

D3

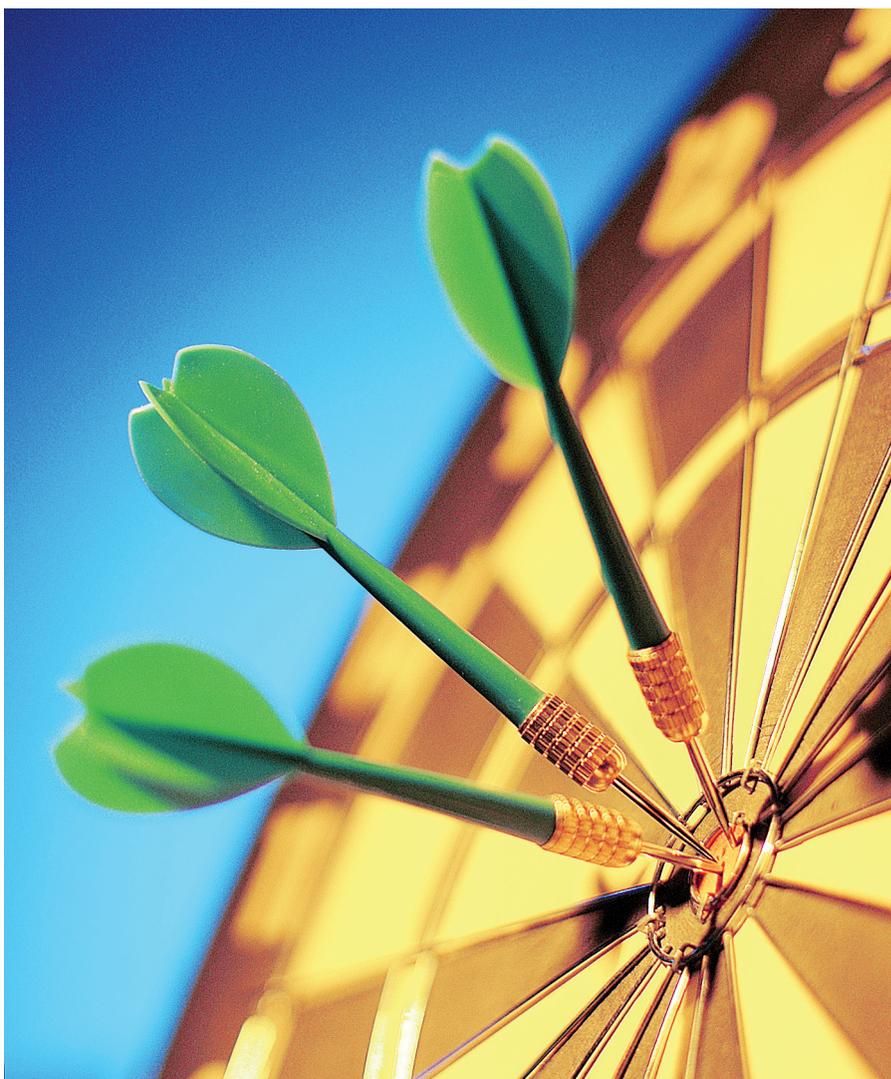
Sistemi di forze: calcolo grafico



TEORIA

- 1 Uso del CAD nei procedimenti grafici
- 2 Rappresentazione grafica dei vettori
- 3 Poligono delle forze
- 4 Poligono delle successive risultanti
- 5 Poligono funicolare
- 6 Sistemi equivalenti

AUTOVALUTAZIONE



La riduzione di un sistema di forze al più semplice sistema equivalente (risultante, momento risultante o vettore nullo) può essere eseguita per via grafica. Poco usati nella pratica professionale, i procedimenti grafici sono didatticamente molto interessanti perché uniscono all'immediatezza visiva la possibilità di controllare i diversi passaggi del calcolo. Con l'impiego dei programmi CAD questi procedimenti superano gli aspetti tradizionalmente negativi del disegno manuale, dovuti alla lentezza e all'imprecisione. Le freccette nel centro del bersaglio simulano un sistema spaziale di vettori concorrenti in un punto.

1. Uso del CAD nei procedimenti grafici

La risoluzione grafica dei sistemi di forze mette immediatamente in luce alcuni aspetti negativi, propri dei procedimenti del disegno manuale:

- si deve disporre, oltre che della calcolatrice (per riportare sul disegno o, viceversa, per leggere in scala i moduli dei vettori), dei tradizionali strumenti da disegno: carta, matita, gomma, squadre;
- capita spesso di dovere sospendere il disegno (e reimpostarlo) perché il punto d'incontro di due rette esce dal foglio;
- per quanto il disegno sia eseguito con cura, la precisione dei risultati è sempre compromessa da errori grafici e di lettura.

In generale i metodi analitici sono oggi preferiti ai metodi grafici, perché l'introduzione di nuove metodologie di calcolo e la diffusione del software permettono di risolvere senza difficoltà sistemi di equazioni con grande numero di incognite.

D'altra parte, i metodi grafici hanno il vantaggio della grande immediatezza visiva, che li rende molto utili in una prima fase dell'apprendimento. Inoltre, è disponibile un potente strumento di disegno, capace di ovviare a tutti gli inconvenienti del procedimento manuale: il **disegno assistito dal computer** o **CAD** (*Computer Aided Design*). Il foglio, sostituito dal monitor del PC, è praticamente illimitato; gli strumenti sono sostituiti da tastiera e mouse. Si possono utilizzare *tipi di linee e colori* diversi per le forze e per le linee di costruzione, ottenendo di-

