

ANÁLISE MATEMÁTICA III

TODOS OS CURSOS EXCEPTO LCI, LEA, LEBM, LEFT E LMAC

TESTE 1 – 9 DE NOVEMBRO DE 2002

RESOLUÇÃO

(1) Considere a seguinte região de \mathbb{R}^3 :

$$V = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : 0 \leq x \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq y \leq \frac{\pi}{2}, \sin y \leq z \leq 1\}.$$

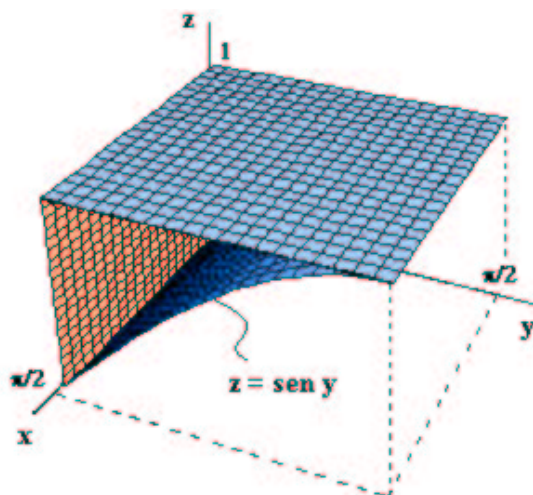
(3 val.) (a) Calcule o integral $\iiint_V 2z$.

(3 val.) (b) Escreva uma expressão para $\iiint_V f$ da forma

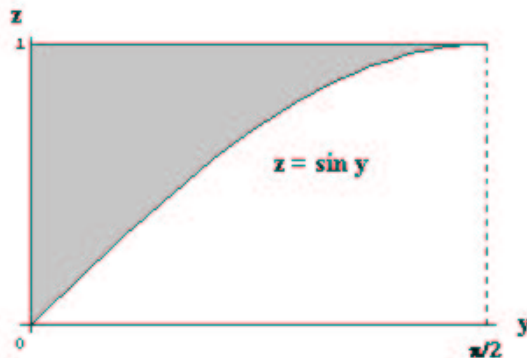
$$\int_{\dots}^{\dots} \left(\int_{\dots}^{\dots} \left(\int_{\dots}^{\dots} f(x, y, z) dx \right) dy \right) dz.$$

Resolução:

(a) A região V é constituída pelos pontos $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ com coordenadas (x, y) no quadrado $[0, \pi/2] \times [0, \pi/2]$ e com coordenada z entre a superfície $z = \sin y$ e o plano $z = 1$. Como esta superfície se obtém trasladando o gráfico do seno (no plano yz) ao longo do eixo dos xx , tem o seguinte aspecto:



Assim, o integral pedido pode ser calculado facilmente por um integral iterado na ordem $dz dy dx$. De facto, fixando $x \in [0, \pi/2]$ encontra-se como corte:



Donde:

$$\begin{aligned}
 \iiint_V 2z &= \int_0^{\pi/2} \left(\int_0^{\pi/2} \left(\int_{\sin y}^1 2z \, dz \right) dy \right) dx \\
 &= \int_0^{\pi/2} \left(\int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 y) \, dy \right) dx \\
 &= \int_0^{\pi/2} \left(\int_0^{\pi/2} \frac{1}{2}(1 + \cos 2y) \, dy \right) dx \\
 &= \int_0^{\pi/2} \left[\frac{1}{2} \left(y + \frac{1}{2} \sin 2y \right) \right]_{y=0}^{y=\pi/2} dx \\
 &= \int_0^{\pi/2} \frac{\pi}{4} \, dx = \frac{\pi^2}{8} .
 \end{aligned}$$

- (b) Para o integral iterado pedido, há que fixar primeiro a coordenada z . Do esboço acima é claro que se se fixar $z \in [0, 1]$ obtém-se como corte um rectângulo com $x \in [0, \pi/2]$ e com $y \in [0, \arcsin z]$:



Logo, o integral iterado escreve-se:

$$\iiint_V f = \int_0^1 \left(\int_0^{\arcsin z} \left(\int_0^{\pi/2} f(x, y, z) \, dx \right) dy \right) dz .$$

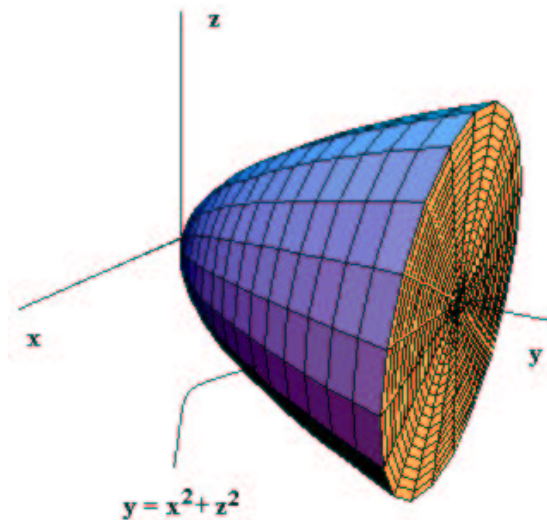
- (2) Um sólido com a forma da região

$$B = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x^2 + z^2 \leq y \leq 1\}$$

- (3) va

tem densidade de massa $f(x, y, z) = e^y$. Calcule a massa total do sólido.

