

CORSO DI CURVE E SUPERFICI 2007-08

1. PIANO TANGENTE AD UNA SUPERFICE

1.1. **Definizione di piano tangente.** La nozione di piano tangente ad una superficie in un punto può essere introdotta con argomenti analoghi a quelli usati per la retta tangente ad una curva.

Definizione 1.1. *Data una superficie S ed un suo punto P diremo che un piano τ passante per P è il piano tangente ad S se, **comunque** fissato il formato $L \times L \times L$ della copia, esiste un ingrandimento di un fattore N_0 abbastanza grande per cui, in ogni copia $L \times L \times L$, centrata in P , realizzata con fattore di ingrandimento **almeno** N_0 , la superficie e il piano τ sono indistinguibili.*

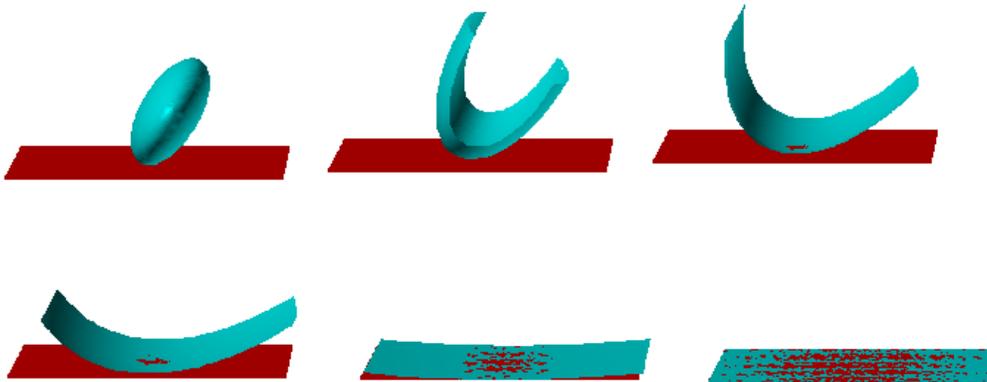


FIGURE 1. Aprendo il file è possibile modificare il punto di tangenza

In Fig. 1 vediamo una serie di immagini ingrandite, con fattore sempre maggiore, fino a quando superficie e piano non coincidono. Una conseguenza importante di questa definizione è che:

Proposizione 1.2. *Sia τ il piano tangente ad una superficie S in un suo punto P . Se C è una curva che giace sulla superficie S e passa per P e possiede la tangente in P , allora tale tangente appartiene al piano τ .*

In altri termini: le rette, tangenti - in un punto di una superficie - alle curve della superficie che passano per quel punto, giacciono tutte su un piano: il piano tangente alla superficie in quel punto.

Dimostrazione. Fissiamo un formato $L \times L \times L$ e prendiamo una copia della superficie con centro in P e ingrandimento molto grande. Allora la porzione di superficie S visibile in fotografia apparirà coincidente con il piano τ . Dunque tutte le curve della

superficie che passano per P appariranno come curve del piano τ . Vale a dire presa una curva C che sta sulla superficie e passa per P , la porzione di curva contenuta nell'immagine apparirà giacente sul piano τ . Pertanto anche la tangente a questa curva apparirà essere sul piano τ . \square

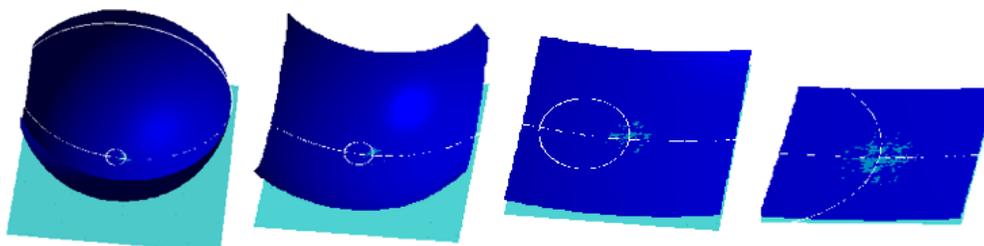


FIGURE 2. Apri il file

In Fig. 2 si vede la sequenza di ingrandimenti che porta ad identificare una porzione di sfera al suo piano tangente. Si vedono anche due curve sulla sfera e si nota come, a seconda della curva considerata, sia necessario un diverso fattore d'ingrandimento per ridurre la curva alla sua retta tangente. Si potrebbe dimostrare (ma è intuitivo) che il fattore d'ingrandimento necessario dipende dalla curvatura k della curva nel punto.

Esempio 1.3. La superficie \mathcal{S} in Fig. 3a nel punto P evidenziato non possiede



FIGURE 3. a - b - c

piano tangente o meglio ne possiede 2 (vedi Fig. 3b). Pertanto diremo che P è un *punto singolare* di \mathcal{S} . Tuttavia possiamo suddividere una porzione di superficie vicina a P in due pezzi (vedi Fig. 3c) in modo tale che in ciascuno di questi due pezzi ogni punto abbia un unico piano tangente.

Senza esaminare troppo in dettaglio la questione dei punti singolari vogliamo però mostrare degli esempi che presentano problemi maggiori che non possono essere così facilmente superati. Per esporre questi esempi dobbiamo introdurre le superfici di rotazione.

2. SUPERFICI DI ROTAZIONE

Definizione 2.1. Una superficie di rotazione è la superficie generata dalla rotazione di una curva \mathcal{C} (eventualmente gobba¹) attorno ad una retta a , detta asse di rotazione.

Precisamente, per ogni punto P di \mathcal{C} , consideriamo la circonferenza passante per P che giace sul piano perpendicolare all'asse a e ha centro sull'asse. L'insieme di queste circonferenze forma la superficie \mathcal{S} .

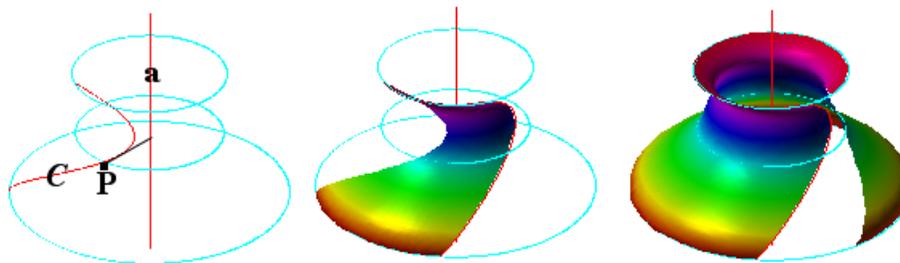


FIGURE 4. Apri il filmato

Esempio 2.2. In Fig. 4 a sinistra vediamo una curva \mathcal{C} , l'asse di rotazione a e alcune delle circonferenze lungo cui ruotano i punti di \mathcal{C} . Nelle altre immagini vediamo il processo con cui viene generata la superficie.

In Fig. 5b sono evidenziate le circonferenze descritte dai punti della generatrice

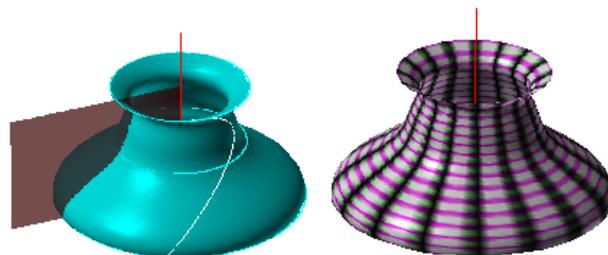


FIGURE 5. a - b

intorno all'asse e le curve che si ottengono tagliando la superficie con un semipiano uscente dall'asse (cfr. Fig. 5a). A proposito di queste curve possiamo dire qualcosa che vale per una qualunque superficie di rotazione.

Osservazione 2.3. Sia \mathcal{S} una superficie di rotazione.

(i) Ogni piano ortogonale all'asse taglia sulla superficie una circonferenza, detta parallelo.

(ii) Ogni semipiano uscente dall'asse taglia sulla superficie una curva detta meridiano (vedi Fig. 5a). I meridiani sono tutti uguali tra loro e la rotazione attorno all'asse di un qualunque meridiano genera la stessa superficie \mathcal{S} . In particolare possiamo sempre vedere una superficie di rotazione come generata da una curva piana.

¹Cioè non piana.

Esempio 2.4. Si confronti la curva gobba \mathcal{C} che genera la superficie di Fig. 4 con un meridiano della stessa.

Per stabilire un'importante proprietà di meridiani e paralleli, diamo la seguente

Definizione 2.5. *Date due curve \mathcal{C} e \mathcal{D} nello spazio che si tagliano in un punto P , l'angolo da esse formato in P è, per definizione, l'angolo formato dalle rette tangenti².*

Proposizione 2.6. *Meridiani e paralleli di una superficie di rotazione sono tra loro perpendicolari³.*

Dimostrazione. Sia P un punto di una superficie di rotazione \mathcal{S} (cfr. Fig. 6). Il

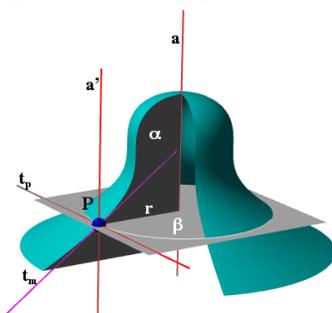


FIGURE 6

parallelo passante per P giace su un piano β ortogonale all'asse di rotazione a e dunque, condotta per P la parallela a' all'asse, risulta anch'essa perpendicolare a questo piano. Cioè a' è perpendicolare a tutte le rette di questo piano che passano per P , in particolare è perpendicolare alla tangente t_p al parallelo.

D'altro canto, quest'ultima è perpendicolare al raggio r (del parallelo) passante per P . Dunque t_p è perpendicolare ad a' e ad r in P e dunque a tutte le rette del piano α che contiene a' ed r . Ma α è il piano che contiene l'asse a di rotazione e il punto P , dunque α contiene anche il meridiano e la sua tangente t_m .

Pertanto t_p è perpendicolare a t_m . □

Esercizio 2.7. *Dimostrare la Proposizione 2.6.*

Osservazione 2.8. *Data una superficie di rotazione \mathcal{S} , i piani del fascio che ha per asse l'asse di rotazione sono piani di simmetria per \mathcal{S} e l'asse di rotazione è asse di simmetria.*

Ciò significa che se α è un piano che contiene l'asse a di rotazione e $P \in \mathcal{S}$, allora il simmetrico P' di P rispetto ad α appartiene ad \mathcal{S} . Inoltre anche il simmetrico P'' di P rispetto all'asse appartiene alla superficie \mathcal{S} (vedi Fig. 7)

²Stiamo supponendo che entrambe le curve posseggano tangente in P .

³I paralleli, che sono circonferenze, hanno tangente in ogni punto. Qui stiamo supponendo che anche il meridiano, che può essere una qualunque curva piana, abbia tangente in ogni punto.

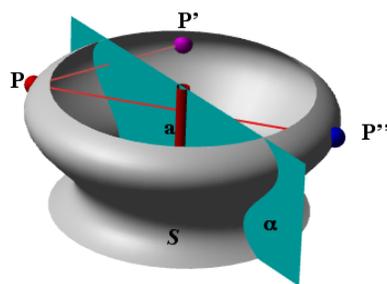


FIGURE 7

2.1. Tangente ad una superficie di rotazione. In questo paragrafo vogliamo studiare l'esistenza del piano tangente in un punto di una superficie di rotazione e, quando esso non è ben definito, che cosa esattamente può succedere.

