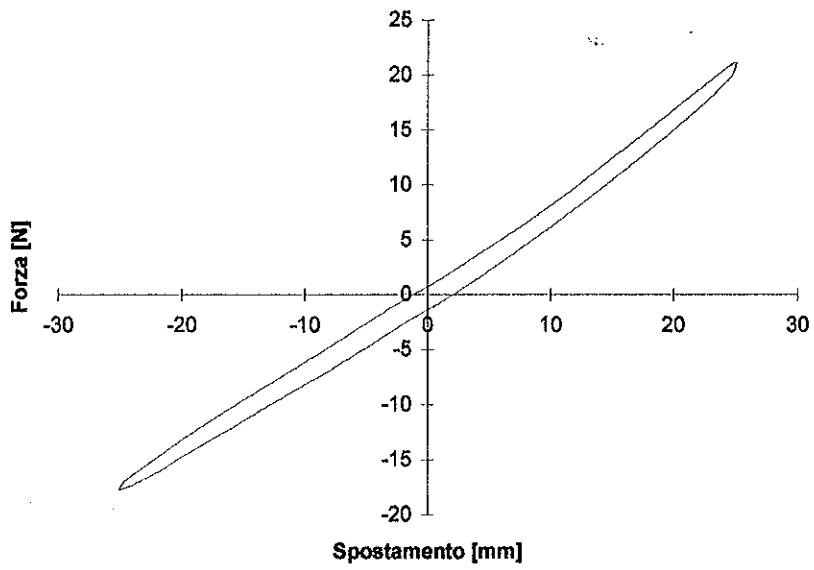
$f_c$  = frequenza del ciclo da ricostruire;

$f_s$  = frequenza di campionamento (100 Hz) del segnale rilevato.

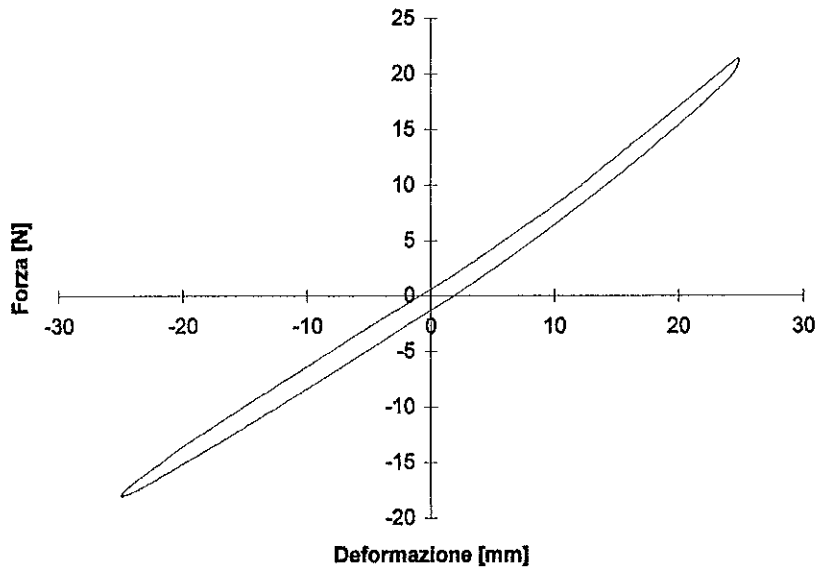
Di seguito sono riportati i cicli d'isteresi delle pinne con pala in tecnopolimero (tab.3.2-2, pinna1) usate nella pinneggiata (andatura lenta con pinne lunghe) presa a riferimento nella costruzione del modello numerico.

In particolare ,nei grafici 7.3-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18 sono riportati i cicli di isteresi previsti nel piano di lavoro di tabella 7.2-1, mentre nel grafico 7.3-19 è riportato il ciclo di isteresi valutato, a scopo di indagine, caricando la pinna a 65 [cm] dalla sezione di vincolo D verso la sezione C (vedi fig.6-1).



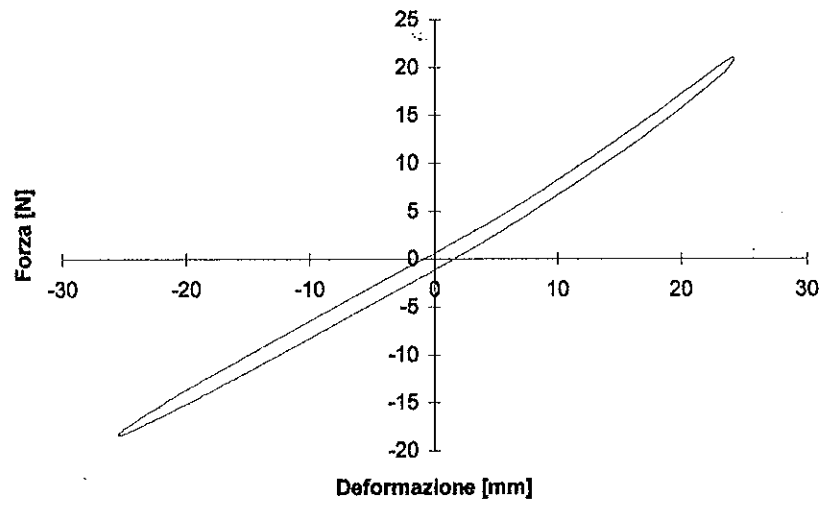


**Grafico 7.3-1** Ciclo di isteresi TAB251.

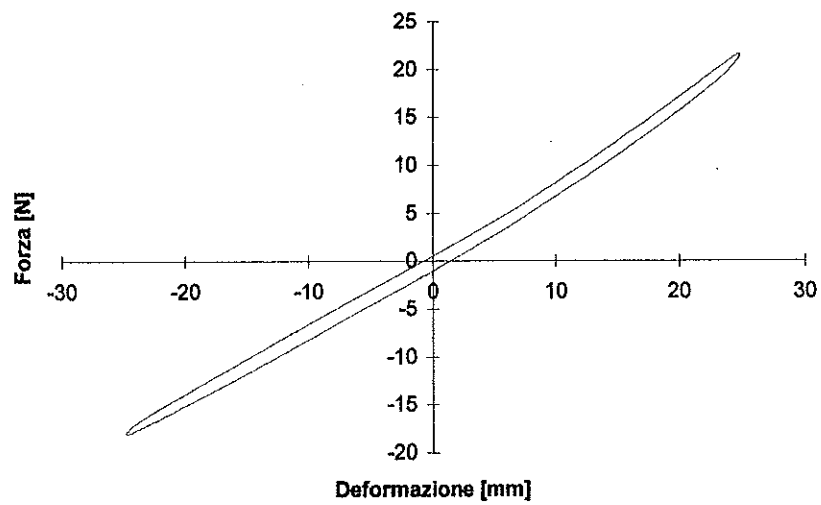


**Grafico 7.3-2** Ciclo di isteresi TAB252.

## Prove dinamiche

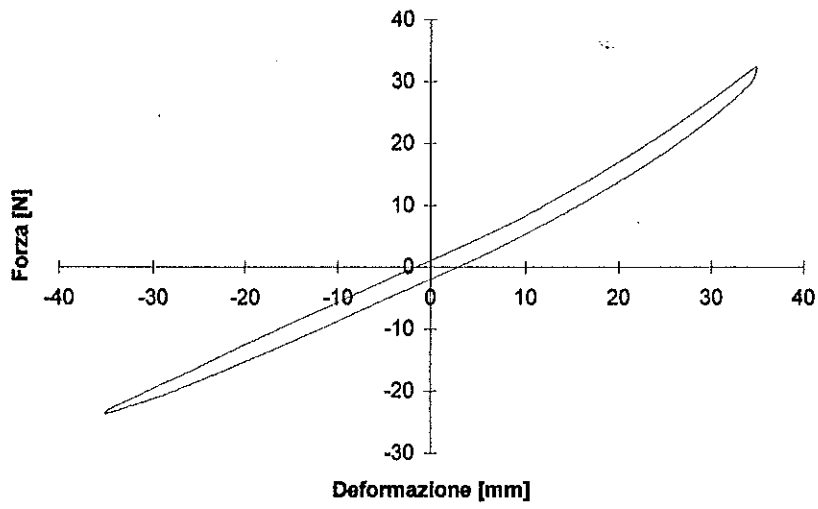


**Grafico 7.3-3** Ciclo di isteresi TAB253.

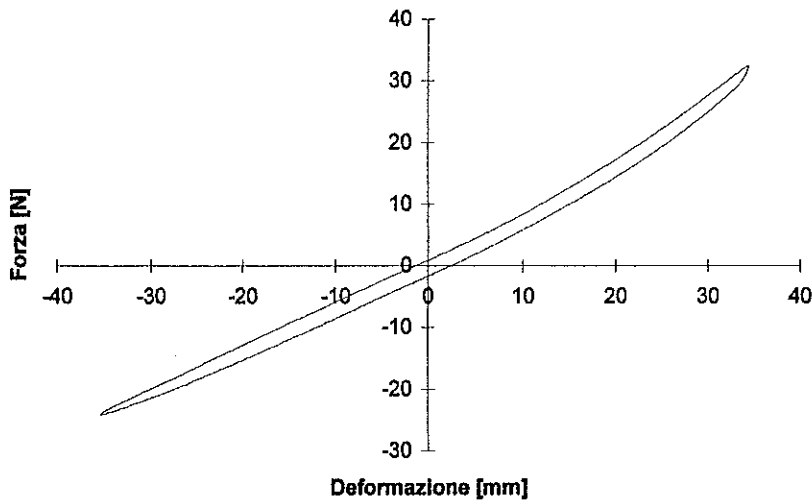


**Grafico 7.3-4** Ciclo di isteresi TAB254.

## Capitolo 7

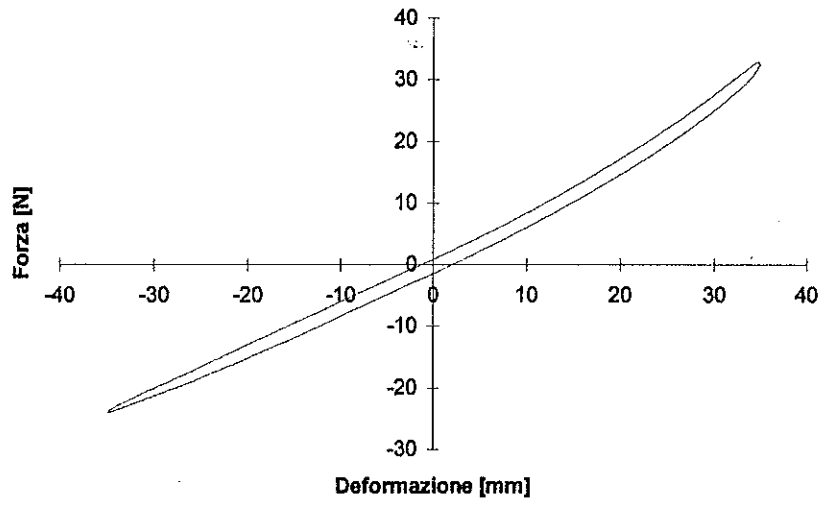


**Grafico 7.3-5** Ciclo di isteresi TAB351.

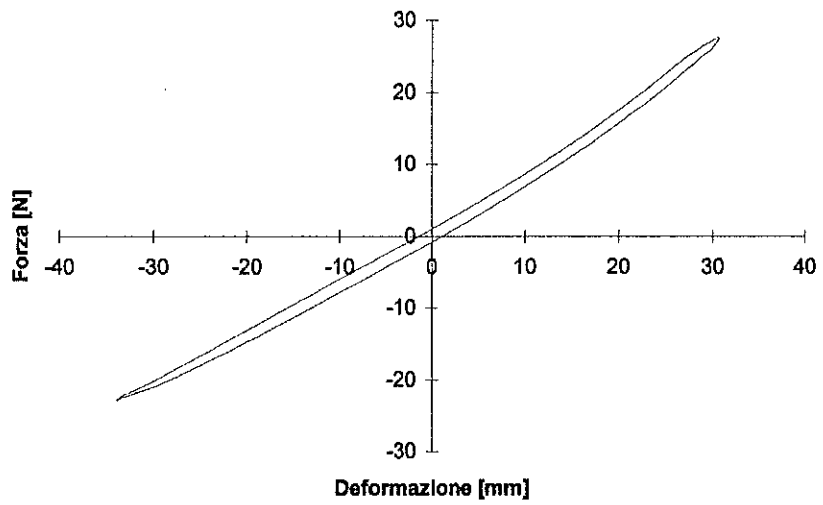


**Grafico 7.3-6** Ciclo di isteresi TAB352.

## Prove dinamiche

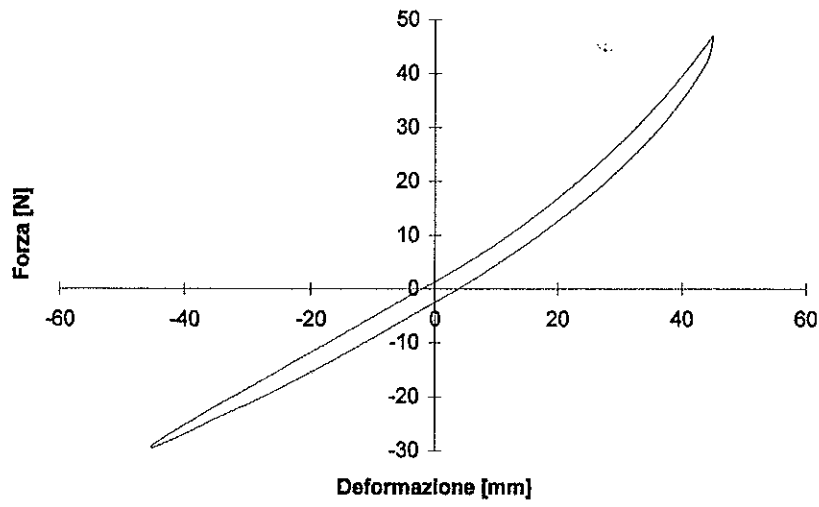


**Grafico 7.3-7** Ciclo di isteresi TAB353.

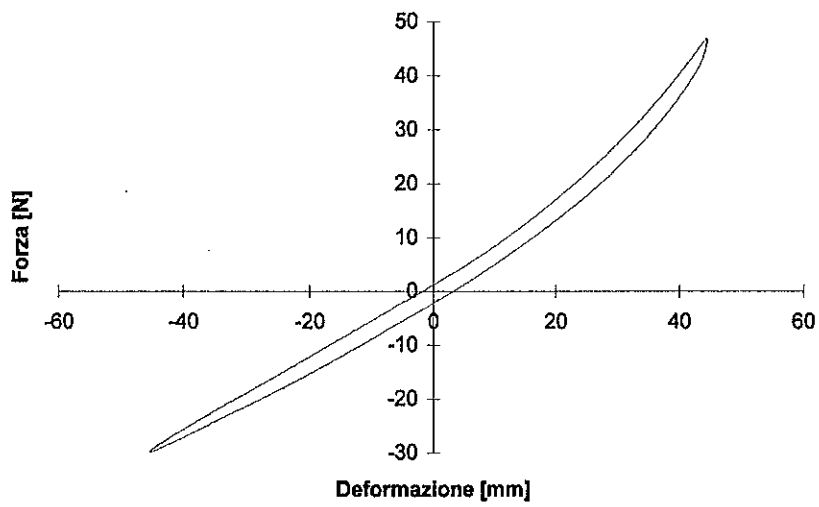


**Grafico 7.3-8** Ciclo di isteresi TAB354.

## Capitolo 7

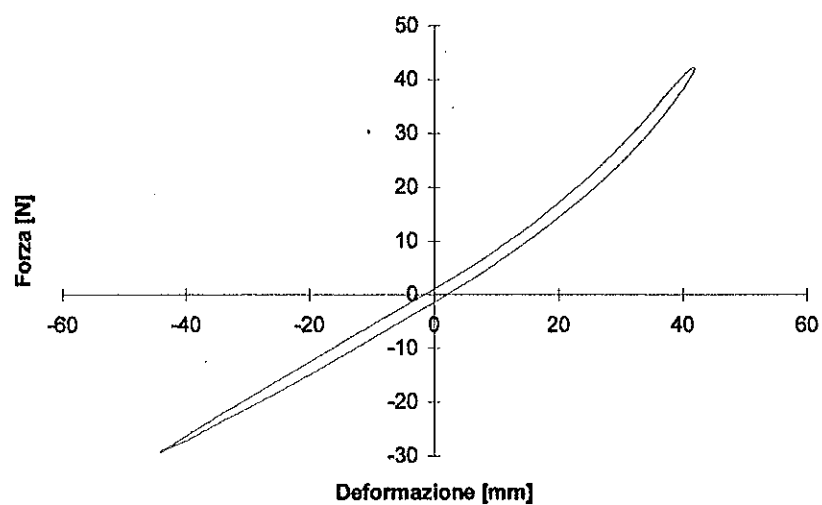


**Grafico 7.3-9** Ciclo di isteresi TAB451.

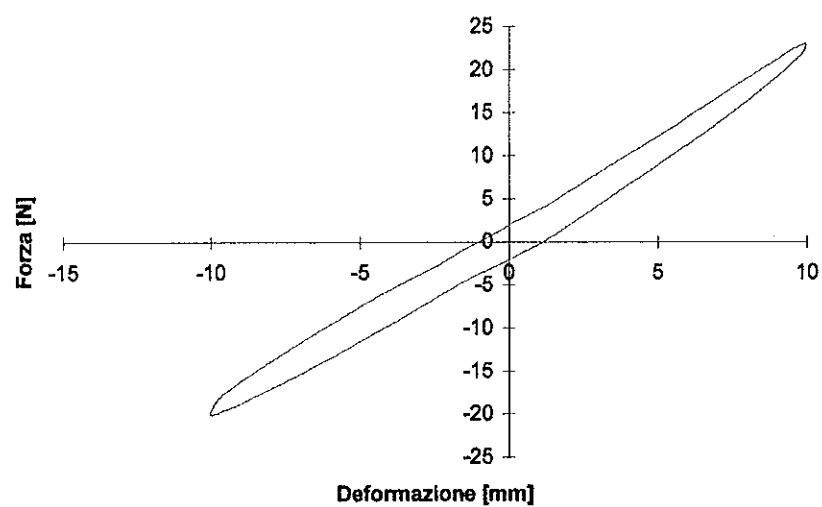


**Grafico 7.3-10** Ciclo di isteresi TAB452.

## Prove dinamiche

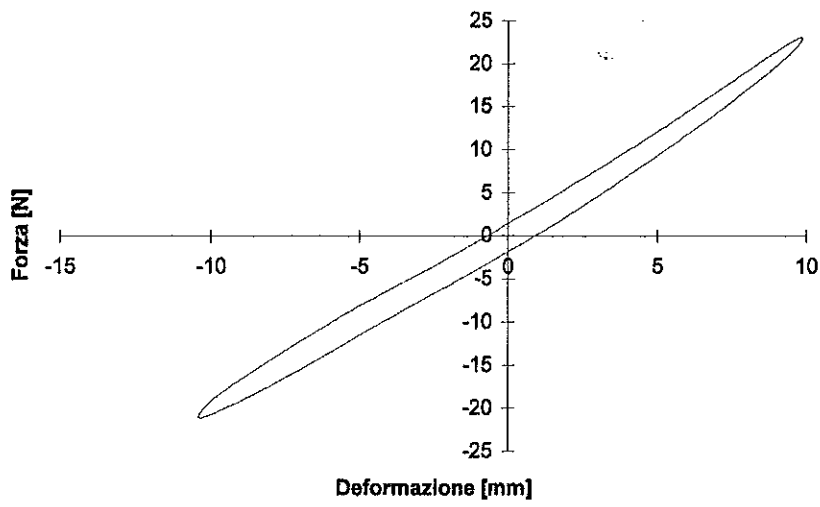


**Grafico 7.3-11** Ciclo di isteresi TAB453.

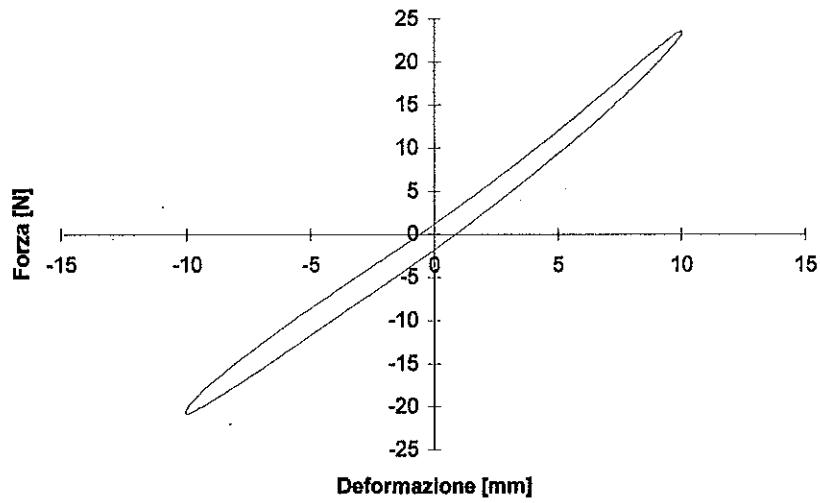


**Grafico 7.3-12** Ciclo di isteresi TCD101.

## Capitolo 7

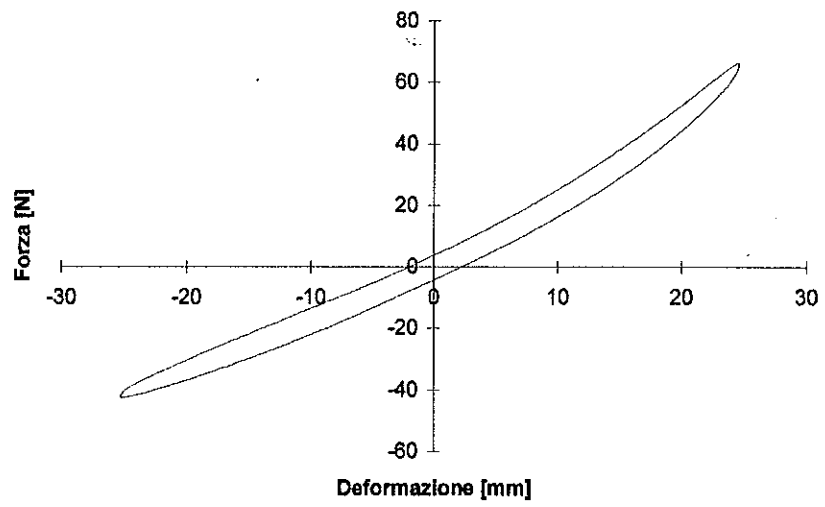


**Grafico 7.3-13** Ciclo di isteresi TCD103.

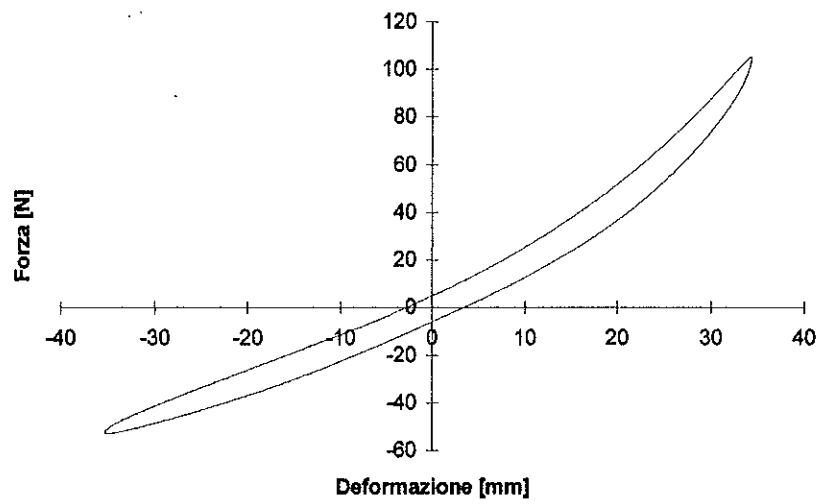


**Grafico 7.3-14** Ciclo di isteresi TCD105.

## Prove dinamiche



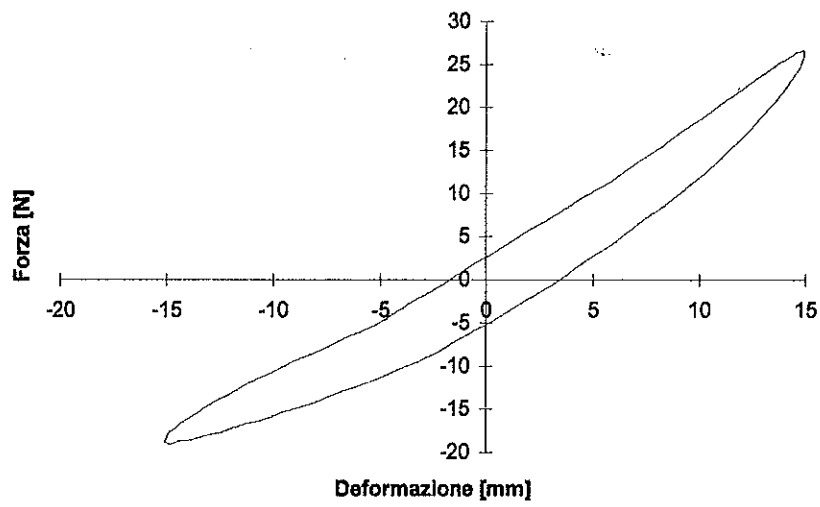
**Grafico 7.3-15** Ciclo di isteresi TCD252.



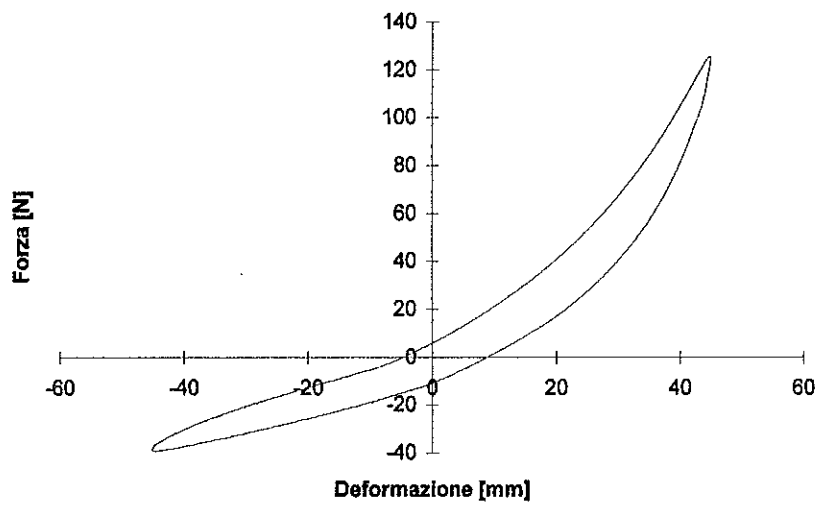
**Grafico 7.3-16** Ciclo di isteresi TCD352.



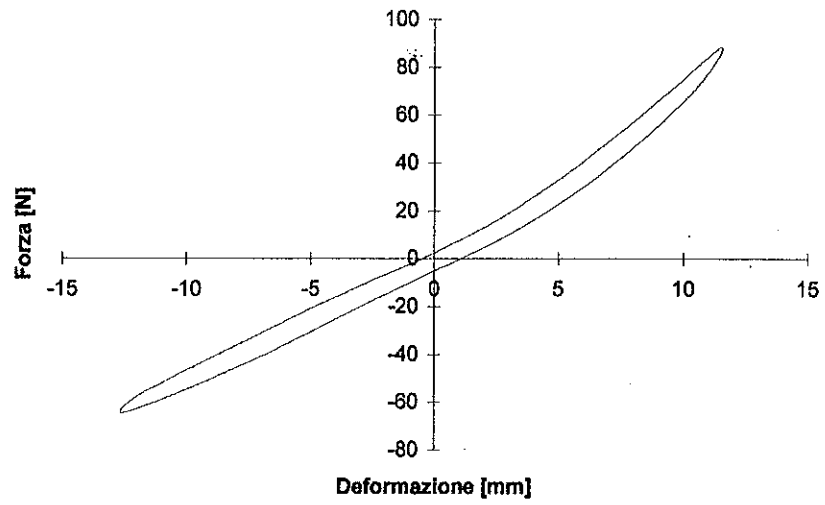
## Capitolo 7



**Grafico 7.3-17** Ciclo di isteresi TDF151.



**Grafico 7.3-18** Ciclo di isteresi TDF451.



**Grafico 7.3-19** Ciclo di isteresi T65D124.

L'analisi approfondita di tutti i cicli d'isteresi ottenuti dalle prove dinamiche è riportata nel capitolo 8.

## **7.4 PROVE SULLA PINNA CON PALA IN COMPOSITO**

Di seguito sono riportati i cicli d'isteresi delle pinne con pala in composito (foto 1.1-1) rilevati con le stesse modalità usate per le pinne con pala in tecnopolimero (par.7.3).

I modelli di pinne con pala in composito analizzate sono:

⇒ X\_15, consigliato per l'apnea in bassi fondali (< di 15 [m] di profondità);

⇒ X\_40, consigliato per l'apnea in alti fondali (40 [m] di profondità).

In particolare ,nei grafici 7.4-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15 sono riportati i cicli di isteresi previsti nel piano di lavoro di tabella 7.2-1, mentre nei grafici 7.4-16,17,18 sono riportati il cicli di isteresi valutati, a scopo di indagine, caricando la pinna a 65 [cm] dalla sezione di vincolo D verso la sezione C (vedi fig.6-1).

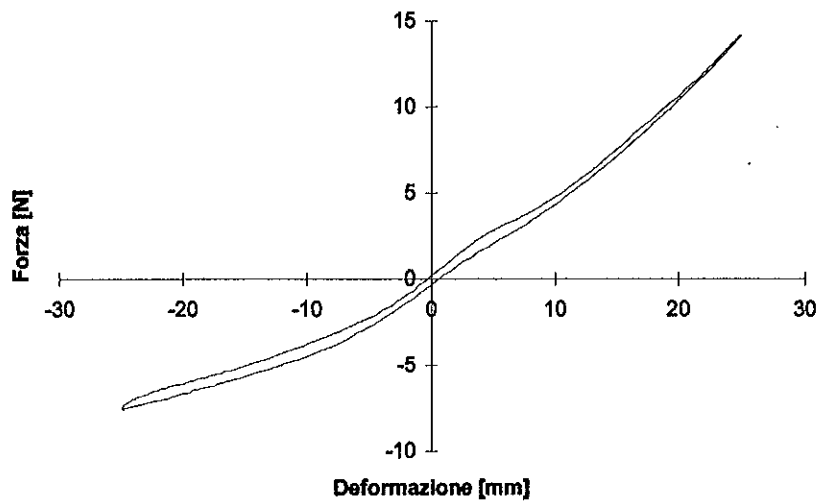


Grafico 7.4-1 Ciclo di isteresi X1AB252.

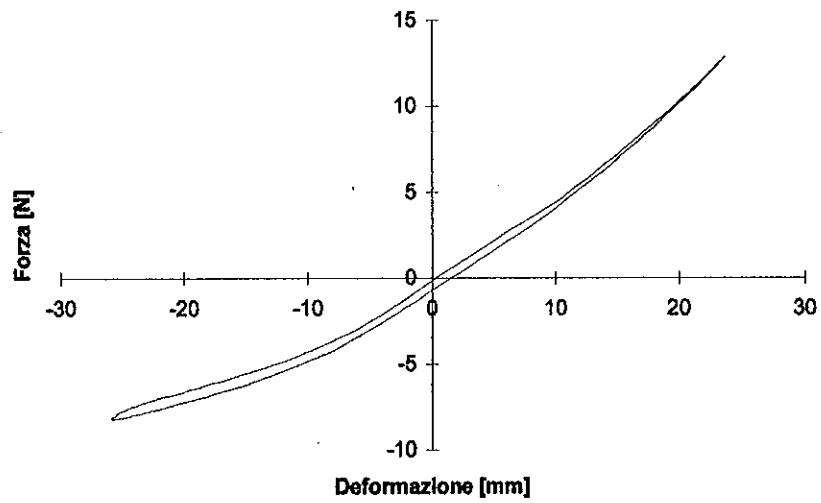
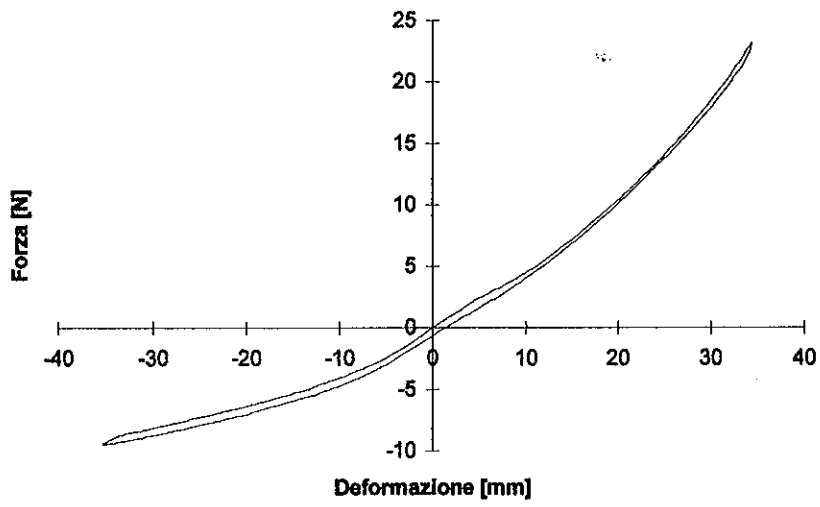
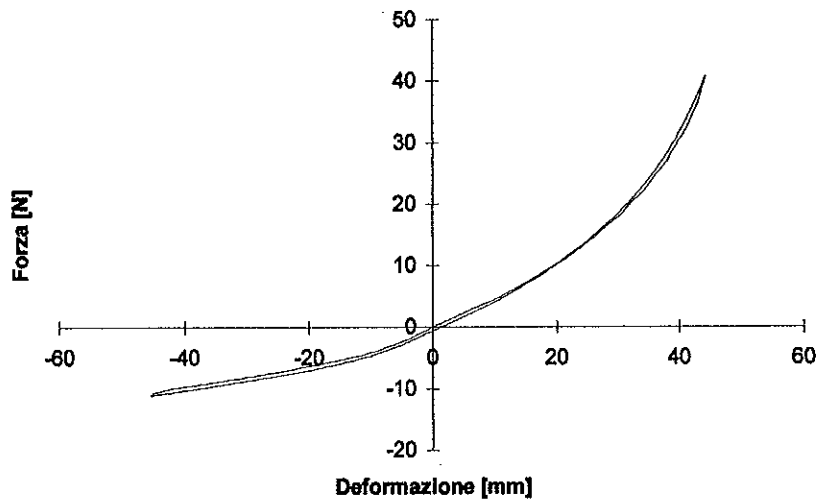


Grafico 7.4-2 Ciclo di isteresi X1AB254.

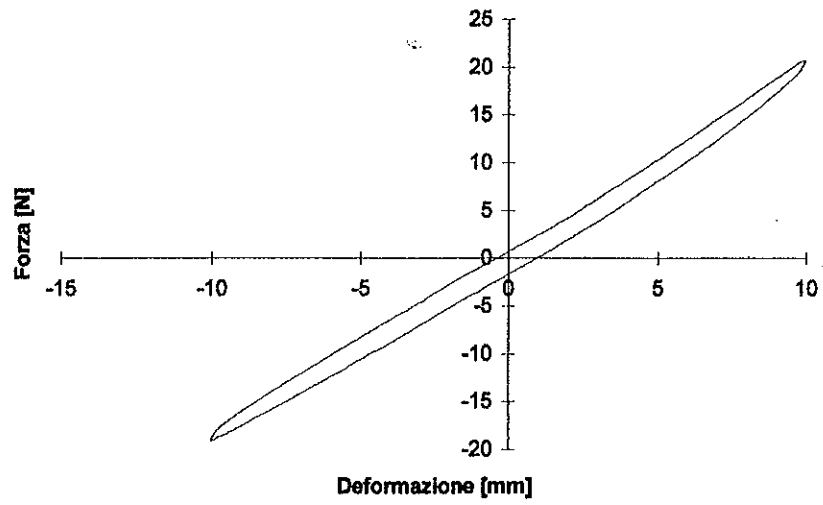


**Grafico 7.4-3** Ciclo di isteresi X1AB352.

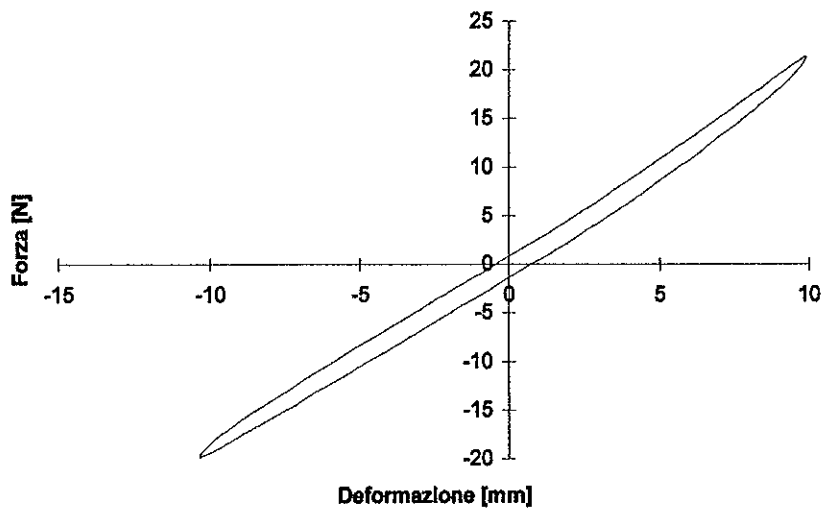


**Grafico 7.4-4** Ciclo di isteresi X1AB452.

## Prove dinamiche

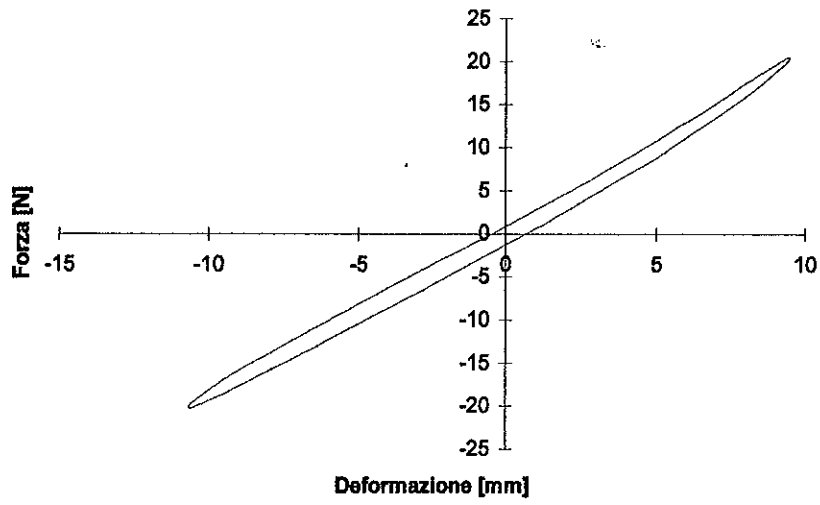


**Grafico 7.4-5** Ciclo di isteresi X1CD101.

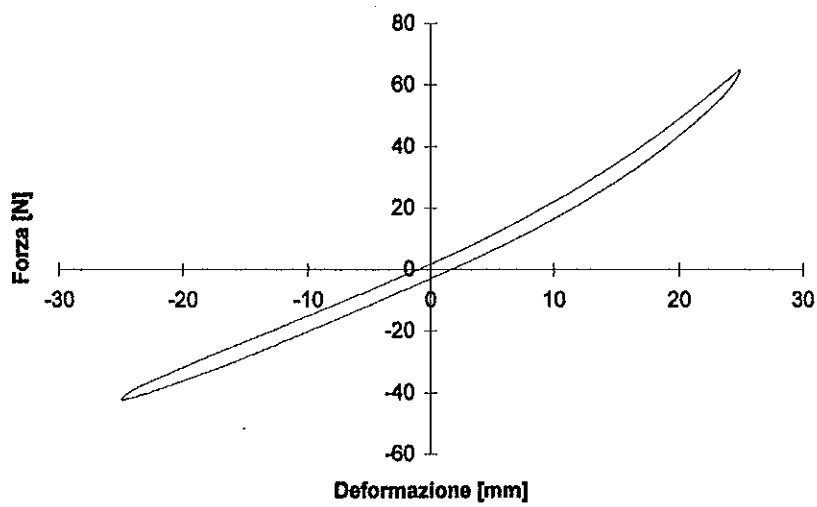


**Grafico 7.4-6** Ciclo di isteresi X1CD103.

## Capitolo 7

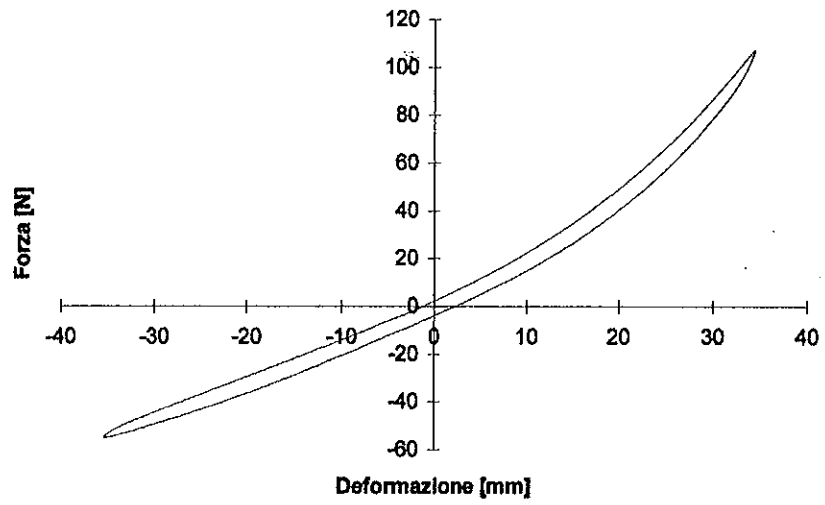


**Grafico 7.4-7** Ciclo di isteresi X1CD105.

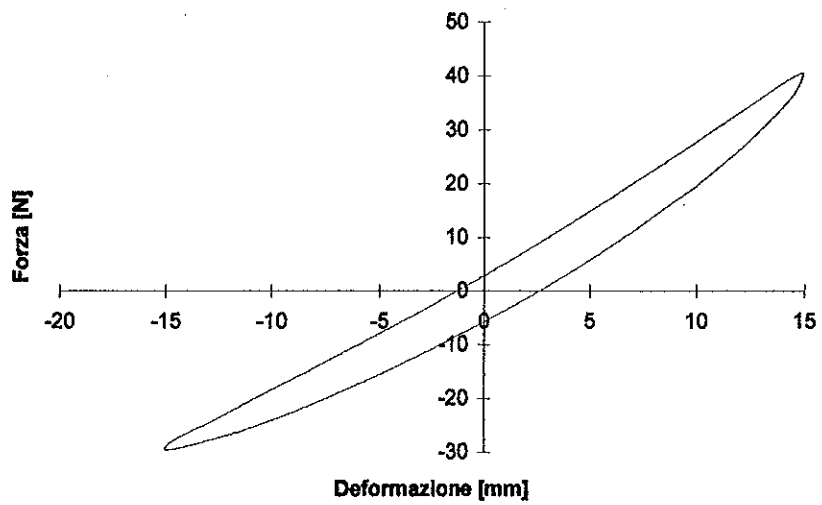


**Grafico 7.4-8** Ciclo di isteresi X1CD252.

## Prove dinamiche



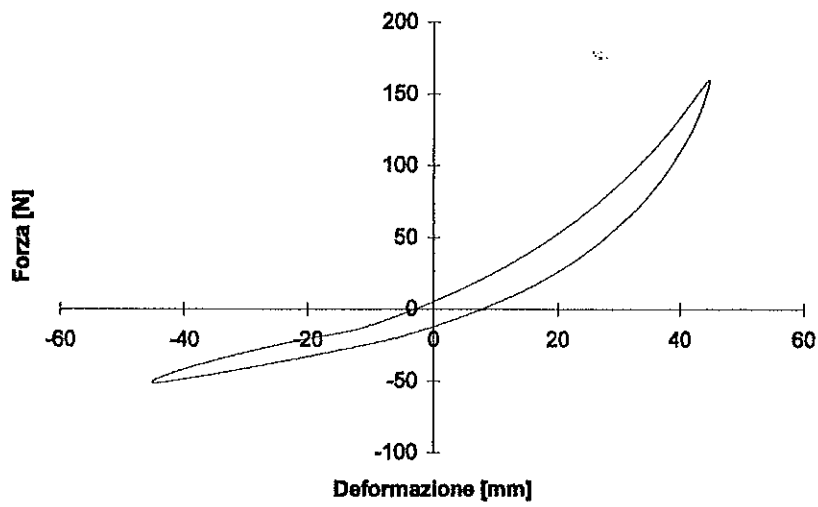
**Grafico 7.4-9** Ciclo di isteresi X1CD352.



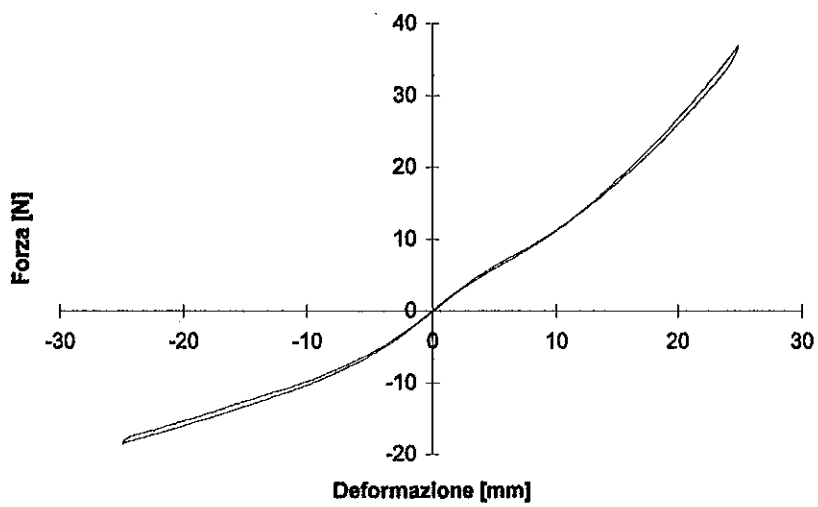
**Grafico 7.4-10** Ciclo di isteresi X1DF151.