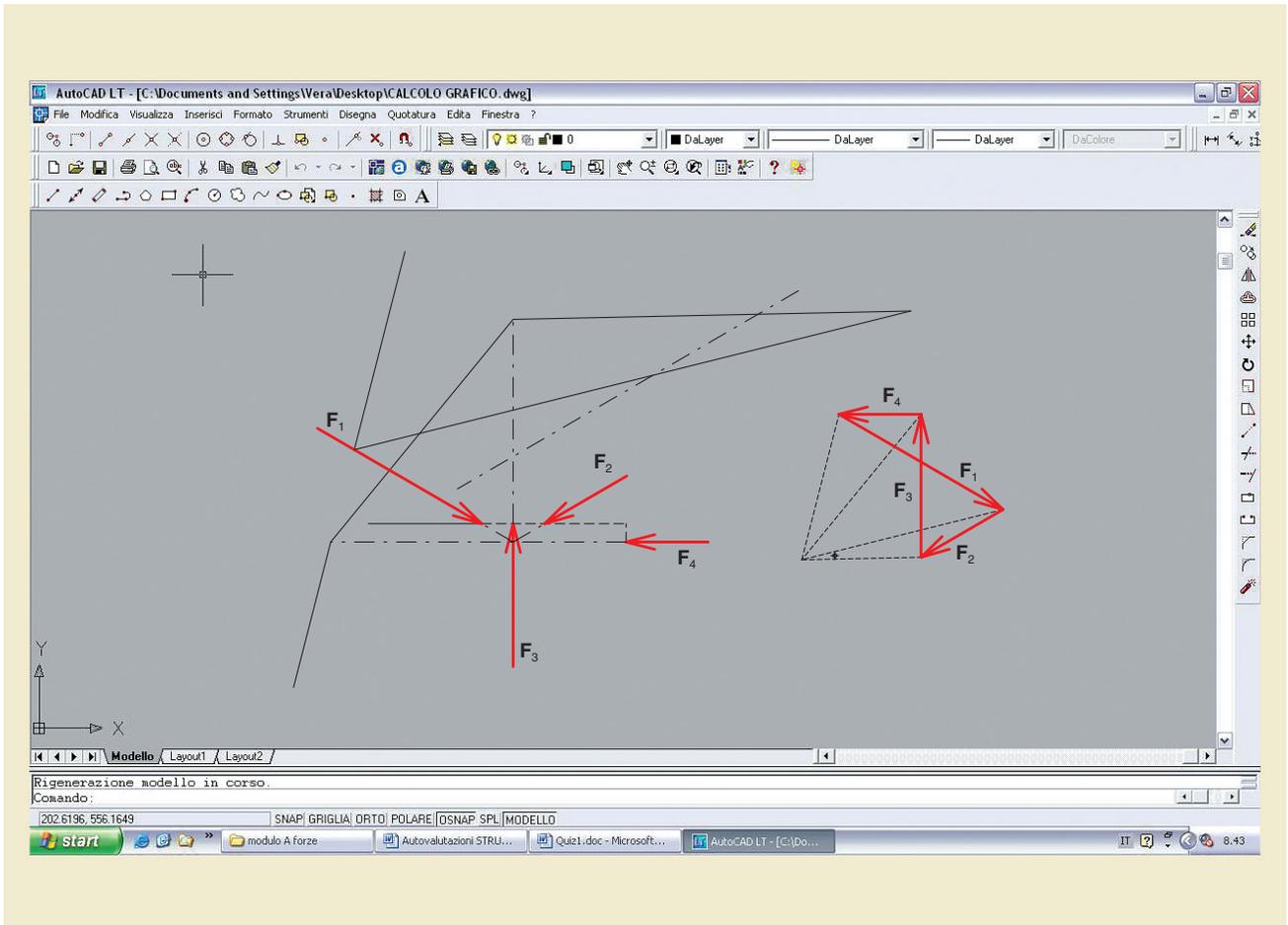


FIGURA 1 Sistema di forze e risoluzione grafica sullo schermo di AutoCAD.

segni più leggibili. Infine, le diverse costruzioni grafiche possono essere disegnate su un *piano* diverso da quello del sistema delle forze che, rimanendo sempre *pulito*, resta disponibile per nuove elaborazioni.

Usando la terminologia del diffusissimo programma *AutoCAD*[®] (► FIGURA 1), si può fare della forza un *blocco*: le diverse forze del sistema possono essere rappresentate *editando* il blocco con i comandi *ruota* e *scala*. Le costruzioni grafiche (tracciamento di parallele, riporto dei vettori testa-coda) sono sostituite dai comandi *copia* e *offset*; il comando *cima* individua immediatamente l'intersezione, anche molto lontana, di due rette. Con il comando *elenca* si ottengono immediatamente modulo, verso, direzione e retta d'azione della risultante cercata, oppure il braccio della coppia e il modulo delle due forze che la costituiscono. Nel CAD, infatti, non esiste il problema del rapporto di scala; o meglio, si può sempre disegnare in scala 1:1.

L'approssimazione delle misure può essere impostata fino a otto decimali, ottenendo risultati di altissima precisione.

Nel seguito tutte le applicazioni e gli esercizi che possono essere vantaggiosamente eseguiti con AutoCAD saranno segnalati con il simbolo **AC**

2. Rappresentazione grafica dei vettori

Un vettore può essere rappresentato sul foglio da disegno, o sullo schermo del computer, da un **segmento orientato** AB , avente **origine** in un punto A e **fine** in un punto B .

Tracciata una retta r inclinata di α rispetto all'orizzontale, si individua su di essa un segmento AB di lunghezza proporzionale al modulo v del vettore. È necessario a tal fine scegliere un'opportuna **scala dei vettori**, con cui si fa corrispondere a un'unità di disegno (1 cm, 1 mm) un certo numero u espresso nell'unità di misura del modulo del vettore. Si scriverà pertanto

$$\text{scala } \frac{1 \text{ cm}}{u}, \quad \text{scala } \frac{1 \text{ mm}}{u}$$

Il numero u è chiamato **fattore di scala**.

La lunghezza del segmento riportato sul disegno si determina dividendo il modulo del vettore per il fattore di scala. Viceversa, il modulo di un vettore rappresentato da un segmento orientato si determina moltiplicando la lunghezza del segmento stesso per il fattore di scala.

Modulo, direzione e verso sono sufficienti a individuare un vettore libero. Per rappresentarlo, basta disegnare uno qualsiasi degli infiniti vettori che abbia i parametri assegnati.

Se, oltre a modulo, direzione e verso, è assegnata anche la retta d'azione (per esempio, mediante le coordinate cartesiane di un suo punto qualsiasi), si rappresenta il vettore scorrevole.

APPLICAZIONI

- 1 Si rappresenti (► FIGURA 2) lo spostamento libero s avente modulo $s = 3 \text{ m}$ e direzione $\alpha = 140^\circ$.

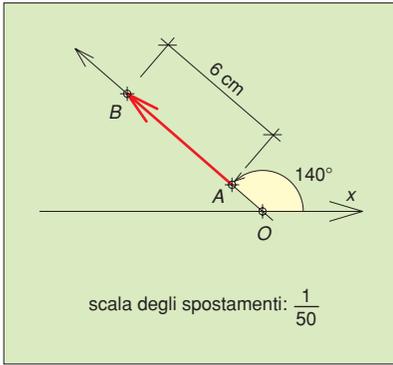


FIGURA 2 Rappresentazione grafica del vettore spostamento \mathbf{s} avente modulo $s = 3$ m e direzione $\alpha = 140^\circ$.

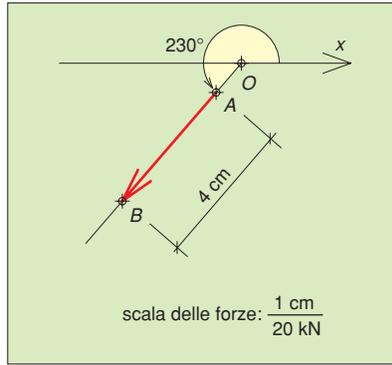


FIGURA 3 Vettore forza \mathbf{F} avente modulo $F = 80$ kN e direzione $\alpha = 230^\circ$.