Esempio 2.9. Consideriamo la superficie \mathcal{S} generata dalla rotazione del meridiano

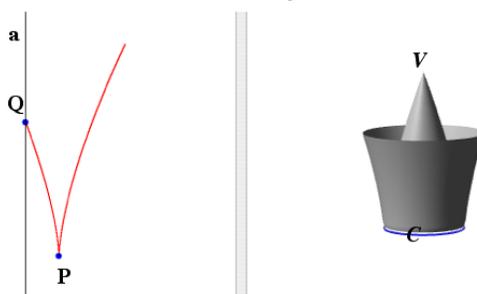


FIGURE 8. a - b

in Fig. 8a. Si tratta di un arco di cuspidi con vertice in P e che tocca l'asse di rotazione in Q . Il vertice P ruotando genera il parallelo \mathcal{C} i cui punti sono tutti singolari (i.e. privi di piano tangente) per la superficie \mathcal{S} . Gli altri punti della cuspidi - diversi da P e da Q - generano punti di \mathcal{S} in cui il piano tangente è ben definito. Problemi invece insorgono nel punto Q in cui la curva generatrice taglia l'asse di rotazione; al punto Q corrisponde su \mathcal{S} il punto V che è singolare.

La situazione esemplificata rispecchia un fatto generale:

Proposizione 2.10. *Sia \mathcal{S} una superficie di rotazione il cui meridiano \mathcal{C} non ha punti singolari⁴. Allora in tutti i punti P di \mathcal{S} , tranne al più quelli in comune con l'asse di rotazione, esiste il piano tangente.*

Precisamente il piano tangente è il piano che contiene le rette t_p e t_m tangenti in P al parallelo e al meridiano che passano per P .

Osservazione 2.11. È opportuno rimarcare il fatto che nella Proposizione 2.10 si parla di meridiano e non di una superficie generata dalla rotazione di una curva. E con ragione, perché ruotando una curva priva di punti singolari si possono generare delle singolarità fuori dall'asse di rotazione. Ad esempio si consideri la Fig. 9, i punti P e Q dell'arco di sinusoidi generano lo stesso parallelo \mathcal{P} tutto costituito di

⁴Vale a dire in ogni punto di \mathcal{C} è ben definita la retta tangente

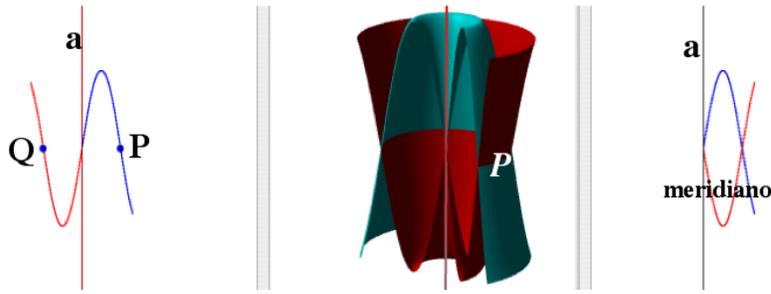


FIGURE 9

punti singolari per la superficie (sono del tipo considerato nell'Esempio 1.3 con due piani tangenti), benché l'arco di sinusoidi non contenga punti singolari. Il fatto è che il meridiano (vedi Fig. 9c) ha un punto singolare!

Esercizio 2.12. *Giustificare l'ultima affermazione della Proposizione 2.10.*

Soluzione. La Proposizione 1.2 afferma che *le rette, tangenti - in un punto P di una superficie \mathcal{S} - alle curve di \mathcal{S} che passano per P , giacciono tutte su un piano: il piano τ tangente alla superficie in quel punto.*

Nel caso particolare di una superficie \mathcal{S} di rotazione, per un punto P di \mathcal{S} che non sta sull'asse, passano due curve della superficie: un parallelo \mathcal{P} ed un meridiano \mathcal{M} . Dunque le tangenti t_p, t_m in P a queste due curve stanno sul piano tangente τ . \square

Resta da studiare cosa accade per i punti in cui la superficie di rotazione taglia l'asse di rotazione:

Proposizione 2.13. *Sia \mathcal{S} la superficie di rotazione generata da una curva piana C , complanare all'asse di rotazione a , che taglia l'asse in un punto P . Supponiamo che in P esista la retta tangente t alla curva.*

(i) *Se l'asse a è tangente alla curva C nel punto P (i.e. $a = t$) allora P è un punto singolare e il piano tangente alla superficie nel punto P degenera ad una retta, l'asse a stesso (nel senso che, ingrandendo - con centro in P - di un fattore sufficientemente grande, superficie e asse risultano indistinguibili).*

(ii) *Se l'asse a non è né tangente né perpendicolare alla curva C in P , allora il piano tangente ad \mathcal{S} in P degenera nel cono generato dalla rotazione della retta t attorno ad a (nel senso che, ingrandendo - con centro in P - di un fattore sufficientemente grande, superficie e cono risultano indistinguibili).*

(iii) *Se l'asse a è perpendicolare alla curva C in P , e, vicino a P , C è simmetrica rispetto all'asse, allora esiste il piano tangente ad \mathcal{S} in P , è il piano perpendicolare all'asse di rotazione.*

(iv) *Se l'asse a è perpendicolare alla curva C in P , ma, vicino a P , C non è simmetrica rispetto all'asse, allora P è un punto singolare, intersezioni di due fogli di superficie che hanno entrambi lo stesso piano tangente, il piano per P perpendicolare all'asse di rotazione.*

Non diamo una dimostrazione di questa Proposizione, ma nei seguenti esercizi esemplifichiamo i diversi casi.

Esercizio 2.14. Si consideri la superficie \mathcal{S} ottenuta ruotando una circonferenza \mathcal{C} attorno ad una retta a ad essa complanare, distinguendo i seguenti casi: (i) la retta è esterna, (ii) la retta è tangente, (iii) la retta è secante, ma non passa per il centro, (iv) la retta passa per il centro della circonferenza.

Si faccia uno schizzo della superficie nei diversi casi, si individuino i punti singolari e si descriva in questi punti il comportamento tangenziale di \mathcal{S} .

Soluzione. (i) La superficie \mathcal{S} è a forma di ciambella e si chiama toro (vedi Fig. 10). Poiché la circonferenza non interseca l'asse, per la Proposizione 2.10, \mathcal{S} è priva di

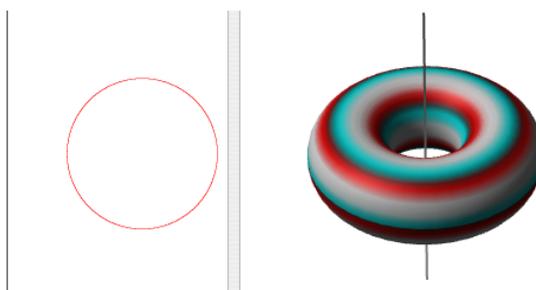


FIGURE 10

punti singolari e in ogni suo punto il piano tangente è ben definito.

(ii) Come si vede dalla Fig. 11b la superficie \mathcal{S} è una specie di toro senza buco

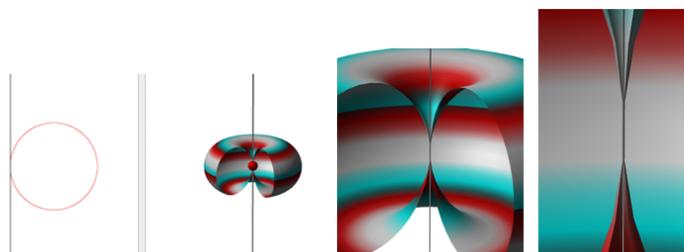


FIGURE 11. a - b - c - d. Aprendo il file è possibile ingrandire l'immagine centrale e vedere la retta *tangente*.

(in figura, per maggior chiarezza, si è trascurato di disegnare uno spicchio della superficie). C'è un unico punto singolare che corrisponde al punto di tangenza tra circonferenza \mathcal{C} e asse a . Ingrandendo molto la superficie \mathcal{S} con centro in P si ottiene (vedi Fig. 11c-d) una retta (precisamente l'asse di rotazione) e non un piano tangente (esattamente come prevede la Proposizione 2.13(i)).

(iii) Come si vede dalla Fig. 12 nel caso che l'asse sia secante (ma non passi per il centro) si ottiene una superficie con due involucri che si toccano nei punti P e Q che sono singolari. Ingrandendo molto la superficie con centro in P o in Q si ottiene un cono (così come prevede la Proposizione 2.13(ii)).

Naturalmente l'apertura del cono dipende dalla distanza dell'asse dal centro della circonferenza. Tale apertura è tanto più grande quanto più l'asse è vicino al centro della circonferenza (vedi Fig. 13)

(iv) Infine Fig. 14 se l'asse passa per il centro della circonferenza la superficie di rotazione è una sfera e non ci sono punti singolari e il piano tangente è perpendicolare all'asse (così come prevede la Proposizione 2.13(iii)). \square

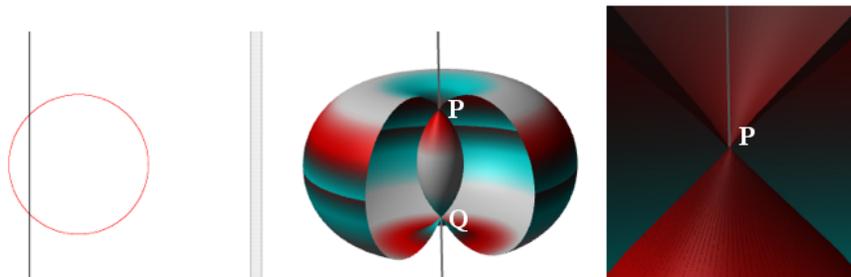


FIGURE 12. Aprendo il file è possibile ingrandire l'immagine centrale e vedere il cono *tangente*.

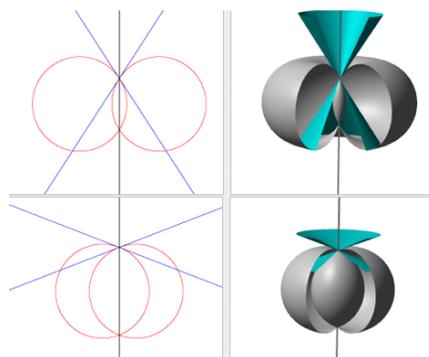


FIGURE 13. Apri il file per vedere l'asse avvicinarsi al centro e il cono aprirsi.

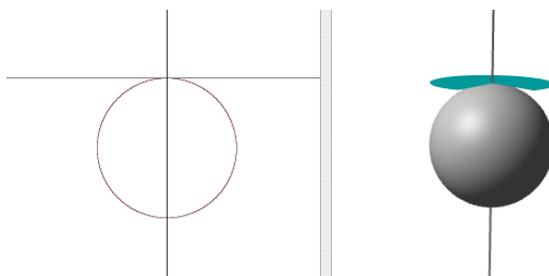
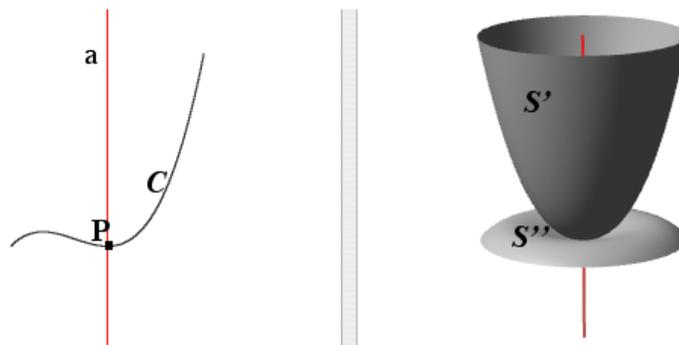


FIGURE 14

Esercizio 2.15. Sia \mathcal{S} la superficie ottenuta ruotando la curva \mathcal{C} in Fig. 15a attorno all'asse a . Si faccia uno schizzo della superficie \mathcal{S} , si individuino gli eventuali punti singolari e si descriva in questi punti il comportamento tangenziale di \mathcal{S} .