## Capitolo 7

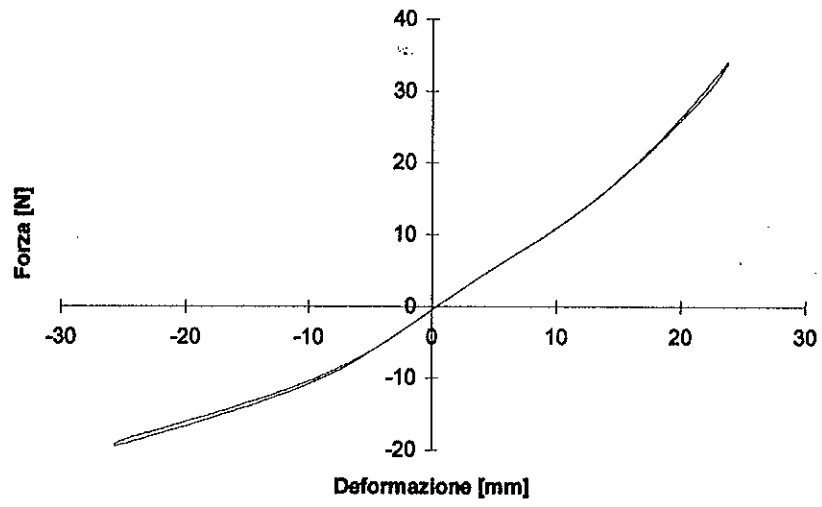


**Grafico 7.4-11** Ciclo di isteresi X1DF451.

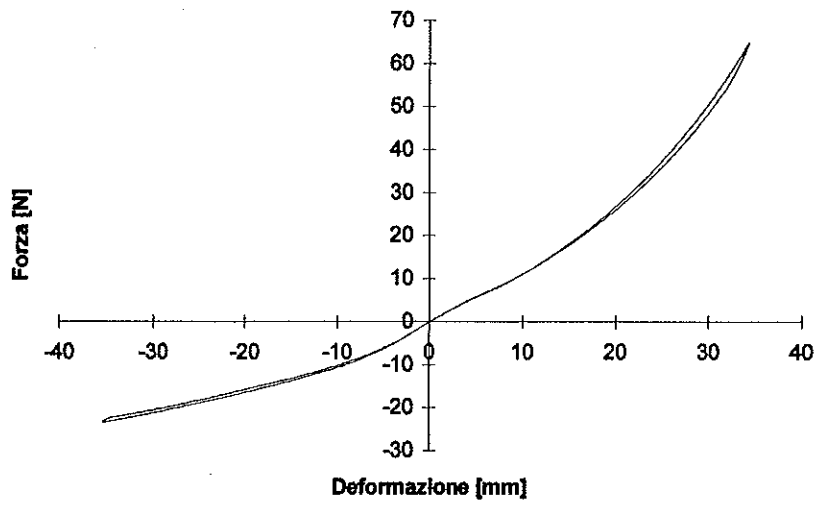


**Grafico 7.4-12** Ciclo di isteresi X4AB252.

## Prove dinamiche

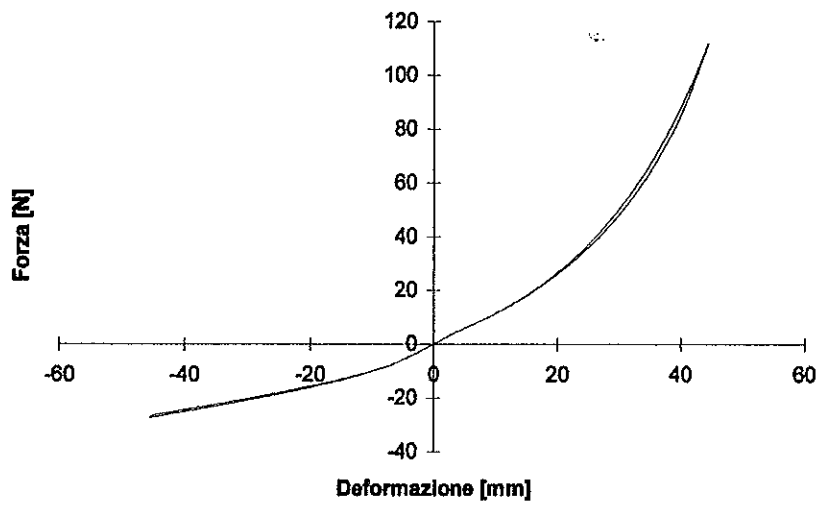


**Grafico 7.4-13** Ciclo di isteresi X4AB254.

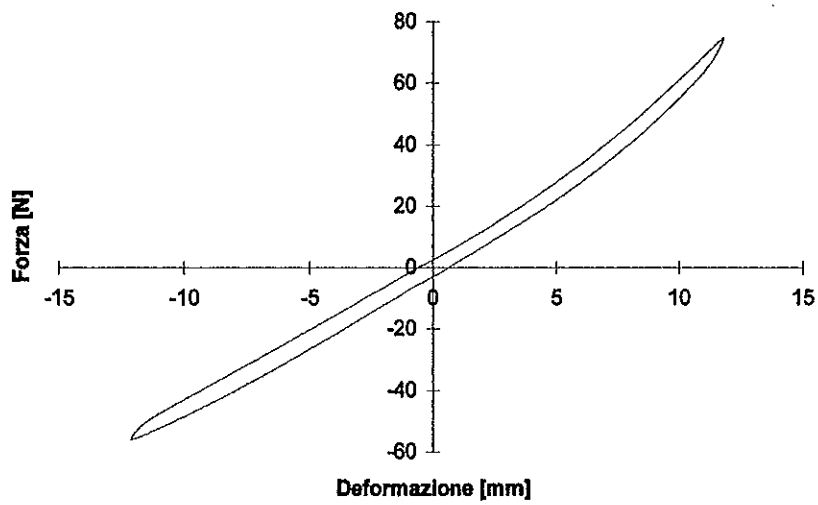


**Grafico 7.4-14** Ciclo di isteresi X4AB352.

## Capitolo 7

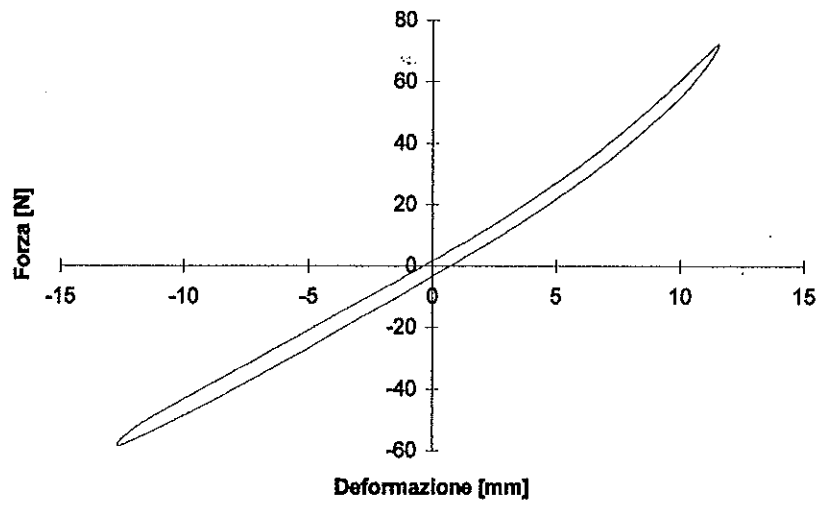


**Grafico 7.4-15** Ciclo di isteresi X4AB452.

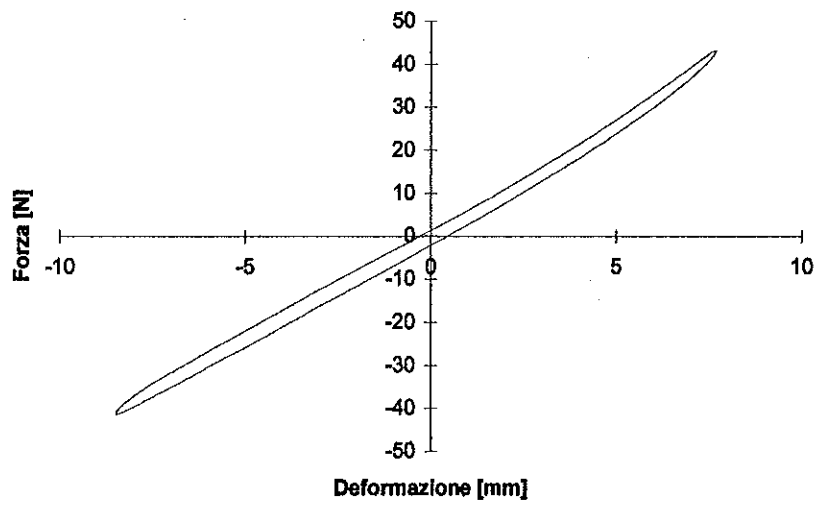


**Grafico 7.4-16** Ciclo di isteresi X165D122.

## Prove dinamiche



**Grafico 7.4-17** Ciclo di isteresi X165D124.



**Grafico 7.4-18** Ciclo di isteresi X165D845.

## Capitolo 7

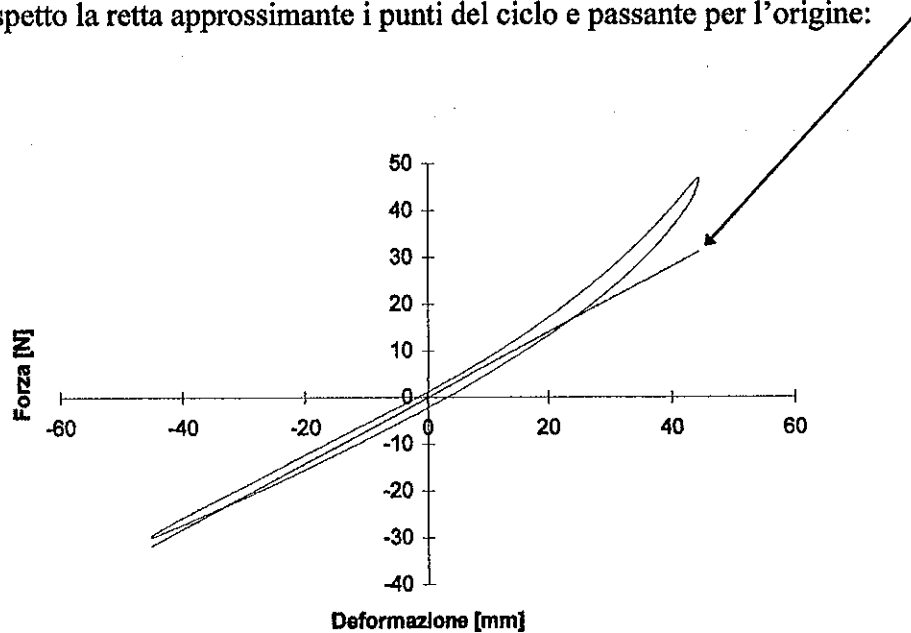
L'analisi approfondita di tutti i cicli d'isteresi ottenuti dalle prove dinamiche è riportata nel capitolo 8.

## CAP. 8 ANALISI DEI RISULTATI DELLE PROVE DINAMICHE

### 8.1 CICLI DI ISTERESI E LORO CARATTERISTICHE

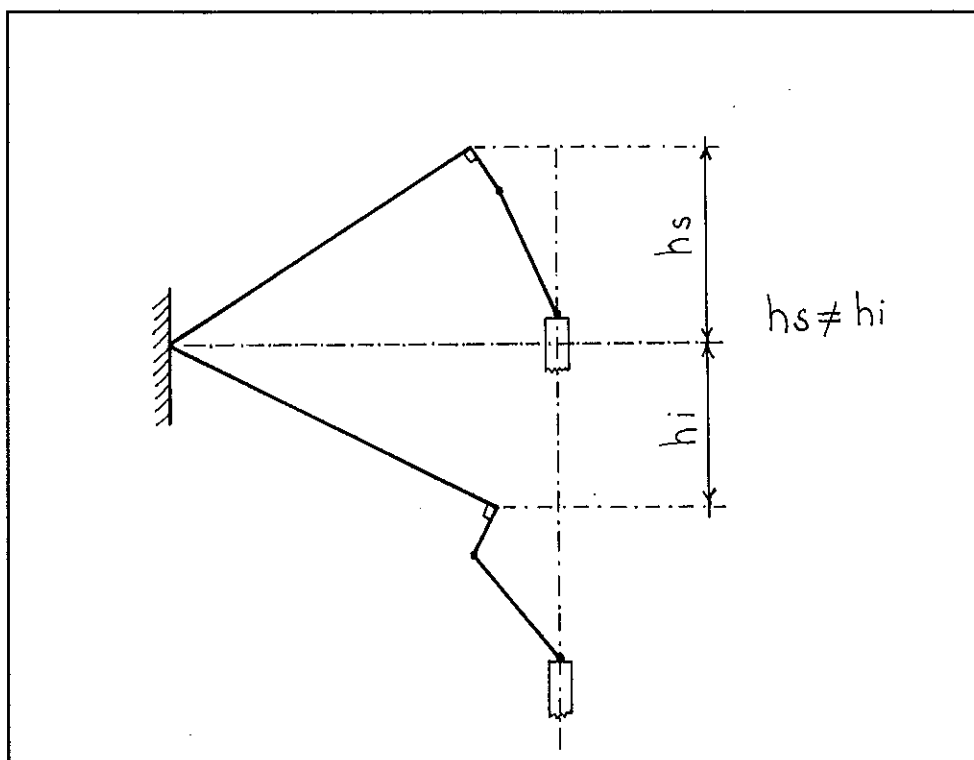
Dai cicli d'isteresi sperimentali, esposti nel precedente capitolo, si possono fare le seguenti osservazioni.

- a) Al crescere dell'ampiezza di sollecitazione, il ciclo d'isteresi assume un andamento asimmetrico sia rispetto l'origine degli assi (graf.8.1-1) sia rispetto la retta approssimante i punti del ciclo e passante per l'origine:



**Grafico 8.1-1** Caratteristiche di asimmetria di un ciclo di isteresi sperimentale.

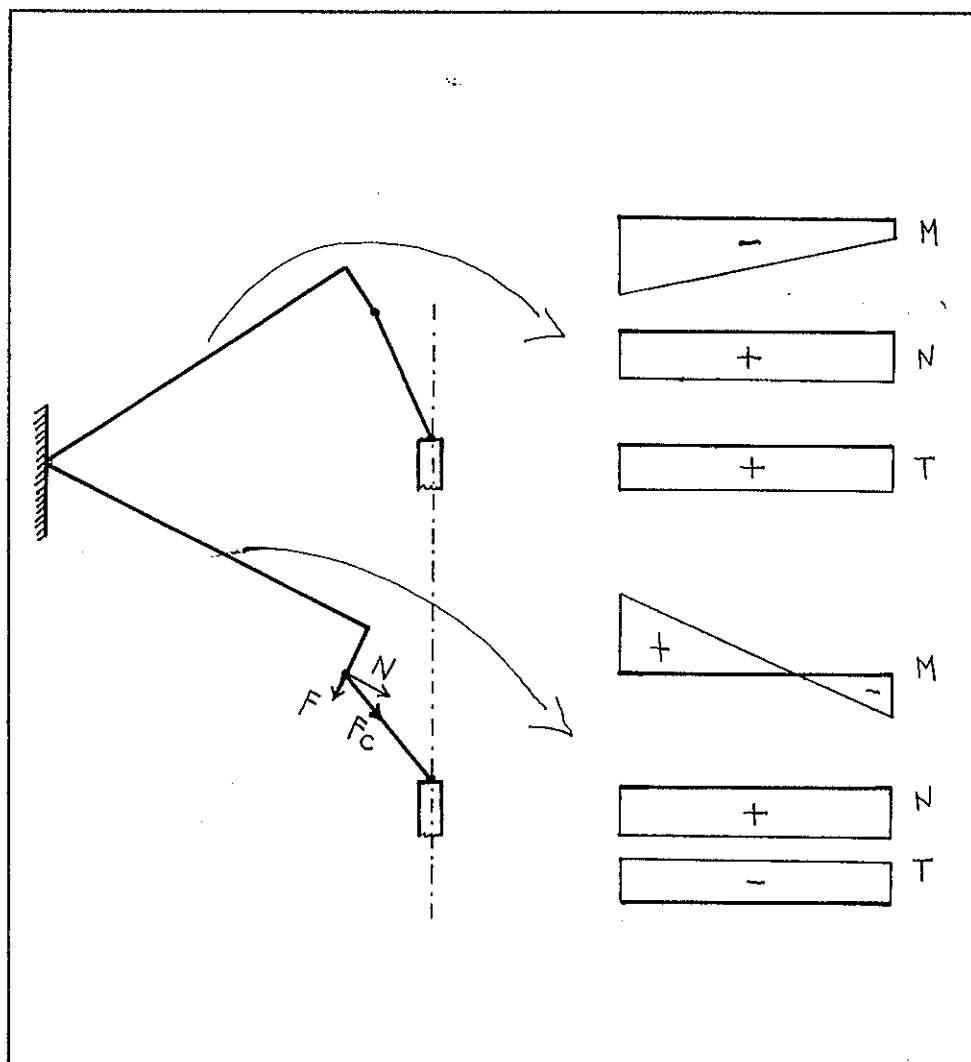
Questa asimmetria di comportamento è causata dalla particolare geometria adottata per i leveraggi che collegano l'attuatore di spostamento alla sezione di carico del tratto di pinna da sollecitare (fig.8.1-1).



**Figura 8.1-1** Sistema di leveraggi nelle due posizioni estreme imposte dall'attuatore di spostamento.

Le conseguenze sul tratto di pala da analizzare sono molteplici:

- ⇒ diversa ampiezza di deformazione nei due versi di sollecitazione (fig.8.1-1);
- ⇒ diverso tipo di sollecitazione nei due versi di deformazione (fig.8.1-2).



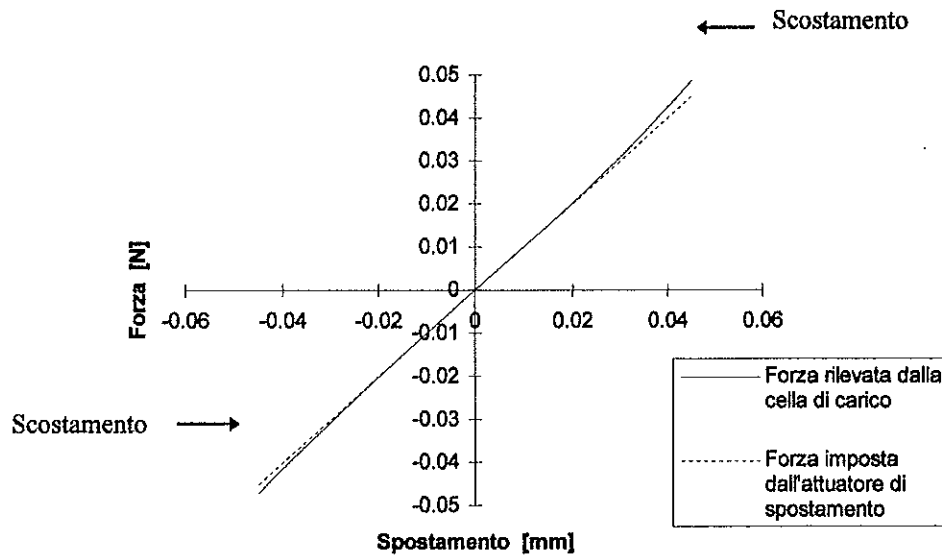
**Figura 8.1-2** Sollecitazioni agenti nelle due posizioni estreme imposte dall'attuatore di spostamento.

Una soluzione alternativa al sistema di leveraggi adottato, consiste nell'incernierare lo snodo superiore della cella di carico in corrispondenza della sezione di carico della pinna (fig.8.1-3), con le seguenti conseguenze:

- a) l'asimmetria del ciclo di isteresi, rispetto la retta approssimante i punti del ciclo e passante per l'origine, risulta ridotta ma non eliminata. Infatti, riproducendo su Working Model tali condizioni di prova e confrontando la



forza imposta dall'attuatore di spostamento con quella rilevata dalla cella di carico, risulta:



**Grafico 8.1-2** Confronto tra la forza imposta dall'attuatore di spostamento e quella rilevata dalla cella di carico, quantificate simulando numericamente su WM le condizioni di prova con lo snodo superiore della cella di carico incernierato in corrispondenza della sezione di carico della pinna.

- b) la simmetria del ciclo di isteresi, rispetto l'origine degli assi (graf.8.1-2);
- c) una notevole complicazione degli afferraggi che fissano lo snodo superiore della cella di carico in corrispondenza della sezione di carico della pinna.

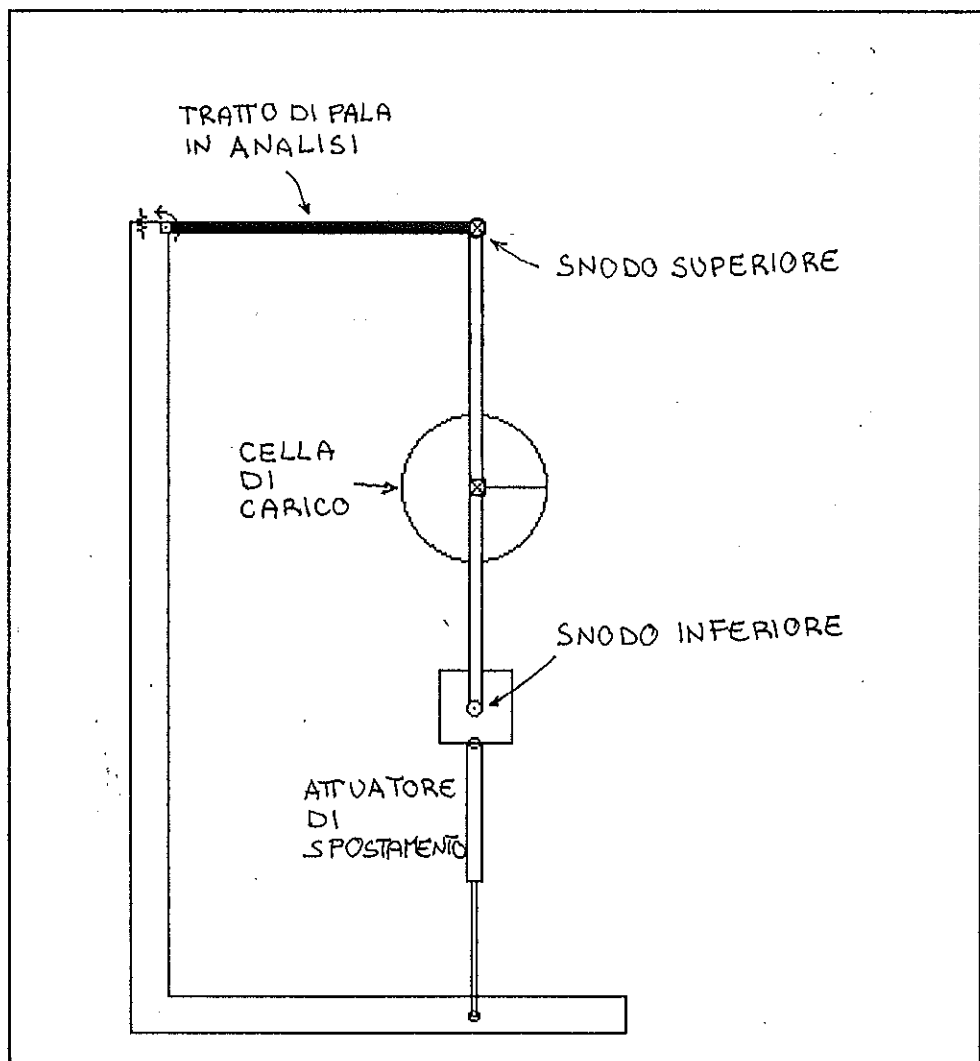
Considerando:

- le notevoli complicazioni e le scarse migliorie che si potrebbero ottenere ripetendo le prove incernierando lo snodo superiore della cella di carico in corrispondenza della sezione di carico della pinna;

## Analisi dei risultati delle prove dinamiche

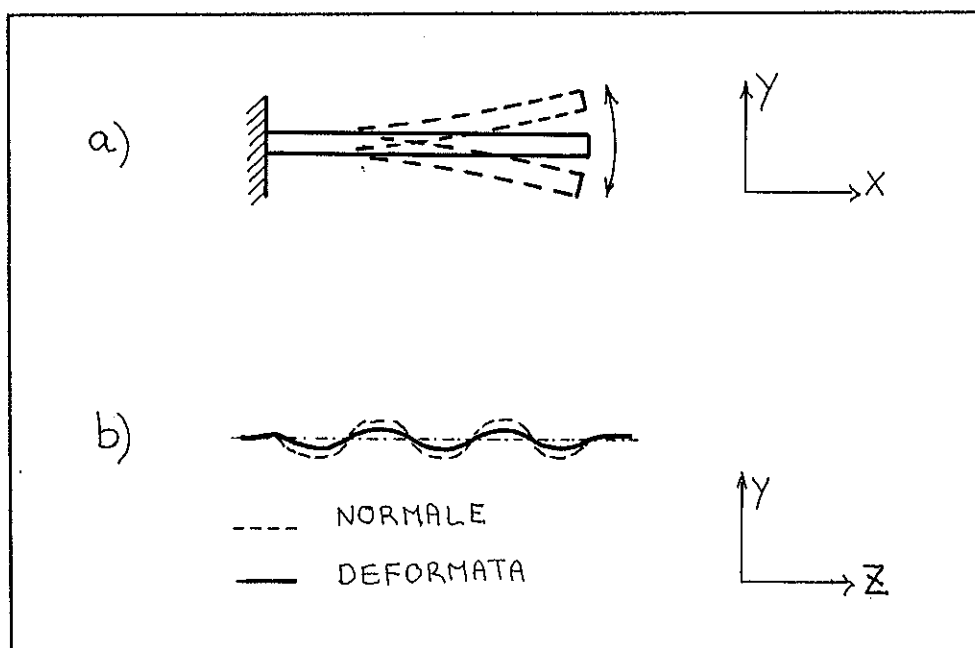
- che trattando opportunamente i cicli di isteresi rilevati sperimentalmente (vedi paragrafi successivi) si ottengono comunque i valori esatti delle costanti di rigidità flessionale e dei coefficienti di smorzamento isteretico;

le prove dinamiche effettuate non sono state ripetute.

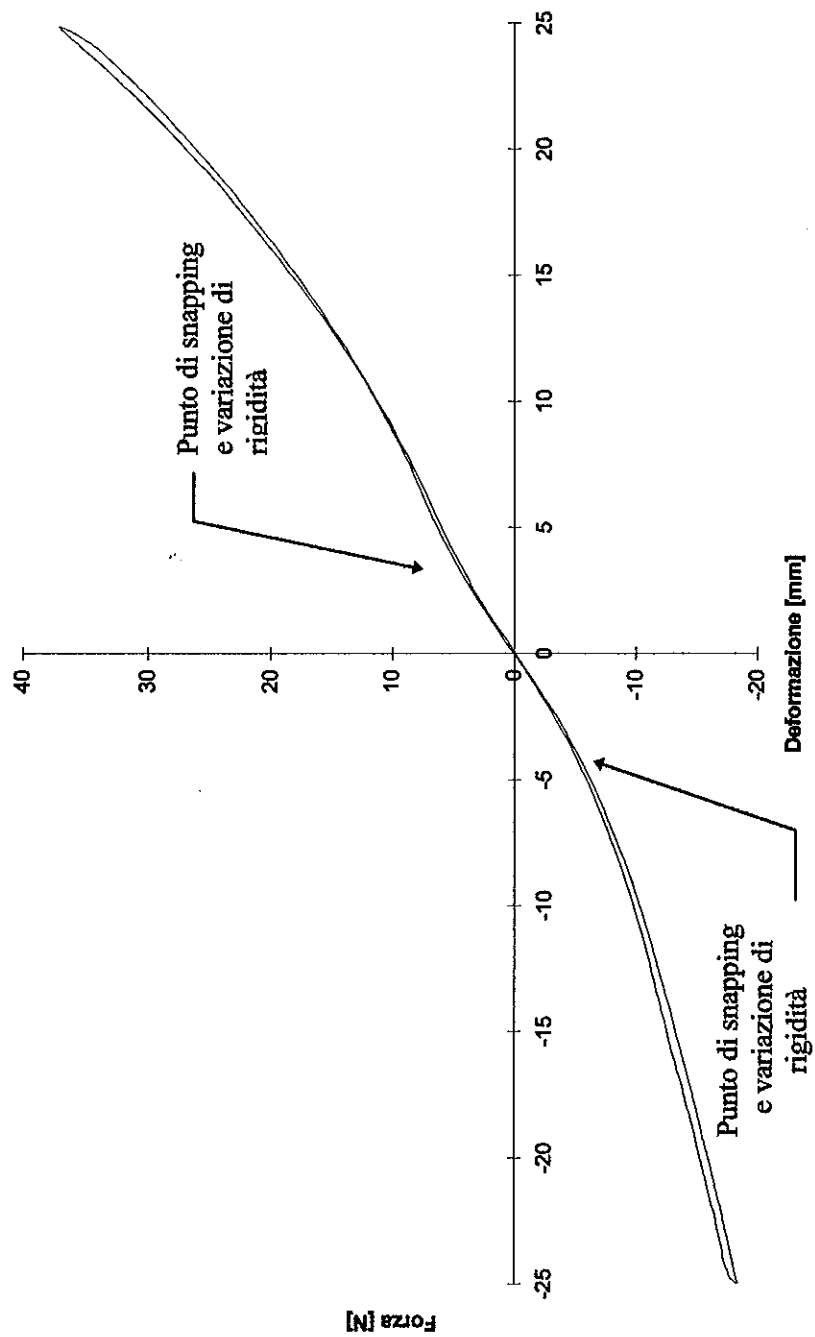


**Figura 8.1-3** Configurazione assunta dalle prove dinamiche incernierando lo snodo superiore della cella di carico in corrispondenza della sezione di carico della pinna.

- b) I coefficienti di smorzamento isteretico dei longheroni e della scarpetta sono elevati, perché i tratti di pinna che li comprendono sono caratterizzati da cicli di isteresi più aperti ( vedi graf.7.3-12,13,14,15,16,17,18 e graf.7.4-5,6,7,8,9,10,11);
- c) Durante l'inversione della sollecitazione (fig.8.1-4a), nei tratti di sola pala della pinna in composito (graf.7.4-1,2,3,4,12,13,14,15), si verifica un fenomeno che si è denominato di "snapping" causato dall'improvvisa variazione di concavità del profilo ad onde della sezione trasversale della pala (fig.8.1-4b) e riscontrabile nei cicli di isteresi da una brusca variazione di rigidità (graf.8.1-3). Infatti, durante il fenomeno di "snapping", a causa della deformazione del profilo ad onda, si ha una variazione del momento d'inerzia della sezione trasversale rispetto il suo asse neutro che determina una corrispondente variazione di rigidità.



**Figura 8.1-4** a) Inversione della sollecitazione agente sulla pinna durante le prove dinamiche; b) Deformazione del profilo ad onde della sezione trasversale della pala durante lo "snapping".



**Grafico 8.1-3** Ciclo di isteresi di un tratto di sola pala di pinna in composito, con evidenziati i punti di brusca variazione di rigidezza dovuti al fenomeno di "snapping" causato dall'improvvisa deformazione del profilo ad onde della sezione trasversale.

## 8.2 CONFRONTO DEI RISULTATI SPERIMENTALI PER TRATTO DI PINNA E MATERIALE

Da ogni ciclo d'isteresi si sono estratti i seguenti parametri:

⇒ la costante di rigidezza “lineare” apparente  $K_{XA}$ , valutata approssimando tutti i punti del ciclo con una retta di equazione:

$$F = K_{XA} \cdot f_Y$$

dove:

$K_{XA}$  = costante di rigidezza “lineare” detta apparente, perché valutata a titolo di primo confronto qualitativo senza tenere conto dell'errore di asimmetria caratteristico dei cicli d'isteresi sperimentali (graf.8.2-1);

$F$  = forza agente sul tratto di pinna in analisi;

$f_Y$  = freccia di deformazione;

⇒ il coefficiente di smorzamento isteretico “lineare”  $c_X$ , valutato con la:

$$c_X = \frac{\Delta H/2}{\omega \cdot X} = \frac{\Delta H}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot X}$$

dove:

$c_X$  → è detto “lineare” per distinguerlo dal coefficiente di smorzamento “rotazionale” isteretico  $c_\varphi = M_f/v_\varphi$ , dove

## Analisi dei risultati delle prove dinamiche

$M_f$  è il momento flettente all'incastro e  $v_\varphi$  è la velocità di rotazione angolare;

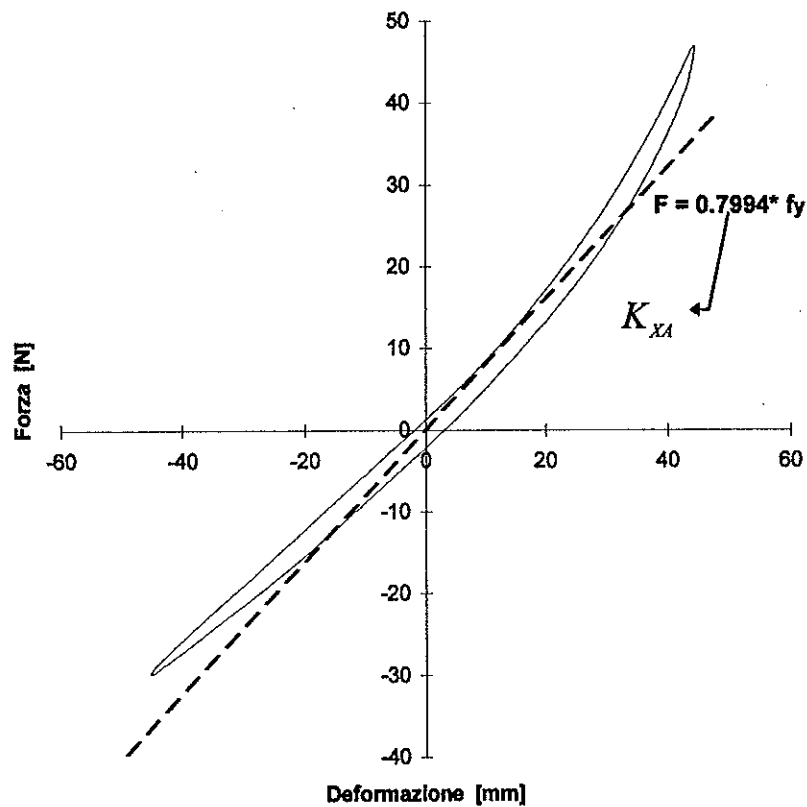
$$\Delta H = F_{\text{positivo}}(f_Y = 0) + |F_{\text{negativo}}(f_Y = 0)| \rightarrow \text{ampiezza del ciclo}$$

di isteresi nel punto a deformazione nulla (fig.7-1b);

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \rightarrow \text{pulsazione del ciclo e } f \rightarrow \text{frequenza del ciclo;}$$

$X \rightarrow$  ampiezza massima di deformazione;

$\Rightarrow$  l'energia dissipata dal ciclo A, corrispondente all'area del ciclo, valutata con la formula dei trapezi [10].



**Grafico 8.2-1** Costante di rigidezza "lineare" apparente  $K_{XA}$  coincidente con il coefficiente angolare della retta approssimante tutti i punti del ciclo sperimentale.

## Capitolo 8

I parametri estratti dai cicli d'isteresi sperimentali sono di seguito esposti:

Tipo di prova	Tipo di materiale	Tratto di pala	Ampiezza di sollecitazione [mm]	Frequenza di sollecitazione [Hz]	Area del ciclo, A [N*mm]	Coeff. di smorz., Cx [N*s/mm]	Cost. di rigid., KxA [N/mm]
TAB251	Tecnopol.	AB	50	0.1	93.68	0.06939	0.754
TAB252	Tecnopol.	AB	50	0.2	86.67	0.02776	0.7694
TAB253	Tecnopol.	AB	50	0.3	78.14	0.01619	0.7712
TAB254	Tecnopol.	AB	50	0.4	70.88	0.01388	0.7759
TAB351	Tecnopol.	AB	70	0.1	193.02	0.06443	0.7676
TAB352	Tecnopol.	AB	70	0.2	168.67	0.02974	0.7788
TAB353	Tecnopol.	AB	70	0.3	153.05	0.01652	0.7869
TAB354	Tecnopol.	AB	70	0.4	104.83	0.01115	0.7629
TAB451	Tecnopol.	AB	90	0.1	329.38	0.06794	0.7917
TAB452	Tecnopol.	AB	90	0.2	293.57	0.03084	0.7994
TAB453	Tecnopol.	AB	90	0.3	201	0.01414	0.7849
TCD101	Tecnopol.	CD	20	0.1	67.06	0.31225	2.0879
TCD103	Tecnopol.	CD	20	0.3	57.51	0.09252	2.1221
TCD105	Tecnopol.	CD	20	0.5	54.5	0.04857	2.1589
TCD252	Tecnopol.	CD	50	0.2	386.6	0.12143	2.0717
TCD352	Tecnopol.	CD	70	0.2	793.97	0.12639	2.0829
T65D124	Tecnopol.	65D	24	0.4	213	0.11565	5.932
TDF151	Tecnopol.	DF	30	0.1	182.75	0.41633	1.462
TDF451	Tecnopol.	DF	90	0.1	1524.75	0.30068	1.5842
X1AB252	Comp.X15	AB	50	0.2	25.36	0.00976	0.4282
X1AB254	Comp.X15	AB	50	0.4	22.73	0.00618	0.4173
X1AB352	Comp.X15	AB	70	0.2	37.37	0.00595	0.4423
X1AB452	Comp.X15	AB	90	0.2	52.43	0.00944	0.5018
X1CD101	Comp.X15	CD	20	0.1	42.27	0.19082	1.9324
X1CD103	Comp.X15	CD	20	0.3	40.54	0.06361	1.9736
X1CD105	Comp.X15	CD	20	0.5	39.12	0.03123	1.9697
X1CD252	Comp.X15	CD	50	0.2	244.03	0.06939	2.0462
X1CD352	Comp.X15	CD	70	0.2	479.09	0.06195	2.1483
X165D122	Comp.X15	65D	24	0.2	135.28	0.16624	5.2059
X165D124	Comp.X15	65D	24	0.4	126.71	0.07228	5.1431
X165D12T	Comp.X15	65D	24	0.2	133.86	0.15901	5.1257
X165D845	Comp.X15	65D	16	0.45	54.03	0.09155	5.0399
X1DF151	Comp.X15	DF	30	0.1	210.06	0.45970	2.2754
X1DF451	Comp.X15	DF	90	0.1	1591.08	0.31225	2.0711
X4AB252	Comp.X40	AB	50	0.2	24.04	0.00694	1.0749
X4AB254	Comp.X40	AB	50	0.4	13.08	0.00659	1.0392
X4AB352	Comp.X40	AB	70	0.2	46.22	0.00248	1.1649
X4AB452	Comp.X40	AB	90	0.2	68.62	0.00524	1.3491

**Tabella 8.2-1** Riassunto dei parametri estratti dai cicli d'isteresi sperimentali.

Dai grafici che confrontano i risultati delle prove dinamiche ottenute con uguali frequenze ed ampiezze di sollecitazione (vedi appendice E), si osserva che:

- a) La costante di rigidezza "lineare" apparente  $K_{XA}$  generalmente cresce con l'ampiezza di sollecitazione  $X$  e non varia con la frequenza:

$$K_{XA} = K_{XA}(X)$$

Infatti, al crescere dell'ampiezza di sollecitazione aumenta l'asimmetria che è più evidente nella parte alta del ciclo di isteresi (graf.8.2-1), quindi la retta che interpola i punti del ciclo ha un coefficiente angolare (corrispondente alla  $K_{XA}$ ) maggiore.

- b) Il coefficiente di smorzamento isteretico "lineare"  $c_X$  decresce al crescere della frequenza di sollecitazione  $f$  e non varia con l'ampiezza:

$$c_X = c_X \left( \frac{1}{f} \right)$$

Infatti, dalla teoria [11] si sa che il coefficiente di smorzamento isteretico, vale:

$$c = \frac{\beta \cdot K}{\omega} = \left( \frac{\beta \cdot K}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \frac{1}{f} \quad [N]$$

dove:



$\frac{\beta \cdot K}{2 \cdot \pi} \rightarrow$  per un generico tratto di pinna è un termine costante:

$\beta \rightarrow$  coefficiente adimensionale di smorzamento isteretico;

$K \rightarrow$  costante di rigidità flessionale;

$\omega = 2 \cdot \Pi \cdot f \rightarrow$  pulsazione del ciclo;

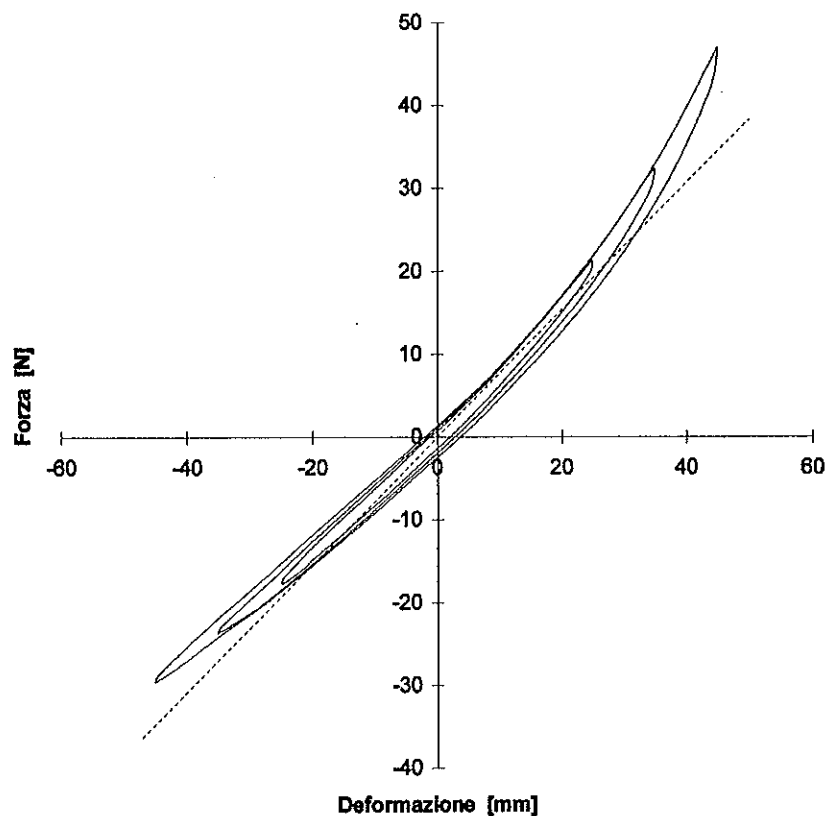
- c) L'area del ciclo d'isteresi  $A$  (corrispondente all'energia dissipata dal ciclo) cresce al crescere dell'ampiezza di sollecitazione  $X$  e decresce al crescere della frequenza di sollecitazione  $f$  :

$$A = A\left(\frac{X}{f}\right)$$

Infatti, al crescere dell'ampiezza di sollecitazione la lunghezza del ciclo aumenta, mentre al crescere della frequenza di sollecitazione la larghezza del ciclo diminuisce (vedi relazione geometrica con  $c$  nel graf.7-1b).

### 8.3 VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE "LINEARI" EFFETTIVE DELLE PINNE

Lo scostamento tra il valore della costante di rigidezza "lineare" apparente  $K_{XA}$  e quello della costante di rigidezza "lineare" reale  $K_X$ , valutato per un generico tratto di pinna, è proporzionale all'asimmetria del relativo ciclo di isteresi (vedi paragrafo precedente) che cresce all'aumentare dell'ampiezza di sollecitazione (graf.8.3-1).

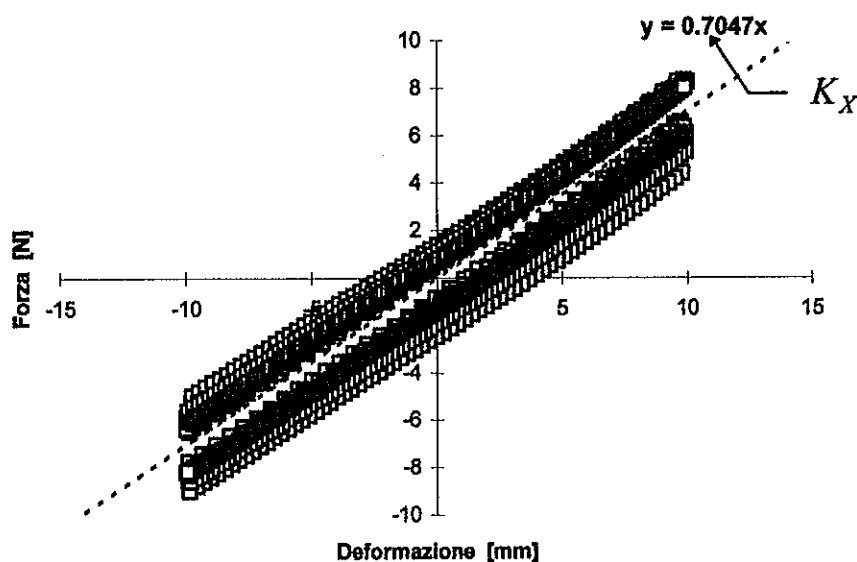


**Grafico 8.3-1** Aumento dell'asimmetria del ciclo di isteresi al crescere dell'ampiezza di sollecitazione.

La costante di rigidezza “lineare” reale  $K_X$  si è valutata approssimando, con una retta di equazione  $F = K_X \cdot f_Y$ , il relativo ciclo di isteresi troncato a  $\pm 10$  millimetri, perché per tale ampiezza di sollecitazione l’influenza dell’asimmetria del ciclo si è considerata trascurabile.