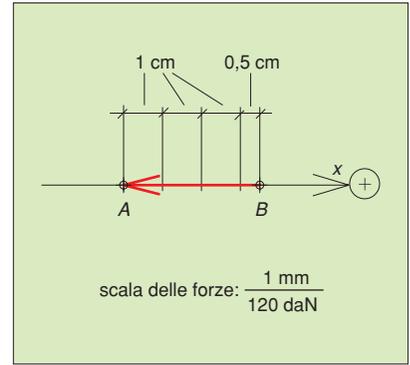


FIGURA 4 Vettore rappresentato dal segmento orientato AB .

Occorre scegliere, anzitutto, una scala degli spostamenti proporzionata alle dimensioni del disegno; per esempio:

$$\frac{1 \text{ cm}}{50 \text{ cm}} = \frac{1}{50} \rightarrow \text{scala } \frac{1}{50}$$

La lunghezza del segmento orientato che rappresenta la forza assegnata sarà pari a

$$300 \text{ cm} \cdot \frac{1}{50} = 6 \text{ cm}$$

Direzione e verso sono fissati dal parametro α .

- 2** Si rappresenti (► FIGURA 3) la forza libera \mathbf{F} avente modulo $F = 80$ kN e direzione $\alpha = 230^\circ$.

Occorre scegliere, anzitutto, una scala delle forze proporzionata alle dimensioni del disegno: per esempio

$$\frac{1 \text{ cm}}{20 \text{ kN}} \quad (\text{► 1})$$

La lunghezza del segmento orientato che rappresenta la forza assegnata sarà pari a $80/20 = 4$ cm. Direzione e verso sono fissati dal parametro α .

- 3** Quale forza è rappresentata dal segmento orientato AB di ► FIGURA 4?

Se il segmento orientato AB misura sul disegno 3,5 cm ed è indicata la scala delle forze

$$\frac{1 \text{ mm}}{120 \text{ daN}}$$

il modulo della forza vale

$$35 \text{ mm} \cdot \frac{120 \text{ daN}}{\text{mm}} = 4200 \text{ daN}$$

La direzione e il verso sono rappresentati dal parametro α , che può essere misurato con un goniometro (in questo caso risulta $\alpha = 0^\circ$).

► **1** In questo caso non sarebbe corretto scrivere *scala* $1/20$, perché il dividendo (1 cm) e il divisore (20 kN) non hanno la stessa unità di misura.

3. Poligono delle forze

Dato un sistema di forze $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_3, \mathbf{F}_4$ (► FIGURA 5a), il vettore libero risultante può essere determinato per via grafica con il metodo dei percorsi, costruendo il **poligono delle forze**. Tale poligono si ottiene disegnando tutti i vettori del siste-

ma in successione *testa-coda*, in qualsiasi ordine e in opportuna scala, a partire da un punto qualsiasi I del piano (punto iniziale), fino ad arrivare al punto finale F (► FIGURA 5b).

Il lato di chiusura del poligono, ossia il segmento orientato IF , rappresenta il vettore libero risultante \mathbf{R} .

Il poligono delle forze, infatti, può essere costruito anche componendo le prime due forze \mathbf{F}_1 e \mathbf{F}_2 , ottenendo il vettore risultante parziale \mathbf{R}_{1-2} . Componendo \mathbf{R}_{1-2} con la forza \mathbf{F}_3 si ottiene \mathbf{R}_{1-2-3} . Infine, componendo quest'ultima con la forza \mathbf{F}_4 si ottiene il vettore risultante complessivo $\mathbf{R}_{1-2-3-4} = \mathbf{R}$. Il poligono delle forze, così costruito, può anche essere chiamato **poligono dei successivi vettori risultanti** (► FIGURA 5c).

Come per la somma algebrica, anche per la somma vettoriale vale la proprietà commutativa: cambiando l'ordine delle forze, il vettore risultante non cambia (► FIGURA 5d).

Il poligono delle forze determina completamente il vettore libero risultante; infatti:

- il modulo si ottiene moltiplicando la lunghezza del segmento IF per il fattore di scala;
- il verso si determina osservando che, per la regola dei percorsi, il vettore è orientato dal punto iniziale I al punto finale F del poligono delle forze;
- la direzione si può ottenere misurando con un goniometro l'angolo formato dal vettore con l'orizzontale.

Quando, come in questo caso, i punti iniziale e finale I e F sono distinti, il poligono delle forze si dice **aperto** e il vettore risultante è diverso da zero. Quando invece i punti iniziale e finale I e F coincidono, il poligono delle forze si dice **chiuso**; in tal caso il vettore risultante è nullo.

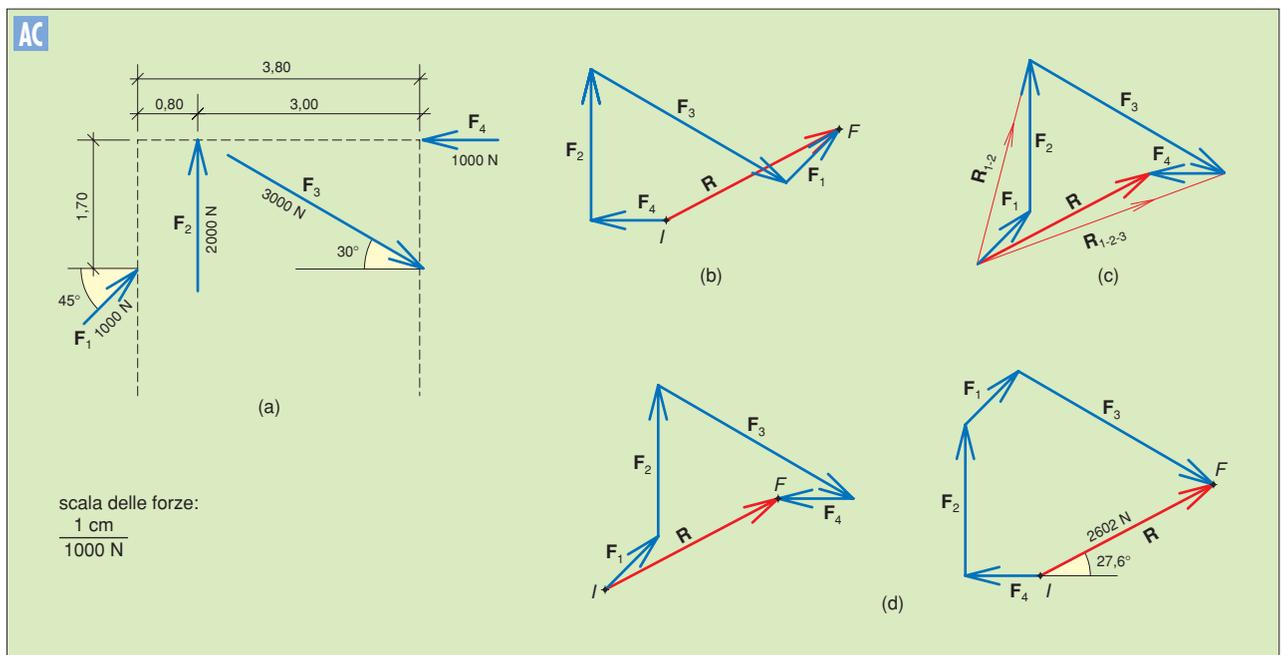


FIGURA 5 (a) Sistema delle forze; (b) poligono delle forze; (c) poligono delle forze costruito come poligono dei successivi risultanti; (d) vale la proprietà commutativa.