Soluzione. In Fig. 15b un'immagine della superficie \mathcal{S} . La curva è perpendicolare all'asse in P , ma non è simmetrica rispetto ad essa, quindi - come prevede la Proposizione 2.13(iv) - la suoperficie vicino a P è composta di due fogli \mathcal{S}' e \mathcal{S}'' che hanno entrambi lo stesso piano tangente in P : il piano perpendicolare all'asse. \square

Esercizio 2.16. Sia \mathcal{S} la superficie di rotazione generata da una curva piana \mathcal{C} , complanare all'asse di rotazione a , che taglia l'asse in un punto P . Supponiamo che in P esista la retta tangente t alla curva. Descrivere i diversi casi possibili e il comportamento tangenziale della superficie \mathcal{S} in P .



9

FIGURE 15. a - b

Suggerimento. Si tratta di riportare l'enunciato della Proposizione 2.10. Per ricordarselo basta tenere presente gli esempi contenuti nell'Esercizio 2.14 e l'esempio della “tazzina con piattino” dell'Esercizio 2.15.

2.2. Equazione cartesiana di una superficie di rotazione.

Proposizione 2.17. *L'equazione cartesiana della superficie S , generata dalla rotazione di una curva C attorno alla retta a , si può scrivere utilizzando la seguente procedura.*

(i) *Si prede un sistema di coordinate cartesiane ortogonali che ha come asse delle z l'asse a di rotazione.*

(ii) *Si scrivono le equazioni*

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases}$$

del moto di un punto $P(t)$ che descrive la curva C .

(iii) *Il punto $P(t) = (x(t), y(t), z(t))$ ha distanza dall'asse a pari a*

$$R(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}.$$

Il parallelo che passa per $P(t)$ è una circonferenza che giace sul piano $z = z(t)$, ha centro sull'asse a nel punto $(0, 0, z(t))$ e raggio $R(t)$; dunque ha equazione

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R(t)^2 \\ z = z(t) \end{cases}$$

(iv) *Si elimina il parametro t in quest'ultima equazione e si ottiene l'equazione cartesiana di S .*

Esercizio 2.18. *Scrivere l'equazione cartesiana della superficie S generata dalla rotazione di una parabola attorno al proprio asse (questa superficie si chiama paraboloidi di rotazione).*

Soluzione. Seguiamo la procedura descritta nella Proposizione 2.17.

(i) Prendiamo come asse delle z l'asse di rotazione e, per semplificare, prendiamo gli altri assi in modo che la parabola abbia vertice nell'origine, concavità rivolta verso le z positive e giaccia sul piano xz (vedi Fig. 16a).

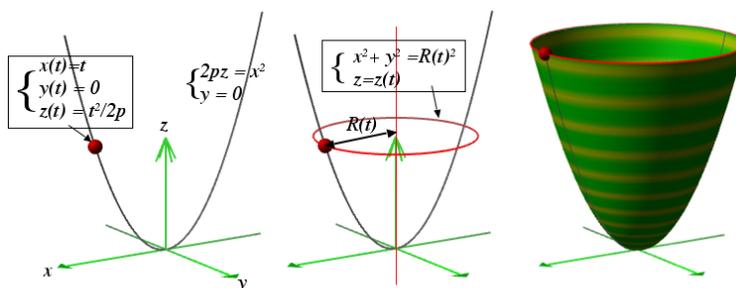


FIGURE 16. a - b - c

(ii) Allora l'equazione nel piano xz della parabola è della forma $2pz = x^2$ (cfr. Corso di geometria, cap. III, Proposizione 4.1) e le equazioni del moto di un punto che percorre la parabola saranno (Fig. 16b)

$$\begin{cases} x(t) = t \\ y(t) = 0 \\ z(t) = t^2/2p \end{cases} ;$$

(possiamo supporre $t > 0$, perché basta ruotare metà parabola).

(iii) La distanza del punto $P(t)$ dall'asse è

$$R(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2} = \sqrt{t^2 + 0^2} = |t| = t.$$

Dunque il parallelo che passa per $P(t)$ ha equazione (Fig. 16b)

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R(t)^2 \\ z = z(t) \end{cases} .$$

Vale a dire

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = t^2 \\ z = t^2/2p \end{cases} .$$

(iv) Eliminiamo il parametro t da quest'ultima equazione. Ricaviamo:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = t^2 \\ t^2 = 2pz \end{cases}$$

e quindi resta

$$x^2 + y^2 = 2pz$$

che è l'equazione della superficie \mathcal{S} (cfr. Fig. 16c). \square

3. TRASFORMAZIONI AFFINI

Non possiamo in questa sede trattare l'argomento con la dovuta accuratezza, ci limitiamo a un'esposizione sommaria.

3.1. Definizione e primi esempi (isometrie).

Definizione 3.1. Una trasformazione affine del piano è un'applicazione biunivoca $\alpha \xrightarrow{F} \beta$ di un piano α in un piano β che trasforma rette in rette. Una trasformazione affine dello spazio è un'applicazione biunivoca F dello spazio in sè che trasforma rette in rette.

Vediamo alcuni esempi di trasformazioni affini. Innanzi tutto consideriamo i *moti rigidi*, che consistono nel movimento di tutto il piano come se fosse un foglio rigido (ad es. di compensato) o di tutto lo spazio come se fosse un blocco rigido (ad es. un pezzo di pietra). Ci sono due esempi fondamentali di moti rigidi:

a) La *rotazione* del piano attorno ad un punto ovvero la rotazione dello spazio attorno ad una retta.

b) Con il termine *traslazione* si intende la trasformazione che sottopone tutti i punti del piano (o dello spazio) ad un medesimo spostamento. In altri termini, fissato un vettore \vec{v} , consideriamo l'applicazione $T_{\vec{v}}$ del piano (dello spazio) in se stesso definita da

$$T_{\vec{v}}(P) = P + \vec{v}.$$

In Fig. 17a si vede l'effetto di una traslazione su un triangolo.

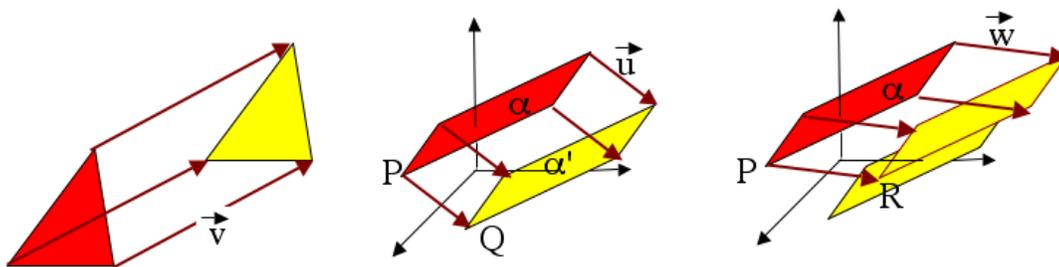


FIGURE 17. a - b - c

Come detto questi due esempi di moti rigidi sono fondamentali perché è possibile provare che

tutti i moti rigidi del piano (dello spazio) si ottengono componendo rotazioni intorno ad un punto (intorno ad un asse) e traslazioni.

Esercizio 3.2. *Mostrare che dati due piani paralleli, esistono infinite traslazioni che mandano il primo nel secondo piano.*

Soluzione. In Fig. 17b si vede l'effetto della traslazione $T_{\vec{u}}$ su un certo piano α . In particolare P viene mandato in Q e dunque $Q = T_{\vec{u}}(P) = P + \vec{u}$, pertanto

$$\vec{u} = Q - P.$$

Il piano α viene così mandato nel piano α' .

Se, invece di Q , prendo un altro punto R del piano α' e considero il vettore

$$\vec{w} := R - P$$

ottengo, come mostra la Fig. 17c, che la traslazione $T_{\vec{w}}$ manda il piano α ancora nel piano α' (i due parallelogrammi gialli in Fig. 17c sono complanari).

La conclusione è che

dati due piani paralleli α, α' e comunque scelti un punto P di α e un punto Q di α' , la traslazione $T_{\vec{v}}$, dove $\vec{v} = Q - P$, manda il piano α nel piano α' .

□

Lo stesso discorso vale per le rette:

date due rette parallele r, r' e comunque scelti un punto P di r e un punto Q di r' , la traslazione $T_{\vec{v}}$, dove $\vec{v} = Q - P$, manda la retta r nella retta r' .

Altri esempi importanti di trasformazioni affini sono date dalle *riflessioni*: la riflessione del piano rispetto ad una retta e la riflessione dello spazio rispetto ad un piano. Precisamente, fissata una retta r del piano, la riflessione rispetto ad r è la trasformazione che manda ciascun punto P del piano nel suo simmetrico P' rispetto alla retta r . Fissato un piano α nello spazio, la riflessione rispetto ad α è la trasformazione che manda ciascun punto P dello spazio nel suo simmetrico P' rispetto al piano α .

Tutte queste applicazioni (rotazioni, traslazioni, riflessioni) sono trasformazioni affini, infatti è evidente che mandano rette in rette e inoltre sono tutte biunivoche. Per verificare quest'ultimo aspetto basta osservare che posseggono un'inversa: l'inversa di una rotazione in senso antiorario di un angolo θ è la rotazione (intorno allo stesso punto o asse) in senso orario dello stesso angolo; l'inversa della traslazione $T_{\vec{v}}$ è $T_{-\vec{v}}$; ogni riflessione è l'inversa di se stessa, perchè se P' è il simmetrico di P rispetto alla retta r (rispetto al piano α), allora P è il simmetrico di P' .

Mentre i moti rigidi trasformano ogni figura in una figura uguale, ma diversamente dislocata nel piano (o nello spazio), una riflessione del piano trasforma la suola della scarpa destra nella suola di una scarpa sinistra e una riflessione nello spazio trasforma la mano destra nella mano sinistra.

Tuttavia tutte queste trasformazioni non mutano la distanza tra due punti e perciò si chiamano *isometrie*. Si potrebbe dimostrare che

tutte le isometrie del piano (dello spazio) si ottengono componendo rotazioni, traslazioni e riflessioni.

Esercizio 3.3. *Che cos'è un moto rigido?*

(Suggerimento di soluzione.) Dare la definizione di moto rigido, dare esempi (rotazioni e traslazioni) e concludere dicendo che ogni moto rigido si può descrivere come composizione di ... □

Esercizio 3.4. *Che cos'è un'isometria?*

Soluzione. Un'isometria tra piani (risp. dello spazio) è una trasformazione $\alpha \xrightarrow{F} \beta$ tra due piani (risp. una trasformazione dello spazio in sè) che non altera la distanza tra due punti, vale a dire presi due punti P e Q qualsiasi, vale

$$\|F(P) - F(Q)\| = \|P - Q\|.$$

I moti rigidi e le riflessioni sono isometrie. Ogni isometria si ottiene come composizione di moti rigidi e riflessioni. □

3.2. **Altri esempi, più generali, di trasformazioni affini.** Ora consideriamo un altro tipo di trasformazione affine che non è un'isometria⁵.

Definizione 3.5. *Un cambiamento di scala in direzione di tre assi ortogonali è una mappa della forma*

$$(3.1) \quad \begin{cases} x' = k_1x \\ y' = k_2y \\ z' = k_3z \end{cases}$$

dove $k_1, k_2, k_3 > 0$.

Questa applicazione lascia fissa l'origine e dilata o contrae tutti i segmenti paralleli all'asse delle x di un fattore k_1 , tutti i segmenti paralleli all'asse delle y di un fattore k_2 e tutti i segmenti paralleli all'asse delle z di un fattore k_3 .

Analogamente si possono considerare nel piano cambiamenti di scala in direzione di due assi ortogonali.

Si dimostra il seguente

Teorema 3.6. *Una trasformazione affine dello spazio (o del piano) si può sempre descrivere nel modo seguente:*

- prima un'isometria
- poi un cambiamento di scala nella direzione di tre (due) assi ortogonali per opportuni fattori di scala
- infine un'altra isometria.