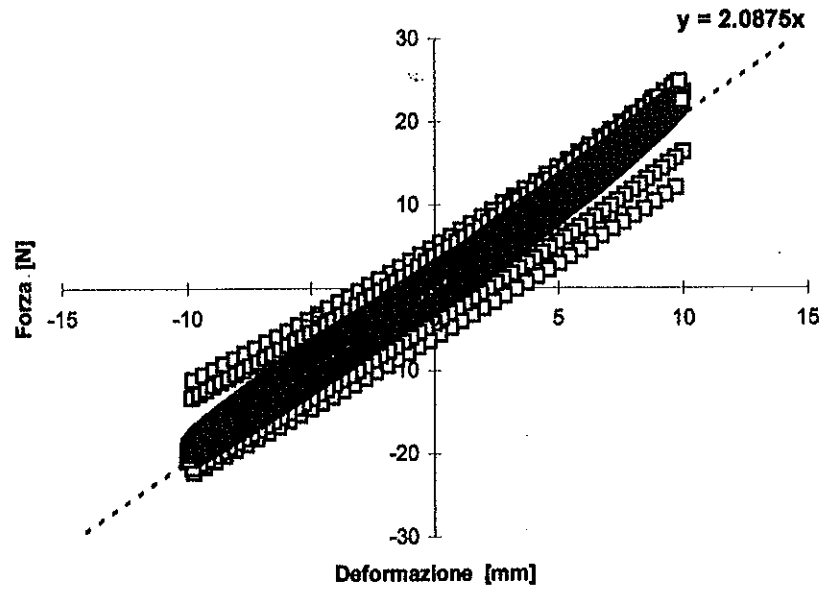
Per ogni tratto di pinna, la relativa costante di rigidezza “lineare” reale  $K_X$  è stata determinata con la seguente procedura (graf.8.3-2,3,4,5,6,7,8):

- 1) sovrapposizione di tutti i cicli di isteresi rilevati dal tratto di pinna in analisi;
- 2) troncatura, di tali cicli, a  $\pm 10$  millimetri;
- 3) approssimazione, di tali cicli, con una retta di equazione  $F = K_X \cdot f_Y$ .

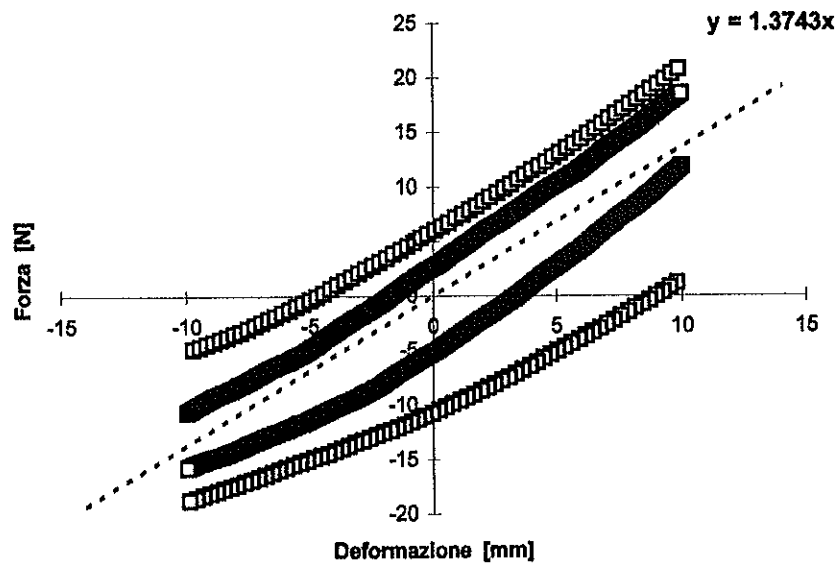


**Grafico 8.3-2** Approssimazione dei cicli troncati rilevati dal tratto di pinna TAB per la determinazione della relativa costante di rigidezza “lineare” reale  $K_X$ .

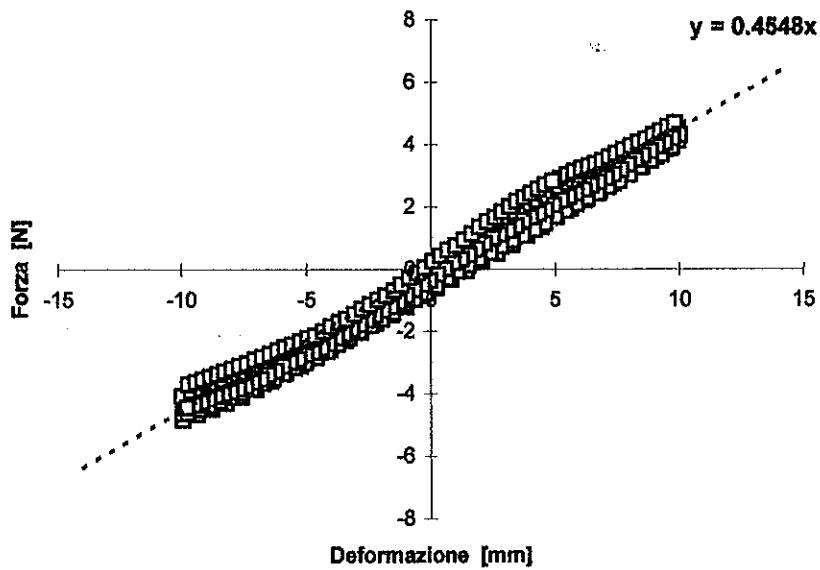
## Analisi dei risultati delle prove dinamiche



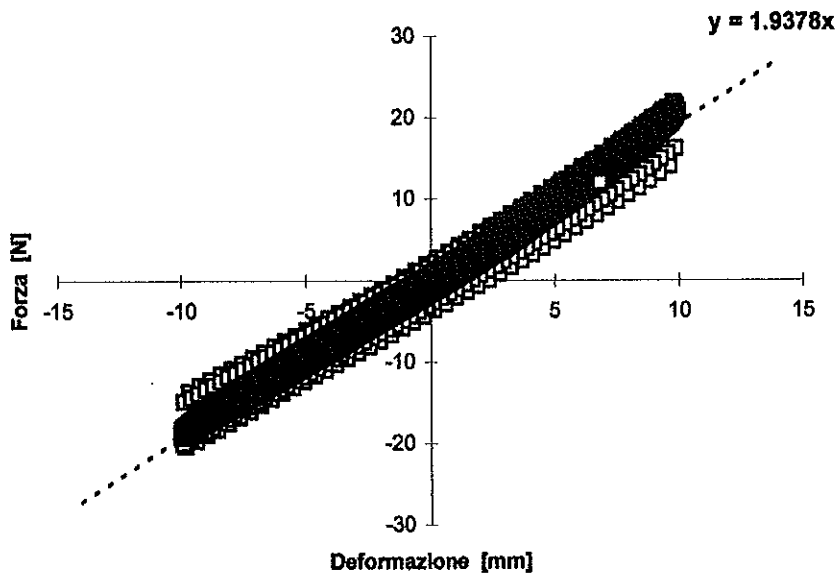
**Grafico 8.3-3** Approssimazione dei cicli troncati rilevati dal tratto di pinna TCD per la determinazione della relativa costante di rigidezza "lineare" reale  $K_x$ .



**Grafico 8.3-4** Approssimazione dei cicli troncati rilevati dal tratto di pinna TDF per la determinazione della relativa costante di rigidezza "lineare" reale  $K_x$ .

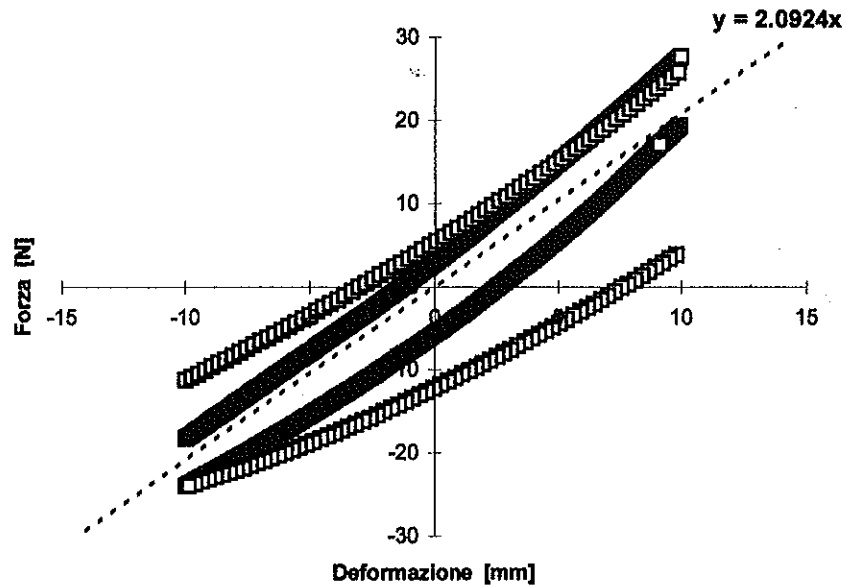


**Grafico 8.3-5** Approssimazione dei cicli troncati rilevati dal tratto di pinna X1AB per la determinazione della relativa costante di rigidità “lineare” reale  $K_X$ .

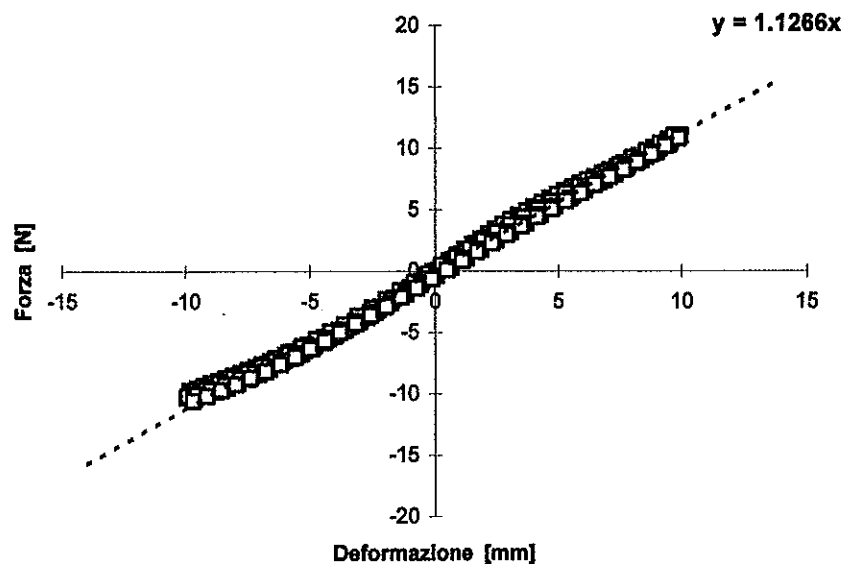


**Grafico 8.3-6** Approssimazione dei cicli troncati rilevati dal tratto di pinna X1CD per la determinazione della relativa costante di rigidità “lineare” reale  $K_X$ .

## Analisi dei risultati delle prove dinamiche



**Grafico 8.3-7** Approssimazione dei cicli troncati rilevati dal tratto di pinna X1DF per la determinazione della relativa costante di rigidezza "lineare" reale  $K_X$ .



**Grafico 8.3-8** Approssimazione dei cicli troncati rilevati dal tratto di pinna X4AB per la determinazione della relativa costante di rigidezza "lineare" reale  $K_X$ .

## Capitolo 8

Come già notato (cap.6,7), la frequenza di sollecitazione da usare per determinare il coefficiente di smorzamento isteretico deve coincidere con quella della pinneggiata presa a riferimento nella costruzione del modello numerico ( $f = 0.424$  [Hz]).

Per ogni tratto di pinna, il relativo coefficiente di smorzamento isteretico "lineare"  $c_x$ , è stato determinato valutando opportunamente le equazioni approssimanti i dati sperimentali (graf.E-1,2,3,7,9,11,13,15) alla frequenza di pinneggiata.

Riassumendo, le costanti di rigidezza "lineare"  $K_x$  ed i coefficienti di smorzamento isteretico "lineare"  $c_x$ , per i vari tratti dei vari tipi di pinne, valgono:

Tipo di pinna	Tratto di pala	Coefficiente di smorzamento isteretico "lineare" $C_x$ per $f = 0.424$ [Hz] [N*s/mm]	Costante di rigidezza "lineare" $K_x$ dei cicli d'isteresi troncati [N/mm]
Tecnopol.	AB	0.01078	0.7047
Tecnopol.	CD	0.06005	2.0875
Tecnopol.	DF	0.16413	1.3743
Comp. X15	AB	0.00572	0.4548
Comp. X15	CD	0.03977	1.9378
Comp. X15	DF	0.17490	2.0924
Comp. X40	AB	0.00658	1.1266

**Tabella 8.3-1** Caratteristiche "lineari" effettive delle pinne.

## Analisi dei risultati delle prove dinamiche

Un reale termine di confronto per i materiali di costruzione delle pale, è costituito dal valore dei coefficienti adimensionali di smorzamento isteretico "lineare"  $\beta_X$ , raccolti in tabella 8.3-2 in termini relativi percentuali:

$$\beta_{X\_rel\%} = \frac{\beta_X - \beta_{X\_Tecnopo.}}{\beta_{X\_Tecnopo.}} * 100 \quad [\%]$$

con:

$\beta_X$  → coefficiente di smorzamento isteretico "lineare" del tratto di pala in analisi;

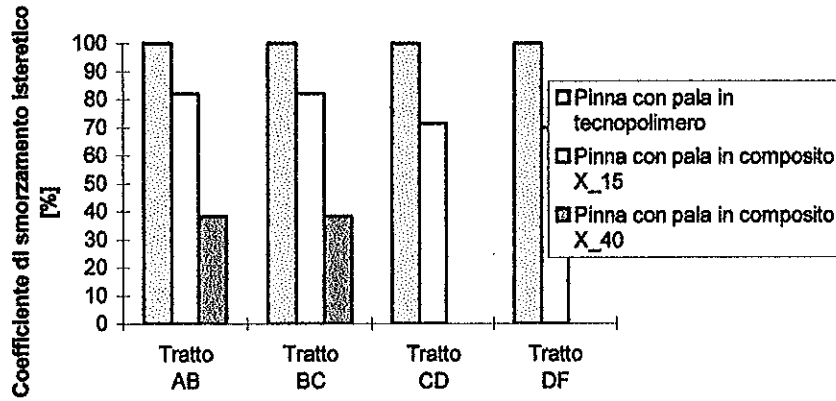
$\beta_{X\_Tecnopo.}$  → coefficiente di smorzamento isteretico "lineare" corrispondente delle pinne con pala in tecnopolimero prese a riferimento.

Tipo di pinna	Tratto di pala	Coefficiente adimensionale di smorzamento isteretico "lineare" valutato per $f = 0.424$ [Hz]	
		valore assoluto	valore relativo %
Tecnopol.	AB	0.040739462	0
Tecnopol.	CD	0.076633631	0
Tecnopol.	DF	0.318165246	0
Comp. X15	AB	0.033478102	-17.8
Comp. X15	CD	0.054670202	-28.7
Comp. X15	DF	0.222690021	-30.0
Comp. X40	AB	0.015558922	-61.8

**Tabella 8.3-2** Coefficienti adimensionali di smorzamento isteretico per le pinne con pala in tecnopolimero e composito.



I risultati di tale confronto, espressi in  $\frac{\beta_X}{\beta_{X\_Tecnop.}} \cdot 100$ , sono di seguito graficati:



**Grafico 8.3-9** Coefficienti di smorzamento isteretico adimensionale.

Per confrontare l'energia assorbita dai cicli d'isteresi sperimentali relativi ai vari tratti di pinna, si è valutata l'area relativa percentuale dei cicli di isteresi  $A_r$  % (tabella 8.3-3), con la seguente:

$$A_r \% = \frac{A - A_{Tecnop.}}{A_{Tecnop.}} \cdot 100 \quad [\%]$$

dove:

$A$  → area del ciclo di isteresi in analisi;

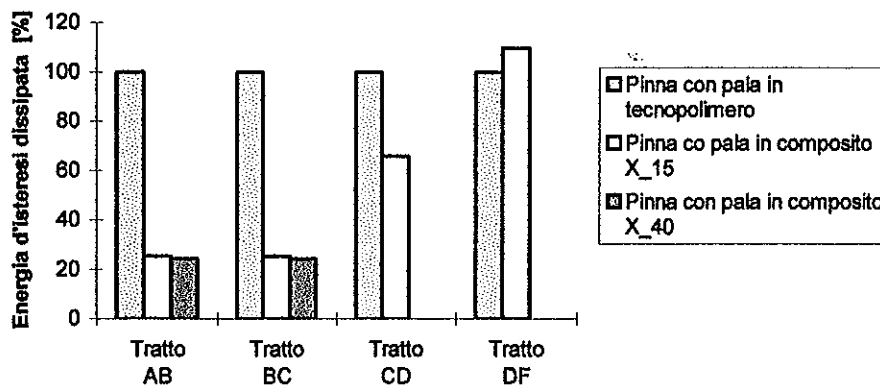
$A_{Tecnop.}$  → area del ciclo di isteresi corrispondente delle pinne con pala in tecnopolimero prese a riferimento.

## Analisi dei risultati delle prove dinamiche

Tipo e tratto di pinna	Area del ciclo di isteresi A [N*mm]	Area relativa percentuale Ar% [%]	Area relativa percentuale Ar% per tipo di pinna [%]
TAB252	86.67	0	0
TAB254	70.88	0	
TAB352	168.67	0	
TAB452	293.57	0	
X1AB252	25.36	-70.74	-74.66
X1AB254	22.73	-67.93	
X1AB352	37.37	-77.84	
X1AB452	52.43	-82.14	
X4AB252	24.04	-72.26	-75.76
X4AB254	13.08	-81.55	
X4AB352	46.22	-72.60	
X4AB452	68.62	-76.63	
TCD101	67.06	0	0
TCD103	57.51	0	
TCD105	54.5	0	
TCD252	386.6	0	
TCD352	793.97	0	
X1CD101	42.27	-36.97	-34.25
X1CD103	40.54	-29.51	
X1CD105	39.12	-28.22	
X1CD252	244.03	-36.88	
X1CD352	479.09	-39.66	
TDF151	182.75	0	0
TDF451	1524.75	0	
X1DF151	210.06	14.94	9.65
X1DF451	1591.08	4.35	

**Tabella 8.3-3** Energia assorbita dai diversi materiali costituenti le pale.

I risultati di tale confronto, espressi in  $\frac{A}{A_{Tecnop.}} \cdot 100$ , sono di seguito graficati:

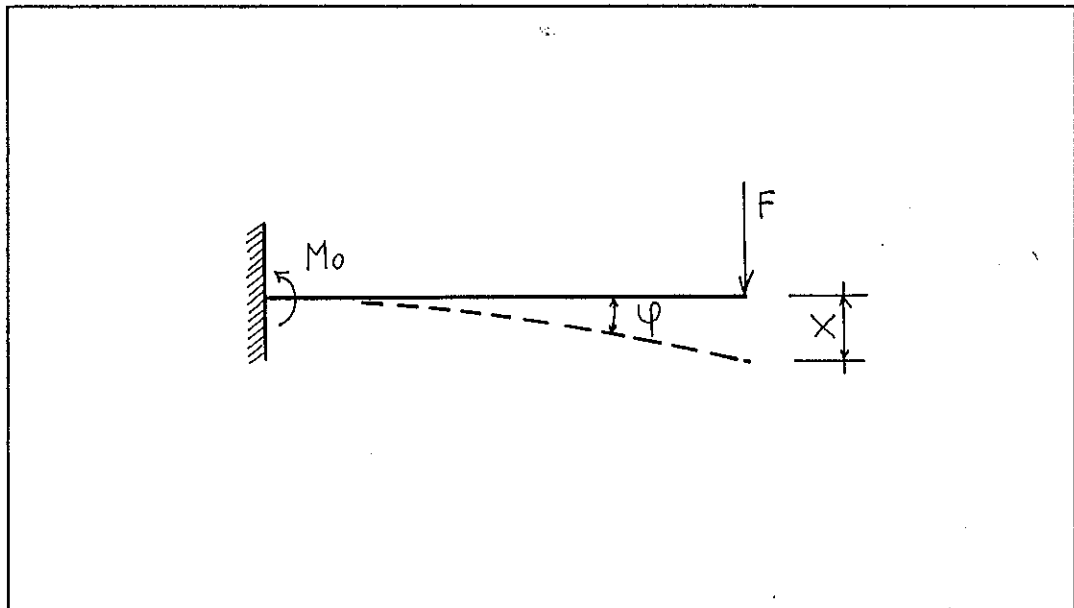


**Grafico 8.3-9** Energia relativa percentuale assorbita nei vari tratti di pinne diverse.

Nonostante i coefficienti adimensionali di smorzamento isteretico delle pinne con pala in composito sono sempre inferiori a quelli delle pinne con pala in tecnopolimero (graf.8.3-9), , essendo il coefficiente di smorzamento isteretico  $c$  proporzionale al coefficiente di rigidezza (vedi cap.7), in alcuni tratti di pala è risultato  $c_{composito} > c_{tecnopolimero}$  (vedi tab.8.3-1). Analogamente, essendo l'area del ciclo d'isteresi proporzionale al coefficiente di smorzamento isteretico  $c$  , in alcuni tratti di pala è risultato  $A_{Composito} > A_{Tecnopolimero}$  come si può notare dal grafico 8.3-9.

## 8.4 VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE "ANGOLARI" EFFETTIVE DELLE PINNE

Dalle prove sperimentali, si sono ottenute le costanti di rigidezza  $K_x = F/x$  ed i coefficienti di smorzamento isteretico  $c_x = F/v_x$  "lineari", cioè relativi ad uno spostamento  $x$ :



**Figura 8.4-1** Schematizzazione di un tratto generico di pinna.

I vincoli che uniscono gli elementi che costituiscono le pinne di Flipper, discretizzate nel modello numerico (fig.5.3-1), sono delle molle rotazionali (Rotational Springs) e degli smorzatori rotazionali (Rotational Dampers), quindi le costanti di rigidezza ed i coefficienti di smorzamento isteretico relativi, devono essere espressi in funzione della rotazione  $\varphi$  del generico tratto di pinna (fig.8.4-1):

$$K_{\varphi} = \frac{M_o}{\varphi} \qquad c_{\varphi} = \frac{M_o}{v_{\varphi}}$$

dove:

$K_{\varphi}$  → costante di rigidezza “angolare”;

$c_{\varphi}$  → coefficiente di smorzamento isteretico “angolare”;

$M_o \rightarrow$  momento flettente nella sezione di vincolo che equivale al momento torcente applicato alla molla e allo smorzatore che uniscono gli elementi costituenti le pinne di Flipper;

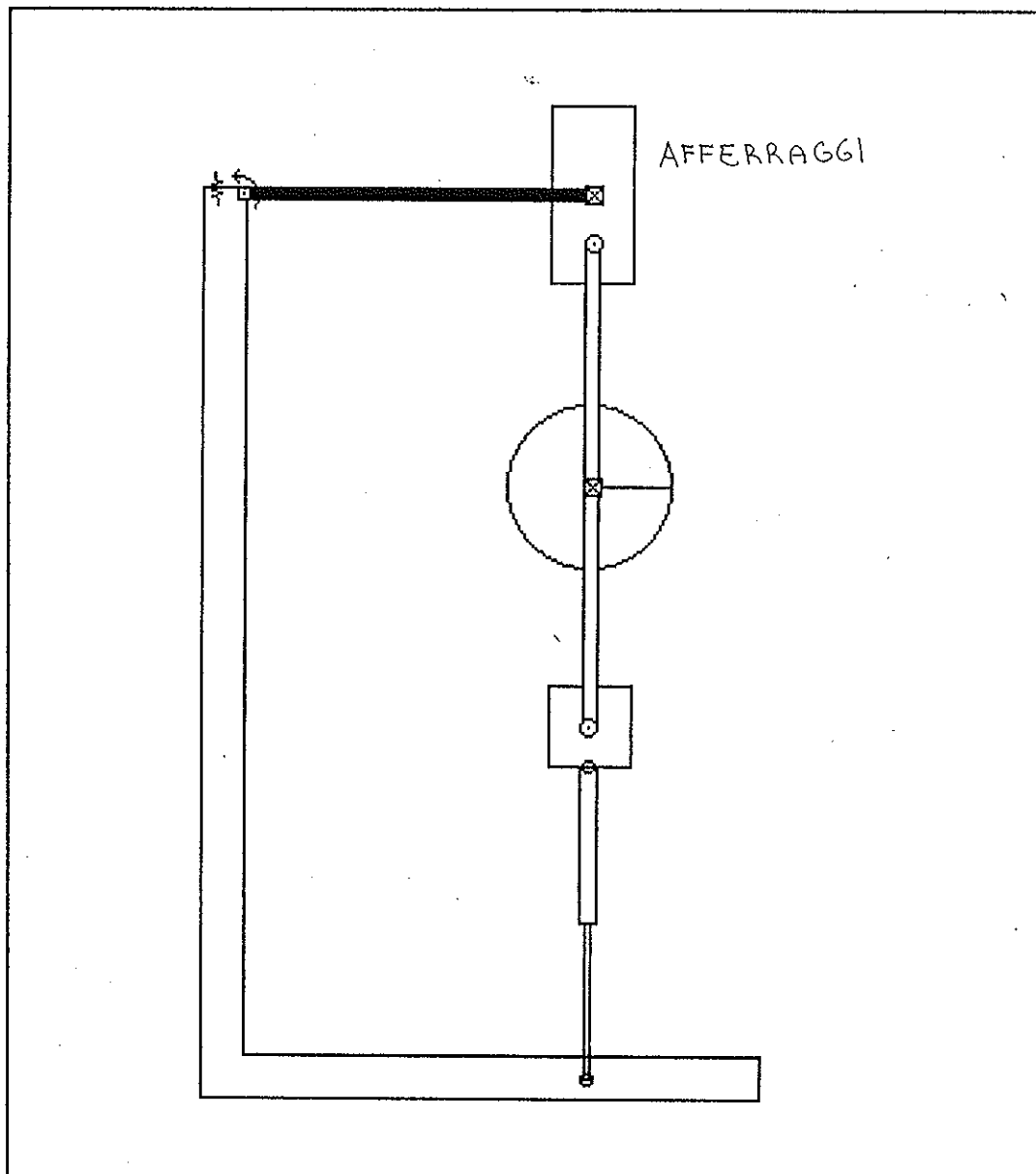
$v_\varphi \rightarrow$  velocità di rotazione del tratto di pinna nella sezione di vincolo.

In ipotesi di piccole rotazioni valgono le seguenti:

$$\begin{array}{ll}
 F = K_x \cdot x & F = c_x \cdot v_x \\
 F \cdot L = K_x \cdot L \cdot x & F \cdot L = c_x \cdot L \cdot v_x \\
 M_o = K_x \cdot L \cdot x & M_o = c_x \cdot L \cdot v_x \\
 = K_x \cdot L \cdot x(\varphi) & = c_x \cdot L \cdot v_x(v_\varphi) \\
 = f(\varphi) & = g(v_\varphi)
 \end{array}$$

dove  $x = x(\varphi)$  e  $v_x = v_x(v_\varphi)$  sono due funzioni che legano gli spostamenti e le relative velocità "lineari" ai corrispondenti spostamenti e velocità "angolari".

Simulando al calcolatore (WM) le condizioni di prova (fig.8.4-2) è stato possibile ricavare per i vari tratti di pala le relazioni  $x \Leftrightarrow \varphi$  e  $v_x \Leftrightarrow v_\varphi$ , che approssimate con una retta passante per l'origine (graf.8.4-1,2,3,4) hanno fornito le funzioni cercate.



**Figura 8.4-2** Simulazione delle prove dinamiche su Working Model.

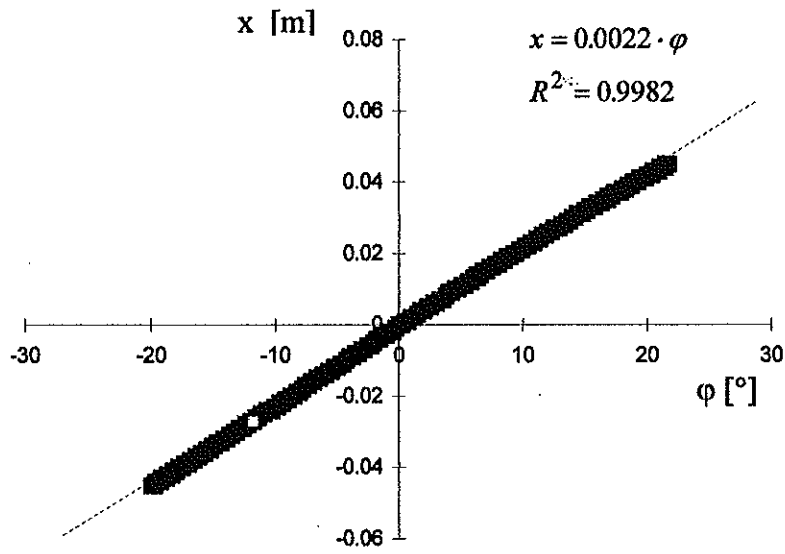


Grafico 8.4-1 Relazioni  $x \Leftrightarrow \varphi$  quantificate con WM per i tratti di pinna AB e BC.

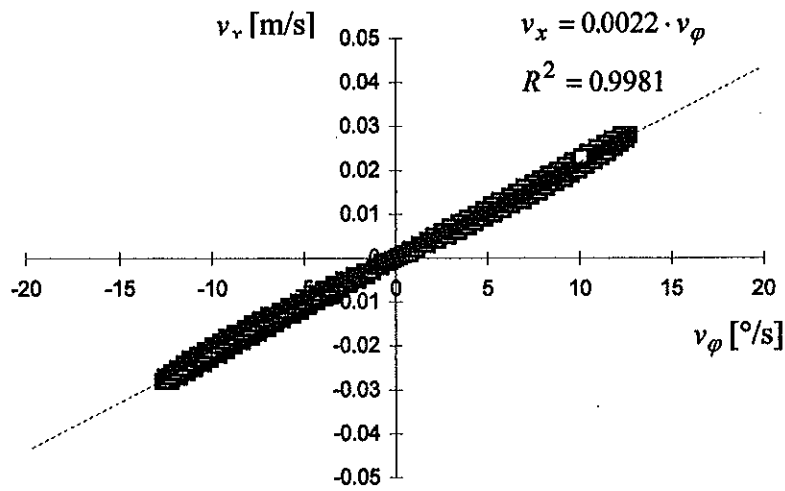
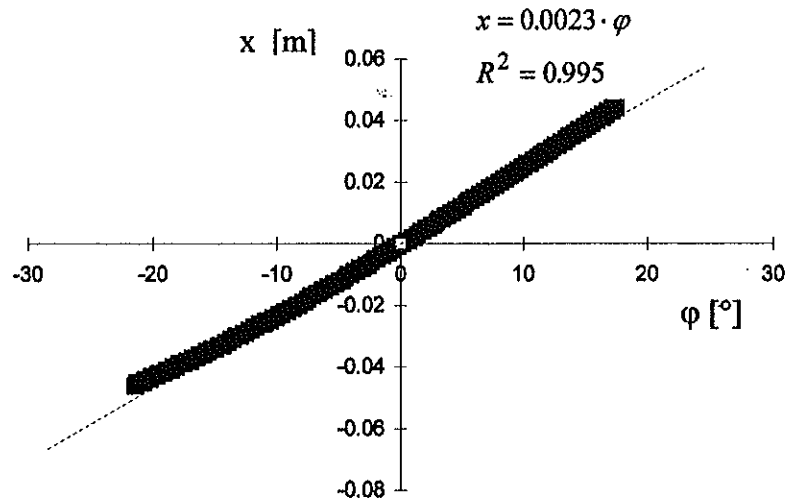
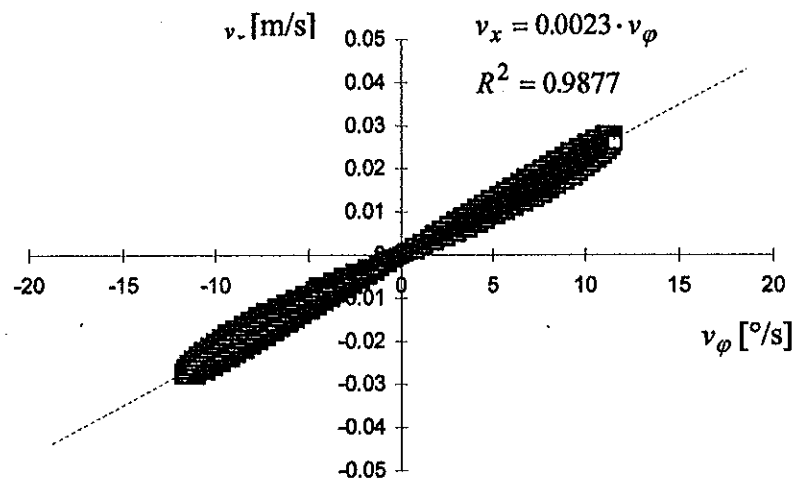


Grafico8.4-2 Relazioni  $v_x \Leftrightarrow v_\varphi$  quantificate con WM per i tratti di pinna AB e BC

## Analisi dei risultati delle prove dinamiche



**Grafico 8.4-3** Relazioni  $x \Leftrightarrow \varphi$  quantificate con WM per i tratti di pinna CD e DF.



**Grafico 8.4-4** Relazioni  $v_x \Leftrightarrow v_\varphi$  quantificate con WM per i tratti di pinna CD e DF

Quindi:



## Capitolo 8

$$M_o = K_x \cdot L \cdot x(\varphi) = K_\varphi \cdot \varphi$$

$$M_o = c_x \cdot L \cdot v_x(v_\varphi) = c_\varphi \cdot v_\varphi$$

$$K_\varphi = \frac{K_x \cdot L \cdot x(\varphi)}{\varphi}$$

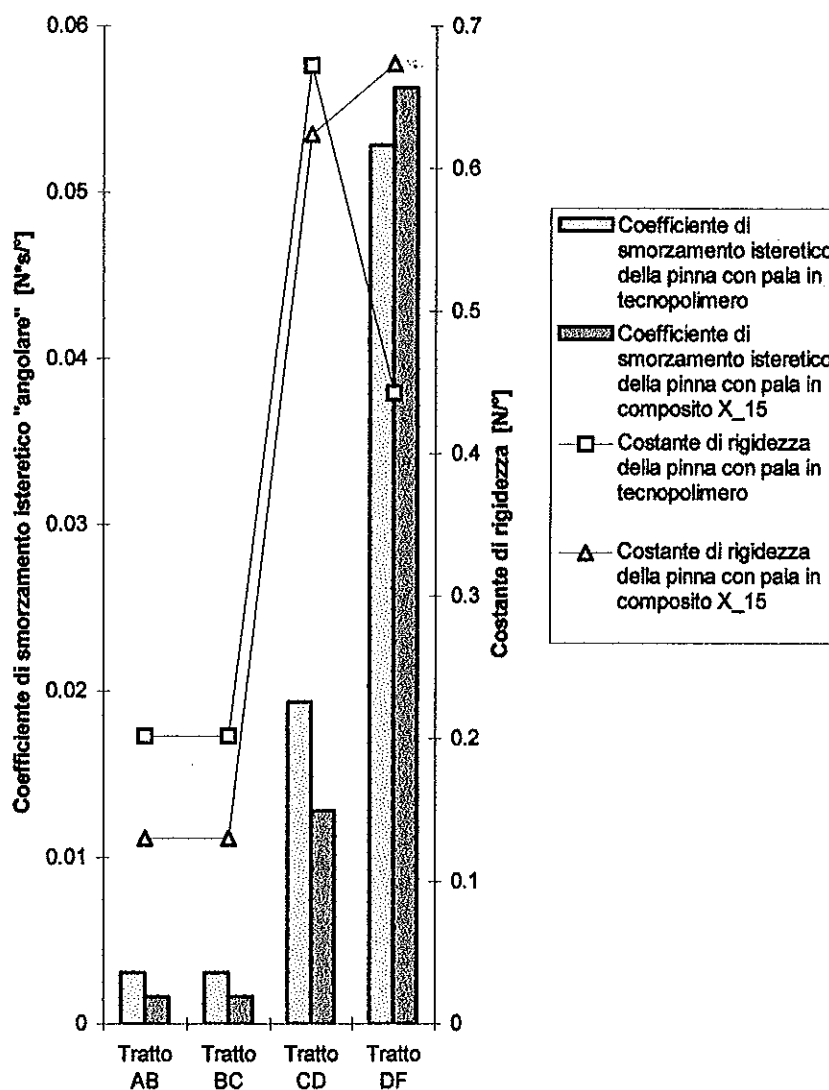
$$c_\varphi = \frac{c_x \cdot L \cdot v_x(v_\varphi)}{v_\varphi}$$

Nella seguente tabella sono raccolte le caratteristiche "angolari" effettive delle pinne:

		Coefficiente di smorzamento	Costante di rigidezza
		isteretico "angolare" $c_\varphi$	"angolare" $K_\varphi$
Tipo di pinna	Tratto di pala	valutato per $f = 0.424$ [Hz]	dei cicli d'isteresi troncati
		[N*s/°]	[N/°]
Tecnopol.	AB	0.00308	0.2015
Tecnopol.	CD	0.01934	0.6722
Tecnopol.	DF	0.05285	0.4425
Comp. X15	AB	0.00164	0.1301
Comp. X15	CD	0.01280	0.6240
Comp. X15	DF	0.05632	0.6738
Comp. X40	AB	0.00188	0.3222

**Tabella 8.4-1** Caratteristiche "angolari" effettive delle pinne.

## Analisi dei risultati delle prove dinamiche



**Grafico 8.4-5** Andamento della costante di rigidezza "angolare" e del coefficiente di smorzamento isteretico "angolare", per i vari tipi di pinne analizzati.

## **8.5 EFFETTO DELL'ERRORE DI DISCRETIZZAZIONE DELLE PINNE DI FLIPPER**

Confrontando un generico ciclo di isteresi sperimentale con quello equivalente ottenuto numericamente discretizzando il tratto di pinna con un unico elemento (fig.8.4-2), si notano (graf.8.5-1):

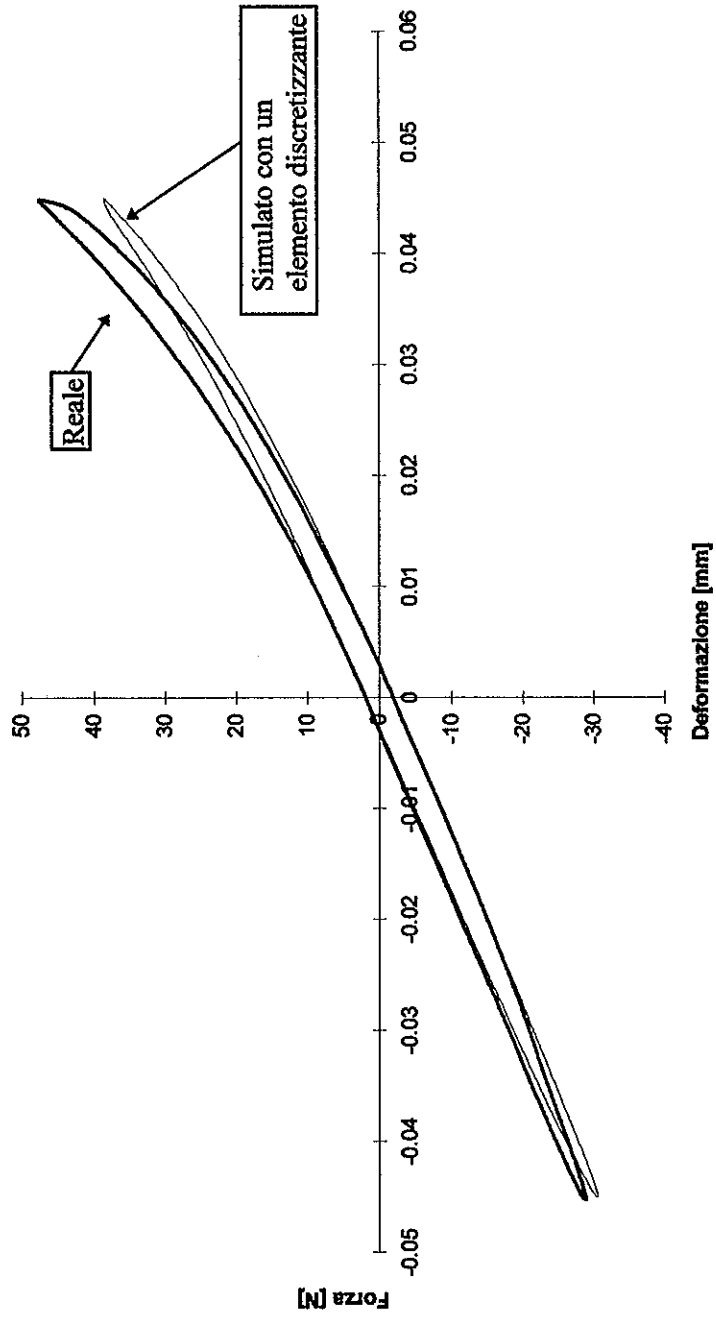
- ⇒ identici coefficienti di smorzamento isteretico;
- ⇒ identiche costanti di rigidità effettive;
- ⇒ diverso comportamento alla deformazione dovuto all'errore di discretizzazione, infatti discretizzando il tratto di pinna con più elementi (vedi appendice I) l'andamento della deformazione simulata si avvicina sempre più a quella reale (graf.8.5-2).

L'ideale sarebbe aumentare il numero di elementi discretizzanti le pinne di Flipper fino a far coincidere i relativi cicli di isteresi con quelli reali, ma i tempi di elaborazione di Working Model per simulare la pinneggiata crescerebbero notevolmente (♣). Dopo laboriosi tentativi si è convenuto di limitare a sei il numero di elementi discretizzanti ciascuna pinna di Flipper.

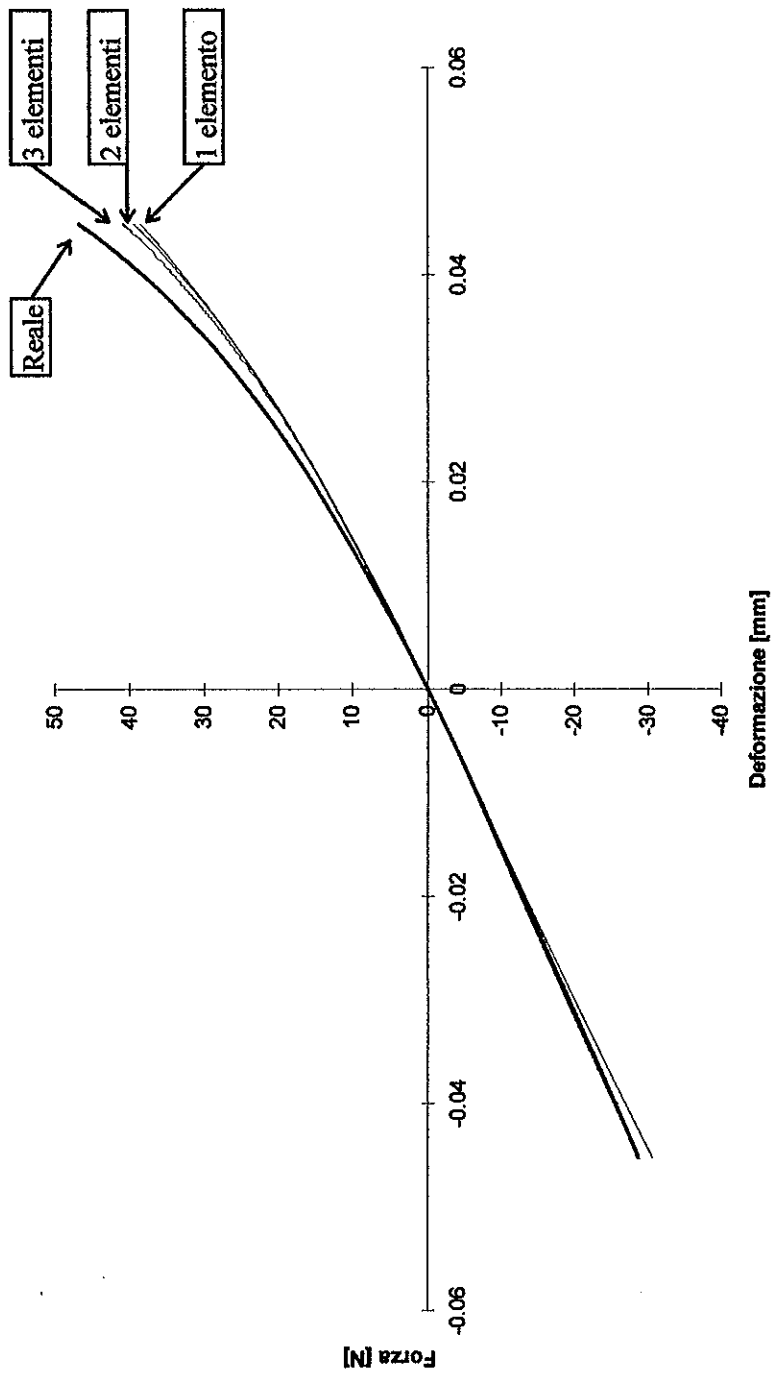
Il confronto fatto nel grafico 8.5-1, oltre ad evidenziare l'errore di discretizzazione delle pinne, è stato molto utile per confermare l'esattezza dei valori dei coefficienti di smorzamento isteretico e delle costanti di rigidità, estratti dai cicli di isteresi sperimentali.

---

(♣) *Discretizzando ciascuna pinna di Flipper con sei elementi, i tempi richiesti per l'elaborazione di alcuni cicli di pinneggiata superano già le cento ore.*



**Grafico 8.5-1** Confronto tra un generico ciclo di isteresi sperimentale con quello equivalente ottenuto numericamente discretizzando il tratto di pinna con un unico elemento.



**Grafico 8.5-2** Confronto tra l'andamento della deformazione sperimentale di un generico tratto di pinna con quello equivalente ottenuto numericamente discretizzando il tratto di pinna con un unico elemento, due elementi, tre elementi.