4. Poligono delle successive risultanti

Costruito il poligono delle forze, sono ormai noti modulo, verso e direzione della risultante. Resta da determinare la sua retta d'azione.

■ Caso delle forze concorrenti

Se le rette d'azione di tutte le forze concorrono in un punto, la retta d'azione della risultante è determinata perché anch'essa passa per lo stesso punto.

■ Caso delle forze non concorrenti

Se le forze non sono concorrenti, il procedimento più spontaneo per determinare la retta d'azione della risultante è il seguente. Poiché le forze sono a due a due concorrenti, la loro risultante parziale deve passare per il punto comune. Con riferimento al sistema di forze assegnato nel paragrafo precedente, la risultante parziale $\mathbf{R}_{1,2}$ deve passare per il punto 1, comune alle rette d'azione r_1 e r_2 ; la successiva risultante parziale $\mathbf{R}_{1,2,3}$ deve passare per il punto 2, comune alla $\mathbf{R}_{1,2}$ e alla r_3 ; infine, la retta d'azione r della risultante \mathbf{R} dell'intero sistema deve passare per il punto 3, comune alla $\mathbf{R}_{1,2,3}$ e alla r_4 .

Riassumendo, il procedimento è il seguente (► FIGURA 6):

- si determina il punto 1, intersezione delle rette r_1 e r_2 ;
- si traccia dal punto 1 la parallela II al vettore parziale $\mathbf{R}_{1,2}$ che si trova nel poligono dei successivi risultanti;
- si determina il punto 2, intersezione tra la II e la r_3 ;
- si traccia dal punto 2 la retta III, parallela al vettore risultante parziale $\mathbf{R}_{1,2,3}$;
- si determina il punto 3, intersezione tra la III e la r_4 : per il punto 3 passa la retta d'azione r della risultante \mathbf{R} .

Il poligono aperto avente per lati I = r_1 , II, III, IV = r prende il nome di **poligono delle successive risultanti**.

I suoi lati, infatti, rappresentano le rette d'azione delle risultanti parziali di quelle forze del sistema che *precedono* una certa forza: per esempio, il lato II, che precede la forza \mathbf{F}_3 , è la retta d'azione della risultante parziale $\mathbf{R}_{1,2}$, risultante

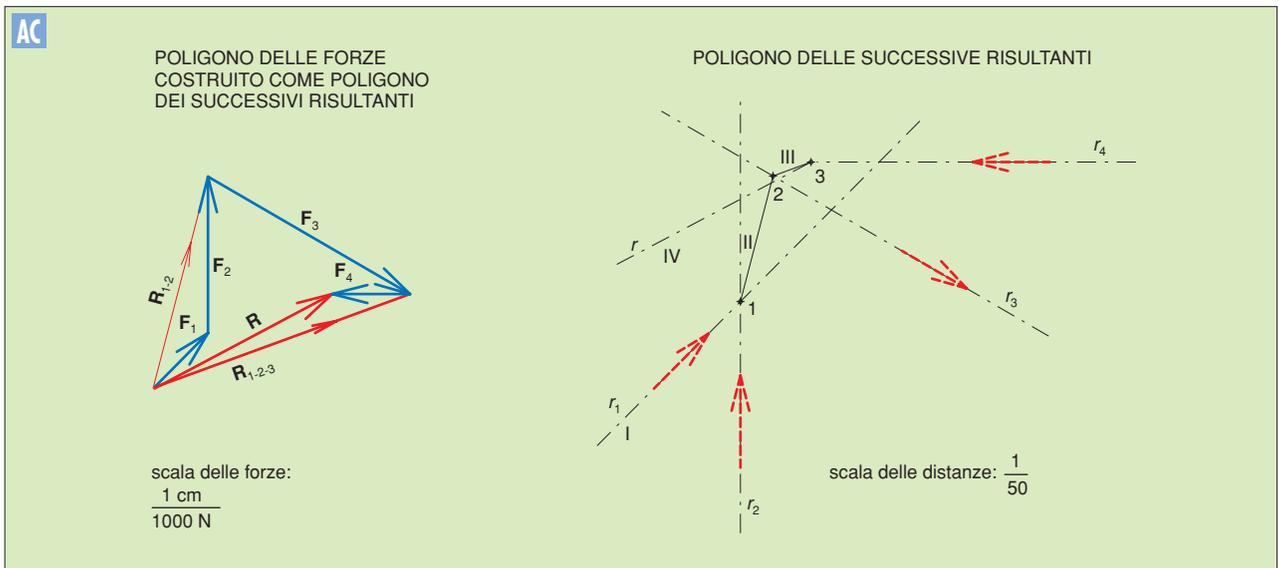


FIGURA 6 Poligono delle successive risultanti.

delle sole forze F_1 e F_2 , precedenti la F_3 . Modulo, direzione e verso di ogni risultante parziale vanno letti nel poligono dei successivi vettori risultanti.

È fondamentale che nel sistema delle forze le posizioni delle rette d'azione delle forze, disegnate nella giusta direzione, siano rappresentate in scala (►2). Si deve, quindi, lavorare con due scale:

- una **scala delle lunghezze**, per disegnare nella giusta posizione le rette d'azione delle forze del sistema;
- una **scala delle forze**, per disegnare il poligono delle forze.

5. Poligono funicolare

Quando, come spesso succede nel disegno manuale, il punto d'incontro di una risultante parziale con la forza seguente esce dal foglio, la costruzione del poligono delle successive risultanti non è eseguibile. Per determinare la retta d'azione della risultante si ricorre quindi, molto più spesso, alla costruzione di un altro poligono, il **poligono funicolare**, più adattabile alle particolari configurazioni dei diversi sistemi di forze (►3).

Riconsiderato il sistema e uno dei suoi poligoni delle forze (►FIGURA 7), è necessario *proiettare* i suoi vertici da un punto P qualsiasi del piano, detto **polo**; si ottengono i segmenti I, II, III, IV, V, detti *proiettanti*. Se n è il numero delle forze del sistema, si hanno $n + 1$ proiettanti (►4).

Partendo da un punto qualsiasi O del piano, si tracci la parallela a I fino a incontrare la retta r_1 : questo è il primo lato del poligono funicolare. Dall'intersezione trovata si mandi la parallela a II, fino a incontrare r_2 ; e così via. La parallela all'ultimo segmento proiettante V è l'ultimo lato del poligono funicolare.

Essendo arbitraria la scelta del polo, si possono costruire infiniti poligoni funicolari, dalle forme più svariate. Tenendo fisso il polo, si possono poi disegnare infiniti poligoni funicolari paralleli tra loro, a seconda della scelta del punto O .

►2 Si noti che non è necessario, invece, rappresentare in scala le forze sulle rispettive rette d'azione.

►3 La forma del poligono funicolare richiama la configurazione di una fune soggetta alle forze del sistema.