Per illustrare questo risultato consideriamo il seguente esempio. Identifichiamo il piano con una piantina di Parma distesa sul tavolo⁶. Dapprima ruotiamo la piantina in senso orario (cfr. Fig. 18) poi fissiamo due rette ortogonali (ad es. via

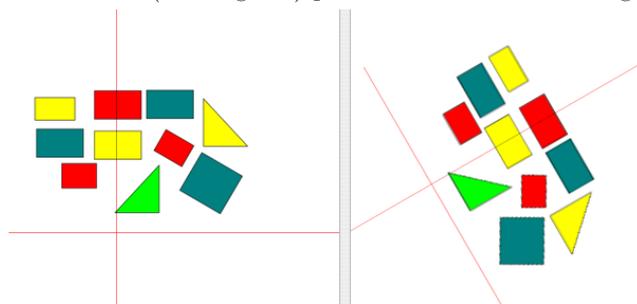


FIGURE 18

Repubblica e via Garibaldi) e facciamo un cambiamento di scala dilatando di un fattore 2 in direzione di via Repubblica e contraiamo di un fattore $1/2$ in direzione di via Garibaldi (cfr. Fig. 19). Infine riflettiamo rispetto ad una retta verticale (vale a dire ribaltiamo la piantina sul tavolo, tenendo fissa la retta verticale, cfr. Fig. 20).

Descriviamo alcune proprietà delle trasformazioni affini. In primo luogo, poichè le trasformazioni affini sono biunivoche, se due figure \mathcal{F} e \mathcal{G} (ad esempio due curve)

⁵Salvo nel caso in cui $k_1 = k_2 = k_3 = 1$

⁶La cosa evidentemente non è possibile perché il piano è illimitato e la piantina no, ma ci intendiamo.

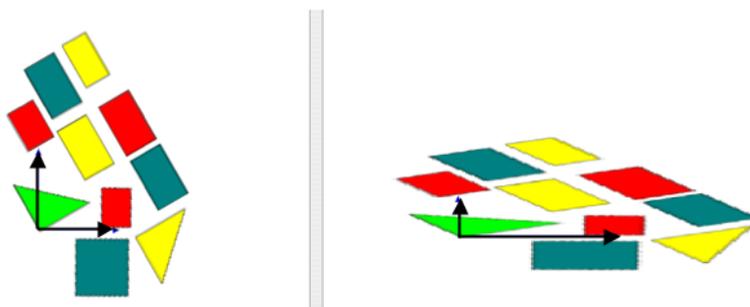


FIGURE 19

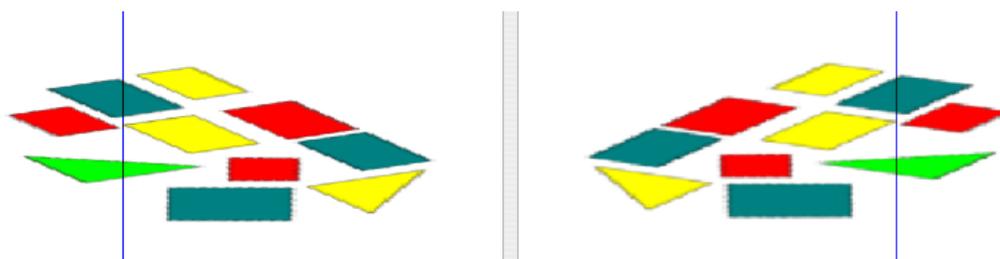


FIGURE 20

hanno un numero finito di punti in comune, esse vengono mandate in due figure \mathcal{F}' e \mathcal{G}' che hanno lo stesso numero di punti in comune. In particolare nel piano rette incidenti (un solo punto in comune) vanno in rette incidenti e rette parallele (nessun punto in comune) in rette parallele. Due rette incidenti nello spazio individuano un piano che contiene tutte le rette incidenti ad entrambe, ne segue che piani vanno in piani. In particolare piani incidenti (hanno in comune una retta) vanno in piani incidenti e piani paralleli vanno in piani paralleli.

Esercizio 3.7. *Provare che una trasformazione affine dello spazio manda coppie di rette parallele in coppie di rette parallele e coppie di rette sghembe in coppie di rette sghembe.*

Soluzione. Sia F una trasformazione affine dello spazio e siano r ed r' due rette parallele. (Già sappiamo che, nel caso di trasformazioni affini del piano, rette parallele vanno in rette parallele; ma qui F è una trasformazione dello spazio). Allora, per la Definizione 3.1, $F(r)$ e $F(r')$ sono rette. Le rette r ed r' , essendo parallele, sono complanari; sappiamo che F manda piani in piani, dunque $F(r)$ e $F(r')$ sono rette complanari. Se fossero incidenti, allora F^{-1} le manderebbe in due rette incidenti, cioè r ed r' sarebbero incidenti, assurdo. Dunque $F(r)$ e $F(r')$ sono parallele.

Siano r ed r' sghembe (i.e. nè parallele, nè incidenti). Allora, per Definizione 3.1, $F(r)$ e $F(r')$ sono rette; esse non possono essere nè parallele, nè incidenti, altrimenti (usando F^{-1}) anche r ed r' sarebbero parallele o incidenti. Dunque $F(r)$ e $F(r')$ sono sghembe. \square

Un triangolo individua tre rette, due a due incidenti, che determinano i suoi lati; da questo segue (sarebbe necessario una spiegazione più approfondita) che un triangolo va in un triangolo. Si noti tuttavia, come mostra la Fig. 19, che in

generale le trasformazioni affini non conservano l'ampiezza degli angoli e quindi possono trasformare un triangolo isoscele o equilatero in un triangolo scaleno. Anzi si può dimostrare che dati due triangoli qualsiasi esiste una trasformazione affine del piano che manda il primo nel secondo triangolo.

3.3. Comportamento di una trasformazione affine su piani paralleli. Dal punto di vista analitico le trasformazioni affini sono le più semplici. Fissati sistemi di coordinate cartesiane ortogonali sui piani α e β , una trasformazione affine $\alpha \xrightarrow{F} \beta$ è data da equazioni della forma

$$(3.2) \quad \begin{cases} x' = ax + by + p \\ y' = cx + dy + q \end{cases}$$

dove la matrice $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ è invertibile. Questo significa che il punto $P \in \alpha$ di coordinate (x, y) viene mandato nel punto $F(P) = (x', y')$ dove x' e y' sono date dall'equazione (3.2). Possiamo anche scrivere

$$F(x, y) = A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix}$$

Analogamente una trasformazione affine dello spazio è data da equazioni della forma

$$\begin{cases} x' = a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + p_1 \\ y' = a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z + p_2 \\ z' = a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z + p_3 \end{cases}$$

dove la matrice $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$ è invertibile. Possiamo anche scrivere

$$(3.3) \quad F(x, y, z) = A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix}$$

Quello che interessa osservare è che le equazioni di una trasformazione affine sono sempre di primo grado.

Una conseguenza dell'equazione (3.3) è il seguente:

Teorema 3.8. *Una trasformazione affine dello spazio agisce nello stesso modo su piani paralleli.*

Precisamente cfr. Fig. 21 dati una trasformazione affine F dello spazio e due piani paralleli α, α' , siano $\beta = F(\alpha)$ e $\beta' = F(\alpha')$ i piani ad essi corrispondenti. Presa una figura \mathcal{F} su α consideriamo una traslazione $T_{\vec{v}}$ che manda α in α' ; allora $\mathcal{F}' = T_{\vec{v}}(\mathcal{F})$ è una figura su α' uguale ad \mathcal{F} . Consideriamo le corrispondenti figure $F(\mathcal{F})$ che sta su β e $F(\mathcal{F}')$ che sta su β' .

Affermo che $F(\mathcal{F})$ e $F(\mathcal{F}')$ sono uguali.

Dimostrazione. . Prendiamo $P' \in \alpha'$, allora $P := P' - \vec{v} \in \alpha$. Confrontiamo $F(P')$ che sta su β' con $F(P)$ che sta su β .

Fissiamo un sistema di coordinate nello spazio in modo che possiamo scrivere la formula (3.3). Sia $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$, allora se $P' = (x, y, z)$ abbiamo $P = P' - \vec{v} = (x - v_1, y - v_2, z - v_3)$ e quindi

$$\begin{aligned} F(P) &= F(x - v_1, y - v_2, z - v_3) = A \begin{pmatrix} x - v_1 \\ y - v_2 \\ z - v_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} = \\ &= A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - A \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} = F(x, y, z) - A\vec{v} = F(P') - A\vec{v}. \end{aligned}$$

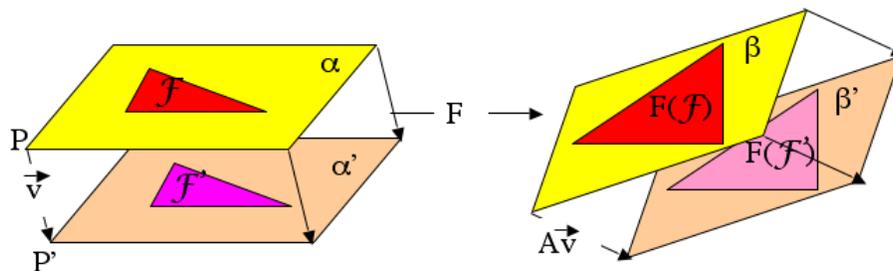


FIGURE 21

Ne segue

$$F(P') = F(P) + A\vec{v} = T_{A\vec{v}}(F(P)).$$

Questo significa che $F(F')$ e $F(F)$ sono uguali perché differiscono di una traslazione. \square

3.4. Trasformazioni affini e coniche.

Teorema 3.9. *Le trasformazioni affini mandano coniche in coniche.*

Per dimostrarlo conviene prima considerare questo risultato parziale:

Lemma 3.10. *Data una trasformazione affine $\alpha \xrightarrow{F} \beta$, se \mathcal{C} è una conica del piano α , allora $F(\mathcal{C})$ è una conica del piano β .*

Dimostrazione. Osserviamo che:

- Si potrebbe dimostrare con qualche calcolo che se \mathcal{D} è una curva piana che ha equazione cartesiana di grado⁷ n , allora essa incontra ogni retta in al più n punti distinti ed esiste almeno una retta che incontra \mathcal{D} in esattamente n punti.
- Le coniche sono le curve di secondo grado.
- Se \mathcal{C} incontra una retta r in k punti, allora, poiché F è biunivoca, $F(\mathcal{C})$ incontra $F(r)$ esattamente in k punti.

Ora la dimostrazione è semplice. Sia r' una retta di β , allora esiste una retta r di α tale che $r' = F(r)$. Poiché \mathcal{C} è una conica essa incontra r in al più 2 punti e quindi $F(\mathcal{C})$ incontra r' in al più 2 punti. Inoltre esiste una retta r_0 di α che incontra \mathcal{C} in esattamente 2 punti e quindi $F(\mathcal{C})$ incontra $F(r_0)$ in esattamente 2 punti, dunque $F(\mathcal{C})$ ha un'equazione di secondo grado e perciò è una conica. \square

Dimostrazione del Teorema 3.9. Se F è una trasformazione affine tra due piani, il Lemma 3.10 è sufficiente. Se F è una trasformazione affine dello spazio ragioniamo così: sia \mathcal{C} una conica; essa giace su un certo piano α e sia $\beta = F(\alpha)$ il piano corrispondente. Consideriamo la restrizione $F|_{\alpha} : \alpha \rightarrow \beta$; essa è biunivoca (è un fatto generale quando si considera la restrizione di un'applicazione biunivoca) e manda rette di α in rette di β . Dunque è una trasformazione affine e possiamo applicare il Lemma 3.10 per concludere che $F(\mathcal{C})$ è una conica. \square

Corollario 3.11. *Le trasformazioni affini mandano coniche non degeneri in coniche non degeneri.*

⁷Vale a dire l'equazione è un polinomio in x ed y in cui il monomio di grado massimo ha grado n . Ad es. $xy^2 + y + x = 1$ ha grado 3.