## 8.6 VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DA IMPORRE ALLE PINNE DI FLIPPER

Dalle riprese subacquee della pinna durante la pinneggiata, si è notato che i tratti di pala più deformati sono quelli compresi tra le sezioni AB e BC. Potendo discretizzare ogni pinna con soli sei elementi (vedi paragrafo 8.5), si è convenuta la seguente distribuzione:

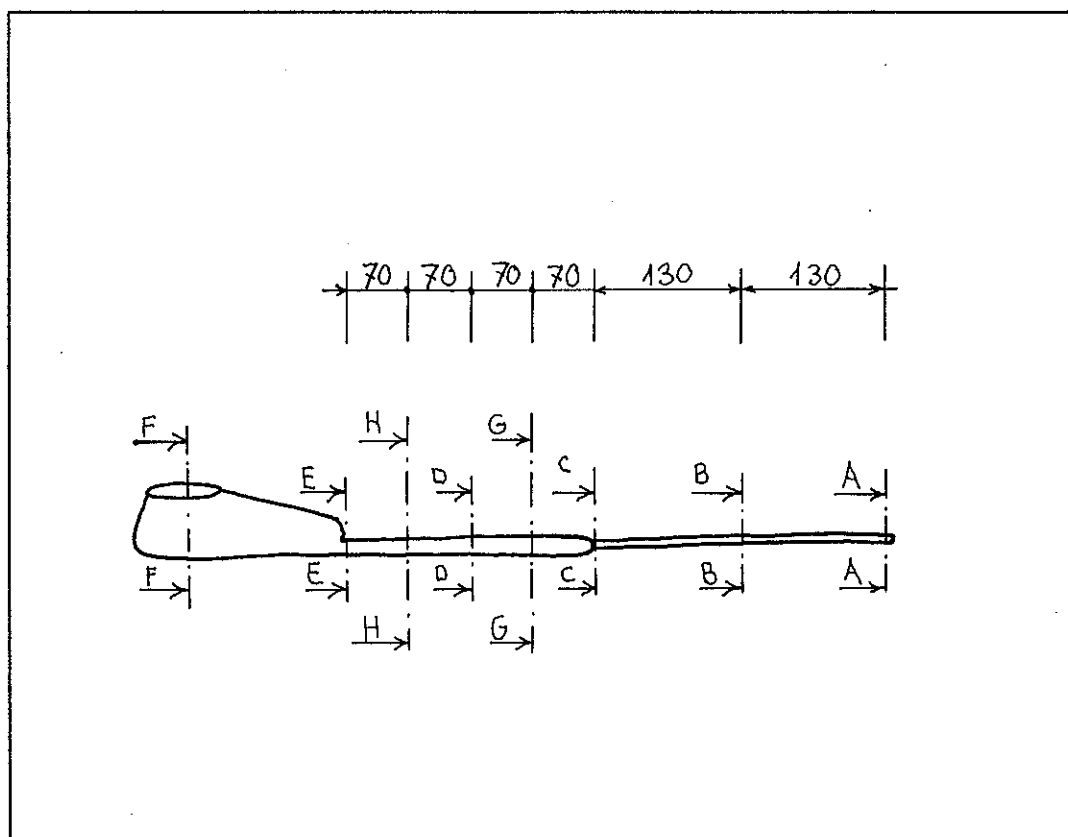


Figura 8.6-1 / Elementi discretizzanti le pinne di Flipper.

L'azione dell'acqua su un generico tratto di pinna in moto relativo, può essere per semplicità schematizzata con un carico distribuito costante:

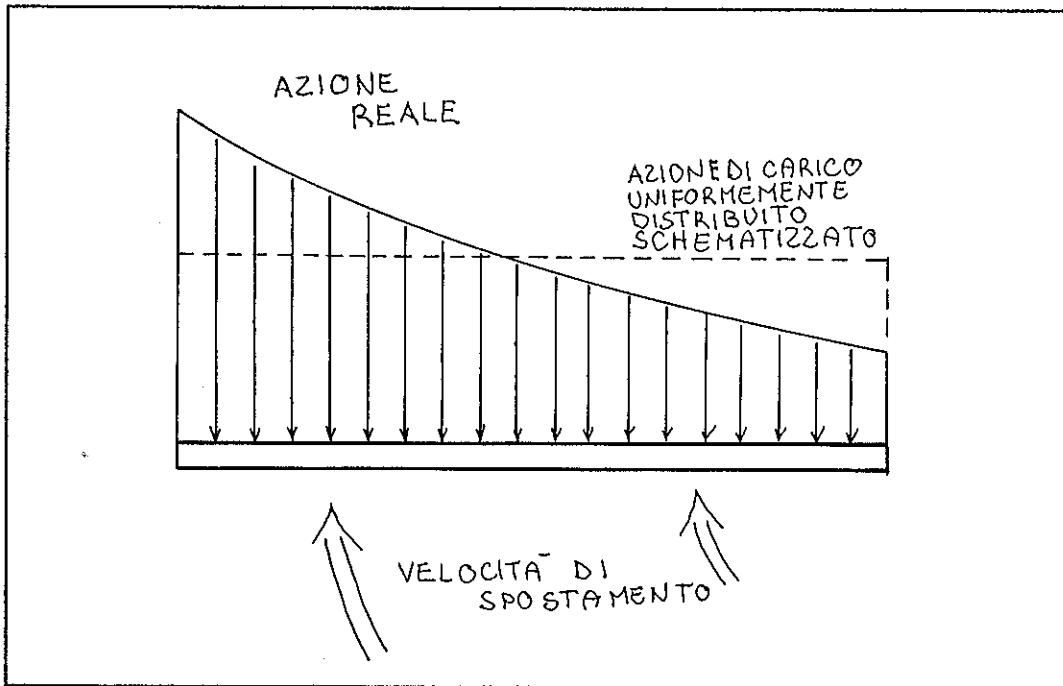
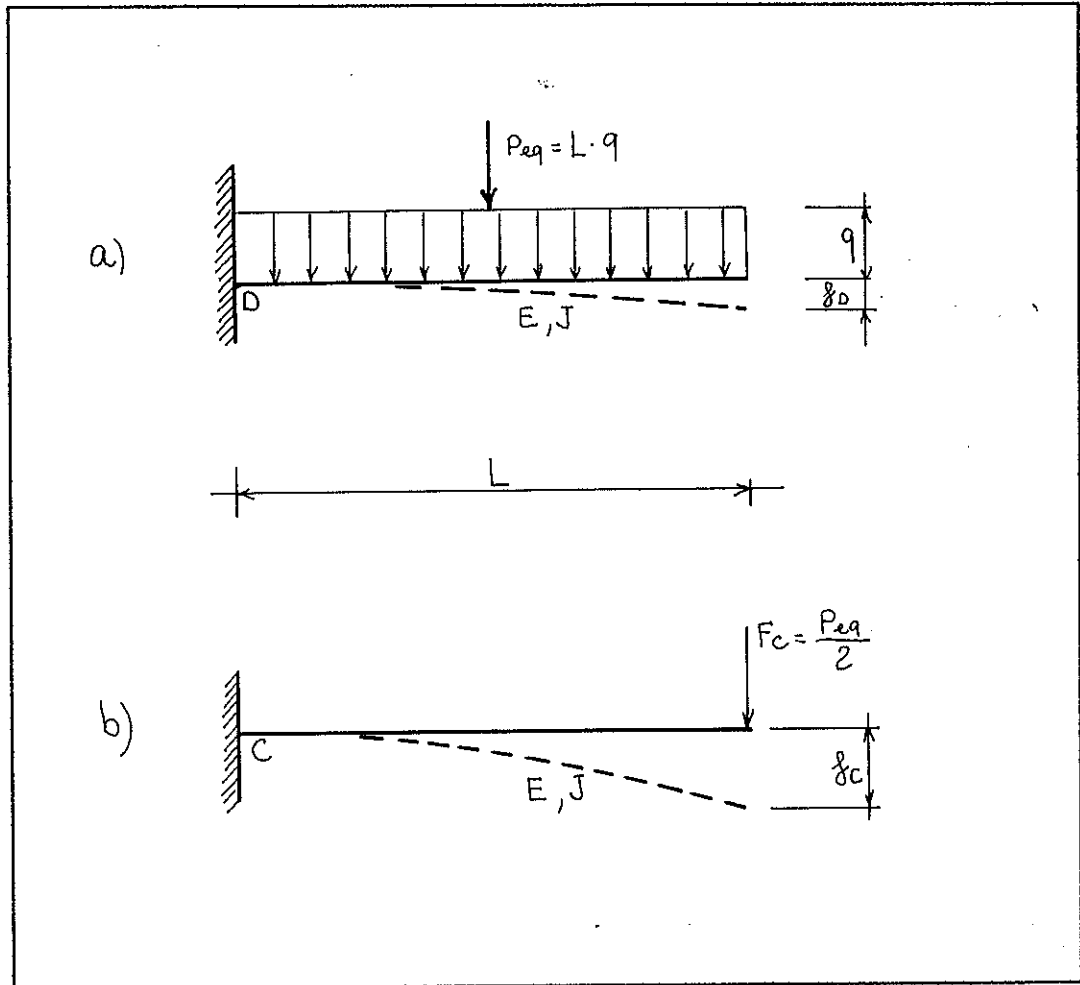


Figura 8.6-2 Azione dell'acqua su un generico tratto di pinna in moto relativo.

Sperimentalmente, per valutare le caratteristiche di rigidità e smorzamento, si è invece imposto una carico concentrato all'estremità opposta della sezione di vincolo del tratto di pala in analisi (fig.8.4-2). Per poter applicare i dati forniti dalle prove sperimentali alle pinne di Flipper è quindi necessario valutare le relazioni che legano le caratteristiche di rigidità ( $K_{\varphi}$ ) e smorzamento ( $c_{\varphi}$ ) di un generico tratto di pinna sollecitato con un carico concentrato (fig.8.6-3a), alle caratteristiche di rigidità ( $K_{\varphi_D}$ ) e smorzamento ( $c_{\varphi_D}$ ) dello stesso tratto di pinna sollecitato con un carico distribuito equivalente (fig.8.6-3b).



**Tabella 8.6-1** a) Tratto di pinna sollecitato con un carico concentrato;  
b) Stesso tratto di pinna sollecitato con un carico distribuito.

Per ipotesi, il momento flettente agente nella sezione di vincolo è lo stesso  
 $M_D = M_C$ , quindi:

$$M_D = (q \cdot L) \cdot \frac{L}{2} = P_{eq} \cdot \frac{L}{2} = P \cdot L = M_C$$

$$P_{eq} = 2 \cdot P$$



le frecce massime  $f_{\max\_D}$  e  $f_{\max\_C}$ , valgono:

$$f_{\max\_D} = \frac{1}{8} \cdot \frac{q \cdot L^4}{E \cdot J} = \frac{1}{8} \cdot \frac{P_{eq} \cdot L^3}{E \cdot J}$$

$$f_{\max\_C} = \frac{1}{3} \cdot \frac{P \cdot L^3}{E \cdot J} \stackrel{P_{eq} = 2 \cdot P}{=} \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{eq} \cdot L^3}{2 \cdot E \cdot J}$$

quindi:

$$\frac{f_{\max\_D}}{f_{\max\_C}} = \frac{\frac{1}{8} \cdot \frac{P_{eq} \cdot L^3}{E \cdot J}}{\frac{1}{3} \cdot \frac{P_{eq} \cdot L^3}{2 \cdot E \cdot J}} = \frac{3}{4}$$

$$f_{\max\_D} = \frac{3}{4} \cdot f_{\max\_C}$$

Perciò, a parità di sollecitazione all'incastro, il tratto di pinna soggetto ad un carico distribuito ha una minore freccia massima di deformazione.

Quindi, la costante di rigidezza ( $K_{\varphi\_WM}$ ) di un generico tratto di pinna discretizzato come un unico elemento da applicare alle pinne di Flipper vale:

$$K_{\varphi\_WM} = \frac{4}{3} \cdot K_{\varphi}$$

Ricordando dalla teoria [11] che il coefficiente di smorzamento isteretico è direttamente proporzionale alla rigidezza  $K$ :

$$c = \frac{\beta \cdot K}{\omega}$$

dove:

$\beta$  = coefficiente adimensionale di smorzamento isteretico, costante per un certo materiale;

$\omega = 2 \cdot \Pi \cdot f$  = pulsazione di pinneggiata;

allora il coefficiente di smorzamento isteretico ( $c_{\varphi\_WM}$ ) di un generico tratto di pinna discretizzato come un unico elemento da applicare alle pinne di Flipper vale:

$$c_{\varphi\_WM} = \frac{4}{3} \cdot c_{\varphi}$$

Tenendo conto anche delle relazioni che legano gli elementi discretizzanti un generico tratto di pinna (vedi appendice I), le caratteristiche di rigidezza e smorzamento da imporre, nei vari tipi di simulazione, alle molle rotazionali (Rotational Springs) e agli smorzatori rotazionali (Rotational Dampers) che vincolano reciprocamente gli elementi che costituiscono le pinne di Flipper (fig.5.3-1), valgono:

	Coefficiente di smorzamento		Costante di rigidità	
	isteretico $c_{\varphi\_WM}$		$K_{\varphi\_WM}$	
	della pinna con pala in		della pinna con pala in	
	tecnopolimero	composito X_15	tecnopolimero	composito X_15
	[N*s/°]	[N*s/°]	[N/°]	[N/°]
<b>Molla 1</b>	0.00411	0.00219	0.2687	0.1734
<b>Molla 2</b>	0.00411	0.00219	0.2687	0.1734
<b>Molla 3</b>	0.03223	0.02134	1.1203	1.0400
<b>Molla 4</b>	0.03223	0.02134	1.1203	1.0400
<b>Molla 5</b>	0.08808	0.09387	0.7375	1.1229
<b>Molla 6</b>	0.08808	0.09387	0.7375	1.1229

**Tabella 8.6-2** Caratteristiche di rigidità e smorzamento da imporre, nei vari tipi di simulazione, alle pinne di Flipper.

## CAP. 9 SIMULAZIONI

### 9.1 CONDIZIONI DI SIMULAZIONE

Analizzare numericamente un problema dinamico significa anche integrare delle equazioni differenziali. Working Model integra usando o il metodo di Eulero [10], che fornisce veloci elaborazioni ma risultati approssimati, o il metodo di Kutta-Merson (metodo di Runge-Kutta del quinto ordine) [10], che fornisce risultati precisi ma elaborazioni lente. Oltre al metodo di integrazione è possibile definire anche il passo di integrazione (al crescere del passo diminuisce la precisione dei risultati e aumenta la velocità di elaborazione) che può essere fisso o variabile (stimato da WM affinché l'errore d'integrazione sia minore di una certa tolleranza).

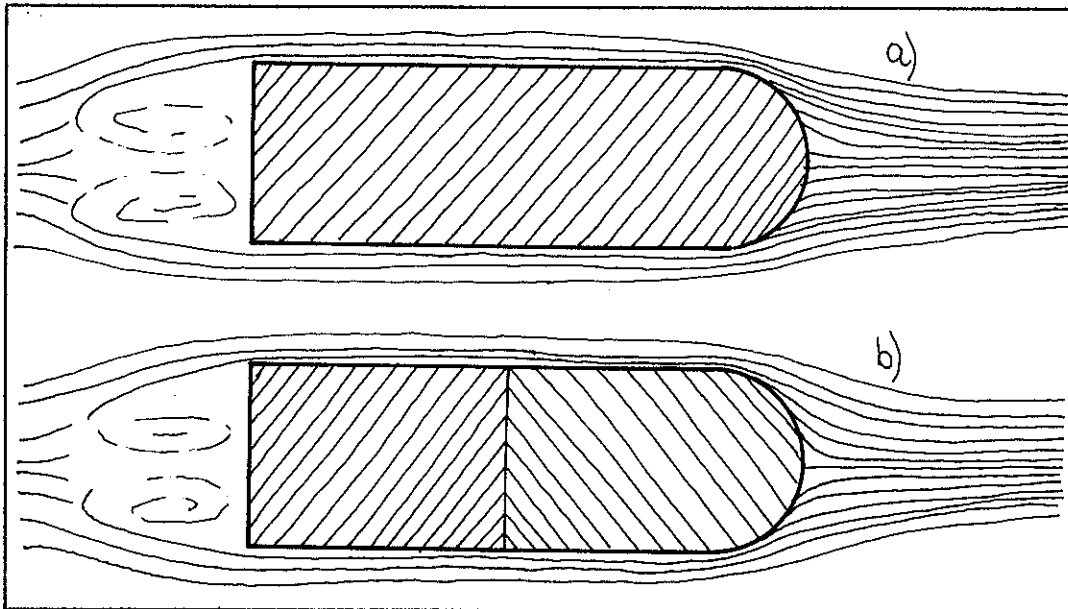
Al fine di ottenere un'analisi accurata con tempi d'elaborazione ragionevoli, dopo numerosi e lunghi tentativi, si è adottato, per tutte le simulazioni di Flipper, il metodo di Kutta-Merson con un passo variabile d'integrazione.

Affinchè i frames, componenti la pinneggiata simulata su WM, siano direttamente confrontabili con i fotogrammi della pinneggiata reale, rilevati dalle riprese subacquee, si è imposto un passo di animazione (Animation Step) di 0.04 secondi.

Per registrare i valori assunti dalle varie variabili (velocità di nuotata, momenti torcenti agenti nelle articolazioni, energia assorbita dalla pinneggiata, etc.), sono stati creati degli appositi output.

La resistenza all'avanzamento di un corpo completamente immerso nell'acqua (fig.9.1-1a), anche se è diviso in due corpi consecutivi (fig.9.1-1b), non varia, per questa ragione i coefficienti di resistenza idrodinamici degli elementi che compongono il corpo di Flipper  $C_{RX}$  (vedi paragrafo 5.6) sono stati opportunamente

rivisti, curando che ai corpi in ombra non fossero imputati più volte effetti di resistenza non reali.



**Figura 9.1-1** a) Corpo completamente immerso nell'acqua; b) Stesso corpo diviso in due parti consecutive.

Imposte le caratteristiche di rigidità e smorzamento rilevate dalle pinne con pala in tecnopolimero (tab.8.6-2), è stata lanciata la prima simulazione.

## **9.2 RISULTATI DELLA PRIMA SIMULAZIONE E TARATURA DEL MODELLO**

La velocità media a regime fornita dalla prima simulazione di pinneggiata ad andatura economica con pinne lunghe in tecnopolimero  $v_{wm\_tec}$  è minore della corrispondente velocità reale rilevata sperimentalmente in piscina  $v_{Reale\_tec}$  (tab.3.4-1):

$$\frac{v_{wm}}{v_{Reale}} = \frac{0.184}{0.761} = 0.242$$

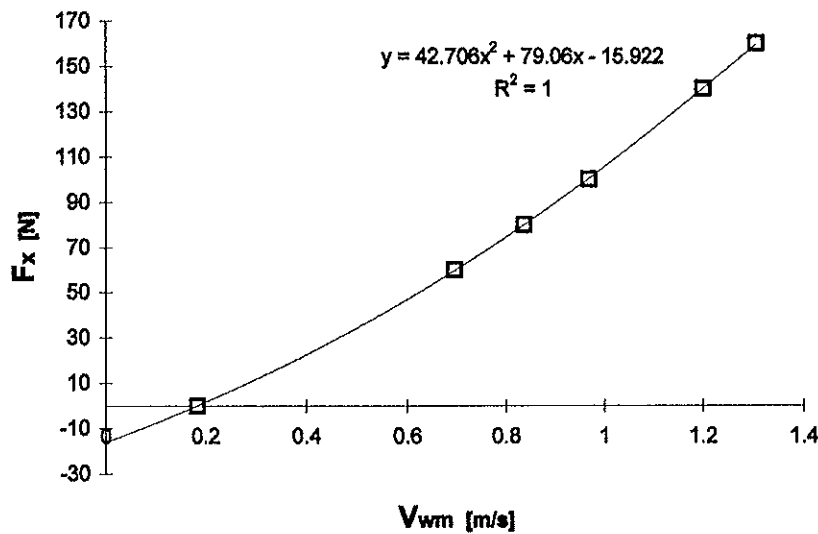
questo scostamento è dovuto agli errori di rilievo della pinneggiata (deformazioni ottiche durante le riprese, etc.), alle approssimazioni introdotte durante il rilievo delle caratteristiche meccaniche delle pinne e alle approssimazioni introdotte nel modello numerico (funzioni che impongono la cinematica del movimento, stima da tabelle dei coefficienti di resistenza idrodinamica, discretizzazione del corpo e delle pinne di Flipper, programma di modellazione bidimensionale, integrazione numerica delle equazioni differenziali, etc.), nonostante lo sforzo eseguito nella eliminazione del maggior numero di parametri incogniti, e la cura nella caratterizzazione del materiale.

La deformazione delle pinne, della prima simulazione di pinneggiata ad andatura economica con pinne lunghe in tecnopolimero, è molto vicina alla corrispondente deformazione rilevata dalle riprese subacquee.

Il modello è stato tarato imponendo al campo di forze agente sul tronco di Flipper una costante di taratura valutata da un'opportuna funzione di taratura. Per quantificare la forza che il modello dovrebbe fornire per raggiungere una certa velocità, sono state lanciate delle simulazioni imponendo al tronco di Flipper una forza di spinta fittizia longitudinale  $F_x$  e valutando le relative velocità medie raggiunte a regime  $v_{wm}$ . I risultati di queste elaborazioni sono raccolti in tabella 9.2-1 e l'andamento approssimato nel grafico 9.2-1.

$F_x$	[N]	0	60	80	100	140	160
$V_{wm}$	[m/s]	0.18396	0.69528	0.83551	0.96625	1.19869	1.30375

**Tabella 9.2-1** Velocità medie raggiunte a regime  $v_{wm}$  imponendo al tronco di Flipper una forza di spinta longitudinale  $F_x$ .



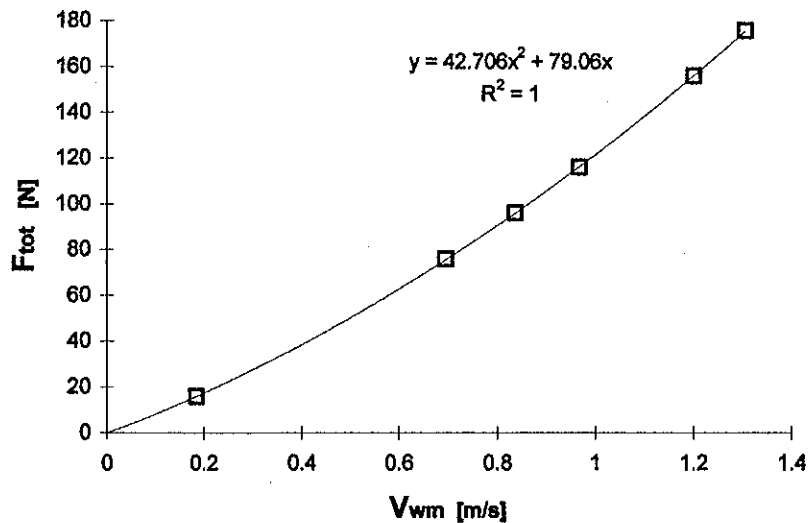
**Grafico 9.2-1** Approssimazione dei risultati forniti dalle elaborazioni ottenute imponendo al tronco di Flipper una spinta longitudinale.

Si nota che la spinta generata da Flipper può essere valutata dall'andamento approssimato per  $v_{wm}=0$ :

$$|F_X|_{v_{wm}=0} = 15.922 \text{ [N]}$$

Traslando l'asse delle ascisse rispetto le ordinate di  $|F_X|_{v_{wm}=0} = 15.922$ , si ottiene l'andamento della forza totale  $F_{Tot}$  che il modello dovrebbe fornire per raggiungere una certa velocità (graf.9.2-2):

$$F_{Tot} = 42.706 \cdot v_{wm}^2 + 79.06 \cdot v_{wm} \text{ [N]}$$



**Grafico 9.2-2** Andamento della forza totale che il modello dovrebbe fornire per raggiungere una certa velocità.

Estendendo il ragionamento all' $i$ -esima simulazione, fatta per esempio variando le caratteristiche delle pinne, la funzione di taratura  $F_{tar\_i}$  che fornisce la costante di



taratura da imporre al campo di forze agente sul tronco di Flipper, ha il seguente valore:

$$F_{tar\_i} = F_{Tot} |_{v_{Reale\_i}} - F_{Tot} |_{v_{wm\_i}}$$

dove:

$v_{wm\_i} \rightarrow$  è la velocità media raggiunta a regime dall'i-esima simulazione con Flipper non tarato;

$v_{Reale\_i} \rightarrow$  è la velocità media raggiunta a regime dall'i-esima simulazione con Flipper tarato, che coincide con la presunta velocità reale valutata dalla seguente proporzione:

$$v_{wm\_tec} \cdot v_{Reale\_tec} = v_{wm\_i} \cdot v_{Reale\_i} \quad , \text{da cui:}$$

$$v_{Reale\_i} = \frac{v_{Reale\_tec}}{v_{wm\_tec}} \cdot v_{wm\_i} = \frac{0.761}{0.184} \cdot v_{wm\_i}$$

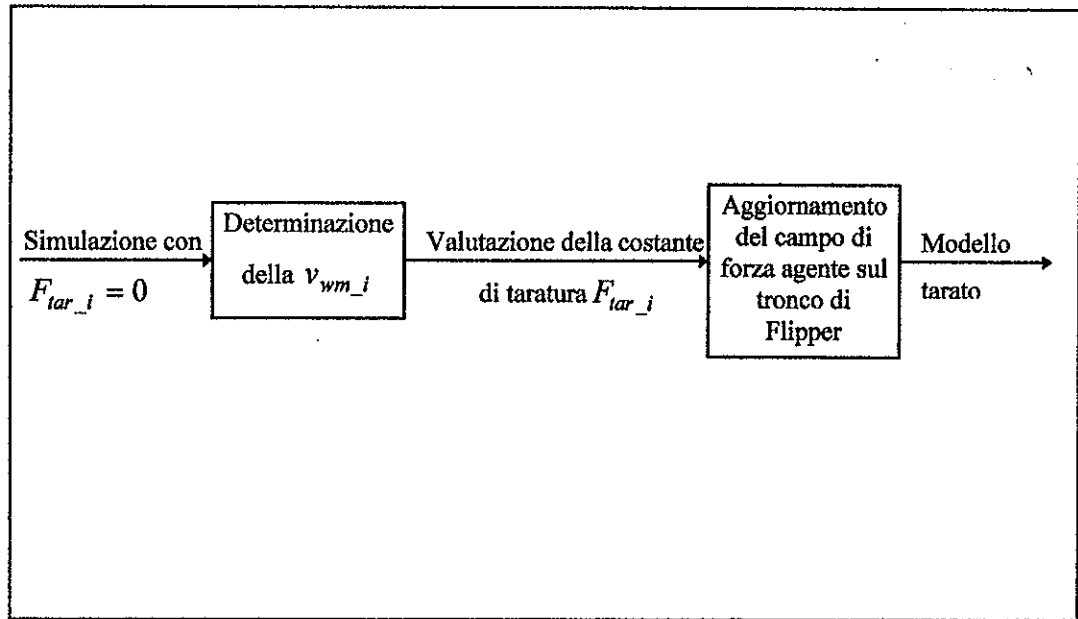
quindi, la funzione di taratura vale:

$$F_{tar\_i} = \left[ 42.706 \cdot \left( \frac{0.761}{0.184} \cdot v_{wm\_i} \right)^2 + 79.06 \cdot \left( \frac{0.761}{0.184} \cdot v_{wm\_i} \right) \right] - \left[ 42.706 \cdot v_{wm\_i}^2 + 79.06 \cdot v_{wm\_i} \right]$$

$$F_{tar\_i} = 687.8 \cdot v_{wm\_i}^2 + 247.9 \cdot v_{wm\_i} \quad [N]$$

Riassumendo (fig.9.2-1), per tarare una generica simulazione è necessario prima valutare la velocità media raggiunta a regime dal modello non tarato  $v_{wm\_i}$ , poi determinare dalla funzione di taratura la costante di taratura  $F_{tar\_i}$  che andrà applicata al campo di forze agente sul tronco di Flipper:

$$F_X = -\left(\frac{1}{2} \cdot C_{RX} \cdot \rho \cdot A_X \cdot v_X^2\right) + F_{tar\_i}$$



**Figura 9.2-1** Procedura seguita per tarare una generica simulazione.

Imposta la costante di taratura alla simulazione di pinne ad andatura economica con pinne lunghe in tecnopolimero, è stata rilanciata l'elaborazione.

### **9.3 VERIFICA DELLA CORRETTEZZA DEI COEFFICIENTI DI RESISTENZA IDRODINAMICA**

Nel paragrafo 5.6.1 sono stati valutati i coefficienti di resistenza idrodinamica dei corpi soggetti al campo di forze, supponendo che i relativi numeri di Reynolds

siano maggiori di  $10^5$ . Ora, dai risultati della simulazione tarata della pinneggiata ad andatura economica con pinne lunghe in tecnopolimero, è possibile estrarre le velocità medie  $V_m = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2}$  a regime di tutti gli elementi soggetti al campo di forze e quindi valutare i relativi numeri di Reynolds (tab.9.3-1).

Nome elemento	Velocità media Vm [m/s]	Numero di Reynolds alla velocità media Re
<b>Braccio</b>	0.76	100156.55
<b>Torace</b>	0.76	151752.35
<b>Bacino</b>	0.76	151752.35
<b>Coscia</b>	0.81	109165.68
<b>Gamba</b>	0.99	108141.00
<b>Piede</b>	1.25	100080.78
<b>Tratto di pinna EH</b>	1.38	303387.05
<b>Tratto di pinna HD</b>	1.39	305185.75
<b>Tratto di pinna DG</b>	1.40	307137.99
<b>Tratto di pinna GC</b>	1.41	309399.52
<b>Tratto di pinna CB</b>	1.42	311700.53
<b>Tratto di pinna BA</b>	1.46	320408.84

**Tabella 9.3-1** Valutazione dei numeri di Reynolds degli elementi interessati dal campo di forze.

Dalla tabella 9.3-1 si nota che non si sono presi in considerazione alcuni membri del corpo di Flipper (mano, avambraccio, testa), questo perché sono stati considerati membri “consecutivi” all’insieme torace-braccia (vedi paragrafo 9.1 e figura 9.1-1).

## **9.4 AVVIO DELLE SIMULAZIONI ED ANDAMENTO DEI RISULTATI**

Dai rilievi effettuati in vasca (cap.3), si è notato che al variare delle caratteristiche delle pinne e frequenza della pinneggiata varia anche la cinematica della pinneggiata. Rispetto la pinneggiata ad andatura economica con pinne lunghe in tecnopolimero, la cinematica della pinneggiata varia particolarmente usando pinne di diversa lunghezza (tab.3.2-2 , pinna 2 e pinna 4) e aumentando la frequenza di gambata (andatura veloce).

A scopo d'indagine sono state eseguite comunque le seguenti simulazioni numeriche, tutte caratterizzate dalla cinematica della pinneggiata ad andatura economica con pinne lunghe in tecnopolimero presa a riferimento:

Tipo di simulazione	Tipo di andatura	Tipo di pala
F_TE	Economica	Tecnopolimero
F_CE	Economica	Composito X_15
F_TV	alla freq. di 0.847 [Hz]	Tecnopolimero
F_CV	alla freq. di 0.847 [Hz]	Composito X_15
F_TE2C	Economica	Tecnopolimero lunga 0.58 [m]
F_TE1C	Economica	Tecnopolimero lunga 0.71 [m]
F_TEL	Economica	Tecnopolimero lunga 0.97 [m]
F_TEKK	Economica	Tecnopolimero a doppia rigidità
F_TEK	Economica	Tecnopolimero metà rigidità
F_TESS	Economica	Tecnopolimero a doppio smorzamento
F_TES	Economica	Tecnopolimero a metà smorzamento
F_TE1F	Economica	Tecnopolimero senza un tratto di pala in EH
F_TE2F	Economica	Tecnopolimero senza un tratto di pala in in EH e HD

**Tabella 9.4-1** Caratteristiche delle simulazioni lanciate.

In tabella 9.4-2 è riportato un esempio dei risultati assoluti di tutte le simulazioni del modello numerico non tarato.

Tipo di simulazione	Tipo di andatura	Tipo di pala	Velocità media [m/s]	Energia dissipata da Flipper [J]	Energia dissipata dalla pinna [J]
F_TE	Economica	Tecnopolimero	0.1840	21796	292
F_CE	Economica	Composito X_15	0.1980	74602	941
F_TV	0.847 [Hz]	Tecnopolimero	0.0219	36016	586
F_CV	0.847 [Hz]	Composito X_15	0.0533	139639	1203
F_TE2C	Economica	Tecnop. lunghe 0.58 [m]	0.1814	17040	148
F_TE1C	Economica	Tecnop. lunghe 0.71 [m]	0.2158	21208	391
F_TEL	Economica	Tecnop. lunghe 0.97 [m]	0.0978	50020	484
F_TEKK	Economica	Tecnop. doppia rigidità	0.2178	78800	1679
F_TEK	Economica	Tecnop. metà rigidità	0.1194	14024	299
F_TESS	Economica	Tecnop. doppio smorz.	0.1552	152663	846
F_TES	Economica	Tecnop. metà smorz.	0.2053	8086	264
F_TE1F	Economica	Tecnop. feritoia in EH	0.1845	15984	285
F_TE2F	Economica	Tecnop. feritoie in EH e HD	0.1827	17034	288

**Tabella 9.4-2** Risultati assoluti delle simulazioni del modello non tarato.

Dalle simulazioni si è notato, come si era precedentemente intuito, i seguenti comportamenti:

- F\_TV e F\_CV: raddoppiando la frequenza ma mantenendo la cinematica della pinne ad andatura economica, le pinne si sono deformate eccessivamente rendendo la simulazione poco reale e di conseguenza i risultati forniti non utilizzabili;
- F\_TE2C , F\_TE1C e F\_TEL: variando la lunghezza delle pinne, togliendo o aggiungendo i tratti di pala AB e BC senza variare le caratteristiche di rigidità e smorzamento dei vincoli (molle e smorzatori) rimasti, sono diventate troppo o troppo poco rigide in rapporto alla loro lunghezza, rendendo la simulazione poco reale e di conseguenza i risultati forniti non utilizzabili;

- nei restanti tipi di simulazione le pinne si sono deformate in un modo che si presume si avvicini molto ad un comportamento reale.

Per semplificare l'esposizione, le velocità raggiunte a regime da queste simulazioni sono espresse in termini relativi percentuali  $v_r$  %, con:

$$v_r \% = \frac{v - v_{et}}{v_{et}} \cdot 100 \quad [\%]$$

dove:

$v$  → velocità raggiunta a regime dalla generica simulazione;

$v_{et}$  → velocità raggiunta a regime dalla simulazione di pinneggiata ad andatura economica con pinne lunghe in tecnopolimero, presa a riferimento.

Mentre, l'energia assorbita da Flipper e dalla pinna (energia d'isteresi) per un ciclo di pinneggiata è espressa con un:

- + per indicare un maggior assorbimento rispetto la pinneggiata ad andatura economica con pinne lunghe in tecnopolimero, presa a riferimento;
- per indicare un minore assorbimento rispetto la pinneggiata ad andatura economica con pinne lunghe in tecnopolimero, presa a riferimento.

I risultati delle simulazioni di confronto e di sviluppo sono raccolti in tabella 9.4-4 e analizzati nel capitolo 10 dedicato alle conclusioni.

A scopo di verifica si sono eseguite delle nuove prove cronometrate in acqua (tab.9.4-3) usando le pinne con pala in tecnopolimero (tab.3.2-2 , pinna 1) e le pinne

con pala in carbonio X\_15 (foto 1.1-1), con risultati molto vicini a quelli forniti dal modello.

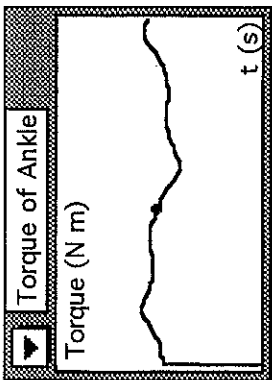
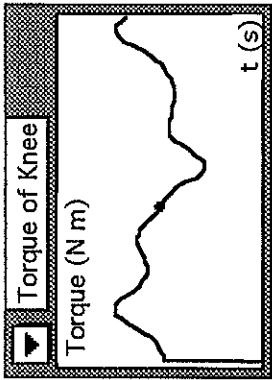
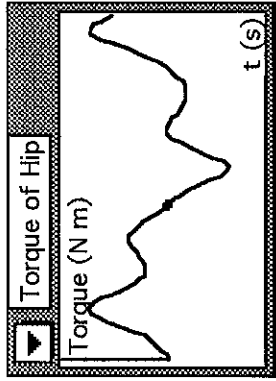
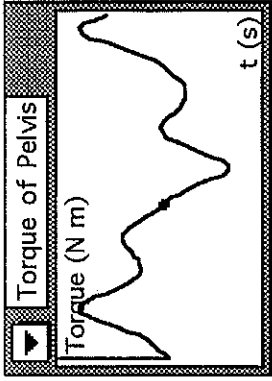
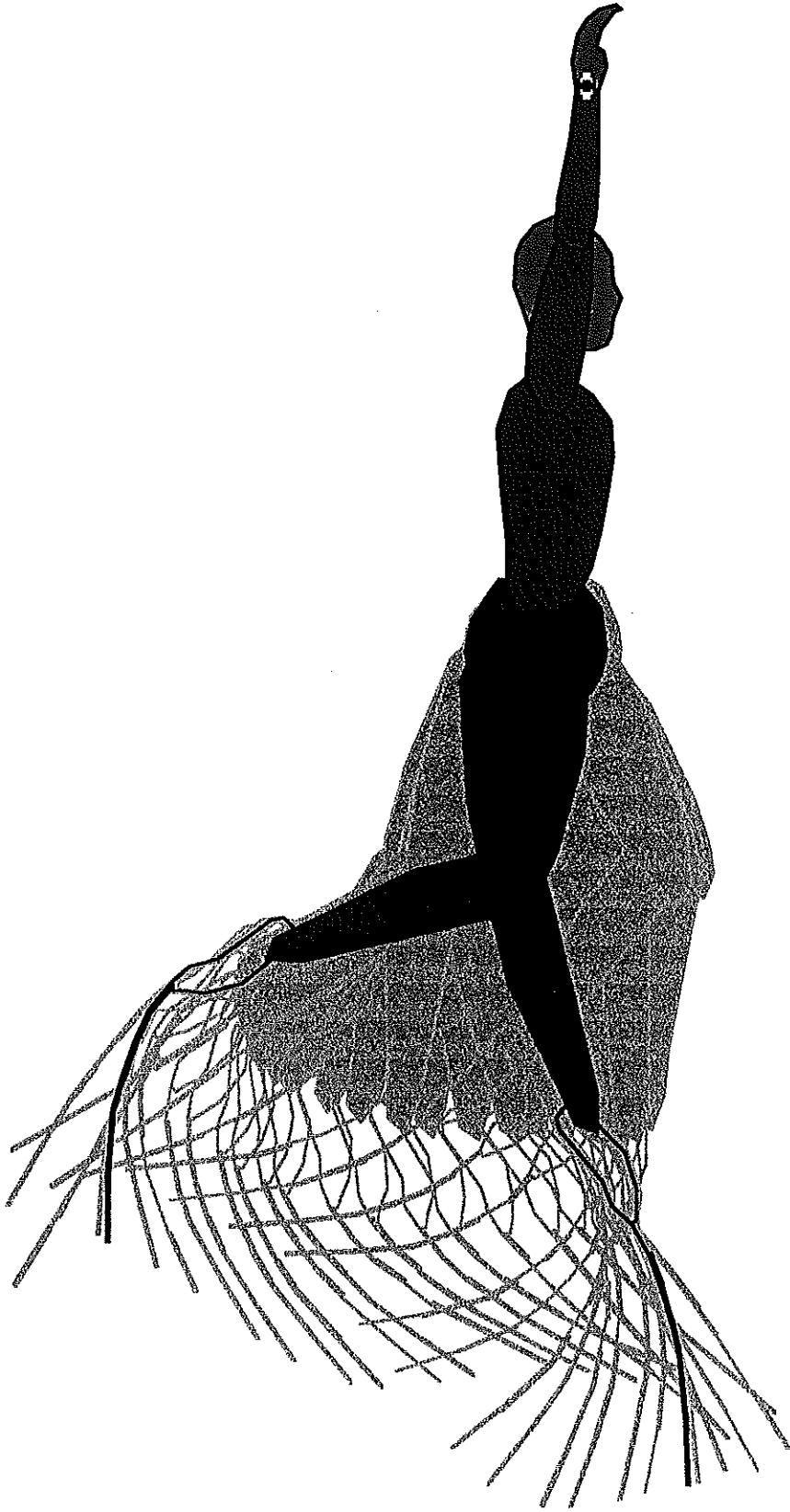
Atleta	Tipo di pinne lunghe	Velocità medie [m/s]	Velocità per tipo di pinna [m/s]	Velocità per tipo di pinna relativa percentuale [%]
D	Tecnopolimero	1.369	<b>1.326</b>	<b>0</b>
D	Tecnopolimero	1.238		
D	Tecnopolimero	1.314		
D	Tecnopolimero	1.372		
D	Tecnopolimero	1.342		
D	Tecnopolimero	1.325		
D	Composito X_15	1.407	<b>1.415</b>	<b>6.681</b>
D	Composito X_15	1.450		
D	Composito X_15	1.430		
D	Composito X_15	1.404		
D	Composito X_15	1.423		
D	Composito X_15	1.376		

**Tabella 9.4-3** Risultati sperimentali rilevati con delle nuove prove cronometriche in acqua.

Tipo di simulazione	Tipo di pala	Velocità media $v_r$ %	
		Energia assorbita da Flipper	Energia assorbita dalla pinna
F_TE	Tecnopolimero	=	=
F_CE	Composito X_15	+	+
F_TEKK	Tecnopolimero doppia rigidità	+	+
F_TEK	Tecnopolimero metà rigidità	-	-
F_TESS	Tecnopolimero doppio smorzamento	+	+
F_TES	Tecnopolimero metà smorzamento	-	-
F_TEF	Tecnopolimero con feritoia in EH	-	-
F_TE2F	Tecnopolimero con feritoia in EH e HD	-	-

**Tabella 9.4-4** Risultati delle simulazioni di confronto (F\_TE, F\_CE) e di sviluppo (F\_TEKK, F\_TEK, F\_TESS, F\_TES, F\_TEF, F\_TE2F).





## CAP. 10 CONCLUSIONI

Il lavoro svolto in questa tesi rappresenta un primo approccio allo studio razionale della pinneggiata subacquea, sia da un punto di vista biomeccanico, sia da un punto di vista della valutazione dell'efficienza delle pinne mediante una simulazione numerica della pinneggiata.

A partire dalla registrazione di più tipi di pinneggiate, ottenute riprendendo con una videocamera direttamente in acqua un atleta in azione, si sono valutate le leggi che governano la cinematica di un tipo di pinneggiata presa a riferimento (andatura economica con pinne lunghe in tecnopolimero). Le informazioni estratte dalle registrazioni subacquee sono state utilizzate anche per un'analisi biomeccanica della pinneggiata, che ha fornito interessanti ed inediti risultati. Disponendo di un programma bidimensionale di modellazione numerica (Working\_Model), si sono discretizzati, in elementi semplici, il corpo dell'atleta e le sue pinne visti rispetto il piano sagittale. Tali elementi sono stati assemblati con dei vincoli rigidi e delle cerniere, mentre posizionando in corrispondenza delle articolazioni mobili, dei motori ruotanti con le leggi sperimentali precedentemente valutate, si è imposta al modello la cinematica della pinneggiata studiata. Da delle prove sperimentali dinamiche sono state estratte le caratteristiche di rigidità e smorzamento di più tipi di pinne, in particolare delle pinne lunghe con pala in tecnopolimero usate per la pinneggiata presa a riferimento e quindi imposte al modello. Per simulare numericamente l'effetto idrodinamico dell'acqua, viste le possibilità offerte da WM, si è scelta la strada di creare un campo di forze basato sulle leggi che governano le forze idrodinamiche agenti sui corpi in movimento. Per effetto della cinematica di pinneggiata imposta e la presenza del campo di forze, l'atleta modellato al calcolatore, per semplicità indicato con il nome di Flipper, avanza, simulando numericamente una pinneggiata subacquea in acqua. A causa delle approssimazioni introdotte per motivi di tempo, mezzi e conoscenze iniziali del problema, nonostante

## Capitolo 10

lo sforzo sostenuto nell'eliminazione del maggior numero di parametri incogniti e la cura nella caratterizzazione del materiale, affinché Flipper nuoti alla velocità rilevata sperimentalmente è stato necessario introdurre una funzione di taratura, agente sul campo di forze, dipendente dalla forza propulsiva necessaria al modello per raggiungere una certa velocità. Tarato il modello è stato possibile simulare la pinneggiata studiata e valutare i momenti torcenti agenti nelle articolazioni mobili, l'energia assorbita da tali articolazioni, i momenti torcenti agenti nelle varie sezioni della pinna, l'energia dissipata per effetto dello smorzamento isteretico del materiale costituente le pinne ed altro. Cambiando solo le caratteristiche meccaniche e geometriche delle pinne di Flipper sono state tentate delle simulazioni di confronto e sviluppo, con risultati che discostano da quelli reali tanto più quanto la cinematica reale della pinneggiata relativa a tali cambiamenti varia rispetto la cinematica, della pinneggiata ad andatura lenta con pinne lunghe, imposta al modello. Le prove sperimentali dinamiche, oltre ai dati necessari per la modellazione numerica hanno fornito un reale termine di confronto per i materiali di costruzione delle pale, con risultati interessanti per le pale realizzate in materiale composito.

Nel seguente paragrafo sono riportati i risultati, l'analisi critica e le prospettive d'indagine delle fasi caratterizzanti il lavoro svolto.

## 10.1 RISULTATI, ANALISI CRITICA E PROSPETTIVE D'INDAGINE

### ◆ Rilevamento e valutazione della pinneggiata.

La pinneggiata varia tra i singoli individui, quindi non esiste una pinneggiata "normale" valida per tutti ma è comunque possibile definire una pinneggiata alla quale far riferimento per studiare razionalmente il problema.