►4 Si faccia molta attenzione alla successione dei segmenti proiettanti: se I è il segmento che proietta da P il punto iniziale I , II è il segmento che proietta da P il punto finale del primo vettore considerato (in questo caso F_1), e così via: l'ultimo segmento V proietta da P il punto finale F del poligono delle forze.

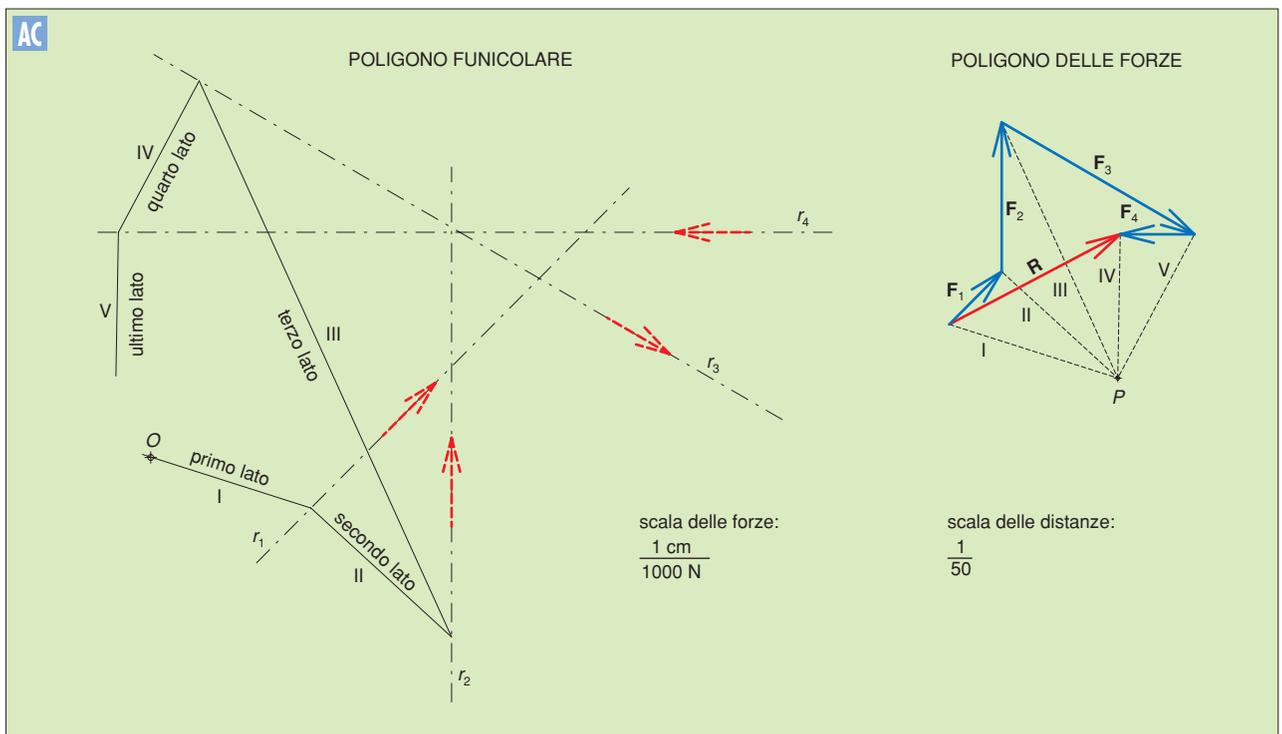


FIGURA 7 Poligono funicolare.

FIGURA 8 La risultante passa per l'intersezione tra il primo e l'ultimo lato del poligono funicolare.

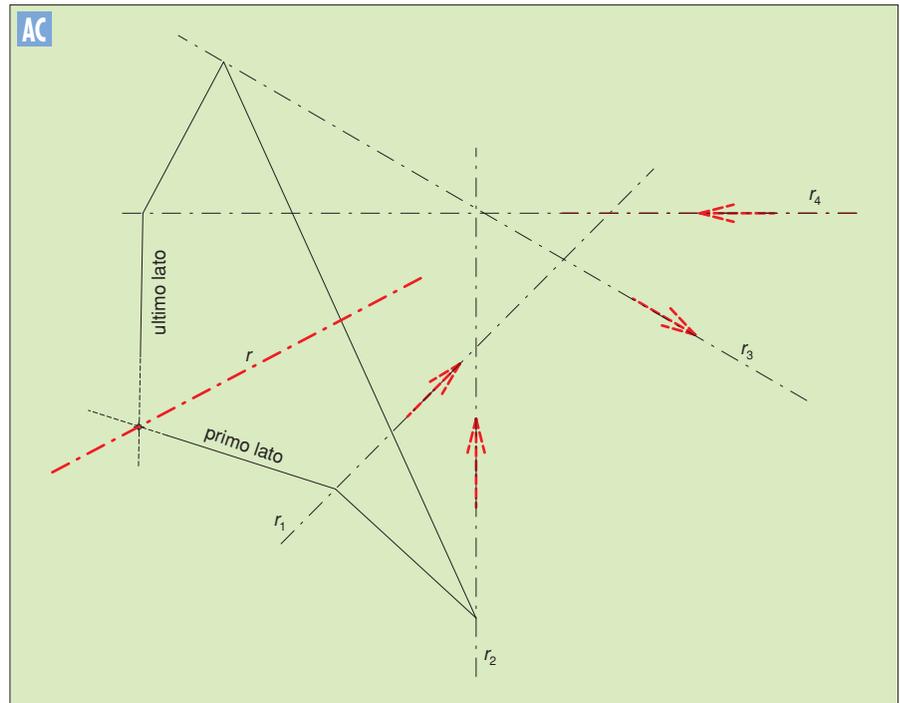
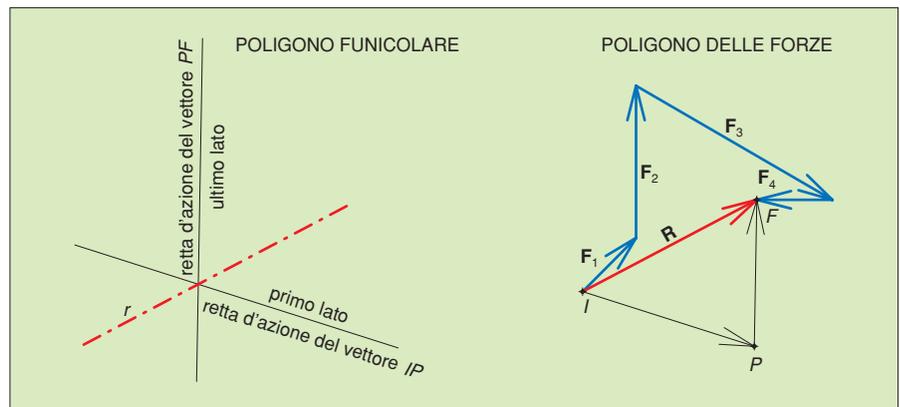


FIGURA 9 I vettori IP e PF equivalgono al sistema assegnato.



