universidade de aveiro departamento de matemática

Álgebra Linear e Geometria Analítica

Agrupamento IV (ECT, EET, EI)

Capítulo 6

Cónicas e Quádricas

Equação geral de uma cónica

As cónicas são curvas obtidas pela interseção de um plano com um cone.

Dados $\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}$ não simultaneamente nulos e $\delta, \eta, \mu \in \mathbb{R}$,

$$\alpha x^2 + \beta y^2 + 2\gamma x y + \delta x + \eta y + \mu = 0$$

$$\Updownarrow$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}}_{X^T} \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha & \gamma \\ \gamma & \beta \end{bmatrix}}_{A} \underbrace{\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}}_{X} + \underbrace{\begin{bmatrix} \delta & \eta \end{bmatrix}}_{B} \underbrace{\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}}_{X} + \mu = 0$$

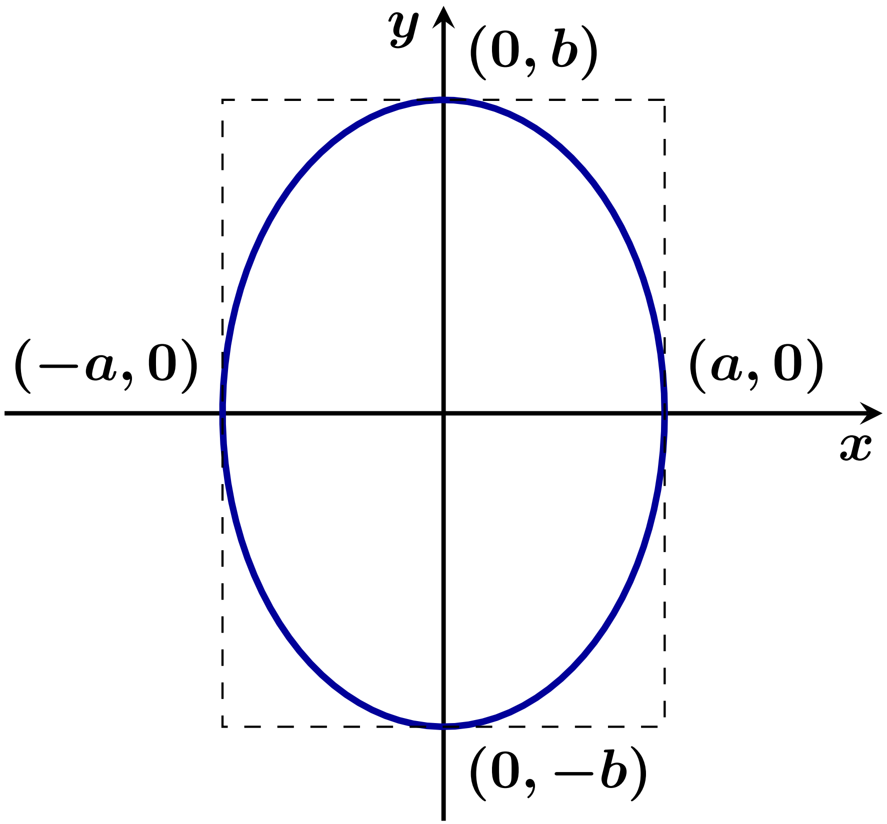
$$\Updownarrow$$

$$X^T A X + B X + \mu = 0,$$

com A matriz simétrica 2×2 não nula e B matriz 1×2, é a equação geral que as coordenadas $X \in \mathbb{R}^2$ dos pontos de uma cónica satisfazem.