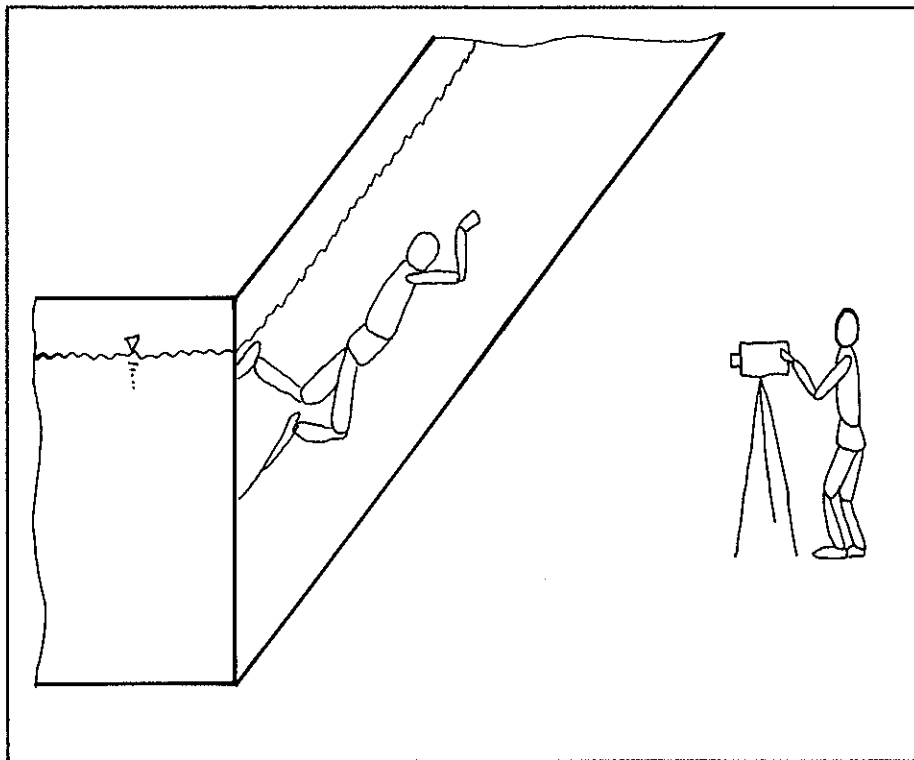
La ripresa video dell'atleta mentre pinneggia è l'unica soluzione per un'analisi approfondita del movimento di pinneggiata. Una prima serie di riprese ha evidenziato, per mancanza di punti di riferimento precisi, una certa difficoltà nel rilevare le posizioni che le articolazioni occupano durante il ciclo di pinneggiata. Questo problema è stato risolto posizionando degli opportuni segnali di riferimento in corrispondenza dell'anca, del ginocchio, della caviglia e dell'avampiede (fig.3.3-4). Il metodo di ripresa adottato (fig.3.3-1), non ha consentito di stimare l'errore di distorsione introdotto dall'obiettivo della videocamera e l'effetto di rifrazione (♣) dell'acqua. Una metodologia di ripresa alternativa a quell'usata consiste nel fissare la videocamera ad un cavalletto e riprendere dall'esterno l'atleta mentre pinneggia in una vasca con una parete trasparente (fig.10.1-1). Così facendo le riprese risulteranno più stabili e sarà possibile tararle per tenere conto degli errori suddetti.

---

(♣) *Fenomeno ottico consistente nella deviazione che un raggio luminoso subisce nel passare dall'uno all'altro di due mezzi trasparenti diversi, quindi caratterizzati da non uguali indici di rifrazione. L'indice di rifrazione dell'acqua è 1.33 volta maggiore di quello dell'aria, infatti, sott'acqua i soggetti appaiono il 25% più vicini e più grandi di quanto non siano effettivamente.*

Dopo un primo tentativo manuale per rilevare gli angoli relativi agli arti inferiori, si è optato per l'uso di un programma CAD con ottimi risultati (tab.B-1 e graf.5.5-1).

Essendo questo lavoro di tesi un primo approccio allo studio della pinneggiata subacquea e considerando i mezzi a disposizione, si ritiene che il sistema adottato per rilevare e valutare le posizioni occupate dalle articolazioni durante un ciclo di pinneggiata, nonostante introduca degli errori geometrici e richieda un lavoro non indifferente, sia soddisfacente. In generale, esiste una differenza tra la cinematica della nuotata di un buon atleta e quella di un atleta medio, ma questa differenza può essere molto piccola, perciò se s'intende simulare efficacemente al calcolatore un gesto



**Figura 10.1-1** Metodologia alternativa di ripresa.

atletico, è molto importante riprodurlo con estrema fedeltà. Un sistema

alternativo a quello adottato, per rilevare e valutare la pinneggiata, consiste nel collegare direttamente il videoregistratore, contenente la registrazione della nuotata, al calcolatore mediante una scheda che permette di digitalizzarne i singoli fotogrammi (per esempio la AV Master Pci). Costruendo un semplice programma che valuta le coordinate dei punti digitalizzati con il mouse, direttamente dal video del calcolatore, in corrispondenza delle articolazioni, sarà possibile definire velocemente e con estrema precisione la cinematica della pinneggiata. Un tale sistema renderebbe possibile un'utilissima analisi statistica della pinneggiata. Infatti, se si potesse definire una cinematica media di pinneggiata per ogni categoria di pinne, si potrebbero realizzare delle simulazioni di sviluppo che si avvicinano molto alla realtà. Interessante sarebbe valutare, per via teorica, la cinematica che rende massima l'efficienza della pinneggiata (per esempio il rapporto tra velocità di nuotata e l'energia spesa), e confrontarla con quella rilevata statisticamente.

Osservando le traiettorie seguite dalle articolazioni rilevate per un ciclo di pinneggiata, si è notato che:

- ⇒ al crescere della velocità di nuotata, l'ampiezza di pinneggiata e l'ampiezza di rollio non variano, mentre varia la loro posizione relativa (fig.3.4-2);
- ⇒ usando le pinne lunghe anziché le corte, la frequenza di pinneggiata diminuisce del 25÷45 % mentre l'ampiezza di pinneggiata aumenta del 15÷45 % ;
- ⇒ esiste un tratto di pinna definito "negativo", che nella fase di massima spinta tende a rallentare l'avanzamento del nuotatore (fig.3.4-3).

Dalle riprese effettuate seguendo posteriormente l'atleta durante la pinneggiata, si è notata una torsione dell'estremità della pala nella fase di

massima spinta che rende instabile e meno efficiente la pinneggiata (vedi par.3.5).

◆ Analisi biomeccanica della pinneggiata.

Questo tipo d'analisi ha permesso di capire la cinematica della pinneggiata anche da un punto di vista fisiologico (tab.4.1-1) e confermare che i rilievi estratti dalle riprese subacquee rientrano nei limiti fisiologici articolari (par. 4.2,3,4,5).

◆ Analisi numerica del problema meccanico e biomeccanico.

Essendo la versione del programma di modellazione disponibile bidimensionale (Working Model 2D), l'analisi (cap.5) ha avuto come riferimento il piano sagittale, però, mediante opportuni artifici si è tenuto conto anche della terza dimensione. Tra non molto sarà disponibile una versione tridimensionale di WM, che potrebbe consentire una modellazione ancor più vicina alla realtà.

Il campo di forze introdotto per simulare le forze idrodinamiche agenti sui corpi in movimento, occupa un posto di rilievo nel modello numerico. Chiaramente, se si ottenessero dei dati sperimentali sui coefficienti di resistenza idrodinamica, anziché rilevarli da tabelle relative a corpi solidi semplici (vedi appendice E), l'azione del campo si avvicinerrebbe ancor più a quella reale.

Ogni corpo schematizzato su WM ha una sua finestra dove sono raccolte le sue proprietà (massa, coefficiente d'attrito statico, etc), ma in questa finestra non sono previste proprietà come, per esempio, i coefficienti di resistenza idrodinamica. Il problema è stato aggirato assegnando ai coefficienti di resistenza idrodinamica il nome di variabili non attive (elasticity, charge, etc) e chiamandoli così nel campo di forze. Questo è solo un altro esempio che fa capire le difficoltà incontrate per far accettare a WM il modello numerico che s'intendeva realizzare.

### ◆ Prove statiche delle pinne.

Nell'intento di determinare le caratteristiche di rigidità flessionale, si è valutata la freccia massima (fig.6.3) conseguente applicazione di un carico statico noto.

Come evidenziato in figura 6.4-2, tali prove sono affette da un errore geometrico non trascurabile e non eliminabile a posteriori. Una possibile, ma laboriosa, modalità di prova alternativa è descritta in figura 6.4-3. In ogni caso le prove sperimentali a carico statico, sono state importanti per capire il comportamento meccanico del materiale costituente le pinne e quindi per giustificare le più complesse prove dinamiche. In teoria probabilmente esiste un legame tra i due tipi di prova, ma in pratica, ricordando che le caratteristiche di smorzamento isteretico sono strettamente legate alla frequenza di sollecitazione, difficilmente le prove a carico statico potranno sostituire in affidabilità i risultati delle prove dinamiche.

### ◆ Prove dinamiche delle pinne.

Per ogni tratto di pinna, variando l'ampiezza e la frequenza di sollecitazione imposta da un attuatore di spostamento, si sono ottenuti i relativi cicli d'isteresi, così con un solo tipo di prova è stato possibile ottenere molte informazioni (costante di rigidità, coefficiente di smorzamento isteretico, energia d'isteresi, stima dell'errore di discretizzazione delle pinne di Flipper, fenomeno di "snapping" per le pinne con pala in composito), il tutto in condizioni di sollecitazione che si avvicinano molto a quelle che si verificano durante la pinneggiata.

La metodologia adottata per rilevare i cicli d'isteresi è affetta da un errore geometrico che genera una diversa ampiezza di deformazione e un diverso tipo di sollecitazione nei due versi di deformazione (fig.8.1-1,2), determinanti un andamento asimmetrico dei cicli (graf.8.1-1). Il problema è stato efficacemente risolto trattando opportunamente tali cicli con'esposto nei paragrafi 8.2, 8.3.



I risultati hanno fornito, oltre ai dati necessari per la modellazione numerica, un reale termine di confronto per i materiali di costruzione delle pale. Infatti, dalla tabella 8.3-2 e grafico 8.3-9 si è notato che i coefficienti adimensionali di smorzamento isteretico delle pinne con pala in composito sono sempre inferiori a quelli delle pinne con pala in tecnopolimero. Nonostante questo, essendo il coefficiente di smorzamento isteretico  $c$  proporzionale al coefficiente di rigidità (cap.7), in alcuni tratti di pala è risultato  $c_{composito} > c_{tecnopolimero}$ , come si può notare dal grafico 8.4-5 che riassume efficacemente le caratteristiche meccaniche delle pinne con pala in tecnopolimero e delle pinne con pala in composito X\_15.

◆ Simulazioni numeriche della pinneggiata.

Al fine di ottenere un'analisi accurata con tempi di elaborazione ragionevoli, dopo numerosi e lunghi tentativi, si è adottato, per tutte le simulazioni di Flipper, il metodo Kutta-Merson (metodo di Runge-Kutta del quinto ordine) per l'integrazione delle equazioni differenziali con un passo d'integrazione variabile (stimato da WM affinché l'errore d'integrazione sia minore di una certa tolleranza).

Nonostante si sia semplificato al massimo il modello numerico, i tempi di elaborazione restano elevati (> di 24 ore imponendo al modello già una velocità iniziale per superare più velocemente la fase transitoria di avvio). Probabilmente intervenendo sulla tolleranza che WM usa come riferimento per confrontare l'errore d'integrazione e stimare il passo d'integrazione, tali tempi potrebbero diminuire leggermente (max 5%). L'unica soluzione è usare calcolatori più veloci, per esempio usando un Pentium 200 MHz, oggi disponibile a prezzi non elevati, con la versione 4.0 di WM, si stima di poter dimezzare tali tempi di elaborazione.

Per registrare la velocità della nuotata, i momenti torcenti agenti nelle articolazioni, l'energia assorbita dalla pinneggiata, ed altro, sono stati creati degli appositi output.

Valutando con una serie di simulazioni la forza propulsiva che Flipper dovrebbe fornire per raggiungere una certa velocità (graf.9.2-2), e confrontando la velocità media a regime fornita dalla prima simulazione di pinneggiata con la corrispondente velocità rilevata sperimentalmente in piscina, è stato possibile definire un'interessante funzione di taratura (par.9.2).

Dal modello tarato, ricavando le velocità medie di spostamento di tutti i corpi soggetti all'azione del campo di forze, è stato possibile valutare con precisione i relativi numeri di Reynolds e confermare i coefficienti di resistenza idrodinamica supposti nella fase di costruzione del modello.

Nonostante che al variare delle caratteristiche delle pinne e frequenza di pinneggiata, dai rilievi effettuati in vasca si è notato che varia anche la cinematica della pinneggiata, a scopo d'indagine sono state eseguite comunque delle simulazioni numeriche di confronto e di sviluppo. I risultati comparativi delle simulazioni le cui pinne si sono deformate in un modo che si presume si avvicini molto ad un comportamento reale sono riportati in tabella 9.4-4.

Il confronto tra l'incremento di velocità media a regime previsto dalla simulazione numerica per le pinne con pala in tecnopolimero con quello rilevato da un'ulteriore prova di pinneggiata cronometrata in piscina (tab.9.4-3), conferma la bontà del lavoro di modellazione svolto.

### ◆ Ottimizzazione.

I risultati delle suddette simulazioni (tab.9.4-4), come si poteva probabilmente intuire ma più difficilmente provare, indicano che:

⇒ al crescere della rigidità della pinna:

- cresce la velocità media di nuotata;
- cresce l'energia assorbita dall'atleta e le sue pinne;

⇒ al crescere del coefficiente di smorzamento isteretico:

- decresce la velocità media di nuotata;
  - cresce l'energia assorbita dall'atleta e le sue pinne;
- ⇒ usando delle pinne con delle feritoie nel tratto di pala EH:
- cresce leggermente la velocità media di nuotata;
  - decresce l'energia assorbita dall'atleta e le sue pinne;
- ⇒ usando delle pinne con delle feritoie nel tratto di pala EH e HD:
- decresce leggermente la velocità media di nuotata;
  - decresce l'energia assorbita dall'atleta e le sue pinne.

Una pinna molto rigida usata con poco forza è meno efficace di una pinna più morbida, perché non deformandosi ottimamente la componente longitudinale di spinta è più piccola. Viceversa, una pinna morbida usata con molta forza è meno efficiente di una pinna più rigida. Quindi la scelta della rigidità globale di una pinna deve essere funzione degli scopi e delle caratteristiche fisiche di chi intende usarla [14].

Una pinna pensata per il nuoto in superficie (detto nuoto pinnato) ha una distribuzione della rigidità nei vari tratti di pala diversa da una pinna pensata per l'apnea, perché diverse sono le condizioni di sollecitazione. E' comunque corretto parlare di distribuzione ottimale della rigidità nei vari tratti di pala se si specifica il tipo d'impiego.

I materiali compositi a fibre lunghe offrono, con un minor peso, una gamma potenziale di rigidità maggiore rispetto al tecnopolimero analizzato.

Un minore coefficiente di smorzamento isteretico costituisce sempre un fattore positivo, infatti, aumenta l'efficienza della pinneggiata (> velocità media di nuotata) pur diminuendo l'energia assorbita dall'atleta e le sue pinne.

## Conclusioni

Come esposto in tabella 8.3-2 le pinne con pala in materiale composito a fibre lunghe sono caratterizzati da un coefficiente adimensionale di smorzamento isteretico sempre inferiore a quello delle pinne con pala in tecnopolimero.