La retta d'azione r della risultante passa comunque per il punto intersezione tra il primo e l'ultimo lato del poligono (► FIGURA 8).

Se, infatti, si considerano il primo e l'ultimo segmento proiettante I e V come segmenti orientati IP e PF , essi rappresentano due forze che hanno come somma il vettore risultante del sistema e come rette d'azione il primo e l'ultimo lato del poligono funicolare (► FIGURA 9). E la retta d'azione della risultante di due sole forze passa, come si sa, dal loro punto intersezione.

Si noti la coincidenza dei risultati con l'applicazione del paragrafo 4 dell'unità D2, in cui lo stesso sistema di forze era trattato per via analitica.

6. Sistemi equivalenti

Naturalmente, è possibile stabilire anche per via grafica se il sistema assegnato equivale a una forza, a una coppia, o se è equilibrato.

■ Sistemi equivalenti a una forza

Il poligono funicolare è aperto (il primo e l'ultimo lato non coincidono) solo se è aperto il poligono delle forze, cioè se il risultante è diverso da zero. In questo caso il sistema equivale a una sola forza (la risultante).

In un sistema equivalente a una sola forza sono aperti sia il poligono delle forze sia il poligono funicolare.

Esempi di sistemi equivalenti a una forza sono stati trattati nei paragrafi 4 e 5.

■ Sistemi equivalenti a una coppia

In un sistema equivalente a una coppia:

- il poligono delle forze è chiuso;
- il poligono funicolare è aperto, con primo e ultimo lato paralleli tra loro.

APPLICAZIONE

Dato (► FIGURA 10) il sistema di quattro forze F_1, F_2, F_3, F_4 , si costruisca (in scala opportuna) un poligono delle forze. Essendo coincidenti il punto iniziale I e il punto finale F , il poligono è chiuso: il risultante R è, perciò, nullo. Se da un punto P qualsiasi assunto come polo si proiettano i vertici del poligono delle forze, si ottengono 5 proiettanti I, II, III, IV, V di cui la prima (I) e l'ultima (V) sono coincidenti. Partendo da un punto qualsiasi, si costruisca poi un poligono funicolare che collega le rette d'azione delle forze. Esso risulta aperto e il primo e l'ultimo lato sono paralleli tra loro; la loro distanza, misurata nella scala delle lunghezze, è di 3,49 m.

Dal poligono delle forze si può osservare che il sistema assegnato è equivalente a due vettori IP e PF di uguale modulo (2365 daN) e di verso opposto, le cui rette d'azione (distinte e parallele) sono il primo e l'ultimo lato del poligono funicolare. I due vettori costituiscono una coppia di forze di momento:

$$M = 2365 \cdot 3,49 \cong 8250 \text{ daN} \cdot \text{m}$$

che è sinistrogiro ed equivalente al sistema dato.

Esiste una doppia infinità di coppie equivalenti al sistema assegnato: una per ogni poligono delle forze e una per ogni poligono funicolare, tutte definite dallo stesso momento.

Si noti la concordanza dei risultati con quelli dell'applicazione del paragrafo 2 dell'unità D2, in cui lo stesso sistema di forze era trattato per via analitica.

■ Sistemi equilibrati

In un sistema equilibrato:

- il poligono delle forze è chiuso;
- il poligono funicolare è chiuso, con primo e ultimo lato coincidenti.

APPLICAZIONE

Si consideri il sistema di quattro forze F_1, F_2, F_3, F_4 rappresentato in ► FIGURA 11.

Costruito, in un'opportuna scala delle forze, il poligono delle forze, si nota che questo risulta chiuso, essendo coincidenti il punto iniziale I e il punto finale F . Questo significa che il vettore risultante R è nullo. Delle cinque proiettanti I, II, III, IV, V che si otten-

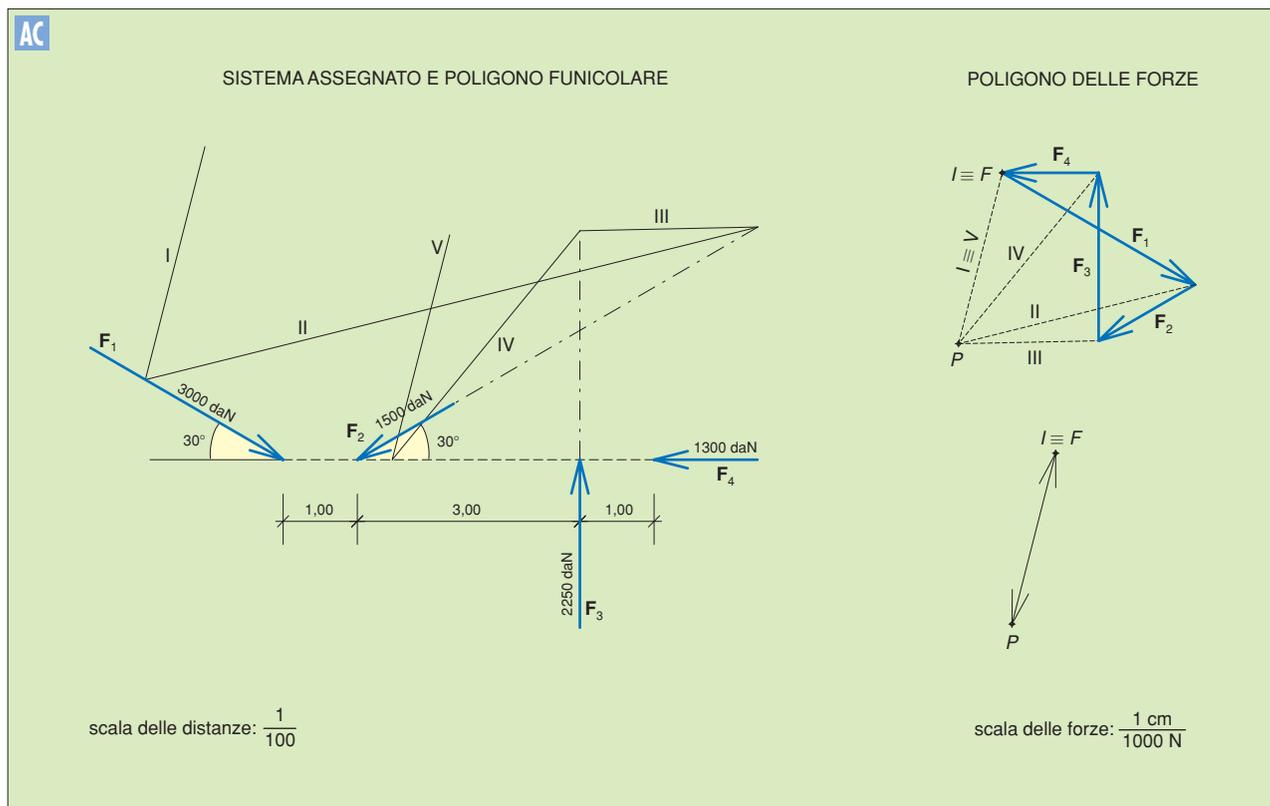


FIGURA 10 Sistema equivalente a una coppia.