Equação reduzida de uma elipse

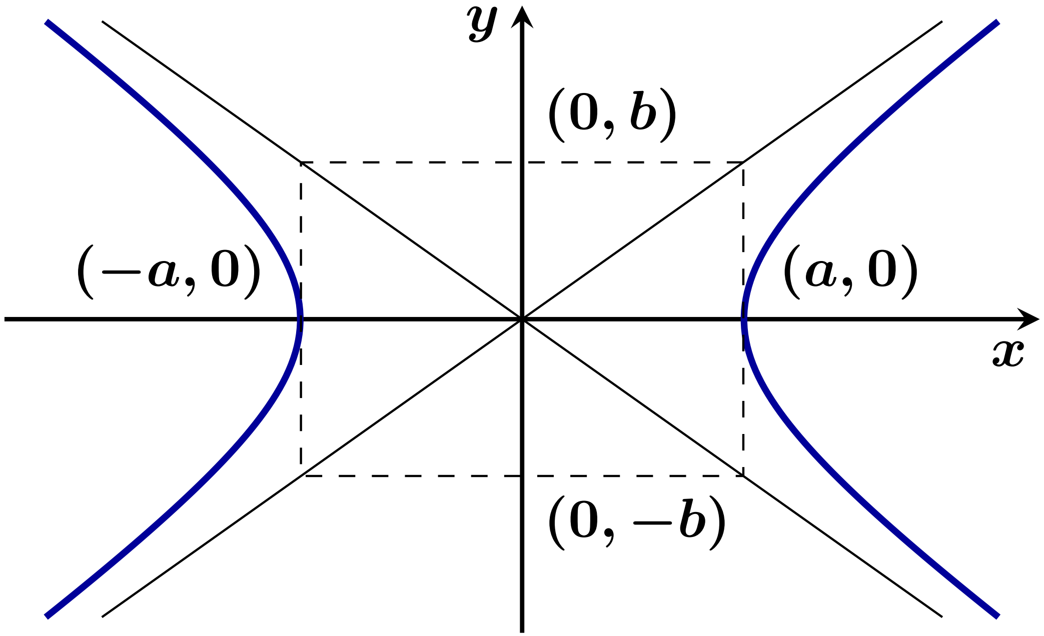
$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{a^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{b^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - 1 = 0 \Leftrightarrow \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad 0 < a \leq b$$



Caso particular: $a = b$ (=raio) $\Rightarrow$ **circunferência**

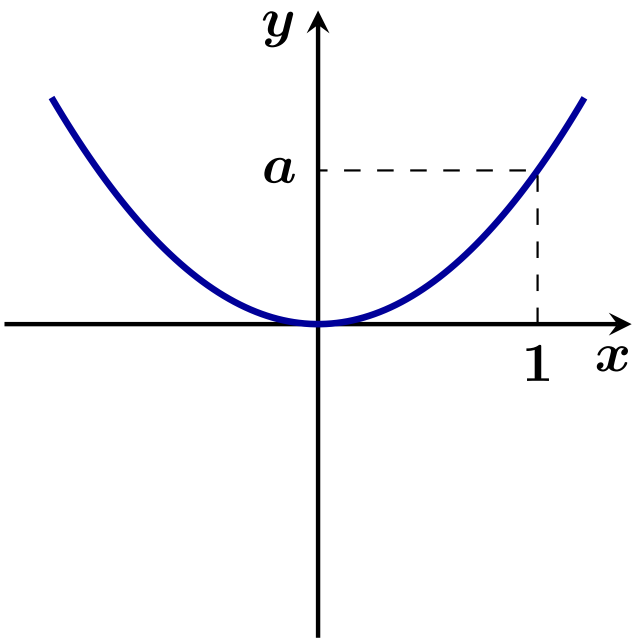
Equação reduzida de uma hipérbole

$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{a^2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{b^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - 1 = 0 \Leftrightarrow \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad a, b > 0$$

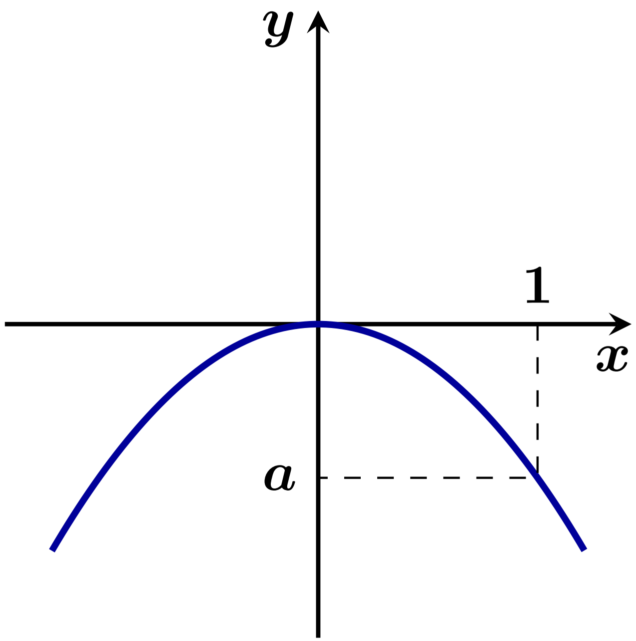


$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = 0 \Leftrightarrow y = ax^2$$

$a > 0$



$a < 0$



Pode simplificar-se a equação geral de uma cónica

$$X^T A X + B X + \mu = 0$$

efetuando a diagonalização ortogonal da matriz simétrica A.