Come già intuito sperimentalmente (fig.3.4-3), i tratti di pinna più vicini alla scarpetta mediamente contribuiscono poco (tratto HD) o addirittura si oppongono (tratto EH) all'avanzamento, come confermato dai risultati delle simulazioni numeriche. Il vantaggio principale di tale geometria, già presente in commercio, è soprattutto la minore energia assorbita dall'atleta e le sue pinne.

~~~~~

*“Soddisfatto del lavoro svolto, spero che diventi uno strumento utile per la definizione di un approccio alternativo allo studio della pinneggiata.”*

*Zanatta Davide*

*via Cesare Battisti n°54*

*Istrana (TV) cap 31036*

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Gianni Roghi : "Uomini e pesci"  
Sperling & Kupfer Ed. , MILANO , 1977
- [2] P.K. Mallick : "Fiber-Reinforced Composites"  
L.L.Faulkner Ed. , Department of Mechanical Engineering  
University of Michigan-Dearborn , 1993
- [3] Bhagwan D. Agarwal , Lawrence J. Broutman :  
"Analysis and Performance of Fiber Composites"  
SPE Ed. , USA , 1980
- [4] Bertagnoni : "Appunti sul cammino"  
Corso fisioterapisti , Vicenza
- [5] I.A.Kapandji : "Fisiologia articolare"  
Marrapese Ed. Demi , Roma , 1983
- [6] Augusto Ghetti : "Idraulica"  
Libreria Cortina Ed. , Padova , 1993

- [7] Henry O. Kendall , Florence P. Kendall , Gladys E. Wadsworth :  
“ I muscoli, esame e studio funzionale”  
Piccin Ed. , Padova , 1985
- [8] Alda Pellegrini : “Elementi di Kinesiologia”  
Corso Fisioterapisti , Conegliano(TV)
- [9] Hatze H. : “A Mathematical Model for the Computational  
Determination of Parameter Values of Anthropometric Segments”  
J. Biomechanics Vol. 13 pag.833 ÷ 843 , Great Britain , 1980
- [10] G.Gambolati : “Elementi di calcolo numerico”  
Libreria Cortina Ed. , Padova , 1985
- [11] R.Basso : “Meccanica delle vibrazioni”  
Appunti dalle lezioni , 1993
- [12] Bruno Atzori : “Appunti di costruzioni di macchine”  
Padova , 1995
- [13] A.Bray - V.Vicentini : “Meccanica sperimentale:  
misure ed analisi delle sollecitazioni”  
Levrotto & Bella Ed. , Torino , 1975

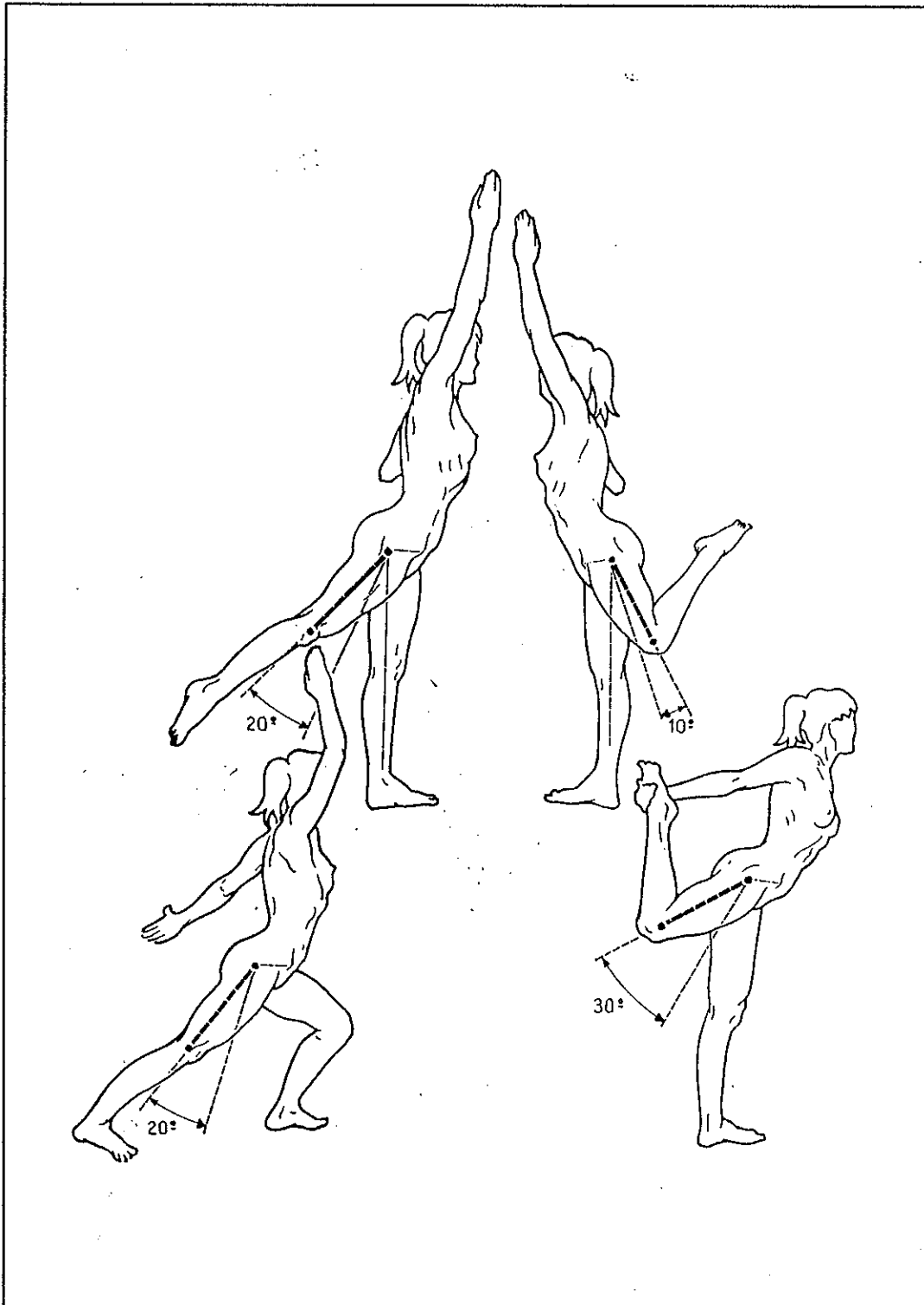
- [14] Antonio Dal Monte : “Appunti sui lavori di biomeccanica relativi alle pinne”  
CONI , Roma , 1996

## **APPENDICE A**

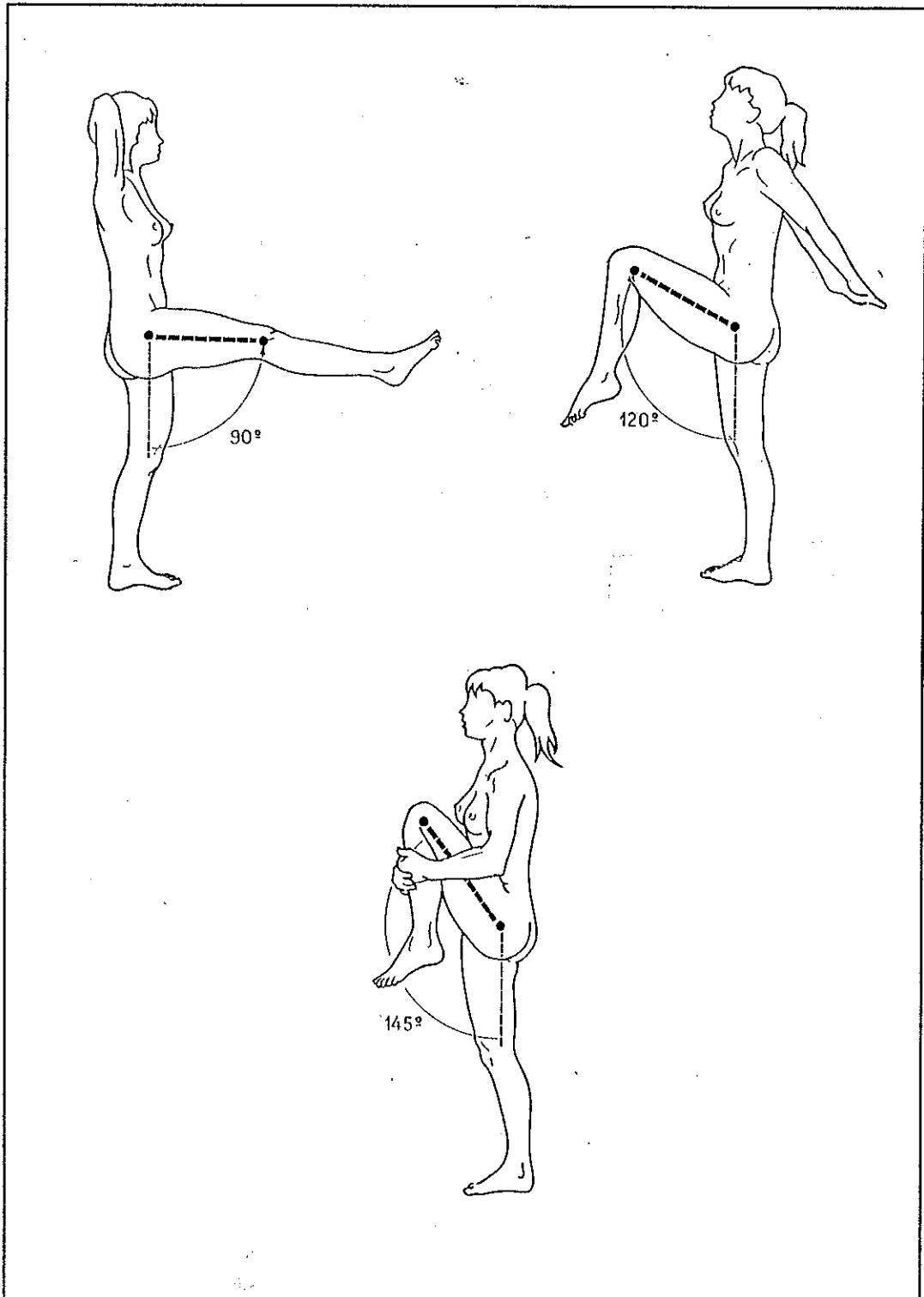
In questa appendice sono raccolti i movimenti ed i relativi angoli massimi di riferimento [5] di flessione ed estensione, dell'anca (fig.A-1,2), del ginocchio (fig.A-3) e della caviglia (fig.A-4),

Dall'esame articolare, relativo ai movimenti interessati dalla pinneggiata, effettuato con apposito goniometro da personale specializzato (Terapista della Riabilitazione), si è constatato che i due atleti rientrano nella norma.



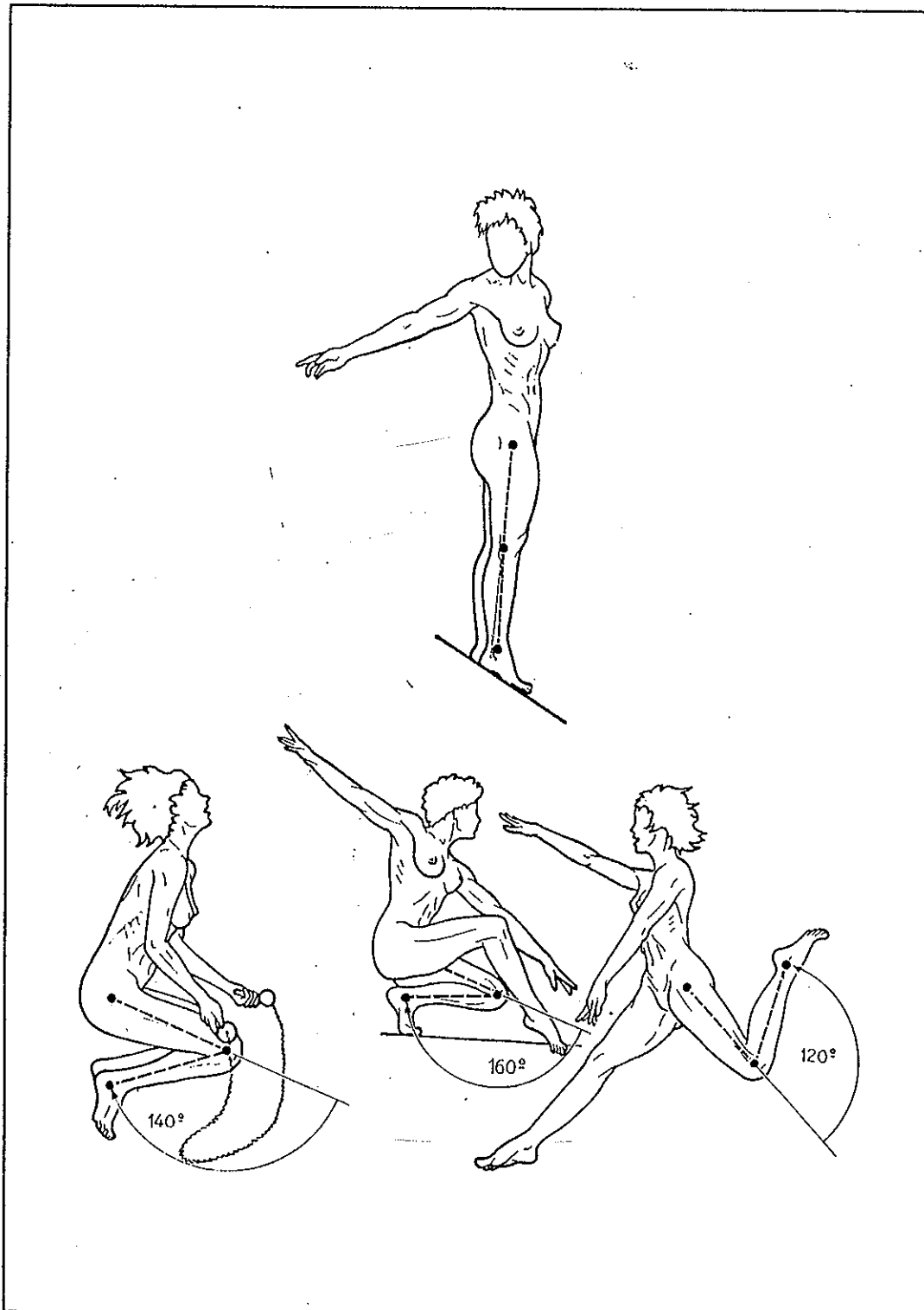


**Figura A-1** Movimenti e relativi angoli massimi di riferimento di estensione dell'anca.

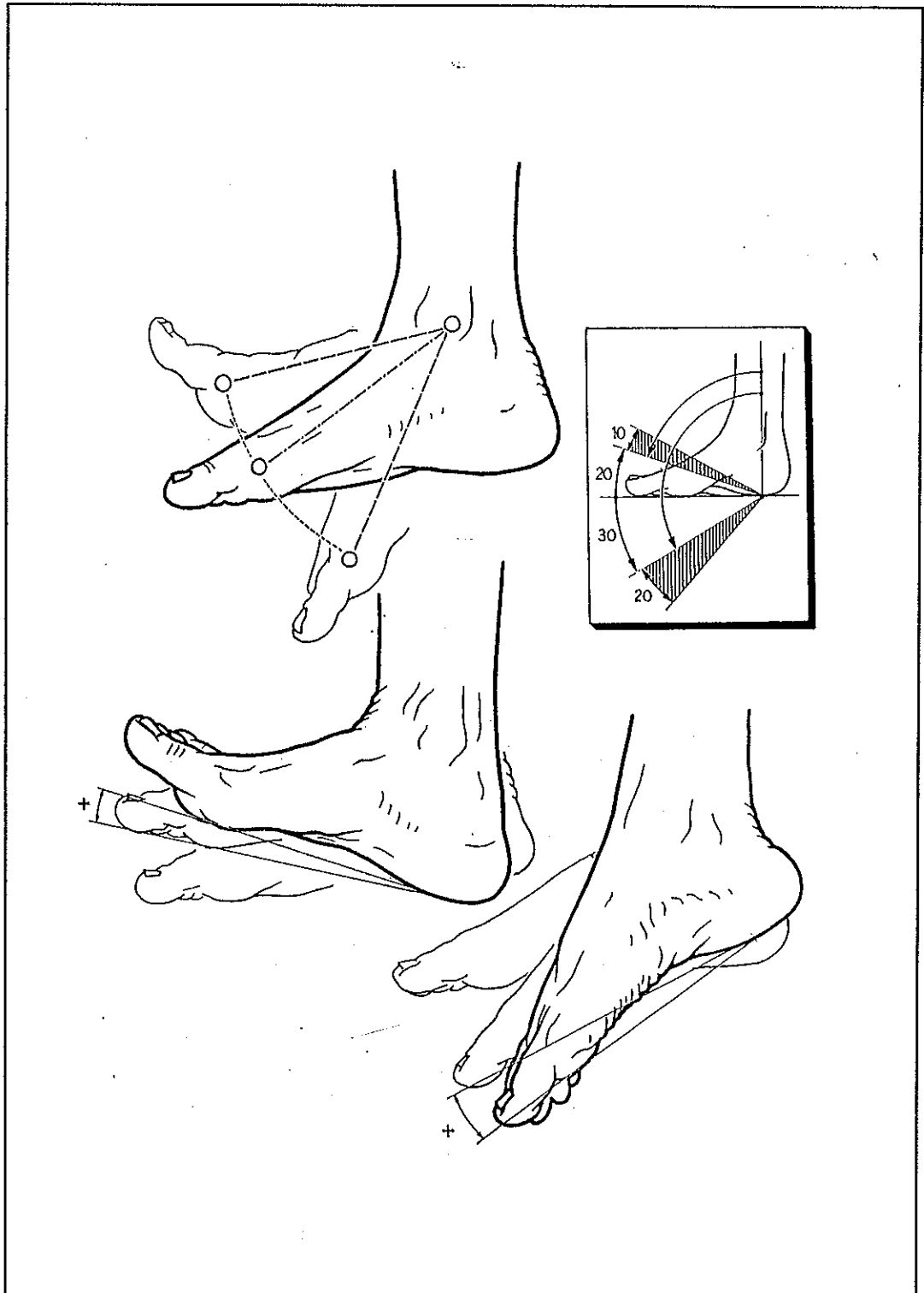


**Figura A-2** Movimenti e relativi angoli massimi di riferimento di flessione dell'anca.

Appendice A



**Figura A-3** Movimenti e relativi angoli massimi di riferimento di flesso-estensione del ginocchio.



**Figura A-4** Movimenti e relativi angoli massimi di riferimento di flessione-estensione della caviglia.

## APPENDICE B

In questa appendice sono tabellati, per ogni fotogramma estratto dal ciclo di pinneggiata studiato (andatura lenta con pinne lunghe), gli angoli che definiscono la posizione relativa tra gli arti. In particolare, in tabella B-1 li troviamo espressi come angoli relativi (fig.3.4-8):

$\alpha$  = angolo del bacino rispetto un asse parallelo alla direzione del moto;

$\beta$  = angolo della coscia rispetto un asse parallelo al bacino;

$\gamma$  = angolo della gamba rispetto un asse parallelo alla coscia;

$\delta$  = angolo del piede rispetto un asse parallelo alla gamba;

mentre in tabella B-2 li troviamo espressi come angoli "medici" (fig.4.1-1):

$\alpha'$  = angolo del bacino rispetto un asse parallelo alla colonna vertebrale;

$\beta'$  = angolo della coscia rispetto un asse parallelo alla colonna vertebrale;

$\gamma'$  = angolo della gamba rispetto un asse parallelo alla coscia;

$\delta'$  = angolo del piede rispetto un asse normale alla gamba;

Appendice B

|        |       | Angoli relativi |         |          |          |
|--------|-------|-----------------|---------|----------|----------|
|        | Tempo | $\alpha$        | $\beta$ | $\gamma$ | $\delta$ |
| Frames | [s]   | [°]             | [°]     | [°]      | [°]      |
| 1      | 0     | 0.03            | 8.8     | 63.69    | -35.62   |
| 2      | 0.04  | -5.42           | 13.55   | 66.28    | -32.65   |
| 3      | 0.08  | -12.78          | 20.54   | 69.72    | -33.06   |
| 4      | 0.12  | -18.44          | 23.07   | 72.7     | -30.66   |
| 5      | 0.16  | -26.31          | 28.35   | 73.91    | -25.54   |
| 6      | 0.2   | -32.56          | 31.52   | 75.72    | -23.62   |
| 7      | 0.24  | -39.3           | 34.58   | 76.09    | -21.64   |
| 8      | 0.28  | -39.3           | 32.05   | 76.2     | -18.01   |
| 9      | 0.32  | -39.3           | 28.81   | 75.74    | -13.65   |
| 10     | 0.36  | -36.99          | 22.7    | 76.13    | -11.6    |
| 11     | 0.4   | -36.99          | 19.55   | 75.67    | -10.39   |
| 12     | 0.44  | -34.76          | 14.21   | 74.46    | -7.25    |
| 13     | 0.48  | -34.76          | 12.39   | 70.63    | -3.81    |
| 14     | 0.52  | -34.73          | 9.57    | 69.35    | -2.44    |
| 15     | 0.56  | -34.76          | 7.98    | 68.22    | -5.51    |
| 16     | 0.6   | -32.56          | 6.72    | 62.52    | 1.3      |
| 17     | 0.64  | -34.76          | 5.28    | 59.96    | -4.17    |
| 18     | 0.68  | -30.44          | -0.85   | 56.91    | -1.55    |
| 19     | 0.72  | -30.44          | -9.14   | 51.28    | -3.36    |
| 20     | 0.76  | -22.33          | -8.52   | 48.3     | -5.65    |
| 21     | 0.8   | -16.54          | -14.22  | 43.07    | -5.12    |
| 22     | 0.84  | -12.79          | -16.55  | 38.38    | -6.78    |
| 23     | 0.88  | -5.43           | -22.29  | 32.82    | -9.79    |
| 24     | 0.92  | -2.31           | -23.34  | 27.18    | -12.04   |
| 25     | 0.96  | 0.04            | -21.32  | 19.79    | -14.2    |
| 26     | 1     | 4.93            | -24.19  | 15.44    | -15.66   |
| 27     | 1.04  | 8.66            | -24.85  | 9.94     | -15.3    |
| 28     | 1.08  | 12.44           | -26.23  | 6.03     | -15.95   |
| 29     | 1.12  | 17.27           | -28.13  | 0.43     | -15.26   |
| 30     | 1.16  | 23.17           | -32.51  | -1.47    | -19.22   |

**Tabella B-1** Angoli relativi degli arti del ciclo di pinneggiate ad andatura lenta e pinne lunghe.

Continua nella pagina successiva →

Appendice B

| Frames | Tempo<br>[s] | Angoli relativi |                |                 |                 |
|--------|--------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|        |              | $\alpha$<br>[°] | $\beta$<br>[°] | $\gamma$<br>[°] | $\delta$<br>[°] |
| 31     | 1.2          | 29.4            | -37.69         | -2.25           | -21.66          |
| 32     | 1.24         | 31.61           | -36.64         | -5.64           | -22.74          |
| 33     | 1.28         | 32.66           | -34.95         | -6.31           | -24.43          |
| 34     | 1.32         | 33.73           | -34.58         | -5.38           | -26.54          |
| 35     | 1.36         | 39.35           | -40.5          | -5.2            | -25.85          |
| 36     | 1.4          | 37.04           | -36.45         | -5.5            | -26.1           |
| 37     | 1.44         | 34.79           | -32.49         | -5.8            | -28.78          |
| 38     | 1.48         | 37.04           | -33.6          | -4.92           | -30.56          |
| 39     | 1.52         | 39.35           | -34.73         | -4.61           | -31.53          |
| 40     | 1.56         | 37.04           | -30.69         | -4.34           | -33.02          |
| 41     | 1.6          | 34.79           | -26.65         | -4.11           | -33.29          |
| 42     | 1.64         | 32.62           | -23.52         | -1.46           | -37.36          |
| 43     | 1.68         | 32.62           | -21.64         | -1.34           | -38.05          |
| 44     | 1.72         | 30.5            | -18.4          | 1.81            | -41.49          |
| 45     | 1.76         | 30.5            | -16.73         | 3.22            | -42.73          |
| 46     | 1.8          | 32.59           | -17.19         | 5.51            | -43.29          |
| 47     | 1.84         | 30.5            | -13.85         | 8.74            | -44.63          |
| 48     | 1.88         | 30.5            | -11.88         | 10.03           | -44.08          |
| 49     | 1.92         | 30.48           | -11.16         | 13.07           | -43.77          |
| 50     | 1.96         | 30.48           | -10.25         | 15.3            | -42.73          |
| 51     | 2            | 30.48           | -9.52          | 18.65           | -44.16          |
| 52     | 2.04         | 30.48           | -8.78          | 20.81           | -43.04          |
| 53     | 2.08         | 30.48           | -9.31          | 26.35           | -44.12          |
| 54     | 2.12         | 28.38           | -9.58          | 35.53           | -45.22          |
| 55     | 2.16         | 24.35           | -5.54          | 35.29           | -45.19          |
| 56     | 2.2          | 20.43           | -3.94          | 43.39           | -40.3           |
| 57     | 2.24         | 14.71           | -1.88          | 49.35           | -41.41          |
| 58     | 2.28         | 12.84           | 0              | 54.43           | -39.61          |
| 59     | 2.32         | 9.15            | 0.41           | 60.11           | -36.65          |

**Tabella B-1** Angoli relativi degli arti del ciclo di pinneggiate ad andatura lenta e pinne lunghe.

Appendice B

|        |       | Angoli "medici" |          |           |           |
|--------|-------|-----------------|----------|-----------|-----------|
|        | Tempo | $\alpha'$       | $\beta'$ | $\gamma'$ | $\delta'$ |
| Frames | [s]   | [°]             | [°]      | [°]       | [°]       |
| 1      | 0     | 0.03            | 8.83     | 63.69     | 20.16     |
| 2      | 0.04  | -5.42           | 8.13     | 66.28     | 23.13     |
| 3      | 0.08  | -12.78          | 7.76     | 69.72     | 22.72     |
| 4      | 0.12  | -18.44          | 4.63     | 72.7      | 25.12     |
| 5      | 0.16  | -26.31          | 2.04     | 73.91     | 30.24     |
| 6      | 0.2   | -32.56          | -1.04    | 75.72     | 32.16     |
| 7      | 0.24  | -39.3           | -4.72    | 76.09     | 34.14     |
| 8      | 0.28  | -39.3           | -7.25    | 76.2      | 37.77     |
| 9      | 0.32  | -39.3           | -10.49   | 75.74     | 42.13     |
| 10     | 0.36  | -36.99          | -14.29   | 76.13     | 44.18     |
| 11     | 0.4   | -36.99          | -17.44   | 75.67     | 45.39     |
| 12     | 0.44  | -34.76          | -20.55   | 74.46     | 48.53     |
| 13     | 0.48  | -34.76          | -22.37   | 70.63     | 51.97     |
| 14     | 0.52  | -34.73          | -25.16   | 69.35     | 53.34     |
| 15     | 0.56  | -34.76          | -26.78   | 68.22     | 50.27     |
| 16     | 0.6   | -32.56          | -25.84   | 62.52     | 57.08     |
| 17     | 0.64  | -34.76          | -29.48   | 59.96     | 51.61     |
| 18     | 0.68  | -30.44          | -31.29   | 56.91     | 54.23     |
| 19     | 0.72  | -30.44          | -39.58   | 51.28     | 52.42     |
| 20     | 0.76  | -22.33          | -30.85   | 48.3      | 50.13     |
| 21     | 0.8   | -16.54          | -30.76   | 43.07     | 50.66     |
| 22     | 0.84  | -12.79          | -29.34   | 38.38     | 49        |
| 23     | 0.88  | -5.43           | -27.72   | 32.82     | 45.99     |
| 24     | 0.92  | -2.31           | -25.65   | 27.18     | 43.74     |
| 25     | 0.96  | 0.04            | -21.28   | 19.79     | 41.58     |
| 26     | 1     | 4.93            | -19.26   | 15.44     | 40.12     |
| 27     | 1.04  | 8.66            | -16.19   | 9.94      | 40.48     |
| 28     | 1.08  | 12.44           | -13.79   | 6.03      | 39.83     |
| 29     | 1.12  | 17.27           | -10.86   | 0.43      | 40.52     |
| 30     | 1.16  | 23.17           | -9.34    | -1.47     | 36.56     |

**Tabella B-2** Angoli "medici" degli arti del ciclo di pinneggiate ad andatura lenta e pinne lunghe.

Continua nella pagina successiva →



Appendice B

| Angoli "medici" |       |           |          |           |           |
|-----------------|-------|-----------|----------|-----------|-----------|
|                 | Tempo | $\alpha'$ | $\beta'$ | $\gamma'$ | $\delta'$ |
| Frames          | [s]   | [°]       | [°]      | [°]       | [°]       |
| 31              | 1.2   | 29.4      | -8.29    | -2.25     | 34.12     |
| 32              | 1.24  | 31.61     | -5.03    | -5.64     | 33.04     |
| 33              | 1.28  | 32.66     | -2.29    | -6.31     | 31.35     |
| 34              | 1.32  | 33.73     | -0.85    | -5.38     | 29.24     |
| 35              | 1.36  | 39.35     | -1.15    | -5.2      | 29.93     |
| 36              | 1.4   | 37.04     | 0.59     | -5.5      | 29.68     |
| 37              | 1.44  | 34.79     | 2.3      | -5.8      | 27        |
| 38              | 1.48  | 37.04     | 3.44     | -4.92     | 25.22     |
| 39              | 1.52  | 39.35     | 4.62     | -4.61     | 24.25     |
| 40              | 1.56  | 37.04     | 6.35     | -4.34     | 22.76     |
| 41              | 1.6   | 34.79     | 8.14     | -4.11     | 22.49     |
| 42              | 1.64  | 32.62     | 9.1      | -1.46     | 18.42     |
| 43              | 1.68  | 32.62     | 10.98    | -1.34     | 17.73     |
| 44              | 1.72  | 30.5      | 12.1     | 1.81      | 14.29     |
| 45              | 1.76  | 30.5      | 13.77    | 3.22      | 13.05     |
| 46              | 1.8   | 32.59     | 15.4     | 5.51      | 12.49     |
| 47              | 1.84  | 30.5      | 16.65    | 8.74      | 11.15     |
| 48              | 1.88  | 30.5      | 18.62    | 10.03     | 11.7      |
| 49              | 1.92  | 30.48     | 19.32    | 13.07     | 12.01     |
| 50              | 1.96  | 30.48     | 20.23    | 15.3      | 13.05     |
| 51              | 2     | 30.48     | 20.96    | 18.65     | 11.62     |
| 52              | 2.04  | 30.48     | 21.7     | 20.81     | 12.74     |
| 53              | 2.08  | 30.48     | 21.17    | 26.35     | 11.66     |
| 54              | 2.12  | 28.38     | 18.8     | 35.53     | 10.56     |
| 55              | 2.16  | 24.35     | 18.81    | 35.29     | 10.59     |
| 56              | 2.2   | 20.43     | 16.49    | 43.39     | 15.48     |
| 57              | 2.24  | 14.71     | 12.83    | 49.35     | 14.37     |
| 58              | 2.28  | 12.84     | 12.84    | 54.43     | 16.17     |
| 59              | 2.32  | 9.15      | 9.56     | 60.11     | 19.13     |

**Tabella B-2** Angoli "medici" degli arti del ciclo di pinneggiate ad andatura lenta e pinne lunghe.

## APPENDICE C

In questa appendice si approfondisce la teoria [6], descrivente le forze idrodinamiche agenti sui corpi in movimento, usata per definire il campo di forze che simula l'effetto dell'acqua sui membri costituenti il corpo di Flipper e sugli elementi costituenti le sue pinne.

Si consideri un corpo solido in moto relativo entro un campo fluido praticamente illimitato in cui si trovi completamente immerso.

Per corpi in moto lento relativo, caratterizzati da numeri di Reynolds ( $\clubsuit$ ) molto bassi, la Forza Tangenziale d'Attrito è la sola che si manifesta tra il corpo ed il mezzo fluido.

Per numeri di Reynolds più elevati, la resistenza alla deformazione si esplica praticamente solo in un sottile strato a contatto della parete, definito Strato Limite.

Il fenomeno di distacco dello strato limite dalla parete e la zona vorticoso che si crea a valle del corpo solido investito, sono un fattore importante, perché in aggiunta all'attrito determinano uno squilibrio delle pressioni fra la parete anteriore e la posteriore del profilo, con una nuova azione risultante.

---

( $\clubsuit$ ) *Il numero di Reynolds ha il significato di rapporto fra la forza d'inerzia*

*$\rho * v^2 * l^2$  e la forza di resistenza viscosa  $\mu * v * l$  che caratterizza il processo dinamico:*

$$Re = (\rho * v * l) / \mu$$

*dove:*

*$\rho$  = densità fluido;*

*$v$  = velocità relativa corpo-fluido;*

*$l$  = lunghezza;*

*$\mu$  = viscosità assoluta fluido.*

Definendo come resistenza  $R$  la forza che si contrappone alla componente nella direzione di  $V_0$  delle azioni dinamiche esercitate dal fluido nel movimento relativo, la parte di essa imputabile alle azioni di attrito  $R_a$ , prende il nome di Resistenza d'Attrito, quella imputabile alle azioni derivanti dallo squilibrio delle pressioni  $R_p$ , prende il nome di Resistenza di Forma (o meglio Resistenza di Pressione).

Si ha:

$$R_a = (C_a * \rho * A * V_0^2) / 2 \quad , \text{ di attrito}$$

$$R_p = (C_p * \rho * A * V_0^2) / 2 \quad , \text{ di pressione}$$

dove  $A$  è la sezione maestra, cioè la proiezione del corpo solido su un piano normale a  $V_0$  e  $C_a$ ,  $C_p$  opportuni coefficienti.

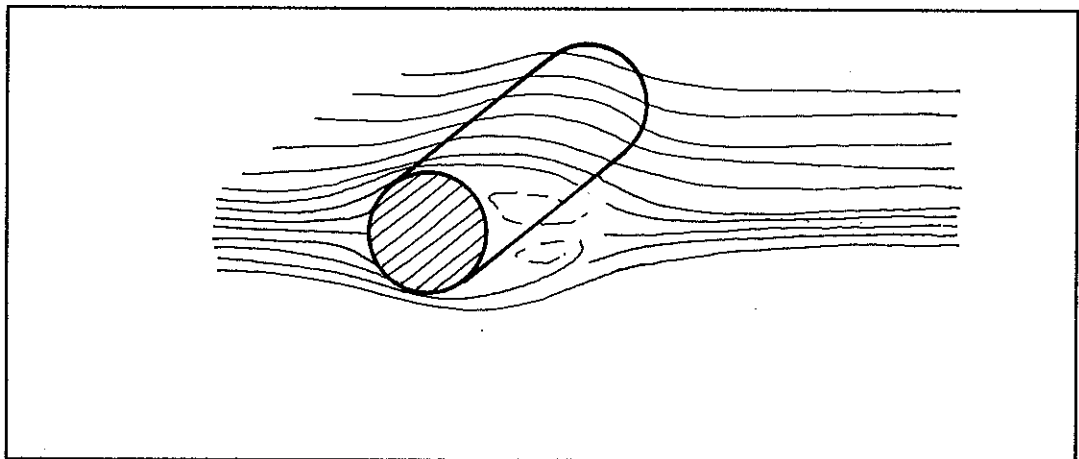
Sommando assieme i due contributi della resistenza d'attrito e della resistenza di forma, si ottiene la resistenza totale:

$$R = (C_r * \rho * A * V_0^2) / 2$$

dove  $C_r$  è detto coefficiente di resistenza. I vari coefficienti  $C$  dipendono, per un fluido incomprimibile in cui il corpo sia totalmente immerso, dalla forma del corpo stesso, dalla scabrezza relativa alla sua superficie e dall'entità della zona di separazione vorticoso, a sua volta dipendente dal numero di Reynolds della corrente indisturbata.

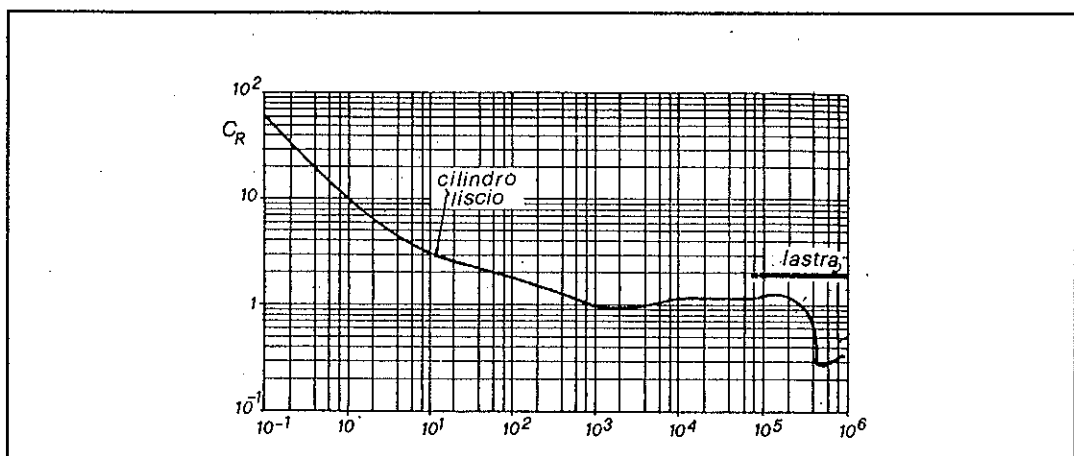
I coefficienti di resistenza relativi agli elementi costituenti il corpo di Flipper e le sue pinne, non avendo a disposizione dati sperimentali specifici, si stimano usando grafici e tabelle relativi a corpi solidi semplici.

Schematizzando il bacino, la coscia, la gamba ed il piede come cilindri disposti trasversalmente alla corrente fluida, si ha:



**Figura C-1** Cilindro investito trasversalmente da una corrente fluida.

Il coefficiente di resistenza  $C_R$  per un cilindro di estensione infinita ( $L \rightarrow$  infinito), ha il seguente andamento:



**Grafico C-1** Andamento del coefficiente di resistenza  $C_R$  per un cilindro ed una lastra investiti trasversalmente da una corrente fluida.

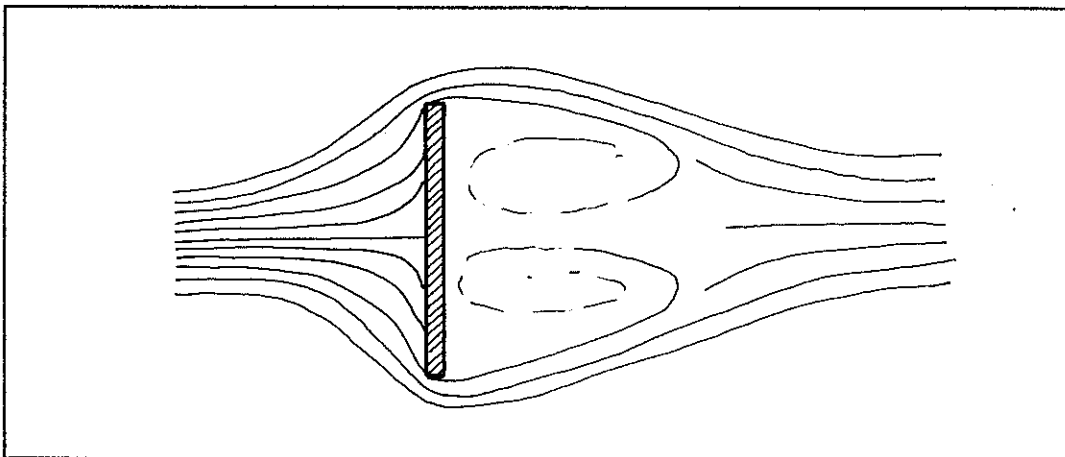
## Appendice C

L'effetto della presenza di testate d'estremità, cioè di una estensione finita anziché infinita della corrente, dà luogo ad una riduzione del coefficiente di resistenza  $C_r$ , come risulta dalla seguente tabella valida per  $Re > 10^5$ :

| Rapporto fra la lunghezza L ed il diametro D | Coefficiente $C_r$ |
|----------------------------------------------|--------------------|
| $A/D=1$                                      | 0.63               |
| $A/D=5$                                      | 0.74               |
| $A/D=20$                                     | 0.90               |
| $A/D=\text{infinito}$                        | 1.20               |

**Tabella C-1** Valore assunto dal coefficiente di resistenza  $C_r$  al variare del rapporto tra la lunghezza ed il diametro del cilindro, valido per  $Cr > 10^5$ .

Schematizzando gli elementi costituenti le pinne come delle lastre piane disposte trasversalmente alla corrente fluida, si ha:



**Figura C-2** Lastra investita trasversalmente da una corrente fluida.

## Appendice C

nel qual caso la resistenza d'attrito è nulla e tutta la resistenza è di forma, dovuta alla separazione della corrente che ha inizio dai due bordi estremi della lastra.

Anche in questo caso, l'effetto della presenza di testate d'estremità dà luogo ad una riduzione del coefficiente di resistenza  $C_r$ , come risulta dalla seguente tabella valida per  $Re > 10^3$ :

| Rapporto fra la lunghezza L e la larghezza A | Coefficiente $C_r$ |
|----------------------------------------------|--------------------|
| L/A=1                                        | 1.16               |
| L/A=5                                        | 1.20               |
| L/A=20                                       | 1.50               |
| L/A=infinito                                 | 1.95               |

**Tabella C-2** Valore assunto dal coefficiente di resistenza  $C_r$  al variare del rapporto tra la lunghezza e la larghezza della lastra, valido per  $Cr > 10^3$ .

## APPENDICE D

In questa appendice sono raccolti i rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulle pinne (tab.3.2-2, pinna1) usate nella pinneggiata (andatura lenta con pinne lunghe), presa a riferimento nella costruzione del modello numerico.

Nelle tabelle seguenti, per ogni rilievo sperimentale è stata calcolata la freccia media di deformazione:

$$f_y = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad [\text{mm}]$$

dove:

$h_1$  = freccia di deformazione rilevata dal comparatore numero uno (vedi fig.6.4);

$h_2$  = freccia di deformazione rilevata dal comparatore numero due (vedi fig.6.4);

e l'inclinazione della pala in corrispondenza della sezione di carico:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h_1 - h_2}{l}\right) \quad [^\circ]$$

dove:

$l$  = distanza longitudinale tra i due comparatori (vedi fig.6.4).

Appendice D

| Pinna vincolata in B e caricata in A con 500 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Prima serie di rilievi sperimentali            |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                     | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                              | 0            | 3.68                 | 2.27       | 2.98                                     | 2.019                             |
| 2                                              | 10           | 4.01                 | 2.46       | 3.24                                     | 2.219                             |
| 3                                              | 20           | 4.12                 | 2.53       | 3.33                                     | 2.276                             |
| 4                                              | 30           | 4.21                 | 2.58       | 3.40                                     | 2.334                             |
| 5                                              | 40           | 4.26                 | 2.62       | 3.44                                     | 2.348                             |
| 6                                              | 50           | 4.33                 | 2.66       | 3.50                                     | 2.391                             |
| 7                                              | 60           | 4.36                 | 2.68       | 3.52                                     | 2.405                             |
| 8                                              | 70           | 4.4                  | 2.70       | 3.55                                     | 2.434                             |
| 9                                              | 80           | 4.45                 | 2.73       | 3.59                                     | 2.462                             |
| 10                                             | 90           | 4.48                 | 2.74       | 3.61                                     | 2.491                             |
| 11                                             | 110          | 4.52                 | 2.77       | 3.65                                     | 2.505                             |
| 12                                             | 130          | 4.56                 | 2.80       | 3.68                                     | 2.519                             |
| 13                                             | 150          | 4.61                 | 2.82       | 3.72                                     | 2.562                             |
| 14                                             | 170          | 4.64                 | 2.84       | 3.74                                     | 2.577                             |
| 15                                             | 200          | 4.64                 | 2.85       | 3.75                                     | 2.562                             |
| 16                                             | 230          | 4.64                 | 2.85       | 3.75                                     | 2.562                             |
| 17                                             | 260          | 4.75                 | 2.91       | 3.83                                     | 2.634                             |
| 18                                             | 290          | 4.75                 | 2.91       | 3.83                                     | 2.634                             |
| 19                                             | 320          | 4.75                 | 2.92       | 3.84                                     | 2.619                             |

**Tabella D-1** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione AB.



| Pinna vincolata in B e caricata in A con 500 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Seconda serie di rilievi sperimentali          |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                     | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                              | 0            | 3.9                  | 2.39       | 3.15                                     | 2.162                             |
| 2                                              | 10           | 4.18                 | 2.57       | 3.38                                     | 2.305                             |
| 3                                              | 20           | 4.31                 | 2.65       | 3.48                                     | 2.376                             |
| 4                                              | 30           | 4.37                 | 2.69       | 3.53                                     | 2.405                             |
| 5                                              | 40           | 4.44                 | 2.73       | 3.59                                     | 2.448                             |
| 6                                              | 50           | 4.51                 | 2.77       | 3.64                                     | 2.491                             |
| 7                                              | 60           | 4.52                 | 2.79       | 3.66                                     | 2.476                             |
| 8                                              | 70           | 4.59                 | 2.81       | 3.70                                     | 2.548                             |
| 9                                              | 80           | 4.64                 | 2.84       | 3.74                                     | 2.577                             |
| 10                                             | 90           | 4.68                 | 2.86       | 3.77                                     | 2.605                             |
| 11                                             | 110          | 4.71                 | 2.88       | 3.80                                     | 2.619                             |
| 12                                             | 130          | 4.74                 | 2.90       | 3.82                                     | 2.634                             |
| 13                                             | 150          | 4.77                 | 2.93       | 3.85                                     | 2.634                             |
| 14                                             | 170          | 4.8                  | 2.94       | 3.87                                     | 2.662                             |
| 15                                             | 200          | 4.84                 | 2.97       | 3.91                                     | 2.677                             |
| 16                                             | 230          | 4.84                 | 2.98       | 3.91                                     | 2.662                             |
| 17                                             | 260          | 4.84                 | 2.98       | 3.91                                     | 2.662                             |
| 18                                             | 290          | 4.89                 | 3.01       | 3.95                                     | 2.691                             |
| 19                                             | 320          | 4.89                 | 3.01       | 3.95                                     | 2.691                             |

**Tabella D-2** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione AB.

Appendice D

| Pinna vincolata in B e caricata in A con 500 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Terza serie di rilievi sperimentali            |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                     | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                              | 0            | 3.91                 | 2.43       | 3.17                                     | 2.119                             |
| 2                                              | 10           | 4.34                 | 2.68       | 3.51                                     | 2.376                             |
| 3                                              | 20           | 4.48                 | 2.75       | 3.62                                     | 2.476                             |
| 4                                              | 30           | 4.54                 | 2.78       | 3.66                                     | 2.519                             |
| 5                                              | 40           | 4.61                 | 2.83       | 3.72                                     | 2.548                             |
| 6                                              | 50           | 4.7                  | 2.88       | 3.79                                     | 2.605                             |
| 7                                              | 60           | 4.74                 | 2.9        | 3.82                                     | 2.634                             |
| 8                                              | 70           | 4.76                 | 2.92       | 3.84                                     | 2.634                             |
| 9                                              | 80           | 4.78                 | 2.93       | 3.86                                     | 2.648                             |
| 10                                             | 90           | 4.79                 | 2.94       | 3.87                                     | 2.648                             |
| 11                                             | 110          | 4.86                 | 2.98       | 3.92                                     | 2.691                             |
| 12                                             | 130          | 4.89                 | 3.00       | 3.95                                     | 2.705                             |
| 13                                             | 150          | 4.9                  | 3.01       | 3.96                                     | 2.705                             |
| 14                                             | 170          | 4.94                 | 3.03       | 3.99                                     | 2.734                             |
| 15                                             | 200          | 4.97                 | 3.06       | 4.02                                     | 2.734                             |
| 16                                             | 230          | 4.98                 | 3.06       | 4.02                                     | 2.748                             |
| 17                                             | 260          | 4.98                 | 3.06       | 4.02                                     | 2.748                             |
| 18                                             | 290          | 4.98                 | 3.07       | 4.03                                     | 2.734                             |
| 19                                             | 320          | 4.98                 | 3.07       | 4.03                                     | 2.734                             |

**Tabella D-3** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione AB.

Appendice D

| Pinna vincolata in B e caricata in A con 1000 g |       |                      |            |                                          |                                   |
|-------------------------------------------------|-------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Prima serie di rilievi sperimentali             |       |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                      | Tempo | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                 | [S]   | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                               | 0     | 6.86                 | 4.39       | 5.63                                     | 3.534                             |
| 2                                               | 10    | 7.51                 | 4.68       | 6.10                                     | 4.047                             |
| 3                                               | 20    | 7.77                 | 4.85       | 6.31                                     | 4.175                             |
| 4                                               | 30    | 7.91                 | 4.92       | 6.42                                     | 4.275                             |
| 5                                               | 40    | 8.05                 | 5.01       | 6.53                                     | 4.346                             |
| 6                                               | 50    | 8.14                 | 5.07       | 6.61                                     | 4.389                             |
| 7                                               | 60    | 8.2                  | 5.1        | 6.65                                     | 4.432                             |
| 8                                               | 70    | 8.26                 | 5.14       | 6.70                                     | 4.460                             |
| 9                                               | 80    | 8.33                 | 5.18       | 6.76                                     | 4.503                             |
| 10                                              | 90    | 8.39                 | 5.22       | 6.81                                     | 4.531                             |
| 11                                              | 110   | 8.5                  | 5.28       | 6.89                                     | 4.602                             |
| 12                                              | 130   | 8.61                 | 5.35       | 6.98                                     | 4.659                             |
| 13                                              | 150   | 8.69                 | 5.4        | 7.05                                     | 4.702                             |
| 14                                              | 170   | 8.75                 | 5.44       | 7.10                                     | 4.730                             |
| 15                                              | 190   | 8.81                 | 5.48       | 7.15                                     | 4.759                             |
| 16                                              | 210   | 8.86                 | 5.51       | 7.19                                     | 4.787                             |
| 17                                              | 240   | 8.86                 | 5.52       | 7.19                                     | 4.773                             |
| 18                                              | 270   | 8.95                 | 5.57       | 7.26                                     | 4.830                             |
| 19                                              | 300   | 9.05                 | 5.63       | 7.34                                     | 4.887                             |
| 20                                              | 330   | 9.08                 | 5.65       | 7.37                                     | 4.901                             |
| 21                                              | 360   | 9.08                 | 5.65       | 7.37                                     | 4.901                             |

**Tabella D-4** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione AB.

Appendice D

| Pinna vincolata in B e caricata in A con 1000 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|-------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Seconda serie di rilievi sperimentali           |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                      | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                 |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                               | 0            | 7.35                 | 4.5        | 5.93                                     | 4.075                             |
| 2                                               | 10           | 7.93                 | 4.89       | 6.41                                     | 4.346                             |
| 3                                               | 20           | 8.15                 | 5.02       | 6.59                                     | 4.474                             |
| 4                                               | 30           | 8.28                 | 5.11       | 6.70                                     | 4.531                             |
| 5                                               | 40           | 8.42                 | 5.19       | 6.81                                     | 4.617                             |
| 6                                               | 50           | 8.51                 | 5.24       | 6.88                                     | 4.674                             |
| 7                                               | 60           | 8.61                 | 5.3        | 6.96                                     | 4.730                             |
| 8                                               | 70           | 8.68                 | 5.35       | 7.02                                     | 4.759                             |
| 9                                               | 80           | 8.74                 | 5.38       | 7.06                                     | 4.802                             |
| 10                                              | 90           | 8.79                 | 5.41       | 7.10                                     | 4.830                             |
| 11                                              | 110          | 8.84                 | 5.45       | 7.15                                     | 4.844                             |
| 12                                              | 130          | 8.94                 | 5.51       | 7.23                                     | 4.901                             |
| 13                                              | 150          | 8.89                 | 5.54       | 7.22                                     | 4.787                             |
| 14                                              | 170          | 8.99                 | 5.55       | 7.27                                     | 4.915                             |
| 15                                              | 190          | 8.99                 | 5.55       | 7.27                                     | 4.915                             |
| 16                                              | 210          | 9.15                 | 5.64       | 7.40                                     | 5.015                             |
| 17                                              | 240          | 9.15                 | 5.65       | 7.40                                     | 5.001                             |
| 18                                              | 270          | 9.28                 | 5.71       | 7.50                                     | 5.100                             |
| 19                                              | 300          | 9.28                 | 5.72       | 7.50                                     | 5.086                             |
| 20                                              | 330          | 9.28                 | 5.73       | 7.51                                     | 5.072                             |
| 21                                              | 360          | 9.43                 | 5.8        | 7.62                                     | 5.185                             |

Tabella D-5 Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione AB.

| Pinna vincolata in B e caricata in A con 1000 g |       |                      |         |                                    |                             |
|-------------------------------------------------|-------|----------------------|---------|------------------------------------|-----------------------------|
| Terza serie di rilievi sperimentali             |       |                      |         |                                    |                             |
| N° rilievo                                      | Tempo | Dati dei comparatori |         | Freccia media di deformazione [MM] | Inclinazione reale pala [°] |
|                                                 | [S]   | h1 [MM]              | h2 [MM] |                                    |                             |
| 1                                               | 0     | 7.4                  | 4.6     | 6.00                               | 4.004                       |
| 2                                               | 10    | 8.24                 | 5.05    | 6.65                               | 4.560                       |
| 3                                               | 20    | 8.48                 | 5.2     | 6.84                               | 4.688                       |
| 4                                               | 30    | 8.66                 | 5.29    | 6.98                               | 4.816                       |
| 5                                               | 40    | 8.77                 | 5.36    | 7.07                               | 4.873                       |
| 6                                               | 50    | 8.86                 | 5.42    | 7.14                               | 4.915                       |
| 7                                               | 60    | 8.9                  | 5.45    | 7.18                               | 4.930                       |
| 8                                               | 70    | 8.97                 | 5.49    | 7.23                               | 4.972                       |
| 9                                               | 80    | 9.04                 | 5.53    | 7.29                               | 5.015                       |
| 10                                              | 90    | 9.08                 | 5.56    | 7.32                               | 5.029                       |
| 11                                              | 110   | 9.15                 | 5.6     | 7.38                               | 5.072                       |
| 12                                              | 130   | 9.24                 | 5.65    | 7.45                               | 5.129                       |
| 13                                              | 150   | 9.26                 | 5.66    | 7.46                               | 5.143                       |
| 14                                              | 170   | 9.26                 | 5.67    | 7.47                               | 5.129                       |
| 15                                              | 190   | 9.26                 | 5.67    | 7.47                               | 5.129                       |
| 16                                              | 210   | 9.26                 | 5.77    | 7.52                               | 4.986                       |
| 17                                              | 240   | 9.46                 | 5.78    | 7.62                               | 5.256                       |
| 18                                              | 270   | 9.56                 | 5.84    | 7.70                               | 5.313                       |
| 19                                              | 300   | 9.57                 | 5.85    | 7.71                               | 5.313                       |
| 20                                              | 330   | 9.57                 | 5.85    | 7.71                               | 5.313                       |
| 21                                              | 360   | 9.57                 | 5.85    | 7.71                               | 5.313                       |

Tabella D-6 Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione AB.

Appendice D

| Pinna vincolata in B e caricata in A con 1500 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|-------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Prima serie di rilievi sperimentali             |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                      | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                 |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                               | 0            | 11.37                | 7.06       | 9.22                                     | 6.150                             |
| 2                                               | 10           | 12.43                | 7.68       | 10.06                                    | 6.772                             |
| 3                                               | 20           | 12.83                | 7.9        | 10.37                                    | 7.026                             |
| 4                                               | 30           | 13.07                | 8.04       | 10.56                                    | 7.167                             |
| 5                                               | 40           | 13.24                | 8.14       | 10.69                                    | 7.266                             |
| 6                                               | 50           | 13.39                | 8.23       | 10.81                                    | 7.351                             |
| 7                                               | 60           | 13.5                 | 8.3        | 10.90                                    | 7.407                             |
| 8                                               | 70           | 13.62                | 8.36       | 10.99                                    | 7.491                             |
| 9                                               | 80           | 13.73                | 8.43       | 11.08                                    | 7.548                             |
| 10                                              | 90           | 13.8                 | 8.48       | 11.14                                    | 7.576                             |
| 11                                              | 110          | 13.94                | 8.57       | 11.26                                    | 7.646                             |
| 12                                              | 130          | 14.04                | 8.64       | 11.34                                    | 7.688                             |
| 13                                              | 150          | 14.14                | 8.69       | 11.42                                    | 7.759                             |
| 14                                              | 170          | 14.22                | 8.74       | 11.48                                    | 7.801                             |
| 15                                              | 200          | 14.32                | 8.8        | 11.56                                    | 7.857                             |
| 16                                              | 220          | 14.37                | 8.83       | 11.60                                    | 7.885                             |
| 17                                              | 240          | 14.43                | 8.87       | 11.65                                    | 7.913                             |