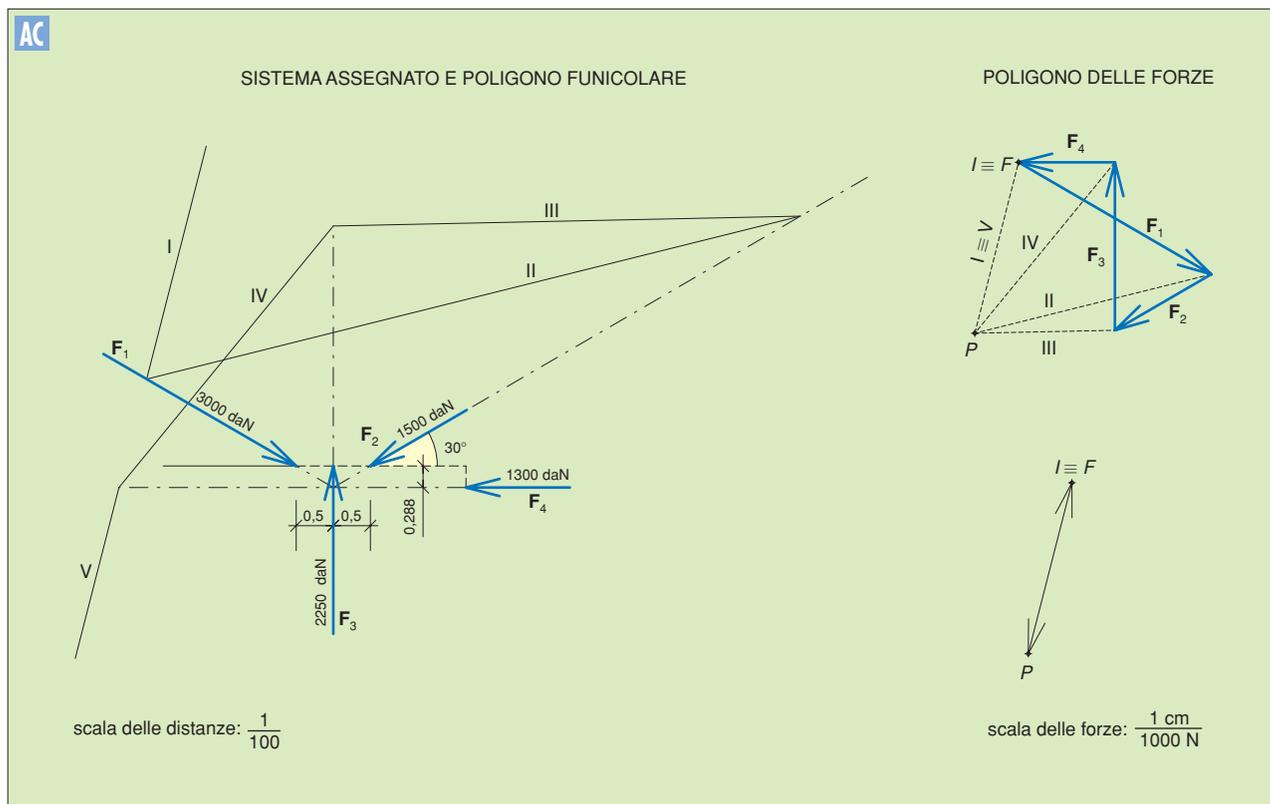


FIGURA 11 Sistema equilibrato.

gono unendo i vertici del poligono con un punto P qualsiasi, la prima (I) e l'ultima (V) sono coincidenti. Qualsiasi poligono funicolare che collega le rette d'azione delle forze risulta chiuso, poiché il primo e l'ultimo lato sono coincidenti.

Osservando il poligono delle forze, si nota che il sistema assegnato equivale ai due vettori IP e PF , di uguale modulo 2365 daN e di verso opposto, le cui rette d'azione sono il primo e l'ultimo lato del poligono funicolare (coincidenti). Poiché i due vettori costituiscono un sistema equilibrato, deve essere equilibrato anche il sistema assegnato, equivalente a quest'ultimo.

I risultati ottenuti concordano con quelli dell'applicazione del paragrafo 3 dell'unità D2, dove lo stesso sistema di forze era trattato per via analitica.

Autovalutazione

A. Verifica delle conoscenze

QUESITI VERO/FALSO

- | | V | F |
|---|--------------------------|--------------------------|
| 1 Un insieme di pesi è rappresentato da un sistema di vettori verticali rivolti verso il basso | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2 La spinta dell'acqua su una parete è rappresentata da un sistema di forze orizzontali distribuite, orizzontali e rivolte verso la parete | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3 La risoluzione grafica manuale è più laboriosa di quella analitica | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4 Con l'uso del CAD la risoluzione grafica è comunque meno precisa della risoluzione analitica | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5 Nel poligono delle forze i vettori possono essere disposti in qualsiasi ordine | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6 Nel poligono delle forze i vettori devono essere disposti <i>testa-coda</i> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7 I lati del poligono delle forze sono le proiettanti | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 8 Per un dato sistema di forze si può costruire un solo poligono funicolare | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 9 I lati del poligono delle forze sono paralleli alle forze | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 10 I lati del poligono funicolare sono paralleli alle proiettanti | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

QUESITI A RISPOSTA SINGOLA

(Una sola risposta è giusta)

- 11** Se il poligono delle forze è chiuso, sicuramente il sistema:
- a è equilibrato
 - b equivale a una coppia
 - c equivale a una forza
 - d non equivale a una forza
- 12** Per determinare la risultante di un sistema di forze concorrenti
- a basta costruire un poligono delle forze
 - b basta costruire un poligono funicolare
 - c sono necessari entrambi i poligoni
 - d non serve nessun poligono
- 13** Per determinare la risultante di un sistema simmetrico
- a basta costruire un poligono delle forze
 - b basta costruire un poligono funicolare
 - c sono necessari entrambi i poligoni
 - d non serve nessun poligono

QUESITI A RISPOSTA MULTIPLA

(Più di una risposta può essere giusta)

- 14** Il poligono funicolare
- a si chiama così perché assume la configurazione di una fune soggetta al sistema delle forze assegnate
 - b è un poligono sempre chiuso
 - c è un poligono sempre aperto
 - d può essere aperto o chiuso

- 15** Un sistema è equilibrato se
- a) sono nulli risultante e momento risultante
 - b) il poligono delle forze è chiuso
 - c) il poligono funicolare è chiuso
 - d) sono chiusi sia il poligono delle forze sia il poligono funicolare
- 16** Un sistema equivale a una coppia se
- a) è nulla la risultante, ma non il momento risultante
 - b) il poligono delle forze è chiuso
 - c) il poligono delle forze è chiuso e il poligono funicolare è aperto
 - d) il poligono funicolare è aperto

QUESITI A RISPOSTA APERTA

- 17** Spiega perché con l'uso del CAD la risoluzione grafica dei sistemi di forze è rapida e precisa (► par. 1).
- 18** Come si rappresenta graficamente un vettore (► par. 2)?
- 19** In un sistema equivalente a una forza, a una coppia o equilibrato, come devono essere il poligono delle forze e il poligono funicolare (chiusi o aperti) (► par. 6)?