Seja P uma matriz ortogonal tal que

$$P^T A P = D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix},$$

onde os valores próprios λ_1 e λ_2 de A estão ordenados do seguinte modo:

- $\lambda_1 \geq \lambda_2$, **se ambos são não nulos;**
- $\lambda_2 = 0$, **se um dos valores próprio é nulo.**

Considerando $X = P\hat{X}$ e $\hat{B} = B\,P$ na equação das cónicas, obtém-se

$$\hat{X}^T P^T A\,P\,\hat{X} + B\,P\,\hat{X} + \mu = \hat{X}^T D\,\hat{X} + \hat{B}\,\hat{X} + \mu = 0$$

que, para $\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix}$ e $\hat{B} = \begin{bmatrix} \hat{\delta} & \hat{\eta} \end{bmatrix}$, é equivalente a

$$\begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{\delta} & \hat{\eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} + \mu = 0$$

$$\Updownarrow$$

$$\lambda_1\,\hat{x}^2 + \lambda_2\,\hat{y}^2 + \hat{\delta}\hat{x} + \hat{\eta}\hat{y} + \mu = 0,$$

onde o termo cruzado (termo em “xy”) foi eliminado. A técnica para eliminar os termos $\hat{B}\hat{X}$ ou μ, quando possível, será mostrada nos exemplos.

Nota: Se $|P| > 0$, esta mudança de variável corresponde a uma rotação.

$$x^2 + y^2 + 4xy - 2x + 2y - 6 = 0$$

$$\Updownarrow$$

$$X^T A X + B X - 6 = 0$$

com

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \qquad A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}, \qquad B = \begin{bmatrix} -2 & 2 \end{bmatrix}.$$

No Exemplo 5 do Capítulo 5 (slide 5-17) efetuou-se a diagonalização ortogonal da matriz simétrica A, tendo-se obtido

$$P^T A P = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \qquad \text{com} \qquad P = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}$$

uma matriz ortogonal.

Considerando $X = P\,\hat{X}$, obtém-se

$$\hat{X}^T P^T A\, P\, \hat{X} + BP\,\hat{X} = 6.$$

Tomando $\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix}$ e atendendo a que $BP = \begin{bmatrix} 0 & 2\sqrt{2} \end{bmatrix}$, obtém-se

$$\begin{aligned} 3\hat{x}^2 - \hat{y}^2 + 2\sqrt{2}\hat{y} = 6 \;&\Leftrightarrow\; 3\hat{x}^2 - (\hat{y}^2 - 2\sqrt{2}\hat{y} + 2) = 6 - 2 \\ &\Leftrightarrow\; 3\hat{x}^2 - (\underbrace{\hat{y} - \sqrt{2}}_{\tilde{y}})^2 = 4 \\ &\quad\; \tilde{x} = \hat{x} \\ &\Leftrightarrow\; \frac{\tilde{x}^2}{\frac{4}{3}} - \frac{\tilde{y}^2}{4} = 1. \end{aligned}$$

Esta última é a equação reduzida de uma hipérbole.

Nota: A mudança de variável $\tilde{y} = \hat{y} - \sqrt{2}$ corresponde a uma translação.

$$2x^2 + y^2 + 12x + 4y + 18 = 0$$

$$\Updownarrow$$

$$2\left(x^2 + 6x + 9\right) - 18 + \left(y^2 + 4y + 4\right) - 4 + 18 = 0$$

$$\Updownarrow$$

$$2\,(\underbrace{x+3}_{\tilde{x}})^2 + (\underbrace{y+2}_{\tilde{y}})^2 = 4$$

$$\Updownarrow$$

$$\frac{\tilde{x}^2}{2} + \frac{\tilde{y}^2}{4} = 1.$$

Esta última é a equação reduzida de uma elipse.

$$2x^2 + 12x + 3y + 15 = 0$$

$$\Updownarrow$$

$$2\left(x^2 + 6x + 9\right) - 18 + 3y + 15 = 0$$

$$\Updownarrow$$

$$2\,(\underbrace{x+3}_{\tilde{x}})^2 + 3(\underbrace{y-1}_{\tilde{y}}) = 0$$

$$\Updownarrow$$

$$\tilde{y} = -\frac{2}{3}\,\tilde{x}^2.$$

Esta é a equação reduzida de uma parábola.