| 18                                              | 270          | 14.52                | 8.92       | 11.72                                    | 7.970                             |
| 19                                              | 300          | 14.59                | 8.97       | 11.78                                    | 7.998                             |
| 20                                              | 345          | 14.69                | 9.03       | 11.86                                    | 8.054                             |
| 21                                              | 390          | 14.77                | 9.08       | 11.93                                    | 8.096                             |
| 22                                              | 435          | 14.86                | 9.14       | 12.00                                    | 8.138                             |
| 23                                              | 480          | 14.94                | 9.18       | 12.06                                    | 8.194                             |

**Tabella D-7** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione AB.

| Pinna vincolata in B e caricata in A con 1500 g |       |                      |            |                                          |                                   |
|-------------------------------------------------|-------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Seconda serie di rilievi sperimentali           |       |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                      | Tempo | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                 | [S]   | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                               | 0     | 11.45                | 7.1        | 9.28                                     | 6.207                             |
| 2                                               | 10    | 12.32                | 7.62       | 9.97                                     | 6.702                             |
| 3                                               | 20    | 12.72                | 7.86       | 10.29                                    | 6.927                             |
| 4                                               | 30    | 12.98                | 8.01       | 10.50                                    | 7.083                             |
| 5                                               | 40    | 13.17                | 8.13       | 10.65                                    | 7.181                             |
| 6                                               | 50    | 13.34                | 8.22       | 10.78                                    | 7.294                             |
| 7                                               | 60    | 13.47                | 8.3        | 10.89                                    | 7.365                             |
| 8                                               | 70    | 13.59                | 8.38       | 10.99                                    | 7.421                             |
| 9                                               | 80    | 13.69                | 8.44       | 11.07                                    | 7.477                             |
| 10                                              | 90    | 13.75                | 8.49       | 11.12                                    | 7.491                             |
| 11                                              | 110   | 13.92                | 8.59       | 11.26                                    | 7.590                             |
| 12                                              | 130   | 14.06                | 8.66       | 11.36                                    | 7.688                             |
| 13                                              | 150   | 14.15                | 8.72       | 11.44                                    | 7.731                             |
| 14                                              | 170   | 14.21                | 8.75       | 11.48                                    | 7.773                             |
| 15                                              | 200   | 14.33                | 8.83       | 11.58                                    | 7.829                             |
| 16                                              | 220   | 14.41                | 8.88       | 11.65                                    | 7.871                             |
| 17                                              | 240   | 14.46                | 8.91       | 11.69                                    | 7.899                             |
| 18                                              | 270   | 14.54                | 8.96       | 11.75                                    | 7.942                             |
| 19                                              | 300   | 14.62                | 9.01       | 11.82                                    | 7.984                             |
| 20                                              | 345   | 14.72                | 9.07       | 11.90                                    | 8.040                             |
| 21                                              | 390   | 14.8                 | 9.12       | 11.96                                    | 8.082                             |
| 22                                              | 435   | 14.85                | 9.16       | 12.01                                    | 8.096                             |
| 23                                              | 480   | 14.94                | 9.21       | 12.08                                    | 8.152                             |

**Tabella D-8** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione AB.

Appendice D

| Pinna vincolata in B e caricata in A con 1500 g |       |                      |      |                 |                    |
|-------------------------------------------------|-------|----------------------|------|-----------------|--------------------|
| Terza serie di rilievi sperimentali             |       |                      |      |                 |                    |
| N° rilievo                                      | Tempo | Dati dei comparatori |      | Freccia media   | Inclinazione reale |
|                                                 | [S]   | h1                   | h2   | di deformazione | pala               |
|                                                 |       | [MM]                 | [MM] | [MM]            | [°]                |
| 1                                               | 0     | 11.3                 | 7.1  | 9.20            | 5.994              |
| 2                                               | 10    | 12.36                | 7.68 | 10.02           | 6.673              |
| 3                                               | 20    | 12.81                | 7.93 | 10.37           | 6.956              |
| 4                                               | 30    | 13.04                | 8.07 | 10.56           | 7.083              |
| 5                                               | 40    | 13.22                | 8.17 | 10.70           | 7.196              |
| 6                                               | 50    | 13.39                | 8.26 | 10.83           | 7.308              |
| 7                                               | 60    | 13.52                | 8.35 | 10.94           | 7.365              |
| 8                                               | 70    | 13.6                 | 8.41 | 11.01           | 7.393              |
| 9                                               | 80    | 13.69                | 8.47 | 11.08           | 7.435              |
| 10                                              | 90    | 13.82                | 8.53 | 11.18           | 7.534              |
| 11                                              | 110   | 13.94                | 8.6  | 11.27           | 7.604              |
| 12                                              | 130   | 14.04                | 8.67 | 11.36           | 7.646              |
| 13                                              | 150   | 14.13                | 8.72 | 11.43           | 7.703              |
| 14                                              | 170   | 14.21                | 8.77 | 11.49           | 7.745              |
| 15                                              | 200   | 14.31                | 8.84 | 11.58           | 7.787              |
| 16                                              | 220   | 14.39                | 8.89 | 11.64           | 7.829              |
| 17                                              | 240   | 14.44                | 8.92 | 11.68           | 7.857              |
| 18                                              | 270   | 14.53                | 8.97 | 11.75           | 7.913              |
| 19                                              | 300   | 14.59                | 9.01 | 11.80           | 7.942              |
| 20                                              | 345   | 14.64                | 9.05 | 11.85           | 7.956              |
| 21                                              | 390   | 14.8                 | 9.14 | 11.97           | 8.054              |
| 22                                              | 435   | 14.86                | 9.19 | 12.03           | 8.068              |
| 23                                              | 480   | 14.91                | 9.21 | 12.06           | 8.110              |

**Tabella D-9** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione AB.



Appendice D

| Pinna vincolata in D e caricata in C con 1000 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|-------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Prima serie di rilievi sperimentali             |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                      | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                 |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                               | 0            | 3.48                 | 2.53       | 3.01                                     | 1.361                             |
| 2                                               | 10           | 4.01                 | 2.81       | 3.41                                     | 1.718                             |
| 3                                               | 20           | 4.14                 | 2.9        | 3.52                                     | 1.776                             |
| 4                                               | 30           | 4.21                 | 2.94       | 3.58                                     | 1.819                             |
| 5                                               | 40           | 4.28                 | 2.99       | 3.64                                     | 1.847                             |
| 6                                               | 50           | 4.33                 | 3.02       | 3.68                                     | 1.876                             |
| 7                                               | 60           | 4.37                 | 3.06       | 3.72                                     | 1.876                             |
| 8                                               | 70           | 4.41                 | 3.08       | 3.75                                     | 1.904                             |
| 9                                               | 80           | 4.44                 | 3.1        | 3.77                                     | 1.919                             |
| 10                                              | 90           | 4.48                 | 3.13       | 3.81                                     | 1.933                             |
| 11                                              | 100          | 4.5                  | 3.15       | 3.83                                     | 1.933                             |
| 12                                              | 120          | 4.45                 | 3.19       | 3.82                                     | 1.804                             |
| 13                                              | 140          | 4.58                 | 3.21       | 3.90                                     | 1.962                             |
| 14                                              | 160          | 4.62                 | 3.24       | 3.93                                     | 1.976                             |
| 15                                              | 180          | 4.64                 | 3.26       | 3.95                                     | 1.976                             |
| 16                                              | 200          | 4.66                 | 3.27       | 3.97                                     | 1.990                             |
| 17                                              | 230          | 4.69                 | 3.31       | 4.00                                     | 1.976                             |
| 18                                              | 260          | 4.76                 | 3.34       | 4.05                                     | 2.033                             |
| 19                                              | 290          | 4.77                 | 3.35       | 4.06                                     | 2.033                             |
| 20                                              | 320          | 4.8                  | 3.38       | 4.09                                     | 2.033                             |
| 21                                              | 350          | 4.85                 | 3.4        | 4.13                                     | 2.076                             |

**Tabella D-10** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione CD.

Appendice D

| Pinna vincolata in D e caricata in C con 1000 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|-------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Seconda serie di rilievi sperimentali           |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                      | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                 |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                               | 0            | 3.75                 | 2.68       | 3.22                                     | 1.532                             |
| 2                                               | 10           | 4.24                 | 2.98       | 3.61                                     | 1.804                             |
| 3                                               | 20           | 4.36                 | 3.06       | 3.71                                     | 1.861                             |
| 4                                               | 30           | 4.44                 | 3.12       | 3.78                                     | 1.890                             |
| 5                                               | 40           | 4.52                 | 3.17       | 3.85                                     | 1.933                             |
| 6                                               | 50           | 4.53                 | 3.19       | 3.86                                     | 1.919                             |
| 7                                               | 60           | 4.58                 | 3.22       | 3.90                                     | 1.947                             |
| 8                                               | 70           | 4.62                 | 3.25       | 3.94                                     | 1.962                             |
| 9                                               | 80           | 4.66                 | 3.28       | 3.97                                     | 1.976                             |
| 10                                              | 90           | 4.68                 | 3.3        | 3.99                                     | 1.976                             |
| 11                                              | 100          | 4.71                 | 3.31       | 4.01                                     | 2.005                             |
| 12                                              | 120          | 4.75                 | 3.35       | 4.05                                     | 2.005                             |
| 13                                              | 140          | 4.79                 | 3.37       | 4.08                                     | 2.033                             |
| 14                                              | 160          | 4.83                 | 3.4        | 4.12                                     | 2.047                             |
| 15                                              | 180          | 4.84                 | 3.41       | 4.13                                     | 2.047                             |
| 16                                              | 200          | 4.88                 | 3.43       | 4.16                                     | 2.076                             |
| 17                                              | 230          | 4.9                  | 3.45       | 4.18                                     | 2.076                             |
| 18                                              | 260          | 4.92                 | 3.46       | 4.19                                     | 2.090                             |
| 19                                              | 290          | 4.96                 | 3.49       | 4.23                                     | 2.105                             |
| 20                                              | 320          | 4.97                 | 3.5        | 4.24                                     | 2.105                             |
| 21                                              | 350          | 5                    | 3.52       | 4.26                                     | 2.119                             |

**Tabella D-11** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione CD.

| Pinna vincolata in D e caricata in C con 1000 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|-------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Terza serie di rilievi sperimentali             |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                      | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                 |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                               | 0            | 3.74                 | 2.75       | 3.25                                     | 1.418                             |
| 2                                               | 10           | 4.31                 | 3.04       | 3.68                                     | 1.819                             |
| 3                                               | 20           | 4.43                 | 3.12       | 3.78                                     | 1.876                             |
| 4                                               | 30           | 4.52                 | 3.18       | 3.85                                     | 1.919                             |
| 5                                               | 40           | 4.57                 | 3.22       | 3.90                                     | 1.933                             |
| 6                                               | 50           | 4.61                 | 3.25       | 3.93                                     | 1.947                             |
| 7                                               | 60           | 4.66                 | 3.29       | 3.98                                     | 1.962                             |
| 8                                               | 70           | 4.7                  | 3.32       | 4.01                                     | 1.976                             |
| 9                                               | 80           | 4.74                 | 3.35       | 4.05                                     | 1.990                             |
| 10                                              | 90           | 4.77                 | 3.37       | 4.07                                     | 2.005                             |
| 11                                              | 100          | 4.81                 | 3.39       | 4.10                                     | 2.033                             |
| 12                                              | 120          | 4.84                 | 3.41       | 4.13                                     | 2.047                             |
| 13                                              | 140          | 4.88                 | 3.44       | 4.16                                     | 2.062                             |
| 14                                              | 160          | 4.92                 | 3.47       | 4.20                                     | 2.076                             |
| 15                                              | 180          | 4.94                 | 3.49       | 4.22                                     | 2.076                             |
| 16                                              | 200          | 4.98                 | 3.51       | 4.25                                     | 2.105                             |
| 17                                              | 230          | 5.01                 | 3.53       | 4.27                                     | 2.119                             |
| 18                                              | 260          | 5.03                 | 3.54       | 4.29                                     | 2.133                             |
| 19                                              | 290          | 5.07                 | 3.57       | 4.32                                     | 2.148                             |
| 20                                              | 320          | 5.1                  | 3.59       | 4.35                                     | 2.162                             |
| 21                                              | 350          | 5.1                  | 3.59       | 4.35                                     | 2.162                             |

**Tabella D-12** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione CD.

Appendice D

| Pinna vincolata in D e caricata in C con 2000 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|-------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Prima serie di rilievi sperimentali             |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                      | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                 |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                               | 0            | 7.9                  | 5.5        | 6.70                                     | 3.434                             |
| 2                                               | 10           | 8.76                 | 6.12       | 7.44                                     | 3.776                             |
| 3                                               | 20           | 9.11                 | 6.34       | 7.73                                     | 3.961                             |
| 4                                               | 30           | 9.29                 | 6.46       | 7.88                                     | 4.047                             |
| 5                                               | 40           | 9.45                 | 6.57       | 8.01                                     | 4.118                             |
| 6                                               | 50           | 9.57                 | 6.66       | 8.12                                     | 4.161                             |
| 7                                               | 60           | 9.68                 | 6.72       | 8.20                                     | 4.232                             |
| 8                                               | 70           | 9.77                 | 6.79       | 8.26                                     | 4.261                             |
| 9                                               | 80           | 9.84                 | 6.84       | 8.34                                     | 4.289                             |
| 10                                              | 90           | 9.92                 | 6.89       | 8.41                                     | 4.332                             |
| 11                                              | 110          | 10.06                | 6.99       | 8.53                                     | 4.389                             |
| 12                                              | 130          | 10.17                | 7.07       | 8.62                                     | 4.432                             |
| 13                                              | 150          | 10.26                | 7.14       | 8.70                                     | 4.460                             |
| 14                                              | 170          | 10.35                | 7.2        | 8.78                                     | 4.503                             |
| 15                                              | 190          | 10.42                | 7.25       | 8.84                                     | 4.531                             |
| 16                                              | 210          | 10.49                | 7.3        | 8.90                                     | 4.560                             |
| 17                                              | 240          | 10.61                | 7.37       | 8.99                                     | 4.631                             |
| 18                                              | 270          | 10.69                | 7.43       | 9.06                                     | 4.659                             |
| 19                                              | 300          | 10.78                | 7.5        | 9.14                                     | 4.688                             |
| 20                                              | 330          | 10.85                | 7.54       | 9.20                                     | 4.730                             |
| 21                                              | 360          | 10.91                | 7.59       | 9.25                                     | 4.745                             |

Tabella D-13 Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione CD.

| Pinna vincolata in D e caricata in C con 2000 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|-------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Seconda serie di rilievi sperimentali           |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                      | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                 |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                               | 0            | 7.93                 | 5.7        | 6.82                                     | 3.191                             |
| 2                                               | 10           | 8.91                 | 6.22       | 7.57                                     | 3.847                             |
| 3                                               | 20           | 9.16                 | 6.41       | 7.79                                     | 3.933                             |
| 4                                               | 30           | 9.32                 | 6.53       | 7.93                                     | 3.990                             |
| 5                                               | 40           | 9.48                 | 6.62       | 8.05                                     | 4.090                             |
| 6                                               | 50           | 9.59                 | 6.7        | 8.15                                     | 4.132                             |
| 7                                               | 60           | 9.71                 | 6.79       | 8.25                                     | 4.175                             |
| 8                                               | 70           | 9.78                 | 6.84       | 8.31                                     | 4.204                             |
| 9                                               | 80           | 9.86                 | 6.9        | 8.38                                     | 4.232                             |
| 10                                              | 90           | 9.93                 | 6.95       | 8.44                                     | 4.261                             |
| 11                                              | 110          | 10.06                | 7.04       | 8.55                                     | 4.318                             |
| 12                                              | 130          | 10.17                | 7.12       | 8.65                                     | 4.360                             |
| 13                                              | 150          | 10.26                | 7.18       | 8.72                                     | 4.403                             |
| 14                                              | 170          | 10.35                | 7.24       | 8.80                                     | 4.446                             |
| 15                                              | 190          | 10.42                | 7.29       | 8.86                                     | 4.474                             |
| 16                                              | 210          | 10.5                 | 7.35       | 8.93                                     | 4.503                             |
| 17                                              | 240          | 10.6                 | 7.41       | 9.01                                     | 4.560                             |
| 18                                              | 270          | 10.69                | 7.48       | 9.09                                     | 4.588                             |
| 19                                              | 300          | 10.79                | 7.55       | 9.17                                     | 4.631                             |
| 20                                              | 330          | 10.86                | 7.6        | 9.23                                     | 4.659                             |
| 21                                              | 360          | 10.92                | 7.64       | 9.28                                     | 4.688                             |

**Tabella D-14** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione CD.

Appendice D

| Pinna vincolata in D e caricata in C con 2000 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|-------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Terza serie di rilievi sperimentali             |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                      | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                 |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                               | 0            | 8.08                 | 5.72       | 6.90                                     | 3.377                             |
| 2                                               | 10           | 9.01                 | 6.3        | 7.66                                     | 3.876                             |
| 3                                               | 20           | 9.23                 | 6.47       | 7.85                                     | 3.947                             |
| 4                                               | 30           | 9.46                 | 6.22       | 7.84                                     | 4.631                             |
| 5                                               | 40           | 9.6                  | 6.72       | 8.16                                     | 4.118                             |
| 6                                               | 50           | 9.68                 | 6.79       | 8.24                                     | 4.132                             |
| 7                                               | 60           | 9.8                  | 6.87       | 8.34                                     | 4.189                             |
| 8                                               | 70           | 9.9                  | 6.94       | 8.42                                     | 4.232                             |
| 9                                               | 80           | 10                   | 7          | 8.50                                     | 4.289                             |
| 10                                              | 90           | 10.07                | 7.05       | 8.56                                     | 4.318                             |
| 11                                              | 110          | 10.22                | 7.15       | 8.69                                     | 4.389                             |
| 12                                              | 130          | 10.33                | 7.23       | 8.78                                     | 4.432                             |
| 13                                              | 150          | 10.42                | 7.3        | 8.86                                     | 4.460                             |
| 14                                              | 170          | 10.51                | 7.36       | 8.94                                     | 4.503                             |
| 15                                              | 190          | 10.59                | 7.41       | 9.00                                     | 4.545                             |
| 16                                              | 210          | 10.66                | 7.46       | 9.06                                     | 4.574                             |
| 17                                              | 240          | 10.75                | 7.52       | 9.14                                     | 4.617                             |
| 18                                              | 270          | 10.85                | 7.6        | 9.23                                     | 4.645                             |
| 19                                              | 300          | 10.94                | 7.65       | 9.30                                     | 4.702                             |
| 20                                              | 330          | 10.99                | 7.7        | 9.35                                     | 4.702                             |
| 21                                              | 360          | 11.06                | 7.75       | 9.41                                     | 4.730                             |

**Tabella D-15** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione CD.

Appendice D

| Pinna vincolata in D e caricata in C con 3000 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|-------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Prima serie di rilievi sperimentali             |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                      | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                 |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                               | 0            | 12.04                | 8.69       | 10.37                                    | 4.787                             |
| 2                                               | 10           | 13.43                | 9.35       | 11.39                                    | 5.824                             |
| 3                                               | 20           | 13.91                | 9.73       | 11.82                                    | 5.966                             |
| 4                                               | 30           | 14.24                | 9.94       | 12.09                                    | 6.136                             |
| 5                                               | 40           | 14.5                 | 10.11      | 12.31                                    | 6.263                             |
| 6                                               | 50           | 14.67                | 10.24      | 12.46                                    | 6.320                             |
| 7                                               | 60           | 14.83                | 10.35      | 12.59                                    | 6.390                             |
| 8                                               | 70           | 14.96                | 10.45      | 12.71                                    | 6.433                             |
| 9                                               | 80           | 15.11                | 10.56      | 12.84                                    | 6.490                             |
| 10                                              | 90           | 15.21                | 10.62      | 12.92                                    | 6.546                             |
| 11                                              | 110          | 15.41                | 10.76      | 13.09                                    | 6.631                             |
| 12                                              | 130          | 15.56                | 10.87      | 13.22                                    | 6.687                             |
| 13                                              | 150          | 15.71                | 10.99      | 13.35                                    | 6.730                             |
| 14                                              | 170          | 15.87                | 11.09      | 13.48                                    | 6.815                             |
| 15                                              | 190          | 15.98                | 11.17      | 13.58                                    | 6.857                             |
| 16                                              | 210          | 16.1                 | 11.25      | 13.68                                    | 6.913                             |
| 17                                              | 240          | 16.24                | 11.36      | 13.80                                    | 6.956                             |
| 18                                              | 270          | 16.38                | 11.45      | 13.92                                    | 7.026                             |
| 19                                              | 300          | 16.51                | 11.54      | 14.03                                    | 7.083                             |
| 20                                              | 330          | 16.63                | 11.62      | 14.13                                    | 7.139                             |
| 21                                              | 360          | 16.74                | 11.71      | 14.23                                    | 7.167                             |

**Tabella D-16** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione CD.

Appendice D

| Pinna vincolata in D e caricata in C con 3000 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|-------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Seconda serie di rilievi sperimentali           |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                      | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                 |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                               | 0            | 12.3                 | 9.05       | 10.68                                    | 4.645                             |
| 2                                               | 10           | 14.2                 | 9.7        | 11.95                                    | 6.419                             |
| 3                                               | 20           | 14.6                 | 10.2       | 12.40                                    | 6.277                             |
| 4                                               | 30           | 14.9                 | 10.4       | 12.65                                    | 6.419                             |
| 5                                               | 40           | 15.05                | 10.53      | 12.79                                    | 6.447                             |
| 6                                               | 50           | 15.24                | 10.64      | 12.94                                    | 6.560                             |
| 7                                               | 60           | 15.36                | 10.73      | 13.05                                    | 6.603                             |
| 8                                               | 70           | 15.5                 | 10.82      | 13.16                                    | 6.673                             |
| 9                                               | 80           | 15.61                | 10.91      | 13.26                                    | 6.702                             |
| 10                                              | 90           | 15.73                | 10.99      | 13.36                                    | 6.758                             |
| 11                                              | 110          | 15.94                | 11.13      | 13.54                                    | 6.857                             |
| 12                                              | 130          | 16.1                 | 11.25      | 13.68                                    | 6.913                             |
| 13                                              | 150          | 16.23                | 11.35      | 13.79                                    | 6.956                             |
| 14                                              | 170          | 16.37                | 11.44      | 13.91                                    | 7.026                             |
| 15                                              | 190          | 16.49                | 11.52      | 14.01                                    | 7.083                             |
| 16                                              | 210          | 16.6                 | 11.6       | 14.10                                    | 7.125                             |
| 17                                              | 240          | 16.74                | 11.71      | 14.23                                    | 7.167                             |
| 18                                              | 270          | 16.85                | 11.79      | 14.32                                    | 7.210                             |
| 19                                              | 300          | 16.97                | 11.97      | 14.47                                    | 7.125                             |
| 20                                              | 330          | 17.11                | 11.98      | 14.55                                    | 7.308                             |
| 21                                              | 360          | 17.21                | 12.03      | 14.62                                    | 7.379                             |

Tabella D-17 Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione CD.



| Pinna vincolata in D e caricata in C con 3000 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|-------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Terza serie di rilievi sperimentali             |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                      | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                 |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                               | 0            | 12.56                | 8.9        | 10.73                                    | 5.228                             |
| 2                                               | 10           | 14.02                | 9.85       | 11.94                                    | 5.952                             |
| 3                                               | 20           | 14.58                | 10.18      | 12.38                                    | 6.277                             |
| 4                                               | 30           | 14.92                | 10.44      | 12.68                                    | 6.390                             |
| 5                                               | 40           | 15.19                | 10.61      | 12.90                                    | 6.532                             |
| 6                                               | 50           | 15.35                | 10.73      | 13.04                                    | 6.588                             |
| 7                                               | 60           | 15.5                 | 10.82      | 13.16                                    | 6.673                             |
| 8                                               | 70           | 15.62                | 10.93      | 13.28                                    | 6.687                             |
| 9                                               | 80           | 15.75                | 11.01      | 13.38                                    | 6.758                             |
| 10                                              | 90           | 15.79                | 11.11      | 13.45                                    | 6.673                             |
| 11                                              | 110          | 16.1                 | 11.25      | 13.68                                    | 6.913                             |
| 12                                              | 130          | 16.26                | 11.37      | 13.82                                    | 6.970                             |
| 13                                              | 150          | 16.4                 | 11.47      | 13.94                                    | 7.026                             |
| 14                                              | 170          | 16.53                | 11.56      | 14.05                                    | 7.083                             |
| 15                                              | 190          | 16.62                | 11.63      | 14.13                                    | 7.111                             |
| 16                                              | 210          | 16.72                | 11.7       | 14.21                                    | 7.153                             |
| 17                                              | 240          | 16.86                | 11.8       | 14.33                                    | 7.210                             |
| 18                                              | 270          | 16.98                | 11.89      | 14.44                                    | 7.252                             |
| 19                                              | 300          | 17.11                | 11.97      | 14.54                                    | 7.322                             |
| 20                                              | 330          | 17.23                | 12.05      | 14.64                                    | 7.379                             |
| 21                                              | 360          | 17.32                | 12.12      | 14.72                                    | 7.407                             |

**Tabella D-18** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione CD.

Appendice D

| Pinna vincolata in F (piede) e caricata in D con 500 g |       |                      |            |                               |                         |
|--------------------------------------------------------|-------|----------------------|------------|-------------------------------|-------------------------|
| Prima serie di rilievi sperimentali                    |       |                      |            |                               |                         |
| N° rilievo                                             | Tempo | Dati dei comparatori |            | Freccia media di deformazione | Inclinazione reale pala |
|                                                        | [S]   | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                               |                         |