B. Verifica delle competenze

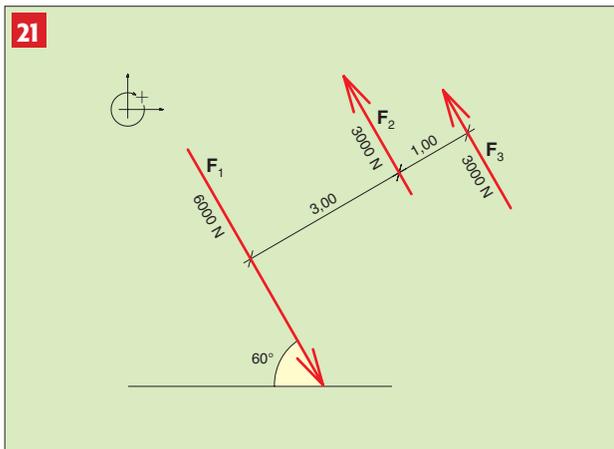
● **Esercizi e problemi**

- 20** Assunto un sistema cartesiano di origine *O*, rappresentare graficamente in scala

$$\frac{1 \text{ cm}}{500 \text{ daN}}$$

le forze definite dai seguenti parametri analitici:

- a) $X = + 1300 \text{ daN}; Y = + 22 \text{ kN}$



- b) $X = + 15000 \text{ N}; Y = - 15 \text{ kN}$
- c) $X = - 1300 \text{ daN}; Y = - 2200 \text{ daN}; M(O) = - 3000 \text{ daN} \cdot \text{m}$
- d) $X = - 15 \text{ kN}; Y = + 15000 \text{ N}; M(O) = - 30000 \text{ daN} \cdot \text{cm}$

- 21** Dimostrare che il sistema assegnato equivale a una coppia e determinarne il momento.

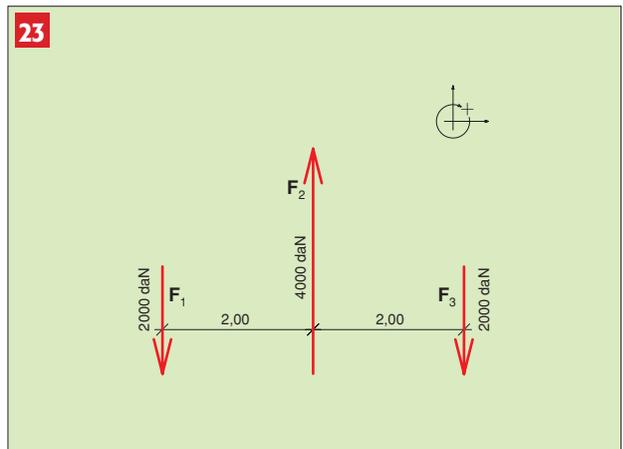
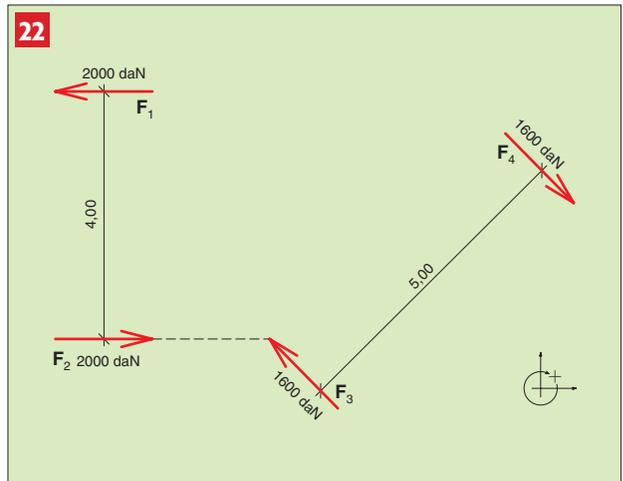
- 22** Dimostrare che il sistema assegnato è un sistema equilibrato (si noti che il sistema è formato da due coppie).

- 23** Dimostrare che il sistema assegnato è un sistema equilibrato (si noti che tutte le forze sono parallele e che il sistema è simmetrico).

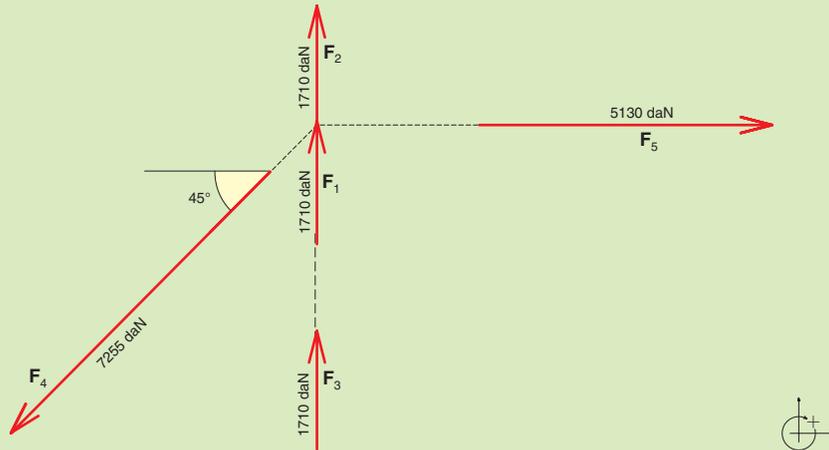
- 24** Dimostrare che il sistema assegnato è un sistema equilibrato (si noti che tutte le forze sono concorrenti).

- 25** Risolvere graficamente gli esercizi 20, 21 e 22 assegnati nell'unità D2 (Autovalutazione).

- 26**
- 27**



24

**Risultati dei quesiti vero/falso**

1V, 2V, 3V, 4F, 5V, 6V, 7F, 8F, 9V, 10V.

Risultati dei quesiti a risposta singola

11d, 12a, 13a.

Risultati dei quesiti a risposta multipla

14ad, 15ad, 16ac.

Risultati della verifica delle competenze**20** a) $F = 2555 \text{ daN}$; $\alpha = 59,4^\circ$ b) $F = 2121 \text{ daN}$; $\alpha = 315^\circ$ c) $F = 2555 \text{ daN}$; $\alpha = 239,4^\circ$ d) $F = 2121 \text{ daN}$; $\alpha = 225^\circ$; $d = 14,14 \text{ cm}$ **21** Il poligono delle forze è chiuso; il poligono funicolare è aperto, con primo e ultimo lati paralleli tra loro ($M = -21\,000 \text{ N} \cdot \text{m}$)**22 23 24** Il poligono delle forze e il poligono funicolare sono chiusi**25 26 27** Si confrontino i risultati con quelli determinati per via analitica nell'Autovalutazione dell'unità D2.