Exemplo 4:

$$2x^2 + y^2 + 12x + 4y + 24 = 0$$

$$\Updownarrow$$

$$2\left(x^2 + 6x + 9\right) - 18 + \left(y^2 + 4y + 4\right) - 4 + 24 = 0$$

$$\Updownarrow$$

$$2\,(x+3)^2 + (y+2)^2 = -2.$$

Esta é a equação de um conjunto vazio.

Exemplo 5:

$$2x^2 + y^2 + 12x + 4y + 22 = 0$$

$$\Updownarrow$$

$$2\,(x+3)^2 + (y+2)^2 = 0.$$

$$\Updownarrow$$

$$x = -3 \quad \text{e} \quad y = -2.$$

Esta é a equação de um ponto.

Situações degeneradas que podem ocorrer:

1. $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = -1 \;\rightarrow$ conjunto vazio;
2. $\frac{x^2}{a^2} = -1 \;\rightarrow$ conjunto vazio;
3. $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 0 \;\rightarrow$ um ponto (origem do referencial);
4. $\frac{x^2}{a^2} = 0 \;\rightarrow$ duas retas coincidentes (eixo Oy, $x = 0$);
5. $\frac{x^2}{a^2} = 1 \;\rightarrow$ duas retas estritamente paralelas ($x = \pm a$);
6. $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 0 \;\rightarrow$ duas retas concorrentes ($y = \pm \frac{b}{a} x$).

Identificação da cónica representada pela equação

$$\lambda_1 x^2 + \lambda_2 y^2 + \mu = 0.$$

Caso 1. λ_1 e λ_2 têm o **mesmo sinal**, ou seja, $|A| > 0$

μ e λ_1 têm sinais contrários	elipse
μ e λ_1 têm o mesmo sinal	conjunto vazio
$\mu = 0$	um ponto: $(0, 0)$

Caso 2. λ_1 e λ_2 têm **sinais contrários**, ou seja, $|A| < 0$

$\mu \neq 0$	hipérbole
$\mu = 0$	duas retas concorrentes: $y = \pm\sqrt{-\frac{\lambda_1}{\lambda_2}}\, x$

Identificação da cónica representada pela equação (onde $|A| = 0$)

$$\lambda_1 x^2 + \eta\, y + \mu = 0.$$

Caso 1. $\eta \neq 0 \;\rightarrow$ **parábola**

Caso 2. $\eta = 0$

μ e λ_1 têm o mesmo sinal	conjunto vazio
μ e λ_1 têm sinais contrários	duas retas estritamente paralelas: $x = \pm\sqrt{-\frac{\mu}{\lambda_1}}$
$\mu = 0$	duas retas coincidentes: $x = 0$ (eixo Oy)

Equação geral de uma quádrica

A equação geral (na forma matricial) de uma quádrica é

$$\boldsymbol{X}^T \boldsymbol{A}\,\boldsymbol{X} + \boldsymbol{B}\,\boldsymbol{X} + \boldsymbol{\mu} = \mathbf{0}, \qquad (1)$$

com $\boldsymbol{A}$ matriz simétrica $\mathbf{3} \times \mathbf{3}$ não nula, $\boldsymbol{B}$ matriz $\mathbf{1} \times \mathbf{3}$, $\boldsymbol{X} \in \mathbb{R}^{\mathbf{3}}$ e $\boldsymbol{\mu} \in \mathbb{R}$.

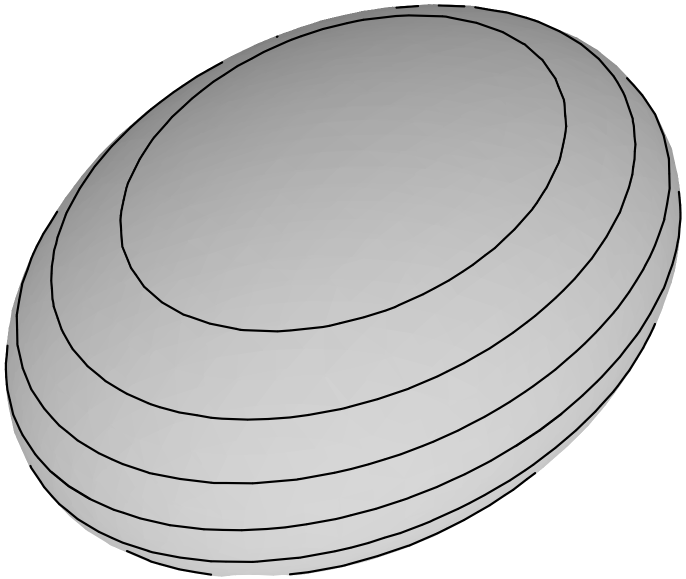
A partir desta equação geral podem ser obtidas as equações reduzidas das quádricas por um processo análogo ao levado a cabo para as cónicas:

1. "rotação" dos eixos (diagonalização ortogonal de $\boldsymbol{A}$) e
2. "translação" dos eixos.