Dimostrazione. Sia F una trasformazione affine e \mathcal{C} una conica non degenera. Per il Teorema 3.9, $F(\mathcal{C})$ è una conica.

Ragioniamo per assurdo, se $F(\mathcal{C})$ fosse degenera, sarebbe formata da rette, quindi, la trasformazione inversa F^{-1} , che ovviamente è ancora affine e dunque manda rette in rette, manderebbe $F(\mathcal{C})$ in un'unione di rette, assurdo perché $F^{-1}F(\mathcal{C}) = \mathcal{C}$. \square

In realtà vale un risultato più preciso:

Teorema 3.12. *Una trasformazione affine F del piano manda ellissi, parabole ed iperboli in coniche dello stesso tipo.*

Inoltre se \mathcal{F} è il fascio di rette parallele all'asse di una parabola \mathcal{P} , allora $F(\mathcal{F})$ è il fascio di rette parallele all'asse della parabola $F(\mathcal{P})$.

Infine se r è un asintoto dell'iperbole \mathcal{I} allora $F(r)$ è un asintoto dell'iperbole $F(\mathcal{I})$.

Dimostrazione. Sia \mathcal{P} una parabola. Consideriamo il fascio \mathcal{F} delle rette parallele all'asse a della parabola. La trasformazione affine F manda il fascio \mathcal{F} in un fascio $F(\mathcal{F})$ di rette parallele. Ora ciascuna retta $r \in \mathcal{F}$ incontra la parabola \mathcal{P} in un sol punto. Allora ciascuna retta $r' \in F(\mathcal{F})$ incontra la conica $F(\mathcal{P})$ in un sol punto. Le rette r' non possono essere tutte tangenti a $F(\mathcal{P})$ (non esiste una conica non degenera che possieda un fascio di rette parallele tangenti) quindi restano solo le seguenti possibilità:

a) $F(\mathcal{P})$ è una parabola e $F(\mathcal{F})$ è il fascio delle rette parallele al suo asse, oppure

b) $F(\mathcal{P})$ è un'iperbole e $F(\mathcal{F})$ è il fascio delle rette parallele ad un suo asintoto r_1 .

Ma l'asintoto r_1 non incontra l'iperbole, mentre tutte le rette di $F(\mathcal{F})$ incontrano $F(\mathcal{P})$ in un punto. Dunque resta solo il caso a) come si voleva.

Sia \mathcal{I} un'iperbole. Il fascio \mathcal{G} delle rette parallele all'asintoto r_0 di \mathcal{I} è formato da rette che incontrano \mathcal{I} in un sol punto, salvo r_0 che non incontra \mathcal{I} . Ragionando come sopra (ripetere effettivamente il ragionamento!) si conclude che $F(\mathcal{I})$ deve essere un'iperbole e il fascio $F(\mathcal{G})$ il fascio delle rette parallele ad un suo asintoto r'_0 . Tra queste rette la sola $F(r_0)$ non incontra l'iperbole $F(\mathcal{I})$ e dunque è l'asintoto r'_0 .

Resta solo da vedere che se \mathcal{E} è un'ellisse, allora $F(\mathcal{E})$ è anch'essa un'ellisse. Ma $F(\mathcal{E})$ è una conica non degenera e se fosse una parabola o un'iperbole, per quanto abbiamo appena provato, anche $F^{-1}(F(\mathcal{E})) = \mathcal{E}$ lo sarebbe, assurdo. \square

Esercizio 3.13. *Sia F una trasformazione affine del piano e sia \mathcal{C} una conica non degenera. Che cosa possiamo dire di $F(\mathcal{C})$?*

Soluzione. Sappiamo che $F(\mathcal{C})$ è una conica non degenera. Più precisamente essa è una parabola, un'iperbole oppure un'ellisse a seconda che \mathcal{C} sia una parabola, un'iperbole oppure un'ellisse. Inoltre se \mathcal{C} è un'iperbole, F manda i suoi asintoti negli asintoti di $F(\mathcal{C})$. Se \mathcal{C} è una parabola, F manda il fascio delle rette parallele al suo asse nel fascio delle rette parallele all'asse di $F(\mathcal{C})$. \square

Esercizio 3.14. Sia F una trasformazione affine del piano e \mathcal{P} una parabola. Allora, come sappiamo, $F(\mathcal{P})$ è una parabola. Se a è l'asse di \mathcal{P} , allora necessariamente $F(a)$ è l'asse di $F(\mathcal{P})$?

Soluzione. Come sappiamo il fascio \mathcal{F} delle rette parallele all'asse a (in celeste in Fig. 22a) viene mandato nel fascio delle rette parallele all'asse di $F(\mathcal{P})$. In

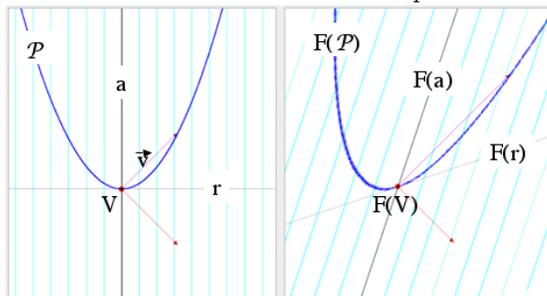


FIGURE 22. a - b

particolare l'asse a viene mandato in una retta $F(a)$ parallela all'asse di $F(\mathcal{P})$ (cfr. Fig. 22b).

Ora sappiamo che la retta r tangente a \mathcal{P} nel vertice V è perpendicolare all'asse a . Allora le rette $F(r)$ e $F(a)$ si tagliano in $F(V)$ e $F(r)$ incontra $F(\mathcal{P})$ solo nel punto $F(V)$, dunque è tangente a $F(\mathcal{P})$ in $F(V)$ (infatti incontrando la parabola in un sol punto e, non essendo parallela all'asse, deve essere tangente). Ma l'angolo tra $F(r)$ e $F(a)$ non è necessariamente retto e quindi $F(V)$ non è necessariamente il vertice e $F(a)$ non è necessariamente l'asse.

La trasformazione affine illustrata in figura è il cambiamento di scala di un fattore 2 nella direzione del vettore \vec{v} . \square

3.5. Trasformazioni affini e quadriche. Concludiamo con un ulteriore risultato riguardante le superfici.

Definizione 3.15. Una superficie che ha un'equazione di secondo grado si chiama quadrica.

Ad esempio il paraboloido di rotazione (cfr. Esercizio 2.18) è una quadrica.

Con argomenti analoghi a quelli del Lemma 3.10 si dimostra che

Proposizione 3.16. Una trasformazione affine dello spazio manda quadriche in quadriche.

Ne segue:

Teorema 3.17. Una curva, sezione piana di una quadrica, è una conica

Dimostrazione. Sia data una quadrica \mathcal{Q} ed una curva \mathcal{C} ottenuta sezionando \mathcal{Q} con un piano α .

La quadrica \mathcal{Q} ha equazione di secondo grado rispetto a qualunque sistema di riferimento cartesiano ortogonale, perché cambiare sistema di riferimento corrisponde ad un'isometria (composta come sappiamo di moti rigidi e riflessioni). Dunque, per la Proposizione 3.16 l'equazione di \mathcal{Q} nel nuovo sistema sarà di secondo grado.

Prendiamo un sistema di riferimento che abbia gli assi x ed y sul piano α ; dunque in questo sistema α ha equazione $z = 0$. Sostituito $z = 0$ nell'equazione di \mathcal{Q} (che è un'equazione di secondo grado in x, y, z , resta un'equazione di secondo grado in x e y); vale a dire la curva \mathcal{C} è una conica. \square

4. PARABOLIDE ELLITTICO

4.1. Costruzione del paraboloide ellittico.

Definizione 4.1. (Costruzione del paraboloide ellittico).

- (*) Siano \mathcal{P}_1 e \mathcal{P}_2 due parabole, disposte su due piani ortogonali, in modo che abbiano il medesimo asse di simmetria (che dunque è necessariamente la retta a comune ai due piani), lo stesso vertice V e la concavità rivolta dalla medesima parte (cfr. Fig. 23).

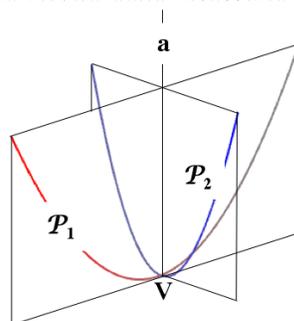


FIGURE 23

Per fissare le idee conviene assumere che l'asse a sia verticale e la concavità delle due parabole rivolta verso l'alto. Per ogni punto P dell'asse a , sopra V , passa un unico piano β_P perpendicolare all'asse. Tale piano taglia su ciascuna parabola una coppia di punti: A, A' su \mathcal{P}_1 e B, B' su \mathcal{P}_2 (cfr. Fig. 24a). Per evidenti motivi

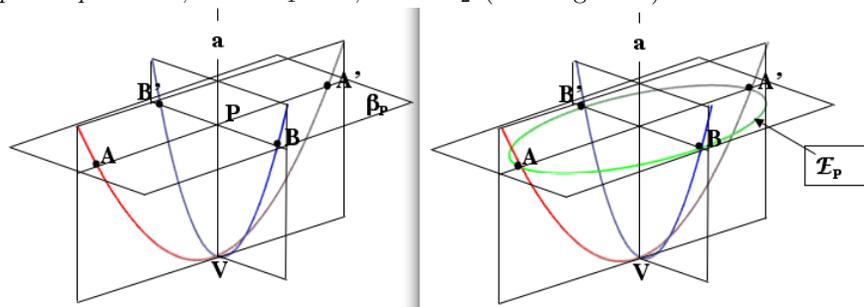


FIGURE 24. a - b

di simmetria i segmenti $\overline{AA'}$ e $\overline{BB'}$ si tagliano perpendicolarmente nel loro punto medio P , pertanto esiste un'unica ellisse \mathcal{E}_P che ha questi quattro punti come vertici (Fig. 24b). (Per $P = V$ l'ellisse \mathcal{E}_V si riduce al solo punto V .)

La superficie descritta dalla famiglia di ellissi \mathcal{E}_P , al variare del punto P sull'asse a , sopra V , si chiama paraboloide ellittico (cfr. Fig. 25 in cui si vedono due immagini diverse dello stesso paraboloide). Il vertice V e l'asse a delle due parabole si chiamano vertice e asse del paraboloide.

Esercizio 4.2. Che cos'è un paraboloide ellittico?

Suggerimento. Utilizzare la Definizione 4.1.