| 1                                                      | 0     | 2.43                 | 1.87       | 2.15                          | 0.802                   |
| 2                                                      | 10    | 2.89                 | 2.26       | 2.58                          | 0.902                   |
| 3                                                      | 20    | 3.05                 | 2.36       | 2.71                          | 0.988                   |
| 4                                                      | 30    | 3.12                 | 2.41       | 2.77                          | 1.017                   |
| 5                                                      | 40    | 3.18                 | 2.46       | 2.82                          | 1.031                   |
| 6                                                      | 50    | 3.23                 | 2.49       | 2.86                          | 1.060                   |
| 7                                                      | 60    | 3.26                 | 2.53       | 2.90                          | 1.046                   |
| 8                                                      | 70    | 3.31                 | 2.56       | 2.94                          | 1.074                   |
| 9                                                      | 80    | 3.34                 | 2.58       | 2.96                          | 1.088                   |
| 10                                                     | 90    | 3.38                 | 2.61       | 3.00                          | 1.103                   |
| 11                                                     | 110   | 3.43                 | 2.65       | 3.04                          | 1.117                   |
| 12                                                     | 130   | 3.5                  | 2.71       | 3.11                          | 1.131                   |
| 13                                                     | 150   | 3.52                 | 2.72       | 3.12                          | 1.146                   |
| 14                                                     | 170   | 3.56                 | 2.75       | 3.16                          | 1.160                   |
| 15                                                     | 190   | 3.6                  | 2.78       | 3.19                          | 1.174                   |
| 16                                                     | 210   | 3.66                 | 2.84       | 3.25                          | 1.174                   |
| 17                                                     | 240   | 3.7                  | 2.86       | 3.28                          | 1.203                   |
| 18                                                     | 270   | 3.78                 | 2.9        | 3.34                          | 1.260                   |
| 19                                                     | 300   | 3.79                 | 2.92       | 3.36                          | 1.246                   |
| 20                                                     | 330   | 3.79                 | 2.92       | 3.36                          | 1.246                   |
| 21                                                     | 360   | 3.79                 | 2.92       | 3.36                          | 1.246                   |

**Tabella D-19** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione DF.

Appendice D

| Pinna vincolata in F (piede) e caricata in D con 500 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|--------------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Seconda serie di rilievi sperimentali                  |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                             | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                        |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                                      | 0            | 2.6                  | 2.16       | 2.38                                     | 0.630                             |
| 2                                                      | 10           | 3.17                 | 2.46       | 2.82                                     | 1.017                             |
| 3                                                      | 20           | 3.28                 | 2.55       | 2.92                                     | 1.046                             |
| 4                                                      | 30           | 3.36                 | 2.61       | 2.99                                     | 1.074                             |
| 5                                                      | 40           | 3.42                 | 2.65       | 3.04                                     | 1.103                             |
| 6                                                      | 50           | 3.49                 | 2.7        | 3.10                                     | 1.131                             |
| 7                                                      | 60           | 3.54                 | 2.74       | 3.14                                     | 1.146                             |
| 8                                                      | 70           | 3.59                 | 2.78       | 3.19                                     | 1.160                             |
| 9                                                      | 80           | 3.61                 | 2.79       | 3.20                                     | 1.174                             |
| 10                                                     | 90           | 3.65                 | 2.82       | 3.24                                     | 1.189                             |
| 11                                                     | 110          | 3.7                  | 2.87       | 3.29                                     | 1.189                             |
| 12                                                     | 130          | 3.72                 | 2.88       | 3.30                                     | 1.203                             |
| 13                                                     | 150          | 3.77                 | 2.91       | 3.34                                     | 1.232                             |
| 14                                                     | 170          | 3.81                 | 2.95       | 3.38                                     | 1.232                             |
| 15                                                     | 190          | 3.82                 | 2.95       | 3.39                                     | 1.246                             |
| 16                                                     | 210          | 3.86                 | 2.98       | 3.42                                     | 1.260                             |
| 17                                                     | 240          | 3.86                 | 2.98       | 3.42                                     | 1.260                             |
| 18                                                     | 270          | 3.93                 | 3.03       | 3.48                                     | 1.289                             |
| 19                                                     | 300          | 3.93                 | 3.03       | 3.48                                     | 1.289                             |
| 20                                                     | 330          | 3.99                 | 3.07       | 3.53                                     | 1.318                             |
| 21                                                     | 360          | 3.99                 | 3.08       | 3.54                                     | 1.303                             |

**Tabella D-20** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione DF.

Appendice D

| Pinna vincolata in F (piede) e caricata in D con 500 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|--------------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Terza serie di rilievi sperimentali                    |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                             | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                        |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                                      | 0            | 2.58                 | 2.02       | 2.30                                     | 0.802                             |
| 2                                                      | 10           | 3.08                 | 2.37       | 2.73                                     | 1.017                             |
| 3                                                      | 20           | 3.21                 | 2.46       | 2.84                                     | 1.074                             |
| 4                                                      | 30           | 3.3                  | 2.53       | 2.92                                     | 1.103                             |
| 5                                                      | 40           | 3.35                 | 2.57       | 2.96                                     | 1.117                             |
| 6                                                      | 50           | 3.42                 | 2.62       | 3.02                                     | 1.146                             |
| 7                                                      | 60           | 3.47                 | 2.66       | 3.07                                     | 1.160                             |
| 8                                                      | 70           | 3.5                  | 2.69       | 3.10                                     | 1.160                             |
| 9                                                      | 80           | 3.53                 | 2.71       | 3.12                                     | 1.174                             |
| 10                                                     | 90           | 3.58                 | 2.74       | 3.16                                     | 1.203                             |
| 11                                                     | 110          | 3.63                 | 2.79       | 3.21                                     | 1.203                             |
| 12                                                     | 130          | 3.67                 | 2.82       | 3.25                                     | 1.217                             |
| 13                                                     | 150          | 3.71                 | 2.85       | 3.28                                     | 1.232                             |
| 14                                                     | 170          | 3.75                 | 2.87       | 3.31                                     | 1.260                             |
| 15                                                     | 190          | 3.77                 | 2.89       | 3.33                                     | 1.260                             |
| 16                                                     | 210          | 3.78                 | 2.9        | 3.34                                     | 1.260                             |
| 17                                                     | 240          | 3.82                 | 2.94       | 3.38                                     | 1.260                             |
| 18                                                     | 270          | 3.86                 | 2.95       | 3.41                                     | 1.303                             |
| 19                                                     | 300          | 3.88                 | 2.98       | 3.43                                     | 1.289                             |
| 20                                                     | 330          | 3.9                  | 2.99       | 3.45                                     | 1.303                             |
| 21                                                     | 360          | 3.95                 | 3.03       | 3.49                                     | 1.318                             |

**Tabella D-21** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione DF.

| Pinna vincolata in F(piede) e caricata in D con 1500 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|--------------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Prima serie di rilievi sperimentali                    |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                             | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                        |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                                      | 0            | 2.43                 | 1.87       | 2.15                                     | 0.802                             |
| 2                                                      | 10           | 2.89                 | 2.26       | 2.58                                     | 0.902                             |
| 3                                                      | 20           | 3.05                 | 2.36       | 2.71                                     | 0.988                             |
| 4                                                      | 30           | 3.12                 | 2.41       | 2.77                                     | 1.017                             |
| 5                                                      | 40           | 3.18                 | 2.46       | 2.82                                     | 1.031                             |
| 6                                                      | 50           | 3.23                 | 2.49       | 2.86                                     | 1.060                             |
| 7                                                      | 60           | 3.26                 | 2.53       | 2.90                                     | 1.046                             |
| 8                                                      | 70           | 3.31                 | 2.56       | 2.94                                     | 1.074                             |
| 9                                                      | 80           | 3.34                 | 2.58       | 2.96                                     | 1.088                             |
| 10                                                     | 90           | 3.38                 | 2.61       | 3.00                                     | 1.103                             |
| 11                                                     | 110          | 3.43                 | 2.65       | 3.04                                     | 1.117                             |
| 12                                                     | 130          | 3.5                  | 2.71       | 3.11                                     | 1.131                             |
| 13                                                     | 150          | 3.52                 | 2.72       | 3.12                                     | 1.146                             |
| 14                                                     | 170          | 3.56                 | 2.75       | 3.16                                     | 1.160                             |
| 15                                                     | 190          | 3.6                  | 2.78       | 3.19                                     | 1.174                             |
| 16                                                     | 210          | 3.66                 | 2.84       | 3.25                                     | 1.174                             |
| 17                                                     | 240          | 3.7                  | 2.86       | 3.28                                     | 1.203                             |
| 18                                                     | 270          | 3.78                 | 2.9        | 3.34                                     | 1.260                             |
| 19                                                     | 300          | 3.79                 | 2.92       | 3.36                                     | 1.246                             |
| 20                                                     | 330          | 3.79                 | 2.92       | 3.36                                     | 1.246                             |
| 21                                                     | 360          | 3.79                 | 2.92       | 3.36                                     | 1.246                             |

**Tabella D-22** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione DF.

Appendice D

| Pinna vincolata in F (piede) e caricata in D con 1500 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|---------------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Seconda serie di rilievi sperimentali                   |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                              | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                         |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                                       | 0            | 2.6                  | 2.16       | 2.38                                     | 0.630                             |
| 2                                                       | 10           | 3.17                 | 2.46       | 2.82                                     | 1.017                             |
| 3                                                       | 20           | 3.28                 | 2.55       | 2.92                                     | 1.046                             |
| 4                                                       | 30           | 3.36                 | 2.61       | 2.99                                     | 1.074                             |
| 5                                                       | 40           | 3.42                 | 2.65       | 3.04                                     | 1.103                             |
| 6                                                       | 50           | 3.49                 | 2.7        | 3.10                                     | 1.131                             |
| 7                                                       | 60           | 3.54                 | 2.74       | 3.14                                     | 1.146                             |
| 8                                                       | 70           | 3.59                 | 2.78       | 3.19                                     | 1.160                             |
| 9                                                       | 80           | 3.61                 | 2.79       | 3.20                                     | 1.174                             |
| 10                                                      | 90           | 3.65                 | 2.82       | 3.24                                     | 1.189                             |
| 11                                                      | 110          | 3.7                  | 2.87       | 3.29                                     | 1.189                             |
| 12                                                      | 130          | 3.72                 | 2.88       | 3.30                                     | 1.203                             |
| 13                                                      | 150          | 3.77                 | 2.91       | 3.34                                     | 1.232                             |
| 14                                                      | 170          | 3.81                 | 2.95       | 3.38                                     | 1.232                             |
| 15                                                      | 190          | 3.82                 | 2.95       | 3.39                                     | 1.246                             |
| 16                                                      | 210          | 3.86                 | 2.98       | 3.42                                     | 1.260                             |
| 17                                                      | 240          | 3.86                 | 2.98       | 3.42                                     | 1.260                             |
| 18                                                      | 270          | 3.93                 | 3.03       | 3.48                                     | 1.289                             |
| 19                                                      | 300          | 3.93                 | 3.03       | 3.48                                     | 1.289                             |
| 20                                                      | 330          | 3.99                 | 3.07       | 3.53                                     | 1.318                             |
| 21                                                      | 360          | 3.99                 | 3.08       | 3.54                                     | 1.303                             |

**Tabella D-23** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione DF.

| Pinna vincolata in F (piede) e caricata in D con 1500 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|---------------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Terza serie di rilievi sperimentali                     |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                              | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                         |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                                       | 0            | 2.58                 | 2.02       | 2.30                                     | 0.802                             |
| 2                                                       | 10           | 3.08                 | 2.37       | 2.73                                     | 1.017                             |
| 3                                                       | 20           | 3.21                 | 2.46       | 2.84                                     | 1.074                             |
| 4                                                       | 30           | 3.3                  | 2.53       | 2.92                                     | 1.103                             |
| 5                                                       | 40           | 3.35                 | 2.57       | 2.96                                     | 1.117                             |
| 6                                                       | 50           | 3.42                 | 2.62       | 3.02                                     | 1.146                             |
| 7                                                       | 60           | 3.47                 | 2.66       | 3.07                                     | 1.160                             |
| 8                                                       | 70           | 3.5                  | 2.69       | 3.10                                     | 1.160                             |
| 9                                                       | 80           | 3.53                 | 2.71       | 3.12                                     | 1.174                             |
| 10                                                      | 90           | 3.58                 | 2.74       | 3.16                                     | 1.203                             |
| 11                                                      | 110          | 3.63                 | 2.79       | 3.21                                     | 1.203                             |
| 12                                                      | 130          | 3.67                 | 2.82       | 3.25                                     | 1.217                             |
| 13                                                      | 150          | 3.71                 | 2.85       | 3.28                                     | 1.232                             |
| 14                                                      | 170          | 3.75                 | 2.87       | 3.31                                     | 1.260                             |
| 15                                                      | 190          | 3.77                 | 2.89       | 3.33                                     | 1.260                             |
| 16                                                      | 210          | 3.78                 | 2.9        | 3.34                                     | 1.260                             |
| 17                                                      | 240          | 3.82                 | 2.94       | 3.38                                     | 1.260                             |
| 18                                                      | 270          | 3.86                 | 2.95       | 3.41                                     | 1.303                             |
| 19                                                      | 300          | 3.88                 | 2.98       | 3.43                                     | 1.289                             |
| 20                                                      | 330          | 3.9                  | 2.99       | 3.45                                     | 1.303                             |
| 21                                                      | 360          | 3.95                 | 3.03       | 3.49                                     | 1.318                             |

**Tabella D-24** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione DF.

Appendice D

| Pinna vincolata in F (piede) e caricata in D con 2000 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|---------------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Prima serie di rilievi sperimentali                     |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                              | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                         |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                                       | 0            | 13.7                 | 11.2       | 12.45                                    | 3.576                             |
| 2                                                       | 10           | 15.5                 | 12.1       | 13.80                                    | 4.858                             |
| 3                                                       | 20           | 16.07                | 12.65      | 14.36                                    | 4.887                             |
| 4                                                       | 30           | 16.57                | 12.93      | 14.75                                    | 5.200                             |
| 5                                                       | 40           | 16.89                | 13.15      | 15.02                                    | 5.342                             |
| 6                                                       | 50           | 17.16                | 13.33      | 15.25                                    | 5.469                             |
| 7                                                       | 60           | 17.3                 | 13.5       | 15.40                                    | 5.427                             |
| 8                                                       | 70           | 17.53                | 13.65      | 15.59                                    | 5.540                             |
| 9                                                       | 80           | 17.66                | 13.74      | 15.70                                    | 5.597                             |
| 10                                                      | 90           | 17.73                | 13.8       | 15.77                                    | 5.611                             |
| 11                                                      | 110          | 17.9                 | 13.94      | 15.92                                    | 5.654                             |
| 12                                                      | 130          | 18.07                | 14.06      | 16.07                                    | 5.725                             |
| 13                                                      | 150          | 18.24                | 14.18      | 16.21                                    | 5.796                             |
| 14                                                      | 170          | 18.37                | 14.28      | 16.33                                    | 5.838                             |
| 15                                                      | 190          | 18.48                | 14.38      | 16.43                                    | 5.852                             |
| 16                                                      | 210          | 18.6                 | 14.47      | 16.54                                    | 5.895                             |
| 17                                                      | 240          | 18.75                | 14.57      | 16.66                                    | 5.966                             |
| 18                                                      | 270          | 18.9                 | 14.68      | 16.79                                    | 6.022                             |
| 19                                                      | 300          | 19.02                | 14.77      | 16.90                                    | 6.065                             |
| 20                                                      | 330          | 19.12                | 14.86      | 16.99                                    | 6.079                             |
| 21                                                      | 360          | 19.22                | 14.94      | 17.08                                    | 6.107                             |

Tabella D-25 Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione DF.



Appendice D

| Pinna vincolata in F (piede) e caricata in D con 2000 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|---------------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Seconda serie di rilievi sperimentali                   |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                              | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                         |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                                       | 0            | 13.75                | 11.28      | 12.52                                    | 3.534                             |
| 2                                                       | 10           | 15.98                | 12.57      | 14.28                                    | 4.873                             |
| 3                                                       | 20           | 16.72                | 13.07      | 14.90                                    | 5.214                             |
| 4                                                       | 30           | 17.02                | 13.29      | 15.16                                    | 5.327                             |
| 5                                                       | 40           | 17.28                | 13.49      | 15.39                                    | 5.413                             |
| 6                                                       | 50           | 17.5                 | 13.68      | 15.59                                    | 5.455                             |
| 7                                                       | 60           | 17.68                | 13.81      | 15.75                                    | 5.526                             |
| 8                                                       | 70           | 17.83                | 13.92      | 15.88                                    | 5.583                             |
| 9                                                       | 80           | 17.95                | 14         | 15.98                                    | 5.640                             |
| 10                                                      | 90           | 18.08                | 14.1       | 16.09                                    | 5.682                             |
| 11                                                      | 110          | 18.3                 | 14.28      | 16.29                                    | 5.739                             |
| 12                                                      | 130          | 18.47                | 14.41      | 16.44                                    | 5.796                             |
| 13                                                      | 150          | 18.62                | 14.53      | 16.58                                    | 5.838                             |
| 14                                                      | 170          | 18.76                | 14.62      | 16.69                                    | 5.909                             |
| 15                                                      | 190          | 18.88                | 14.71      | 16.80                                    | 5.952                             |
| 16                                                      | 210          | 19                   | 14.8       | 16.90                                    | 5.994                             |
| 17                                                      | 240          | 19.13                | 14.91      | 17.02                                    | 6.022                             |
| 18                                                      | 270          | 19.25                | 15.01      | 17.13                                    | 6.051                             |
| 19                                                      | 300          | 19.37                | 15.1       | 17.24                                    | 6.093                             |
| 20                                                      | 330          | 19.47                | 15.17      | 17.32                                    | 6.136                             |
| 21                                                      | 360          | 19.55                | 15.24      | 17.40                                    | 6.150                             |

**Tabella D-26** Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione DF.

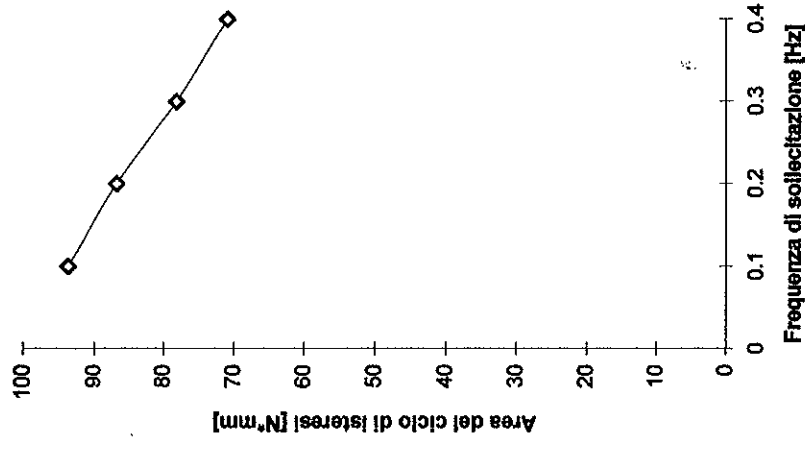
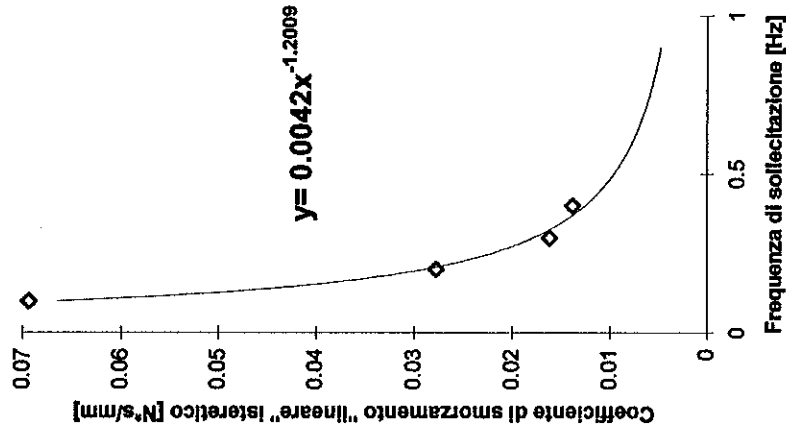
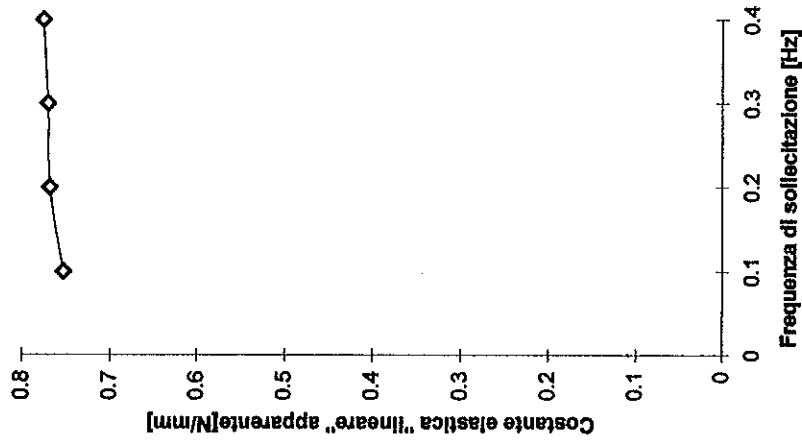
Appendice D

| Pinna vincolata in F (piede) e caricata in D con 2000 g |              |                      |            |                                          |                                   |
|---------------------------------------------------------|--------------|----------------------|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Terza serie di rilievi sperimentali                     |              |                      |            |                                          |                                   |
| N° rilievo                                              | Tempo<br>[S] | Dati dei comparatori |            | Freccia media<br>di deformazione<br>[MM] | Inclinazione reale<br>pala<br>[°] |
|                                                         |              | h1<br>[MM]           | h2<br>[MM] |                                          |                                   |
| 1                                                       | 0            | 13.8                 | 11.35      | 12.58                                    | 3.505                             |
| 2                                                       | 10           | 15.83                | 12.49      | 14.16                                    | 4.773                             |
| 3                                                       | 20           | 16.49                | 13.03      | 14.76                                    | 4.944                             |
| 4                                                       | 30           | 16.92                | 13.34      | 15.13                                    | 5.114                             |
| 5                                                       | 40           | 17.23                | 13.56      | 15.40                                    | 5.242                             |
| 6                                                       | 50           | 17.54                | 13.8       | 15.67                                    | 5.342                             |
| 7                                                       | 60           | 17.8                 | 14         | 15.90                                    | 5.427                             |
| 8                                                       | 70           | 17.95                | 14.08      | 16.02                                    | 5.526                             |
| 9                                                       | 80           | 18.08                | 14.21      | 16.15                                    | 5.526                             |
| 10                                                      | 90           | 18.2                 | 14.3       | 16.25                                    | 5.569                             |
| 11                                                      | 110          | 18.42                | 14.48      | 16.45                                    | 5.625                             |
| 12                                                      | 130          | 18.62                | 14.62      | 16.62                                    | 5.711                             |
| 13                                                      | 150          | 18.77                | 14.73      | 16.75                                    | 5.767                             |
| 14                                                      | 170          | 18.9                 | 14.83      | 16.87                                    | 5.810                             |
| 15                                                      | 190          | 19.03                | 14.94      | 16.99                                    | 5.838                             |
| 16                                                      | 210          | 19.14                | 15.03      | 17.09                                    | 5.867                             |
| 17                                                      | 240          | 19.31                | 15.15      | 17.23                                    | 5.937                             |
| 18                                                      | 270          | 19.43                | 15.24      | 17.34                                    | 5.980                             |
| 19                                                      | 300          | 19.54                | 15.32      | 17.43                                    | 6.022                             |
| 20                                                      | 330          | 19.64                | 15.39      | 17.52                                    | 6.065                             |
| 21                                                      | 360          | 19.73                | 15.47      | 17.60                                    | 6.079                             |

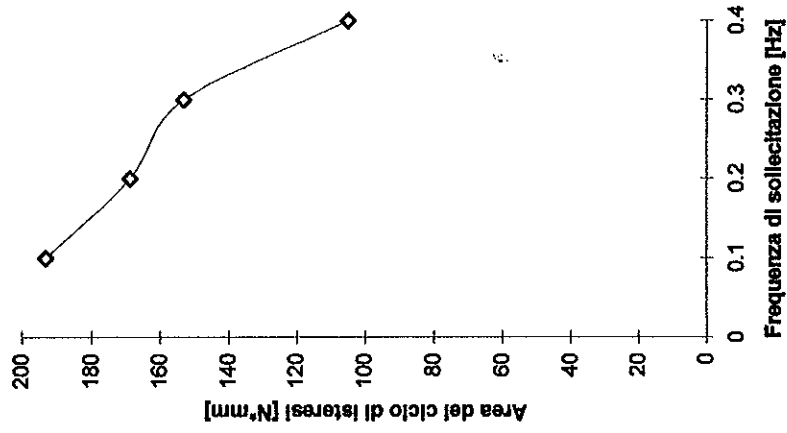
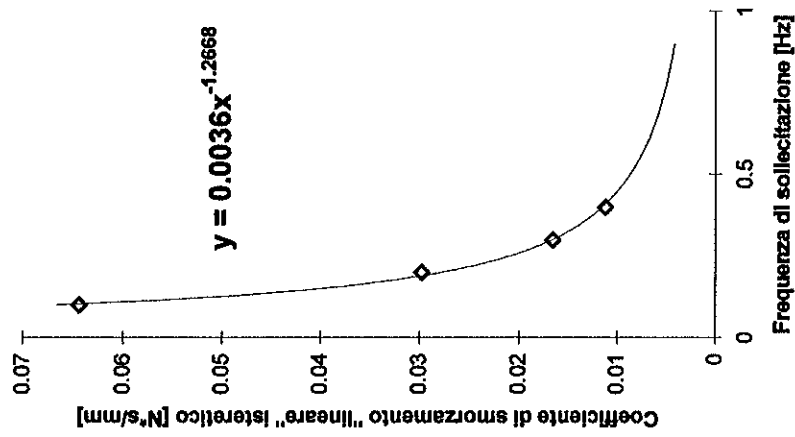
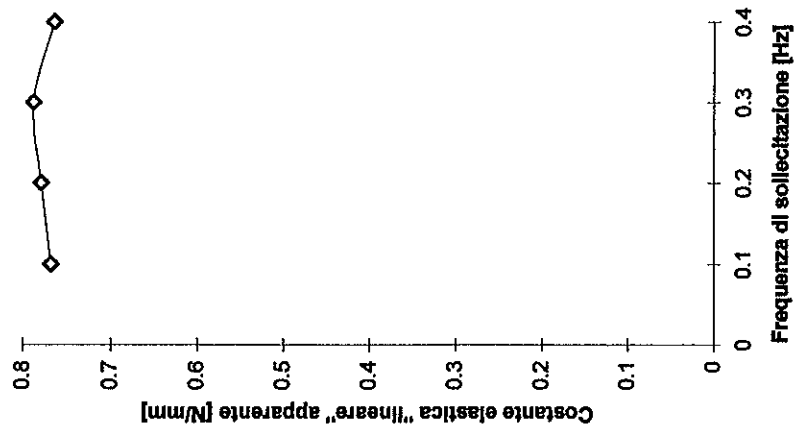
Tabella D-27 Rilievi sperimentali delle prove a carico statico sulla sezione DF.

## **APPENDICE E**

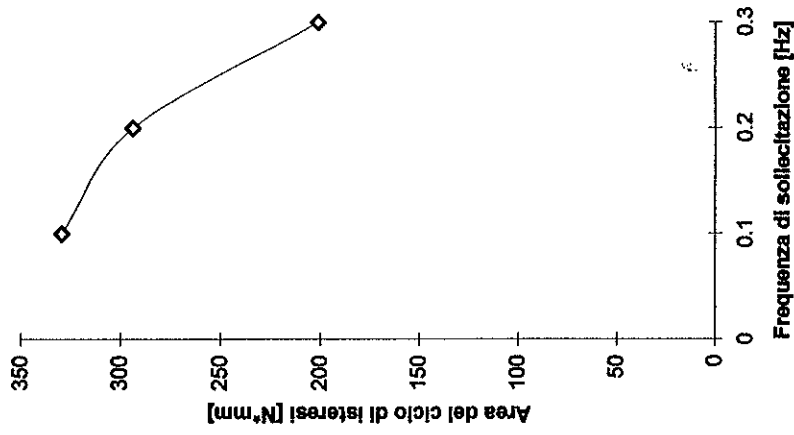
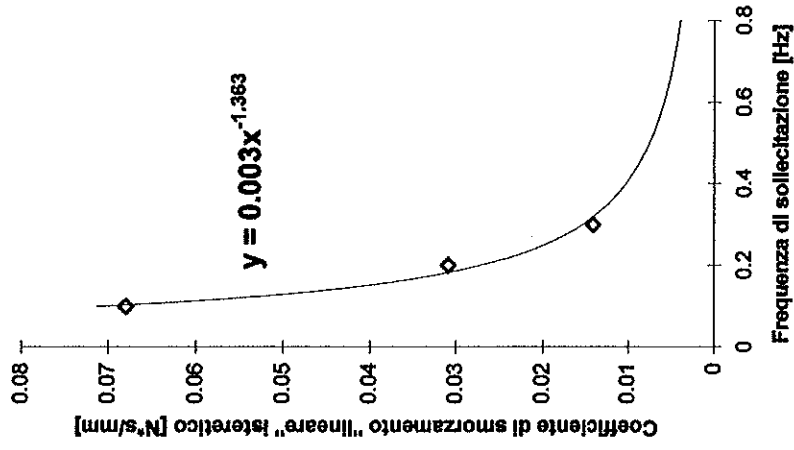
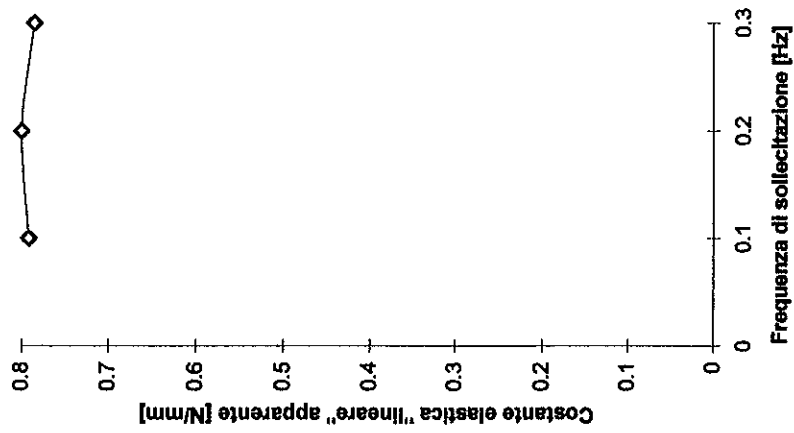
In quest'appendice sono riportati i grafici che confrontano i valori delle costanti di rigidità "lineare" apparenti, i coefficienti di smorzamento "lineare" isteretico e l'energia dissipata per ciclo, risultanti dalle prove dinamiche e raccolti in tabellà 8.2-1. Per ogni tratto di pinna si sono analizzati gli andamenti dei vari parametri tenendo costante o la frequenza di sollecitazione o l'ampiezza di sollecitazione.



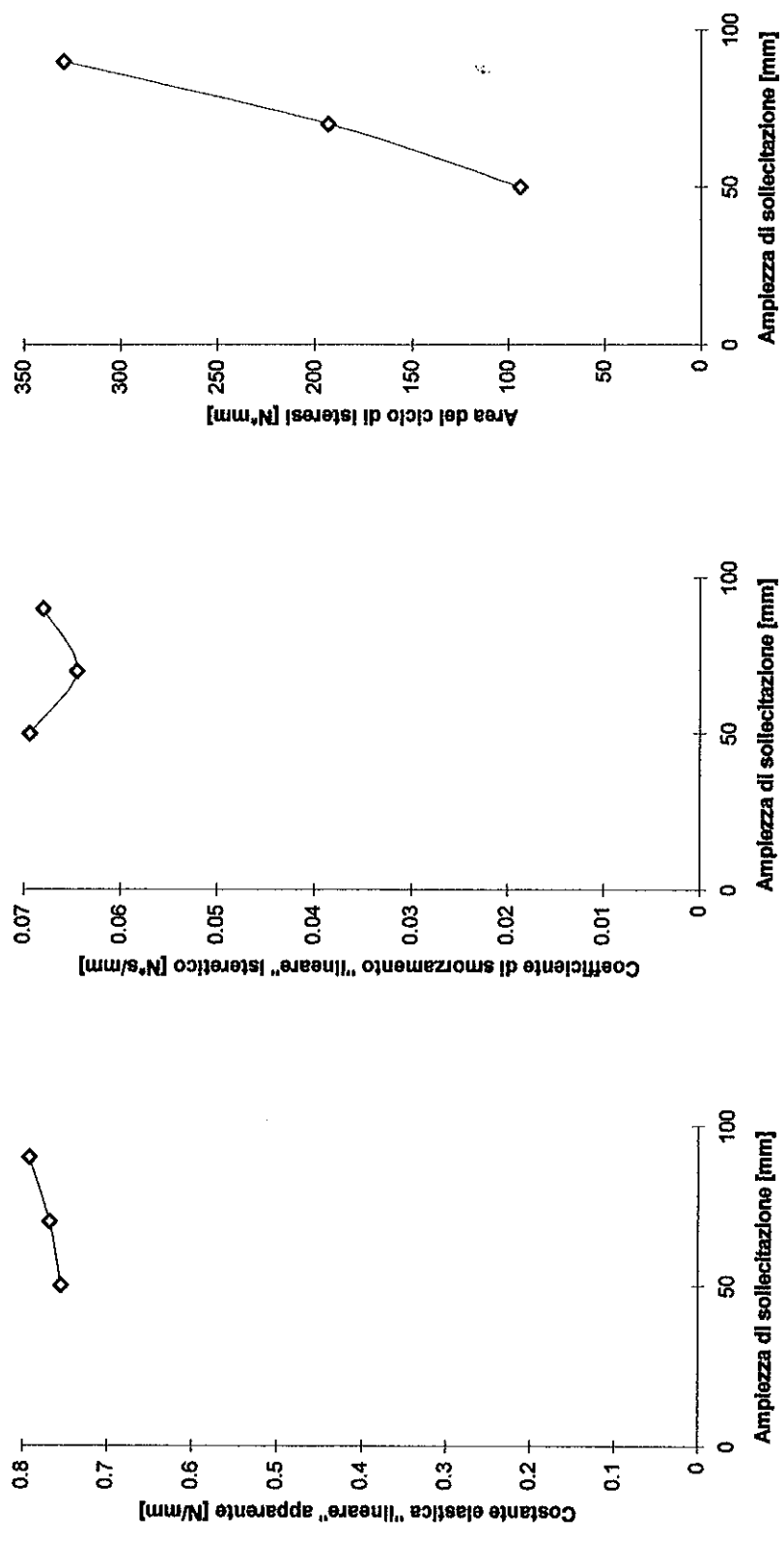
**Grafici E-1** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidezza "lineare" apparente ( $K_{xA}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $C_x$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove TAB con ampiezza di sollecitazione costante di 50 [mm].



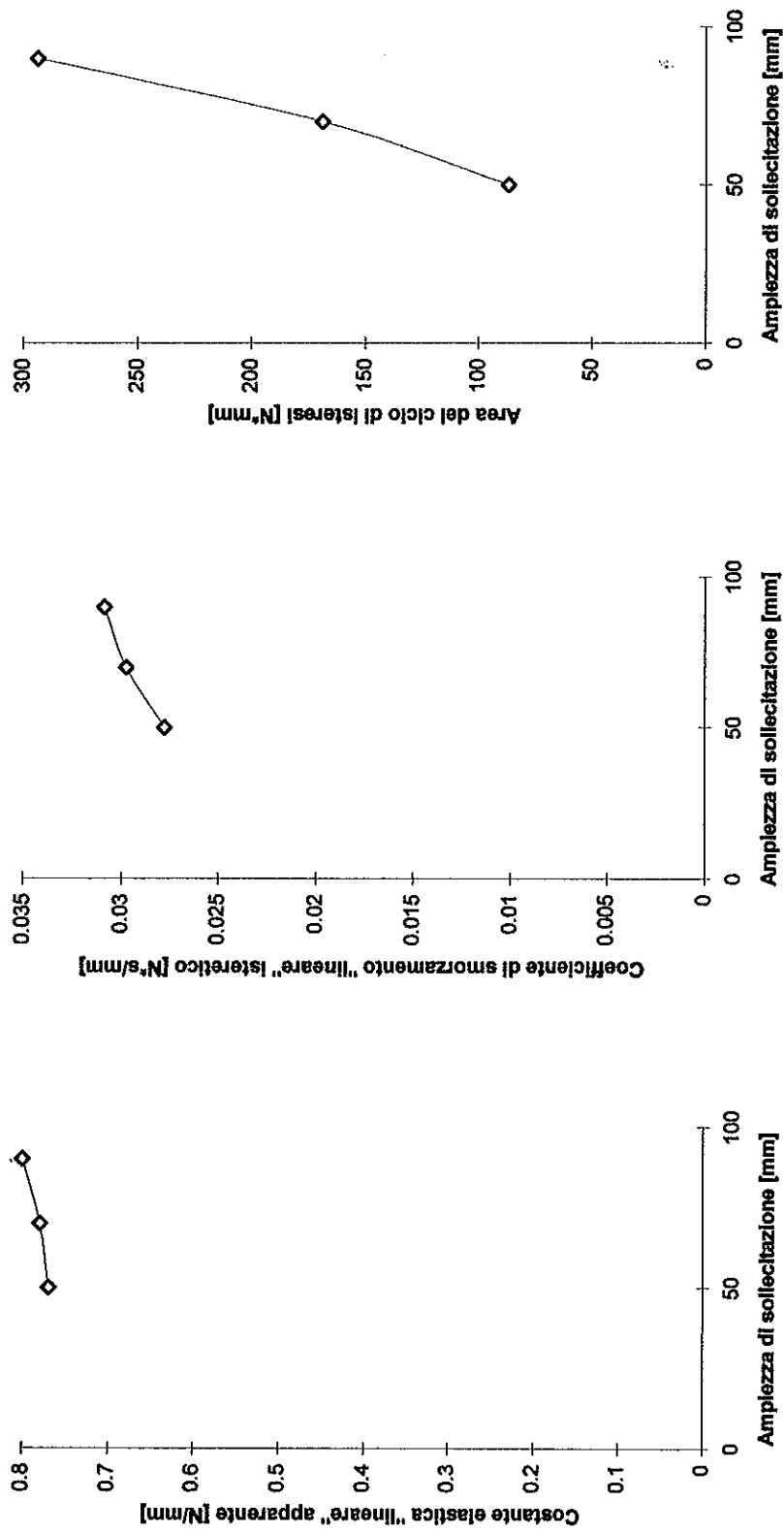
**Grafici E-2** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidità "lineare" apparente ( $K_{xA}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $c_x$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove TAB con ampiezza di sollecitazione costante di 70 [mm].



**Grafici E-3** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidità "lineare" apparente ( $K_{xd}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $c_x$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove TAB con ampiezza di sollecitazione costante di 90 [mm].

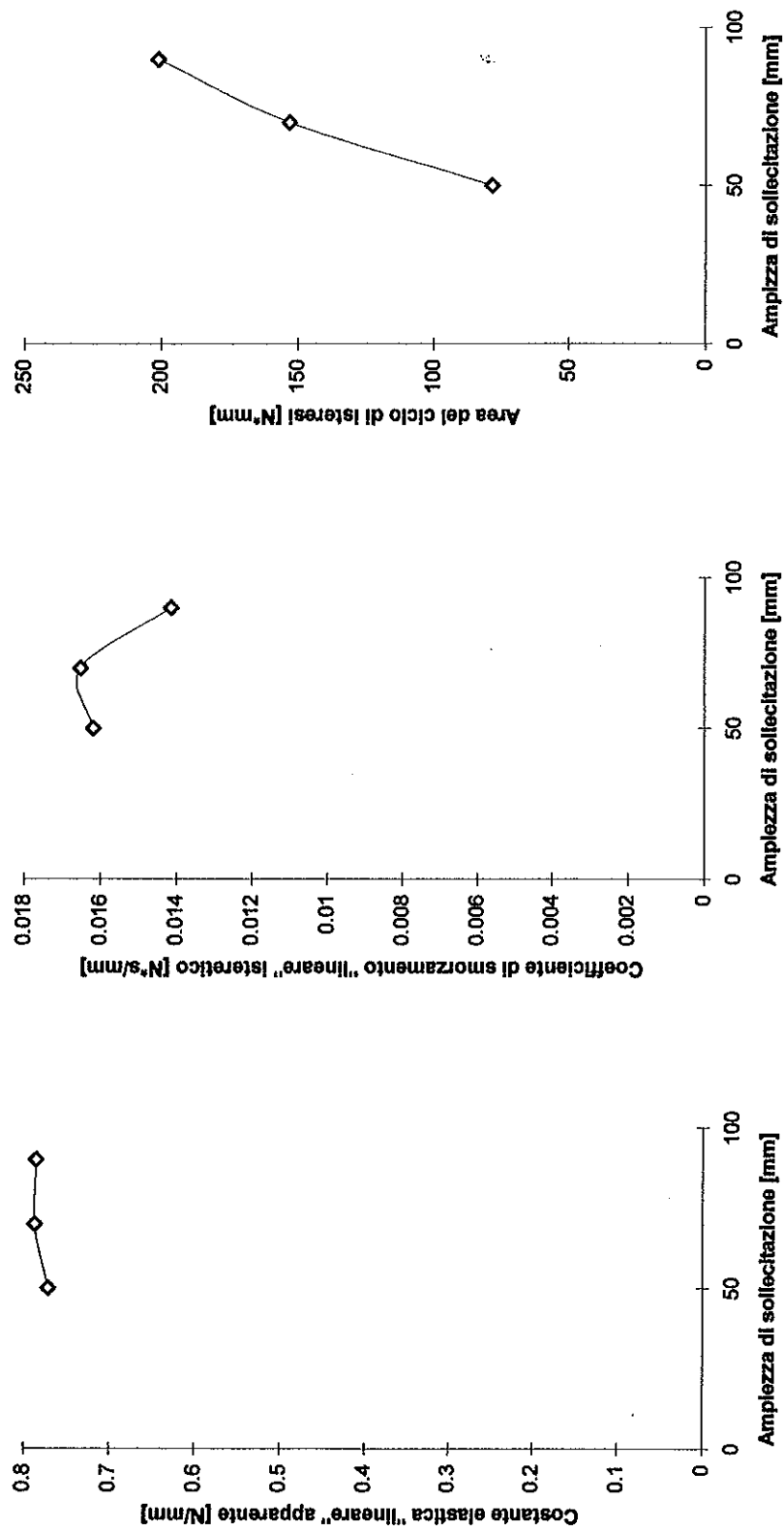


**Grafici E-4** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidità "lineare" apparente ( $K_{XL}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $c_X$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove TAB con frequenza di sollecitazione costante di 0.1 [Hz].

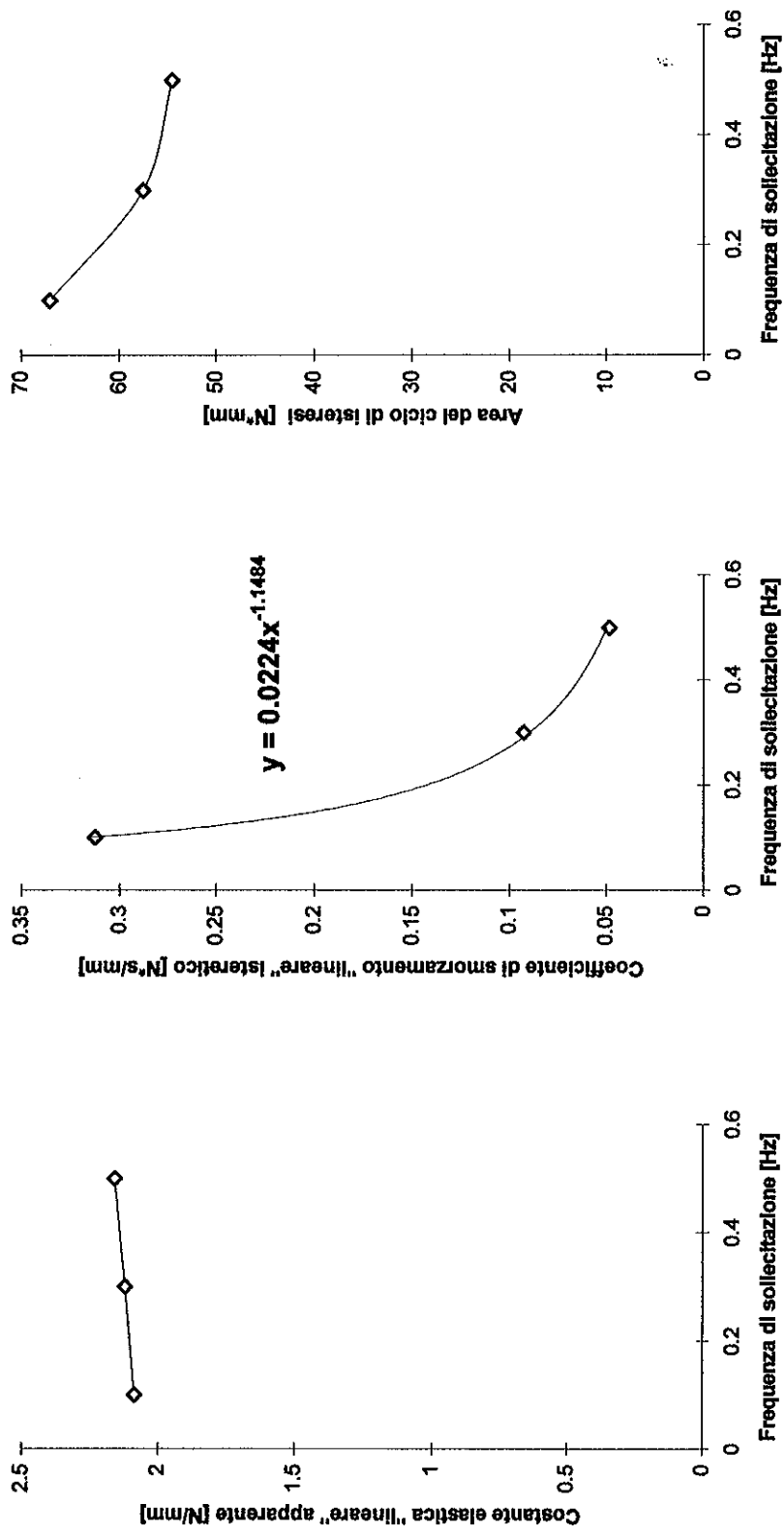


**Grafici E-5** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidità "lineare" apparente ( $K_{XA}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $c_X$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove TAB con frequenza di sollecitazione costante di 0.2 [Hz].

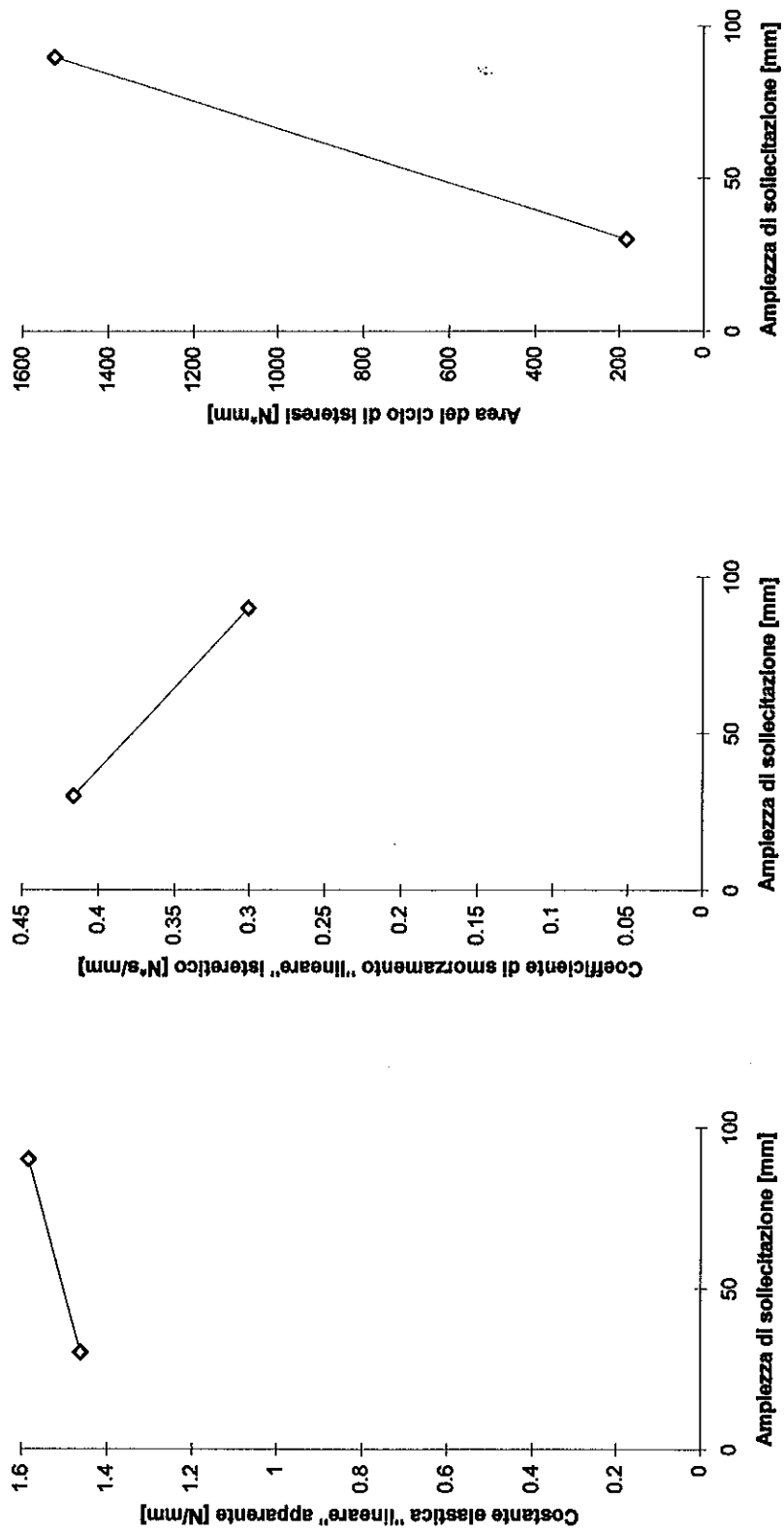




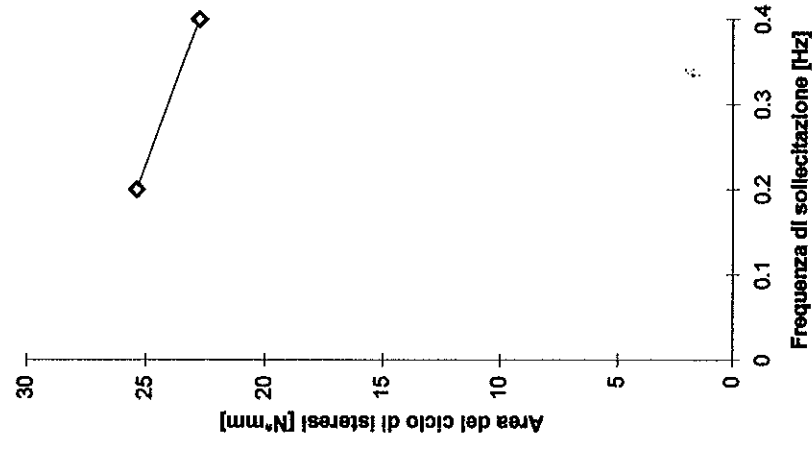
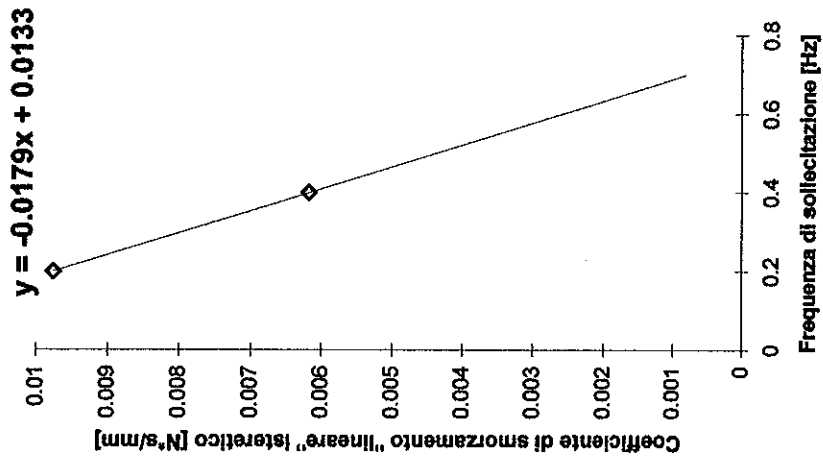
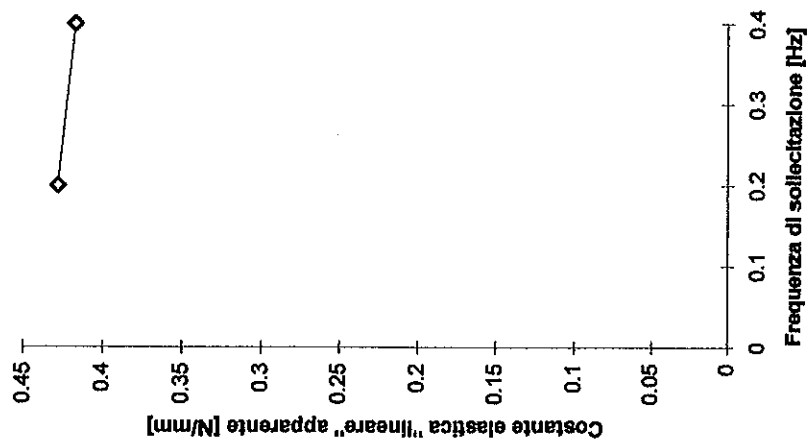
**Grafici E-6** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidezza "lineare" apparente ( $K_{XA}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $c_x$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove TAB con frequenza di sollecitazione costante di 0.3 [Hz].



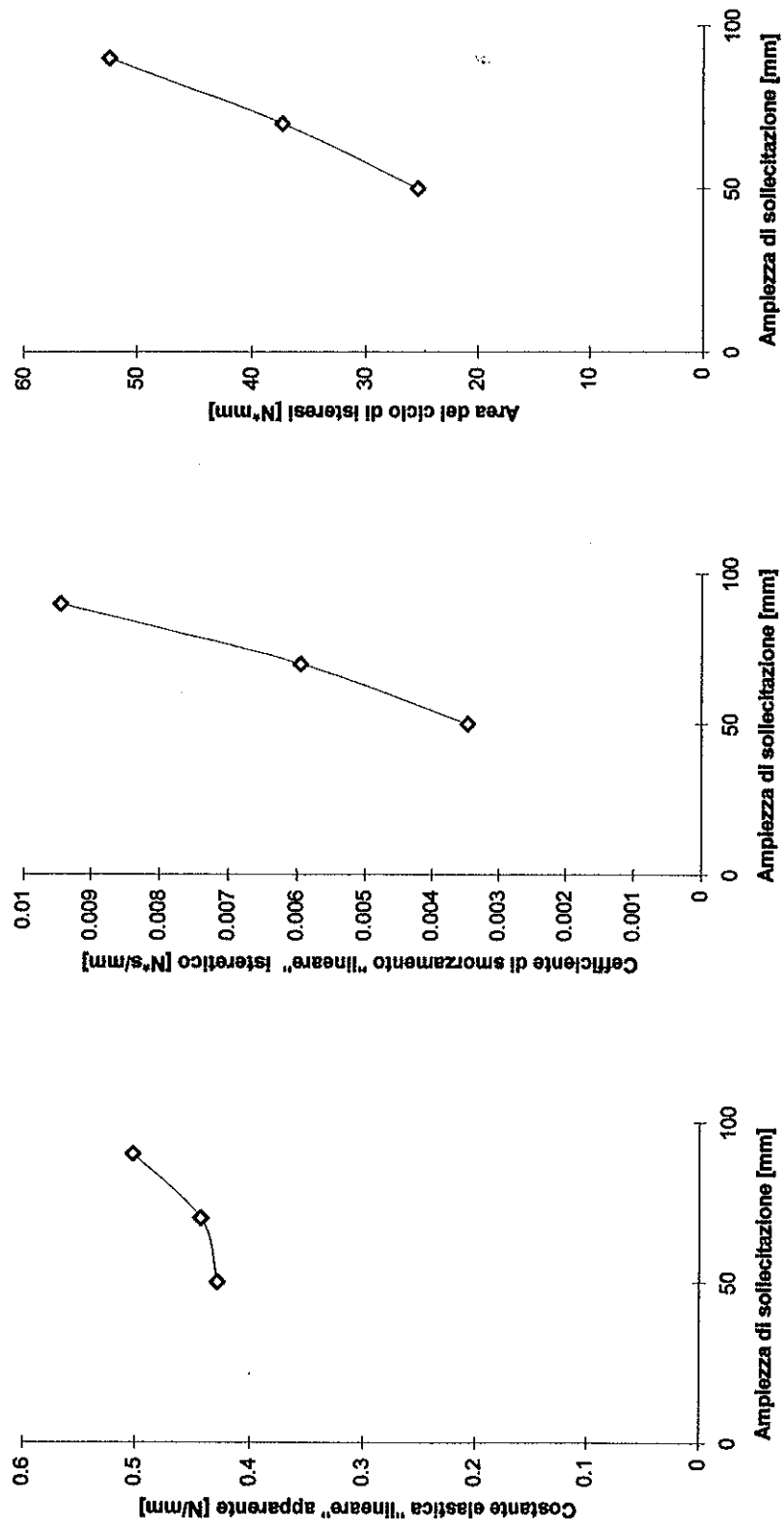
**Grafici E-7** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidezza "lineare" apparente ( $K_{XA}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $c_x$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove TCD con ampiezza di sollecitazione costante di 40 [mm].



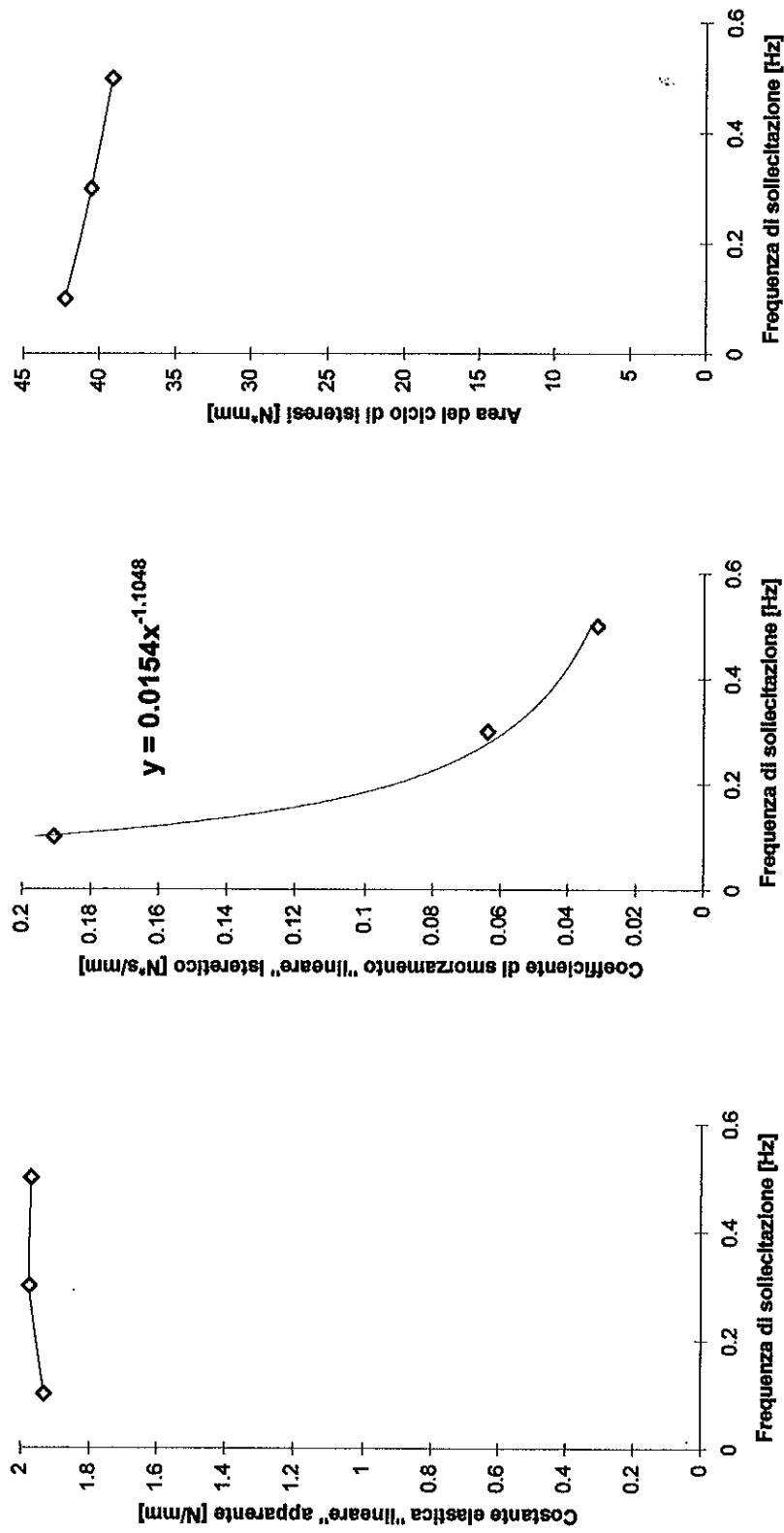
**Grafici E-8** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidezza "lineare" apparente ( $K_{XA}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $c_Y$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove TDF con frequenza di sollecitazione costante di 0.1 [Hz].



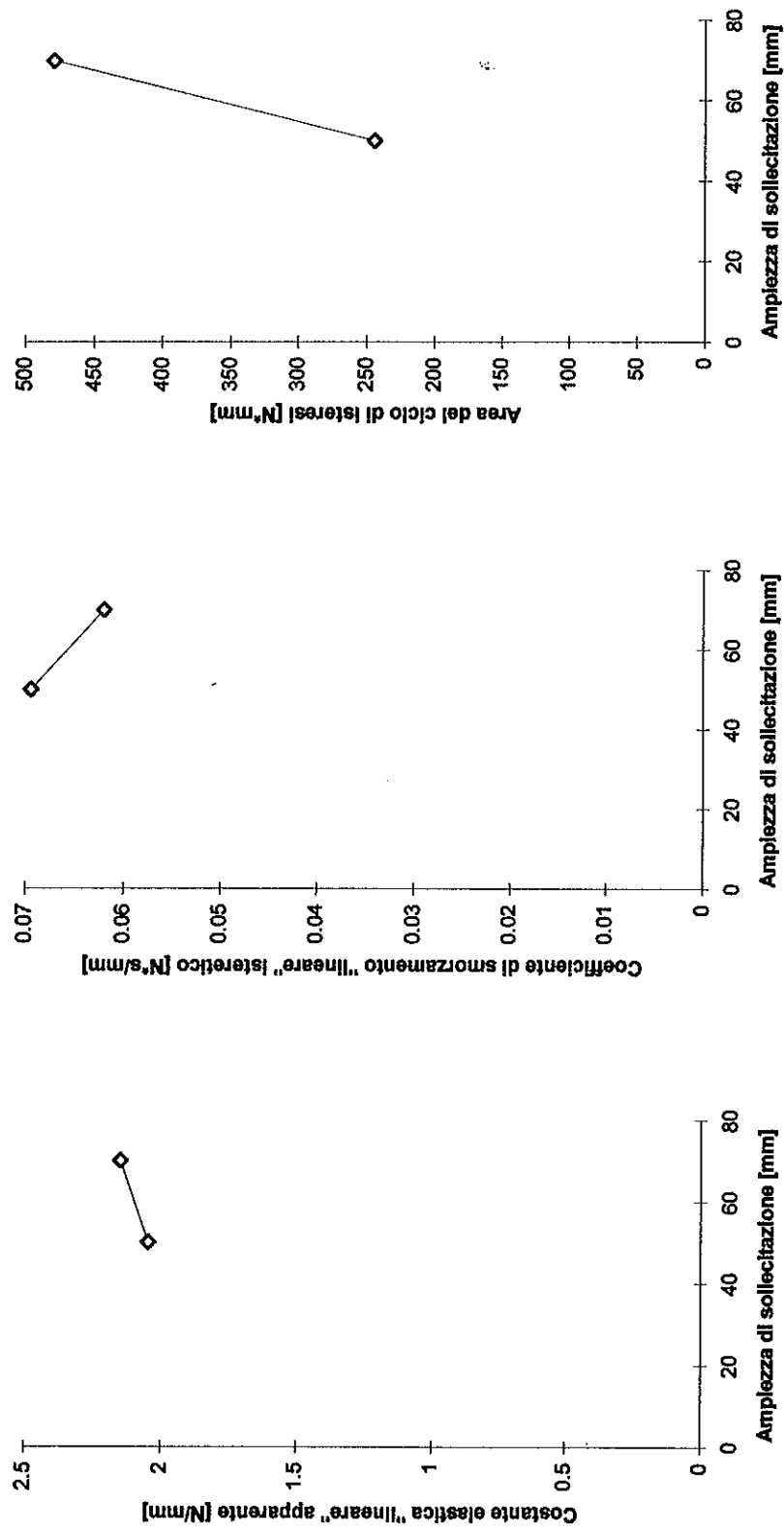
**Grafici E-9** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidezza "lineare" apparente ( $K_{XA}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $c_Y$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove X1AB con ampiezza di sollecitazione costante di 50 [mm].



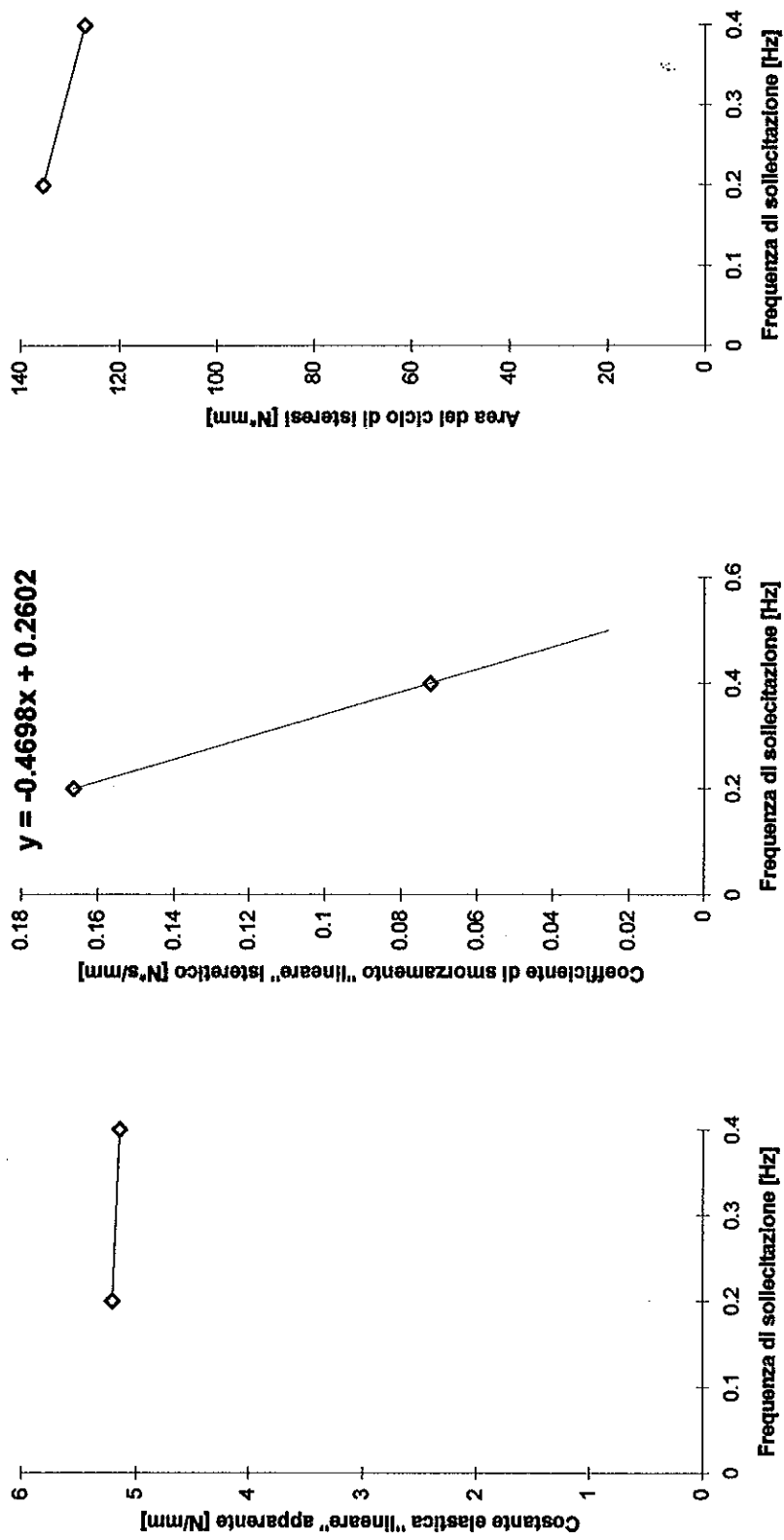
**Grafici E-10** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidezza "lineare" apparente ( $K_{za}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $c_x$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove X1AB con frequenza di sollecitazione costante di 0.2 [Hz].



**Grafici E-11** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidezza "lineare" apparente ( $K_{XA}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $c_X$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove XICD con ampiezza di sollecitazione costante di 20 [mm].

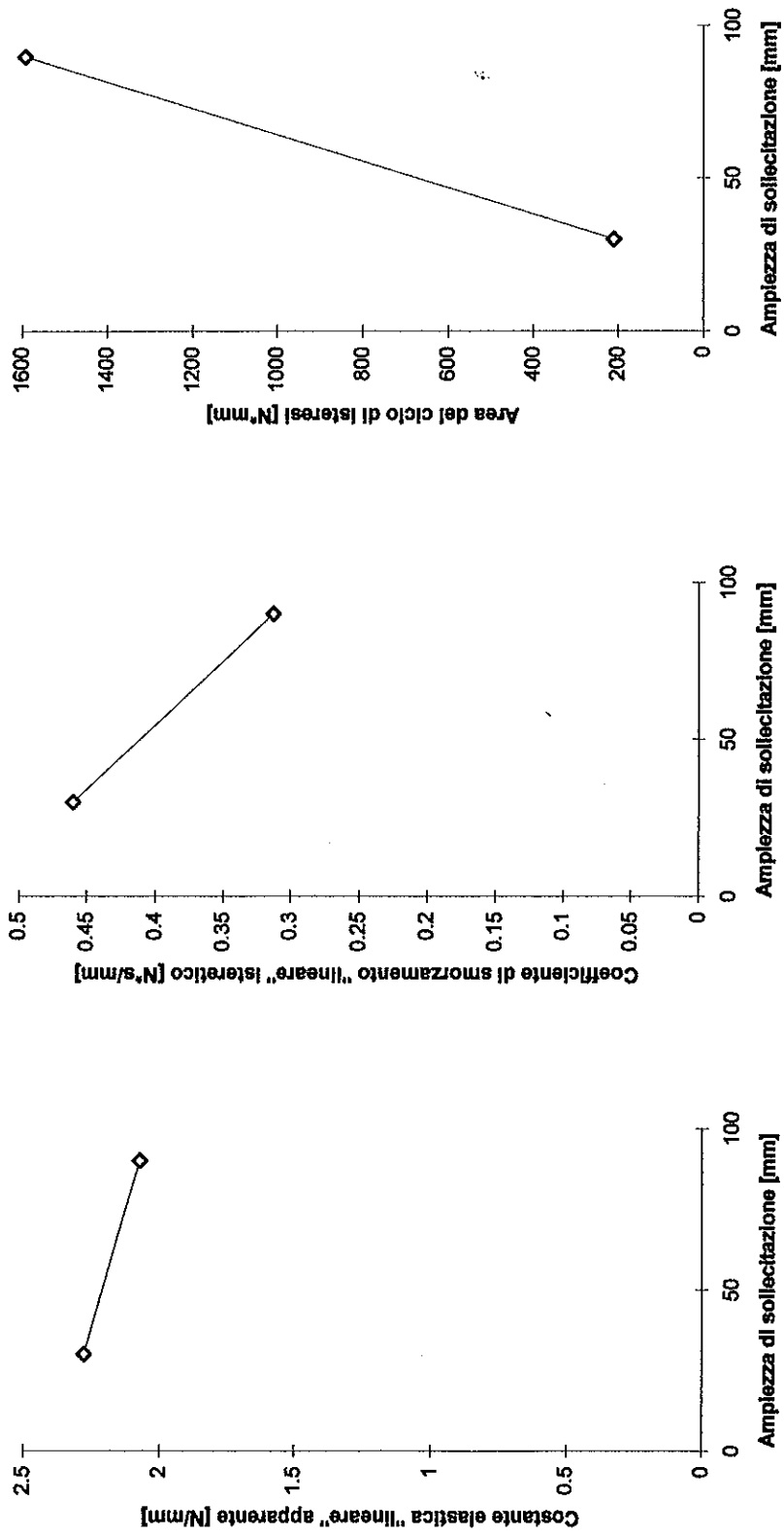


**Grafici E-12** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidità "lineare" apparente ( $K_{x4}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $c_x$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove X1CD con frequenza di sollecitazione costante di 0.2 [Hz].

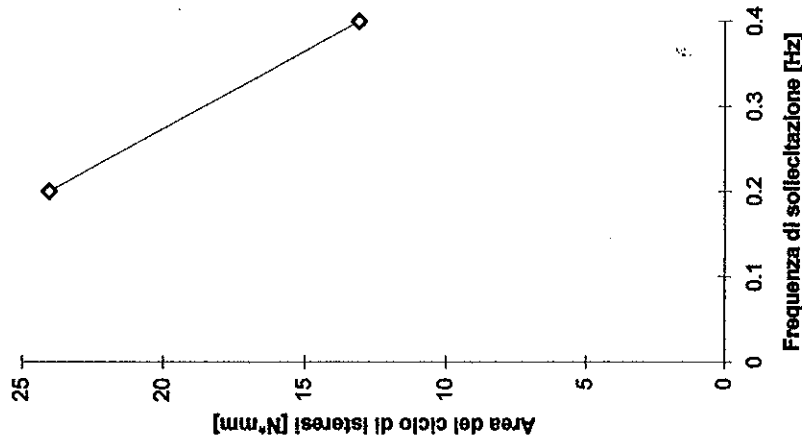
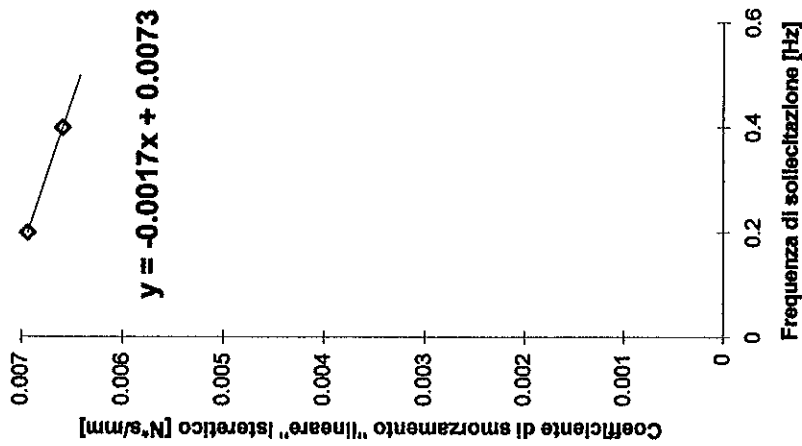
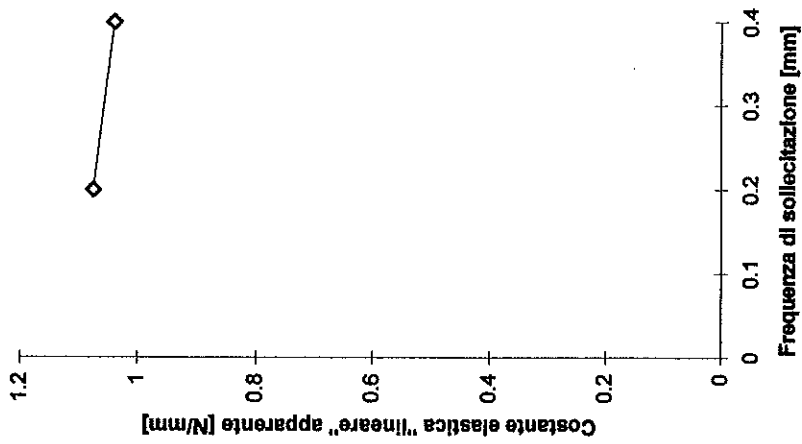


**Grafici E-13** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidezza "lineare" apparente ( $K_{x4}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $c_x$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove X165D con ampiezza di sollecitazione costante di 24 [mm].

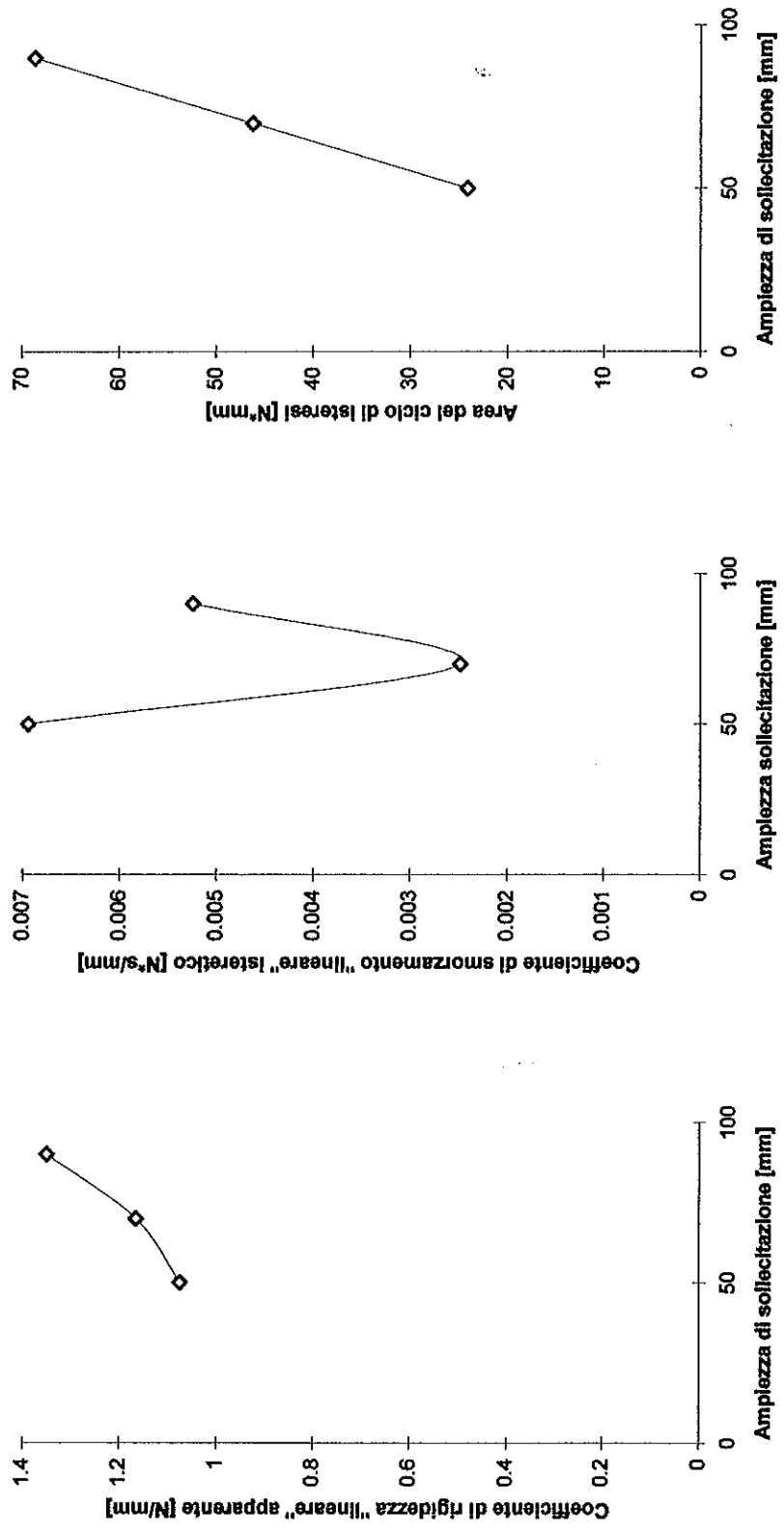




**Grafici E-14** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidezza "lineare" apparente ( $K_{XL}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $c_x$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove X1DF con frequenza di sollecitazione costante di 0.1 [Hz].



**Grafici E-15** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidezza "lineare" apparente ( $K_x$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $C_x$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi ( $A$ ), rilevati nelle prove X4AB con ampiezza di sollecitazione costante di 50 [mm].

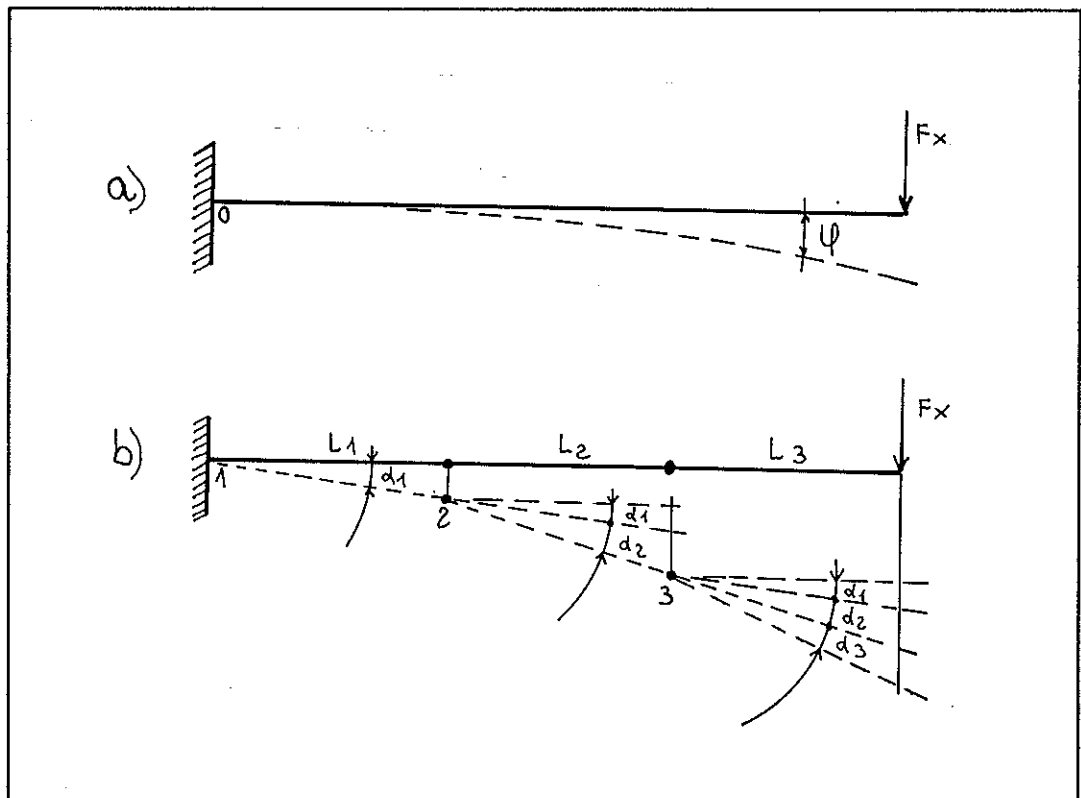


**Grafici E-16** Grafici che confrontano i valori della costante di rigidità "lineare" apparente ( $K_{XA}$ ), del coefficiente di smorzamento "lineare" isteretico ( $c_x$ ) e dell'energia dissipata dai relativi cicli di isteresi (A), rilevati nelle prove X4AB con frequenza di sollecitazione costante di 0.2 [Hz].

## APPENDICE F

In quest'appendice sono valutate le relazioni che legano le caratteristiche di rigidezza ( $K_\varphi$ ) e smorzamento ( $c_\varphi$ ) di un generico tratto di pinna discretizzato come un unico elemento (fig.F-1a), alle caratteristiche di rigidezza ( $K_{\varphi_i}$ ) e smorzamento ( $c_{\varphi_i}$ ) dello stesso tratto di pinna discretizzato in  $n$  elementi uguali (fig.F-1b):

$$K_{\varphi_i} = f(K_\varphi) \qquad c_{\varphi_i} = g(c_\varphi) \qquad i = 1, 2, 3, \dots, n$$



**Figura F-1** a) Tratto di pinna discretizzato come un unico elemento;  
 b) Stesso tratto di pinna discretizzato in più elementi.  
 Discretizzando il tratto di pinna con due elementi ( $n = 2$ ), si ha:

## Appendice F

$$M_0 = K_\varphi \cdot \varphi$$

$$M_1 = K_{\varphi_{-1}} \cdot \varphi_1$$

per ipotesi la forza sollecitante ( $F_X$ ) è uguale, allora il momento flettente nella sezione di vincolo ha lo stesso valore:

$$M_0 = M_1$$

$$K_\varphi \cdot \varphi = K_{\varphi_{-1}} \cdot \varphi_1$$

inoltre:

$$M_2 = F_X \cdot L_2$$

$$= K_{\varphi_{-2}} \cdot \varphi_2$$

$$M_1 = M_2 + F_X \cdot L_1$$

$$= K_{\varphi_{-1}} \cdot \varphi_1$$

quindi:

$$F_X = \frac{K_{\varphi_{-2}} \cdot \varphi_2}{L_2} = \frac{K_{\varphi_{-1}} \cdot \varphi_1 - K_{\varphi_{-2}} \cdot \varphi_2}{L_1} = F_X$$

ma  $K_{\varphi_{-1}} = K_{\varphi_{-2}}$  perchè gli elementi 1 e 2 sono uguali e dello stesso materiale, allora:

$$\frac{\varphi_2}{L} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{L}$$

$$\varphi_1 = 2 \cdot \varphi_2$$

Per ipotesi la deformazione totale ( $f_{tot}$ ) è uguale, quindi per piccole deformazioni si ha:

$$f_{tot} = L \cdot \varphi = L_1 \cdot \varphi_1 + L_2 \cdot (\varphi_1 + \varphi_2) = f_{tot}$$

ma,  $\varphi_1 = 2 \cdot \varphi_2$ , quindi:

$$\begin{aligned} L \cdot \varphi &= \frac{L}{2} \cdot \left( 2 \cdot \varphi_1 + \frac{\varphi_1}{2} \right) \\ &= L \cdot \frac{5}{4} \cdot \varphi_1 \end{aligned}$$

$$\boxed{\varphi = \frac{5}{4} \cdot \varphi_1}$$

essendo  $K_\varphi \cdot \varphi = K_{\varphi_1} \cdot \varphi_1$ , allora:

$$\boxed{K_{\varphi_1} = K_{\varphi_2} = \frac{5}{4} \cdot K_\varphi}$$

, per  $n = 2$

Analogamente, discretizzando il tratto di pinna con tre elementi ( $n = 3$ ), si ottiene:

$$\boxed{K_{\varphi_1} = K_{\varphi_2} = K_{\varphi_3} = \frac{14}{9} \cdot K_\varphi}$$

, per  $n = 3$

## Appendice F

Ricordando dalla teoria [11] che il coefficiente di smorzamento isteretico è direttamente proporzionale alla rigidità K:

$$c = \frac{\beta \cdot K}{\omega}$$

$\beta$  = coefficiente adimensionale di smorzamento isteretico, costante per un certo materiale;

$$\omega = 2 \cdot \Pi \cdot f = \frac{2 \cdot \Pi}{T} = \text{pulsazione di pinneggiata, dove:}$$

f = frequenza di pinneggiata;

T = periodo di pinneggiata;

allora si può scrivere:

$$c_{\varphi_1} = c_{\varphi_2} = \frac{5}{4} \cdot c_{\varphi}$$

, per  $n = 2$

$$c_{\varphi_1} = c_{\varphi_2} = c_{\varphi_3} = \frac{14}{9} \cdot c_{\varphi}$$

, per  $n = 3$