Exercício: Determine as interseções com os planos coordenados ($x = 0$, $y = 0$ e $z = 0$) de todas as quádricas apresentadas nos próximos 5 slides.

Equação reduzida do elipsóide

Equação reduzida de um elipsóide: $\dfrac{x^2}{a^2} + \dfrac{y^2}{b^2} + \dfrac{z^2}{c^2} = 1.$



Nota: No caso particular $a = b = c$, tem-se uma esfera.

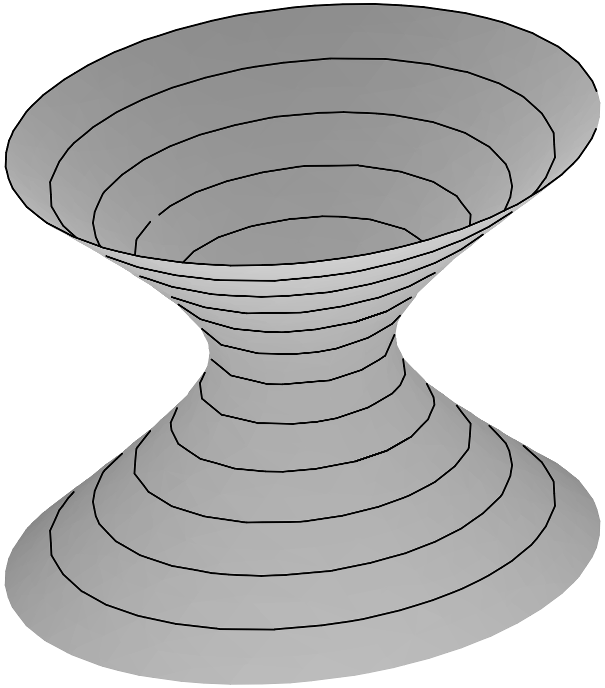
Equações reduzidas dos hiperbolóides

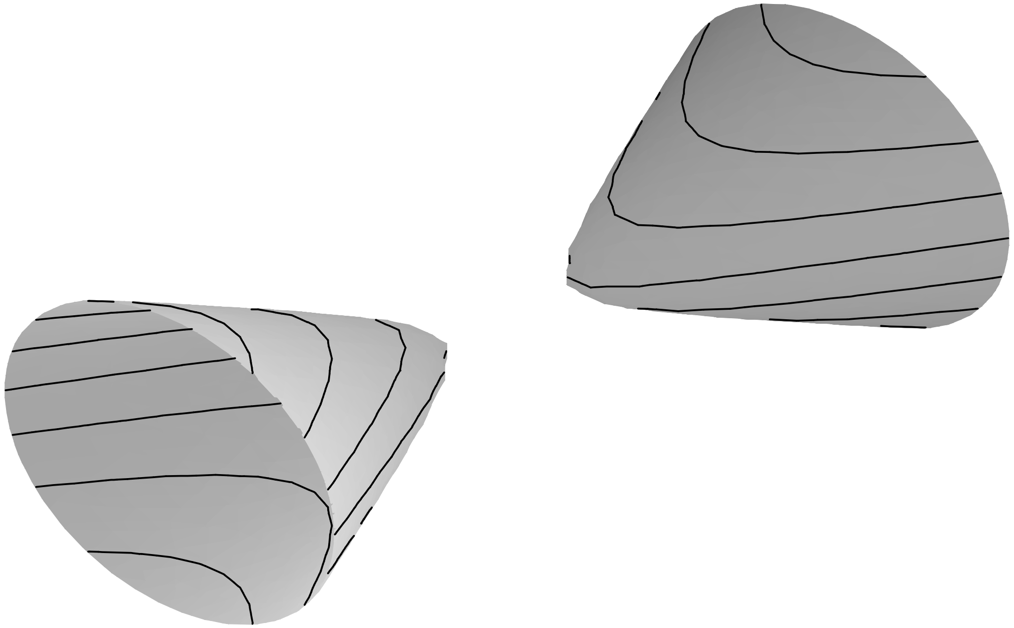
Equação reduzida de um **hiperbolóide de uma folha**:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1.$$