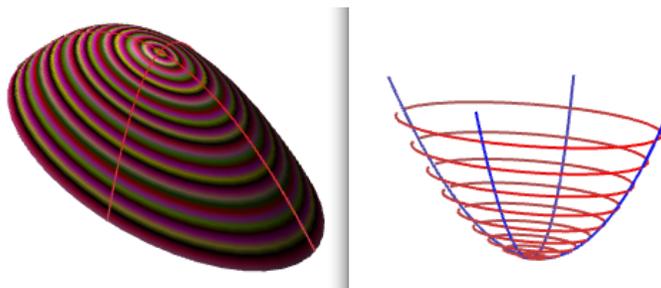


FIGURE 25

4.2. Simmetrie del paraboloide ellittico.

Proposizione 4.3. (i) *I piani che contengono le due parabole con cui si costruisce un paraboloide ellittico sono piani di simmetria del paraboloide (cfr. Fig. 26a).*

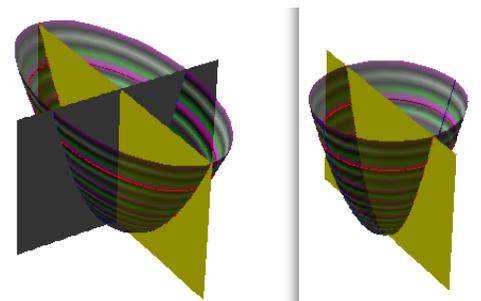


FIGURE 26. a - b

(ii) *L'asse del paraboloide è asse di simmetria.*

(iii) *Se le due parabole sono uguali, allora il paraboloide ellittico è la superficie generata dalla rotazione di una delle due parabole attorno al proprio asse. In tal caso tutti i piani passanti per l'asse sono piani di simmetria (cfr. Fig. 26b).*

Dimostrazione. (i) e (ii). Sia Q un punto del paraboloide ellittico \mathcal{Q} costruito a partire dalle parabole \mathcal{P}_1 e \mathcal{P}_2 e siano α_1 e α_2 i piani che le contengono. Dobbiamo mostrare che i simmetrici Q' e Q'' di Q , rispetto ai piani α_1 e α_2 , e il simmetrico Q''' di Q , rispetto all'asse a , appartengono a \mathcal{Q} .

Il piano β , per Q , perpendicolare all'asse a taglia l'asse in un punto P e il paraboloide lungo l'ellisse \mathcal{E}_P . Inoltre taglia i piani α_1 e α_2 lungo gli assi dell'ellisse \mathcal{E}_P .

Pertanto Q' e Q'' sono i simmetrici di Q rispetto agli assi dell'ellisse e Q''' è il simmetrico di Q rispetto al centro P dell'ellisse; dunque, poiché $Q \in \mathcal{E}_P$, per le proprietà di simmetria dell'ellisse, anche Q' , Q'' e Q''' appartengono a \mathcal{E}_P e quindi a \mathcal{Q} .

(iii) Se le parabole sono uguali, allora i quattro vertici di ciascuna ellisse \mathcal{E}_P sono equidistanti dall'asse e dunque l'ellisse è una circonferenza. \square

Esercizio 4.4. *Quali sono le proprietà di simmetria di un paraboloide ellittico?*

Suggerimento. Enunciare la Proposizione 4.3.

4.3. Quanti sono i paraboloidi ellittici? Per comprendere il problema, prima di affrontarlo consideriamo due casi più familiari.

Quante sono le sfere? Poiché due sfere sono uguali se e solo se hanno lo stesso raggio, le sfere sono tante quante i possibili raggi; vale a dire esiste una corrispondenza biunivoca tra tutte le possibili sfere e l'insieme dei numeri $r > 0$.

Quanti sono i triangoli? Dati due segmenti consecutivi esiste un unico triangolo che ha i due segmenti come lati. D'altra parte i due segmenti consecutivi sono univocamente individuati dalle loro lunghezze $L_1, L_2 > 0$ e dall'angolo θ , $0 < \theta < \pi$, da essi formato. Vale a dire dati L_1, L_2 e θ esiste un unico triangolo che ha due lati consecutivi di lunghezza L_1 e L_2 che formano un angolo θ .

Tuttavia dobbiamo osservare che, ad esempio, le terne

$$L_1 = 3, L_2 = 1, \theta = \pi/2$$

e

$$L_1 = 1, L_2 = 3, \theta = \pi/2$$

individuano lo stesso triangolo. Per evitare questa difficoltà basta assumere sempre $L_1 \geq L_2 > 0$.

Ma questo non basta, perché per ogni triangolo ci sono tre diverse coppie di lati consecutivi e dunque esistono tre diverse terne di numeri L_1, L_2, θ che individuano lo stesso triangolo.

Veniamo al problema che ci interessa. Due parabole sono uguali se la distanza tra fuoco e direttrice è la stessa. Dato un numero positivo p indichiamo con \mathcal{P}_p la parabola per cui la distanza tra fuoco e direttrice è pari a p . Dati $p \geq q > 0$, disponiamo le parabole \mathcal{P}_p e \mathcal{P}_q nello spazio in modo che soddisfino (*) e costruiamo il paraboloido \mathcal{Q} .

Dato un paraboloido ellittico \mathcal{Q} non di rotazione evidentemente i piani che contengono le due parabole sono gli unici piani di simmetria di \mathcal{Q} ; pertanto essi sono univocamente individuati dal paraboloido stesso e dunque anche le due parabole, che sono le sezioni di \mathcal{Q} con questi piani, sono univocamente individuate dal paraboloido stesso. Lo stesso vale se il paraboloido è di rotazione: ogni piano per l'asse taglia sul paraboloido la parabola da cui partire per costruire il paraboloido.

Questa osservazione indica che la corrispondenza

$$(p, q) \mapsto \mathcal{Q}$$

tra tutte le coppie con $p \geq q > 0$ e tutti i paraboloidi ellittici è biunivoca.

Osservazione 4.5. *I paraboloidi ellittici sono in corrispondenza biunivoca con le coppie di numeri $p \geq q > 0$.*

Nel senso che i numeri p e q individuano le due parabole che hanno distanza rispettivamente p e q tra fuoco e direttrice e tali parabole, disposte su piani ortogonali nel modo spiegato sopra, determinano univocamente un paraboloido ellittico.

Viceversa dato un paraboloido ellittico se è di rotazione, un qualunque piano passante per l'asse taglia sul paraboloido una parabola (che non dipende dalla scelta del piano) e $p = q$ sarà la distanza tra fuoco e direttrice di tale parabola. Se il paraboloido ellittico non è di rotazione, allora i suoi due piani di simmetria tagliano su di esso due parabole diverse e i numeri p e q saranno la distanza tra fuoco e direttrice nelle due parabole.

4.4. Costruzione del paraboloido ellittico a partire da un paraboloido di rotazione. Consideriamo una particolare trasformazione affine consistente nella contrazione di un fattore k ($0 < k < 1$) nella direzione di una retta. (In un opportuno sistema di coordinate possiamo descrivere questa trasformazione con l'equazione

$$(4.1) \quad \begin{cases} x' = x \\ y' = ky \\ z' = z \end{cases} .$$

con $0 < k < 1$. Si tratta di un particolare cambiamento di scala (cfr. Definizione 3.5 con $k_1 = k_3 = 1$ e $k_2 = k$) che consiste in una contrazione (infatti $k < 1$) nella

direzione dell'asse delle y . In Fig. 27 vediamo l'effetto di questa contrazione su di

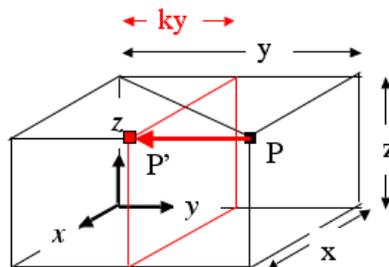


FIGURE 27

un punto $P = (x, y, z)$.

Consideriamo ora un caso più semplice: la contrazione in una direzione nel piano. Vediamo due casi:

a) Contrazione in una direzione di una circonferenza. Come sappiamo (cfr. Corso di Geometria, Cap. II, Corollario 5.17) *contraendo di un fattore k , $0 < k < 1$, in una direzione una circonferenza di raggio r si ottiene un'ellisse i cui semiassi hanno lunghezza r e kr* (cfr. Fig. 28a).

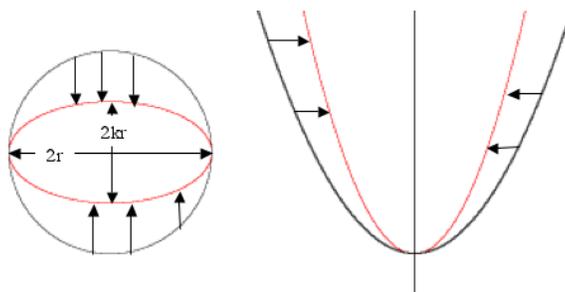


FIGURE 28. a - b

b) Contrazione di una parabola in direzione normale all'asse. *Contraendo una parabola in direzione normale all'asse si ottiene una parabola più "stretta"* (cfr. Fig. 28b).

Dimostrazione. Data la parabola \mathcal{P} di equazione

$$(4.2) \quad 2py = x^2,$$

per un certo $p > 0$. Le equazioni della contrazione in direzione dell'asse delle ascisse (direzione normale all'asse della parabola) sono

$$\begin{cases} x' = kx \\ y' = y \end{cases}.$$

Sostituendo quest'ultime nell'equazione della parabola otteniamo

$$2py' = \left(\frac{x'}{k}\right)^2,$$

cioè

$$2pk^2y' = x'^2$$

che è l'equazione ancora di una parabola.

La distanza tra fuoco e direttrice è rispettivamente $p > pk^2$, dunque la seconda parabola è più "stretta". \square

Ora possiamo procedere alla costruzione che ci interessa:

Proposizione 4.6. *Dato un parabolide di rotazione \mathcal{Q} procediamo ad una contrazione di un fattore k , $0 < k < 1$, in una direzione perpendicolare all'asse del parabolide. Otteniamo così un parabolide ellittico \mathcal{Q}' .*

Considerando tutti i paraboloidi di rotazione e tutti i possibili fattori k , $0 < k < 1$, in questo modo otteniamo tutti i possibili paraboloidi ellittici.

Dimostrazione. Per fissare le idee conviene scegliere un sistema di coordinate cartesiane ortogonali con origine nel vertice del parabolide \mathcal{Q} e asse delle z coincidente con l'asse del parabolide e verso positivo dalla parte della concavità di \mathcal{Q} . Sia l'asse delle y la direzione in cui contraiamo (cfr. Fig. 29a).

La superficie \mathcal{Q} si trasforma in una superficie \mathcal{Q}' (cfr. Fig. 29b). Le sezioni di \mathcal{Q} con piani perpendicolari all'asse ($z = \text{cost.}$) sono i paralleli della superficie di rotazione, cioè sono delle circonferenze, che vengono contratte in ellissi.

La sezione di \mathcal{Q} con il piano xz è una parabola \mathcal{P} che, giacendo su un piano perpendicolare alla direzione y , non subisce alterazioni. Mentre la parabola, identica a questa, che il piano yz taglia su \mathcal{Q} viene contratta in direzione normale al suo asse e diventa una parabola più "stretta" che chiamiamo \mathcal{P}' .

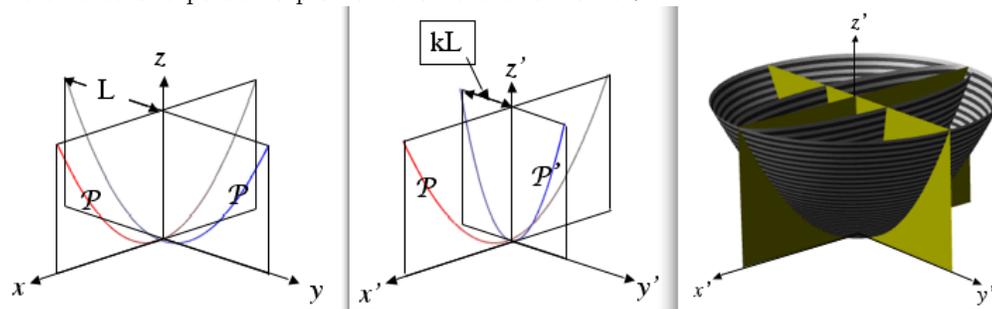


FIGURE 29. a - b - c

Allora è chiaro che la superficie \mathcal{Q}' è il parabolide ellittico definito dalle parabole \mathcal{P} e \mathcal{P}' .