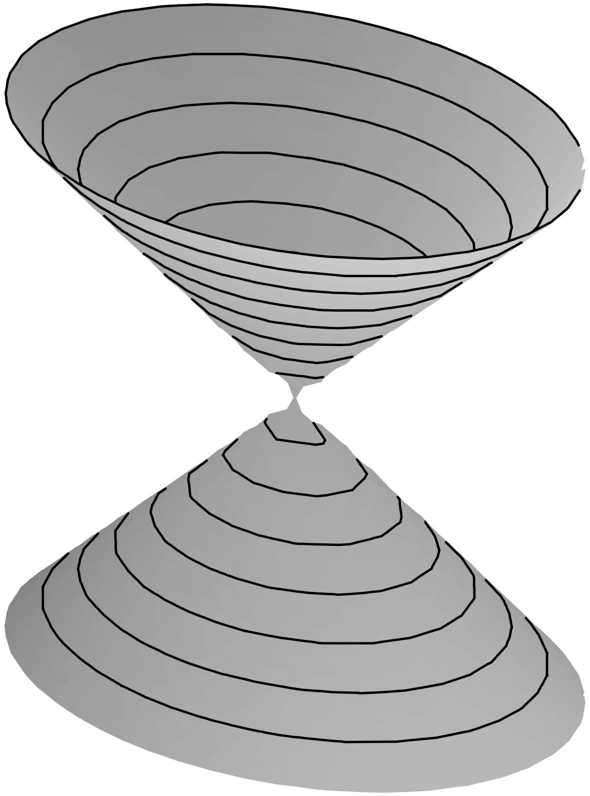
Equação reduzida de um **hiperbolóide de duas folhas**:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1.$$





Equação reduzida de um **cone**: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0.$

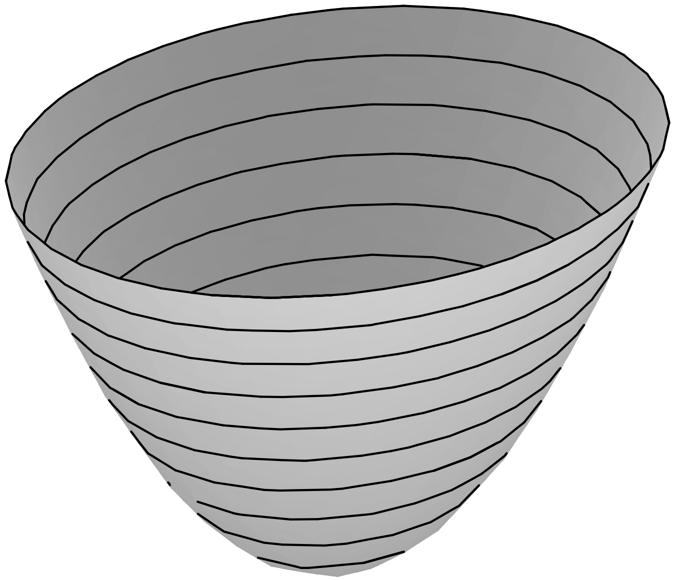


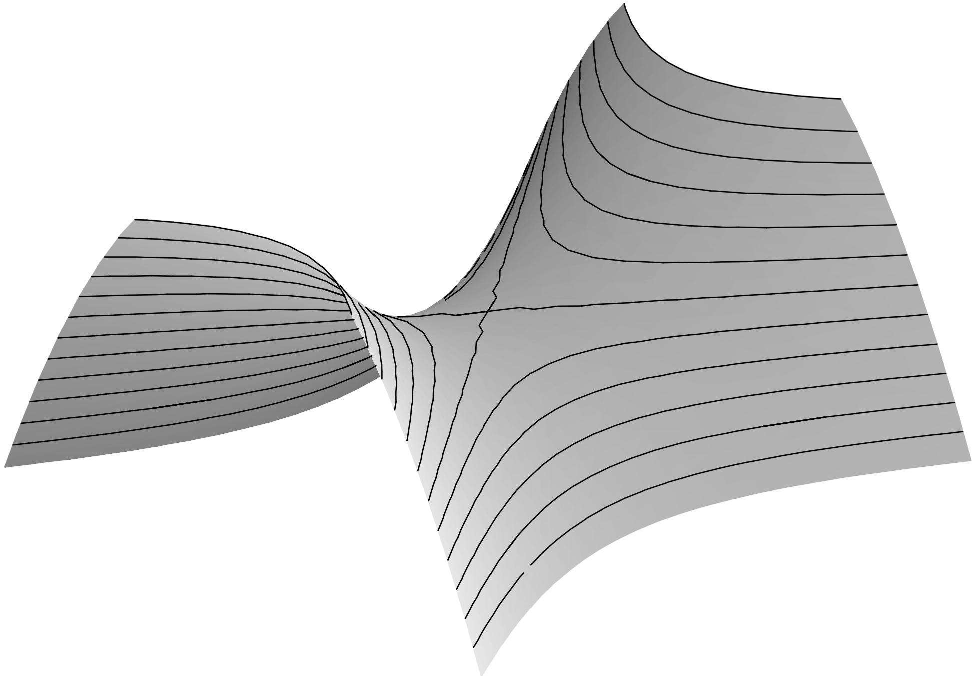
Equação reduzida de um parabolóide elíptico:

$$z = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}.$$

Equação reduzida de um parabolóide hiperbólico:

$$z = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}.$$





Equação reduzida de um cilindro elíptico:

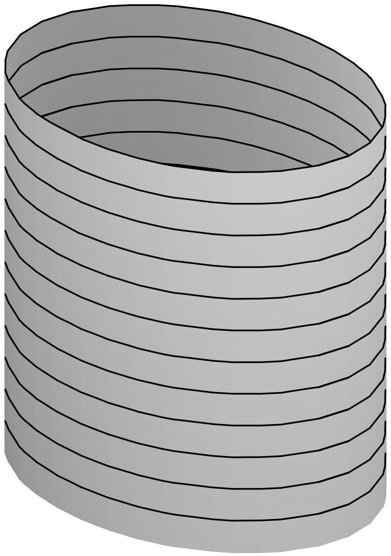
$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

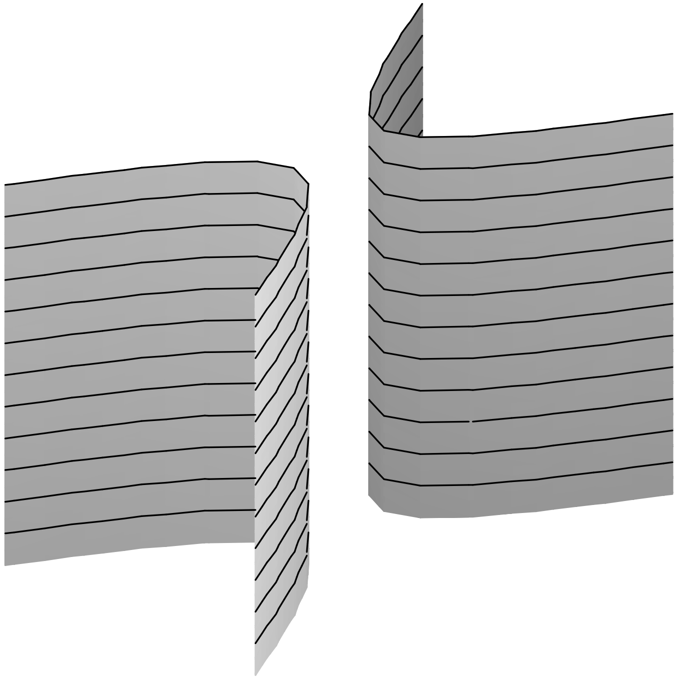
Equação reduzida de um cilindro hiperbólico:

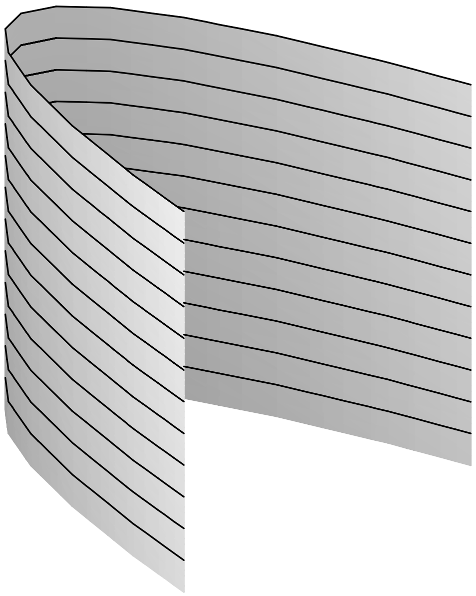
$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

Equação reduzida de um cilindro parabólico:

$$y = ax^2.$$







$$-8x^2 - 8y^2 + 10z^2 + 32xy - 4xz - 4yz - 24 = 0$$

$$\Updownarrow$$

$$X^T A \, X \; = \; 24,$$

com $$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad A = \begin{bmatrix} -8 & 16 & -2 \\ 16 & -8 & -2 \\ -2 & -2 & 10 \end{bmatrix}.$$

Como os valores próprios de A são 12, 6 e -24, existe P ortogonal tal que

$$P^T A \, P = D = \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & -24 \end{bmatrix}.$$

Exemplo 6 – continuação

Considerando $X = P\,\hat{X}$ na equação geral, com $\hat{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$, obtém-se

$$\begin{aligned} X^T A X = 24 \;&\Leftrightarrow \hat{X}^T D \hat{X} = 24 \\ &\Leftrightarrow 12\hat{x}^2 + 6\hat{y}^2 - 24\hat{z}^2 = 24 \\ &\Leftrightarrow \frac{\hat{x}^2}{2} + \frac{\hat{y}^2}{4} - \hat{z}^2 = 1 \end{aligned}$$

que é a **equação reduzida** de um **hiperbolóide de uma folha**.

Nota: As interseções com os eixos coordenados são:

$\hat{x} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\hat{y}^2}{4} - \hat{z}^2 = 1$ **hipérbole** no plano $\hat{y}O\hat{z}$

$\hat{y} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\hat{x}^2}{2} - \hat{z}^2 = 1$ **hipérbole** no plano $\hat{x}O\hat{z}$

$\hat{z} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\hat{x}^2}{2} + \frac{\hat{y}^2}{4} = 1$ **elipse** no plano $\hat{x}O\hat{y}$

Identificação da quádrica representada pela equação

$$\lambda_1 x^2 + \lambda_2 y^2 + \lambda_3 z^2 + \mu = 0.$$

Caso 1. λ_1, λ_2 e λ_3 têm o **mesmo sinal**

μ e λ_1 têm sinais contrários	**elipsóide**
μ e λ_1 têm o mesmo sinal	conjunto vazio
$\mu = 0$	ponto $(0, 0, 0)$

Caso 2. λ_1 e λ_2 têm o **mesmo sinal que é contrário** ao de λ_3

μ e λ_1 têm sinais contrários	**hiperbolóide de uma folha**
μ e λ_1 têm o mesmo sinal	**hiperbolóide de duas folhas**
$\mu = 0$	*cone*

Identificação da quádrica representada pela equação

$$\lambda_1 x^2 + \lambda_2 y^2 + \eta\, z + \mu = 0.$$

Caso 1. λ_1 **e** λ_2 **têm o mesmo sinal**

$\eta \neq 0 \;\rightarrow$ **parabolóide elíptico**

<table>
<tr><td rowspan="3">$\eta = 0 \;\rightarrow$</td><td>μ e λ_1 têm sinais contrários</td><td>cilindro elíptico</td></tr>
<tr><td>μ e λ_1 têm o mesmo sinal</td><td>conjunto vazio</td></tr>
<tr><td>$\mu = 0$</td><td>eixo Oz</td></tr>
</table>

Caso 2. λ_1 **e** λ_2 **têm sinal contrário**

$\eta \neq 0 \;\rightarrow$ **parabolóide hiperbólico**

<table>
<tr><td rowspan="2">$\eta = 0 \;\rightarrow$</td><td>$\mu \neq 0$</td><td>cilindro hiperbólico</td></tr>
<tr><td>$\mu = 0$</td><td>dois planos concorrentes $y = \pm\sqrt{-\frac{\lambda_1}{\lambda_2}}\; x$
que se intersetam no eixo Oz</td></tr>
</table>

Identificação da quádrica representada pela equação

$$\lambda_1 x^2 + \eta\, y + \mu = 0.$$

Caso 1. $\eta \neq 0 \quad \rightarrow \quad$ *cilindro parabólico*

Caso 2. $\eta = 0$

μ e λ_1 têm sinais contrários	dois planos estritamente paralelos: $x = \pm\sqrt{-\frac{\mu}{\lambda_1}}$
μ e λ_1 têm o mesmo sinal	conjunto vazio
$\mu = 0$	dois planos coincidentes: plano yOz

Nota: Na equação $\lambda_1 x^2 + \eta y + \nu z + \mu = 0$, o termo em z elimina-se com uma oportuna escolha da base do espaço próprio associado a zero.