Vediamo che tutti i paraboloidi ellittici si ottengono in questo modo. Dato un parabolide ellittico \mathcal{Q}' , esso, per definizione, è costruito a partire da due parabole \mathcal{P} e \mathcal{P}' . Eventualmente scambiando il ruolo delle due parabole, possiamo supporre che la seconda sia più "stretta" della prima. Dunque \mathcal{P}' si ottiene contraendo \mathcal{P} di un fattore $k < 1$ in direzione perpendicolare all'asse di simmetria. Dunque contraendo il parabolide \mathcal{Q} , ottenuto ruotando \mathcal{P} attorno al proprio asse, in direzione normale all'asse di un fattore k si ottiene proprio \mathcal{Q}' . \square

Esercizio 4.7. *Come posso procurarmi un parabolide ellittico a partire da un parabolide di rotazione?*

Suggerimento. Ripartire la prima parte della dimostrazione della Proposizione 4.6.

Osservazione 4.8. *La contrazione F che manda \mathcal{Q} in \mathcal{Q}' , manda anche l'asse di \mathcal{Q} nell'asse di \mathcal{Q}' .*

4.5. Sezioni piane di un parabolide ellittico.

4.5.1. Sezioni con piani paralleli all'asse.

Proposizione 4.9. *Le sezioni di un paraboloido ellittico \mathcal{Q} con piani paralleli all'asse sono parabole. Più precisamente le sezioni di \mathcal{Q} con un fascio di piani paralleli tra loro e paralleli all'asse sono tutte parabole identiche.*

Possiamo essere ancora più precisi: dato un qualunque piano α passante per l'asse a di \mathcal{Q} , esso taglia su \mathcal{Q} una parabola \mathcal{P} . Inoltre i piani paralleli ad α tagliano su \mathcal{Q} parabole identiche a \mathcal{P} . I vertici di queste parabole descrivono, a loro volta, una parabola \mathcal{P}' . Tale parabola giace su un piano β che passa per l'asse di \mathcal{Q} . Essa dunque è la sezione di \mathcal{Q} con il piano β . Inoltre i piani paralleli a β tagliano su \mathcal{Q} una famiglia di parabole identiche a \mathcal{P}' e i cui vertici descrivono la parabola \mathcal{P} .

Soluzione. Dapprima dimostreremo l'enunciato nel caso particolare di un paraboloido \mathcal{Q} di rotazione. Sia α un qualunque piano che passa per l'asse a di \mathcal{Q} . È necessario un calcolo per vedere che α e i piani paralleli ad α tagliano il paraboloido lungo parabole tutte uguali tra loro.

Come sappiamo (Esercizio 2.18) l'equazione di \mathcal{Q} è della forma

$$x^2 + y^2 = 2pz$$

con $p > 0$ (il sistema di coordinate ha origine nel vertice V del paraboloido e l'asse delle z è l'asse a e il verso positivo è dalla parte della concavità.)

Per ragioni di simmetria (\mathcal{Q} è una superficie di rotazione) non è ristretto assumere che il piano α coincida con il piano xz , vale a dire abbia equazione $y = 0$. Pertanto i piani paralleli ad α possiamo indicarli con α_c e avranno equazione $y = c$, con $c \in \mathbb{R}$.

L'intersezione $\alpha_c \cap \mathcal{Q}$ è data dal sistema

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = 2pz \\ y = c \end{cases},$$

che è equivalente al sistema

$$\begin{cases} x^2 + c^2 = 2pz \\ y = c \end{cases}.$$

Dunque sul piano $y = c$ la sezione è data dall'equazione

$$x^2 + c^2 = 2pz$$

che rappresenta una parabola \mathcal{P}_c . Se scriviamo l'equazione nella forma

$$z = \frac{x^2}{2p} + \frac{c^2}{2p},$$

ci rendiamo conto che la curva è il grafico di una funzione $z = f(x)$ e che al variare di c la funzione cambia solo per una costante additiva; dunque le curve \mathcal{P}_c sono ottenute una dall'altra per traslazione (cfr. Fig. 30).

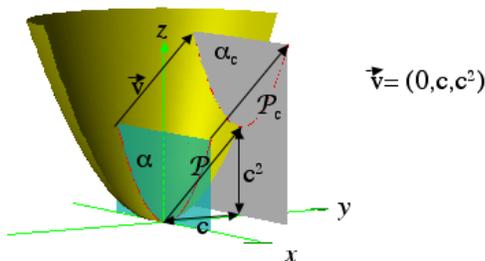


FIGURE 30

Sia β il piano per l'asse a e perpendicolare ad α (cfr. Fig. 31). Poiché \mathcal{Q} è una superficie di rotazione, per ragioni di simmetria, la retta a_c che il piano α_c taglia su β è asse di simmetria dell'intersezione $\alpha_c \cap \mathcal{Q}$. Questo significa che a_c , che è parallelo ad α è l'asse della parabola \mathcal{P}_c .

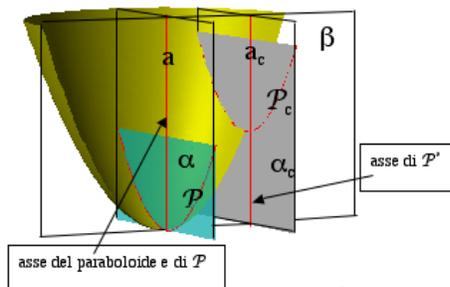


FIGURE 31

Pertanto i vertici V_c delle parabole \mathcal{P}_c stanno tutti sul piano β e formano una curva \mathcal{P}' che è la sezione $\beta \cap \mathcal{Q}$. Ma allora \mathcal{P}' genera per rotazione \mathcal{Q} e dunque \mathcal{P}' è una parabola (identica a \mathcal{P}).

Abbiamo così provato che, per un paraboloide \mathcal{Q} di rotazione, assegnato un piano α che contiene l'asse di \mathcal{Q} , le sezioni con piani paralleli ad α sono parabole tutte uguali, i cui vertici stanno sulla parabola che si ottiene sezionando \mathcal{Q} con il piano β , passante per l'asse di rotazione e perpendicolare ad α .

Questo risultato vale per un qualunque piano α e dunque deve valere anche per il piano β che passa per l'asse di \mathcal{Q} : i piani paralleli a β tagliano sul paraboloide parabole tutte uguali, i cui vertici stanno sulla parabola $\alpha \cap \mathcal{Q}$, infatti α è il piano perpendicolare a β .

Passiamo a considerare il caso di un qualsiasi paraboloide ellittico. Esso si può ottenere come contrazione di un paraboloide di rotazione, quindi per studiare il caso generale possiamo limitarci a considerare un paraboloide ellittico \mathcal{Q}' ottenuto contraendo \mathcal{Q} in una direzione perpendicolare all'asse. Sia F questa contrazione.

Sia γ un piano passante per l'asse di \mathcal{Q}' . Allora $\gamma = F(\alpha)$ per un certo piano α che passa per l'asse di \mathcal{Q} . I piani α_c paralleli ad α , sono mandati da F nei piani γ_c paralleli a γ . Poiché (cfr. Teorema 3.8) le trasformazioni affini agiscono nello stesso modo su piani paralleli, le parabole $\mathcal{P}_c = \alpha_c \cap \mathcal{Q}$, tutte uguali tra loro, vengono mandate in curve $F(\mathcal{P}_c) = \gamma_c \cap \mathcal{Q}'$, tutte uguali tra loro. Ma le trasformazioni affini mandano parabole in parabole (cfr. Teorema 3.12), quindi queste curve $F(\mathcal{P}_c)$ sono parabole.

Come sappiamo, in generale, una trasformazione affine manda una parabola in una parabola, ma non manda necessariamente il vertice nel vertice (cfr. Esercizio 3.14). Tuttavia in questo caso la cosa funziona.

Prima abbiamo osservato che gli assi a_c della parabole \mathcal{P}_c sono tutti paralleli all'asse a di \mathcal{Q} . Ora $F(a)$ è l'asse di \mathcal{Q}' (cfr. Osservazione 4.8) e F manda rette parallele in rette parallele, dunque le rette $F(a_c)$ sono parallele all'asse $F(a)$ di \mathcal{Q}' . Ma (cfr. Teorema 3.12) F manda le rette parallele all'asse di \mathcal{P}_c in rette parallele all'asse di $F(\mathcal{P}_c)$. Dunque anche se $F(a_c)$ non fosse l'asse di $F(\mathcal{P}_c)$, esso è comunque parallelo a tale asse. In conclusione gli assi b_c di $F(\mathcal{P}_c)$ sono paralleli ad a .

In particolare gli assi di tutte le parabole coinvolte sono verticali e quindi in ciascuna parabola il vertice è il punto più basso. Siccome la contrazione F non altera la "quota" dei punti (cioè la coordinata z) essa manda il vertice V_c di \mathcal{P}_c nel vertice di $F(\mathcal{P}_c)$.

Come sappiamo i vertici V_c descrivono la parabola \mathcal{P}' tagliata da β su \mathcal{Q} . Quindi i vertici delle parabole $F(\mathcal{P}_c)$ descrivono la parabola $F(\mathcal{P}')$ che è intersezione del piano $F(\beta)$ con \mathcal{Q}' . Poiché β contiene a , il piano $F(\beta)$ contiene l'asse $F(a)$ di \mathcal{Q}' .

Abbiamo così provato che dato un piano γ che contiene l'asse di \mathcal{Q}' i piani γ_c , paralleli a γ , tagliano su \mathcal{Q}' parabole $F(\mathcal{P}_c)$ tutte uguali tra loro e i cui vertici descrivono la parabola $F(\mathcal{P}')$, tagliata su \mathcal{Q}' , da un piano $F(\beta)$ passante per l'asse di \mathcal{Q}' .

Si osservi che F non conserva gli angoli e dunque in generale i piani γ e $F(\beta)$ non sono tra loro ortogonali. \square

Per comprendere guardiamo la Fig. 32a. Sono evidenziate le sezioni del paraboloide con un fascio di piani paralleli al piano α . Si osserva che queste sezioni sono parabole tutte uguali tra loro e i cui vertici descrivono una parabola \mathcal{P}' che

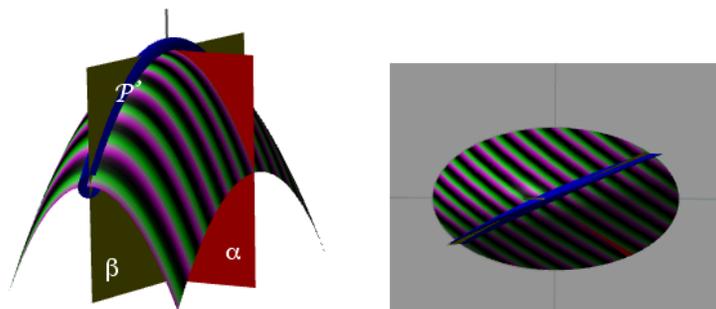


FIGURE 32. a - b

giace sul piano β . Guardando la stessa superficie dall'alto (Fig. 32b) si evidenzia un'ellisse, sezione del paraboloide con un piano ortogonale all'asse, e si vede che gli assi dell'ellisse non sono in rapporto con i piani α e β . Per altro aprendo i file delle figure è possibile variare il piano α e riconoscere che, quando esso coincide con un piano di simmetria dell'ellisse, β è l'altro piano di simmetria (Fig. 33).

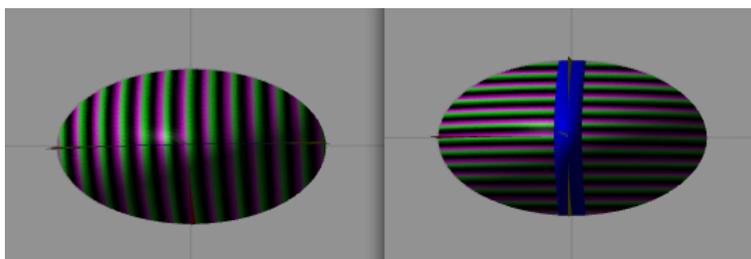


FIGURE 33

È importante comprendere che il piano α determina il piano β . Dunque per ogni piano α esiste un unico piano β che contiene i vertici delle parabole tagliate dai piani paralleli ad α . Inoltre la relazione tra α e β è simmetrica, perché α contiene i vertici delle parabole tagliate dai piani paralleli a β .

Aprendo il file della Fig. 32a è possibile contrarre in una direzione il paraboloide, variare le due famiglie di piani paralleli che tagliano il paraboloide.

Corollario 4.10. *Per ogni punto del paraboloide ellittico passa una ed una sola parabola di ciascuna delle due famiglie.*

Esercizio 4.11. *Dimostrare il Corollario 4.11 e illustrarlo con una figura.*

Soluzione. Fissato il piano α passante per l'asse del paraboloide \mathcal{Q} , questo determina un piano β . Prendiamo un punto P del paraboloide e conduciamo per P i piani α' parallelo ad α e β' parallelo a β . Essi tagliano su \mathcal{Q} due parabole: $\alpha' \cap \mathcal{Q}$ e $\beta' \cap \mathcal{Q}$ che si toccano esattamente in P .

In Fig. 34 si vedono le due famiglie di parabole e i piani di simmetria del paraboloide (aprendo il file si vede come cambiano le due famiglie al variare del piano α). \square

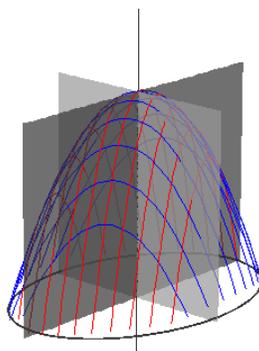


FIGURE 34

Esercizio 4.12. *Come sono fatte le sezioni di un paraboloide ellittico con piani paralleli all'asse?*

Suggerimento. Far riferimento agli enunciati della Proposizione 3.1 (e alla spiegazione immediatamente successiva) e del Corollario 4.10. Si illustri con opportune figure.

4.5.2. *Sezioni con piani non paralleli all'asse.* Consideriamo ora le sezioni piane di un paraboloide ellittico con piani non paralleli all'asse.

Teorema 4.13. *Le sezioni piane di un paraboloide ellittico con piani non paralleli all'asse sono:*

- vuote, se il piano non tocca il paraboloide
- un punto, se il piano è tangente al paraboloide
- un'ellisse.

Dimostrazione. Non daremo una dimostrazione completa, ma argomenti sufficienti a convincerci.

È sufficiente provare il teorema nel caso di un paraboloide di rotazione. Infatti, dato un paraboloide ellittico \mathcal{Q}' esiste un paraboloide di rotazione \mathcal{Q} ed una contrazione F in direzione di una retta ortogonale all'asse tale che $\mathcal{Q}' = F(\mathcal{Q})$; e quindi preso un piano α' , non parallelo all'asse a' di \mathcal{Q}' , esiste un piano α , non parallelo all'asse a di \mathcal{Q} tale che $F(\alpha) = \alpha'$ (qui gioca il fatto che $F(a) = a'$). E dunque la sezione $\alpha \cap \mathcal{Q}$ viene mandata da F in $\alpha' \cap \mathcal{Q}'$. Ma F manda ellissi in ellissi e dunque è sufficiente studiare le sezioni di \mathcal{Q} .

Sia dunque α un piano non parallelo all'asse di \mathcal{Q} . Consideriamo il piano β , passante per l'asse a e ortogonale ad α . I due piani si tagliano lungo una retta r (vedi Fig. 35) e consideriamo le possibili posizioni di r rispetto alla parabola

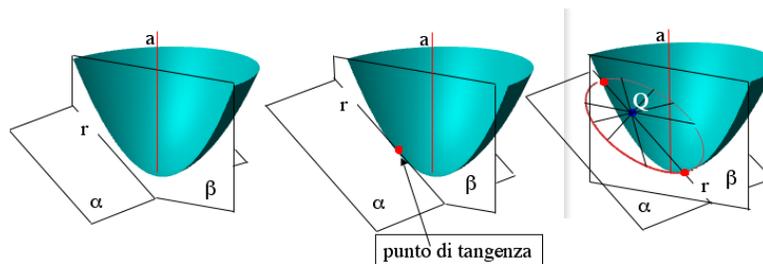


FIGURE 35. a - b - c

$\mathcal{P} = \beta \cap \mathcal{Q}$ (che genera \mathcal{Q} per rotazione).

Se r è esterna, allora $\alpha \cap \mathcal{Q}$ è vuota (Fig. 35a). Se r è tangente, allora $\alpha \cap \mathcal{Q}$ è un punto (Fig. 35b). Infine se r taglia la parabola in due punti⁸ allora preso un qualunque punto Q compreso tra i due punti (Fig. 35c), Q è all'interno del parabolide. Perciò tutte le rette di α uscenti da Q devono “uscire” dal parabolide in entrambi i versi e dunque la curva $\alpha \cap \mathcal{Q}$ è una curva chiusa; ma sappiamo che è una conica, dunque è un'ellisse. \square

In Fig. 36 rivediamo i tre casi.

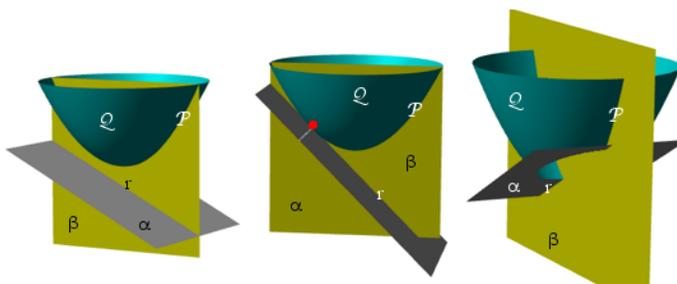


FIGURE 36. a - b - c

Osservazione 4.14. Per il seguito è importante notare che se τ_P è il piano tangente ad un parabolide ellittico nel punto P , tutta la superficie è lasciata da una parte dal piano che tocca il parabolide solo nel punto di tangenza.

Esercizio 4.15. Come sono fatte le sezioni di un parabolide ellittico con piani non paralleli all'asse?

4.6. Equazione cartesiana del parabolide ellittico.

Proposizione 4.16. L'equazione di un parabolide ellittico è della forma

$$(4.3) \quad \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = z$$

con $a, b > 0$. Vale a dire:

- Comunque fissati un sistema di coordinate cartesiane ortogonali e due numeri a e b , con $a \geq b > 0$, il luogo dei punti dello spazio che soddisfano l'equazione (4.3) è un parabolide ellittico. In particolare i suoi piani di simmetria sono i piani coordinati xz e yz , il cui vertice è nell'origine e l'asse delle z (asse di simmetria) è orientato verso la concavità.

- Dato un parabolide ellittico esistono un sistema di coordinate cartesiane ortogonali e due numeri a e b , con $a \geq b > 0$, tali che (4.3) sia l'equazione del parabolide.

I paraboloidi di rotazione hanno equazione (4.3) con $a = b$.

⁸ r non può essere parallela all'asse a , perché α non lo è, dunque se r è secante, deve tagliare \mathcal{P} in 2 punti.

Dimostrazione. Dall'Esercizio 2.18 segue che l'equazione di un paraboloido di rotazione \mathcal{Q} è della forma

$$x^2 + y^2 = 2pz$$

con $p > 0$. La possiamo riscrivere $x^2/2p + y^2/2p = z$, ovvero

$$(4.4) \quad \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} = z$$

con $a = \sqrt{2p}$.

Ora procediamo ad una contrazione nella direzione dell'asse delle y di un fattore $k < 1$. Otteniamo così un paraboloido ellittico \mathcal{Q}' , la cui equazione si ottiene ricavando da (4.1) le variabili x, y, z e sostituendole in (4.4). Otteniamo

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{(ka)^2} = z.$$

Posto $b := ka$ otteniamo (4.3). □

N.B. Considerando l'equazione cartesiana (4.3) vediamo che essa dipende da due parametri $a \geq b > 0$, ritroviamo così, sotto altra forma, il risultato dell'osservazione 4.5.

Per finire vediamo in Fig. 37 tre immagini di un paraboloido ellittico che evi-

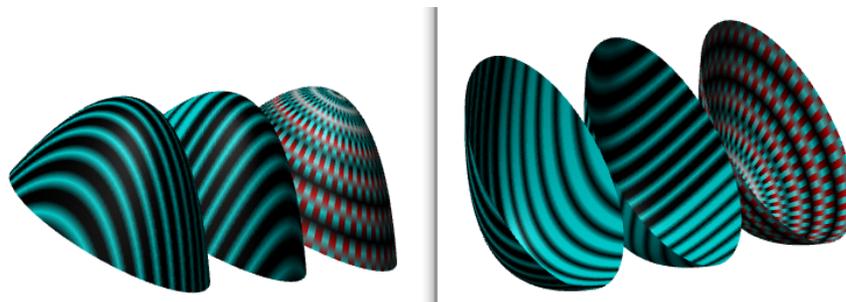


FIGURE 37

denziano le diverse sezioni. In Fig. 38a vediamo il paraboloido ellittico descritto da due famiglie di parabole parallele i cui vertici descrivono una parabola dell'altra famiglia. Aprendo il file è possibile contrarre il paraboloido e cambiare i due fasci di piani paralleli. In Fig. 3.12b si vede il paraboloido ellittico descritto da una parabola che si muove parallelamente a se stessa, con il vertice che scorre su un'altra parabola. Aprendo il file è possibile compiere le medesime operazioni. Come abbi-

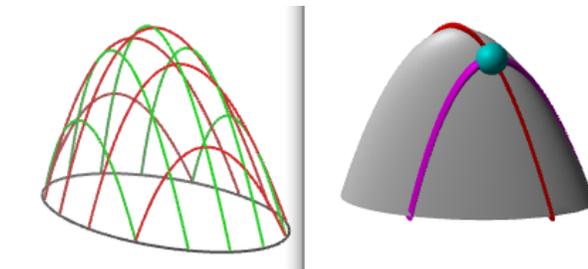


FIGURE 38. a - b

amo più volte insistito, assegnato il paraboloido ellittico il fascio di piani paralleli su cui si muove la prima parabola e il piano su cui giace la seconda parabola (quella che contiene i vertici) sono legati fra loro: assegnato il piano α passante per l'asse

del paraboloido \mathcal{Q} , i vertici delle parabole che i piani paralleli ad α tagliano su \mathcal{Q} formano una parabola \mathcal{P}' che giace su un determinato piano β (passante per l'asse di \mathcal{Q}).

Aggiungiamo un'ultima osservazione.

Osservazione 4.17. *Scelte due parabole \mathcal{P}_1 e \mathcal{P}_2 qualsiasi, disponiamole su due piani incidenti (ma non necessariamente perpendicolari come in Definizione 4.1) in modo che i loro assi di simmetria coincidano con la retta a comune ai due piani, i vertici coincidano e le loro concavità siano rivolte dalla stessa parte di a .*

Trasliamo la parabola \mathcal{P}_1 in modo che il vertice si mantenga sempre sulla parabola \mathcal{P}_2 . La superficie descritta dal moto della parabola \mathcal{P}_1 è un paraboloido ellittico.

Non diamo una dimostrazione di questo risultato (che si potrebbe ottenere da uno studio delle trasformazioni affini), che comunque non è immediata conseguenza di quello che sappiamo. Si noti infatti che da una parte in Definizione 4.1 le parabole \mathcal{P}_1 e \mathcal{P}_2 sono sì arbitrarie, ma giacciono su piani ortogonali; d'altra parte nella Proposizione 4.9 (dove il paraboloido è già assegnato) i piani α e β su cui giacciono le parabole non sono arbitrariamente scelti (la scelta di α determina β).