Resolução: Observe-se que este sólido possui simetria rotacional em relação ao eixo dos yy . De facto, B é a região entre a superfície de revolução $y = x^2 + z^2$ e o plano $y = 1$:



Utiliza-se pois uma transformação $g : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ de coordenadas cilíndricas em relação ao eixo dos yy :

$$\begin{cases} x = \rho \cos \theta \\ y = y \\ z = \rho \sin \theta . \end{cases}$$

O determinante da matriz jacobiana desta transformação é

$$|\det(Dg(\rho, \theta, y))| = \rho$$

e nestas coordenadas a região é descrita por

$$g^{-1}(B) = \{(\rho, \theta, y) : 0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi, \rho^2 \leq y \leq 1\} .$$

Assim, a massa total do sólido B é dada por

$$\begin{aligned} \text{Massa}(B) &= \iiint_B e^y dx dy dz \\ &= \iiint_{g^{-1}(B)} \rho e^y dy d\rho d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^1 \int_{\rho^2}^1 \rho e^y dy d\rho d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^1 \rho (e - e^{\rho^2}) d\rho d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} \left[\frac{1}{2}(e\rho^2 - e^{\rho^2}) \right]_{\rho=0}^{\rho=1} d\theta \\ &= \pi(e - e + 1) = \pi . \end{aligned}$$

(3) Considere os campos vectoriais seguintes:

$$F(x, y, z) = (2xze^{x^2+y}, ze^{x^2+y}, e^{x^2+y}) \quad \text{e} \quad G(x, y, z) = \frac{1}{x^2 + z^2}(-z, 0, x).$$

(a) Calcule o trabalho de F ao longo do arco da hipérbole definida por $z = 1$ e $x^2 - y^2 = 1$, desde o ponto $(1, 0, 1)$ até ao ponto $(\sqrt{2}, 1, 1)$. (3 val.)

(b) Calcule o trabalho de G ao longo da circunferência definida por $x^2 + z^2 = 1$ e $y = 0$, percorrida no sentido anti-horário para um observador colocado no ponto $(0, -10, 0)$, e diga se G é ou não um gradiente no seu domínio. (3 val.)

(c) Calcule o trabalho de G ao longo da elipse definida por $x^2/10 + z^2/55 = 1$ e $y = 0$, percorrida no sentido anti-horário quando se observa de $(0, -10, 0)$. (2 val.)

Resolução:

(a) O campo F é de classe C^1 em \mathbb{R}^3 . Tem-se que

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_1}{\partial y} &= 2xz e^{x^2+y} = \frac{\partial F_2}{\partial x} \\ \frac{\partial F_1}{\partial z} &= 2x e^{x^2+y} = \frac{\partial F_3}{\partial x} \\ \frac{\partial F_2}{\partial z} &= e^{x^2+y} = \frac{\partial F_3}{\partial y}, \end{aligned}$$

logo F é fechado. Uma vez que \mathbb{R}^3 é um conjunto em estrela, conclui-se que F é um gradiente. Um potencial φ para F obtém-se resolvendo o sistema

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 2xz e^{x^2+y} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial y} = z e^{x^2+y} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial z} = e^{x^2+y} \end{cases} \iff \begin{cases} \varphi(x, y, z) = z e^{x^2+y} + k_1(y, z) \\ \varphi(x, y, z) = z e^{x^2+y} + k_2(x, z) \\ \varphi(x, y, z) = z e^{x^2+y} + k_3(x, y) \end{cases}$$

donde se conclui que um potencial para F é dado por

$$\varphi(x, y, z) = z e^{x^2+y}.$$

Para calcular o trabalho realizado por F ao longo do arco de hipérbole Γ usa-se o teorema fundamental do cálculo para integrais de linha:

$$W = \int_{\Gamma} F \cdot dg = \varphi(\sqrt{2}, 1, 1) - \varphi(1, 0, 1) = e^3 - e.$$

(b) O campo G é de classe C^1 no seu domínio $D = \mathbb{R}^3 \setminus \{(0, y, 0) : y \in \mathbb{R}\}$. Uma parametrização para a circunferência $C = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : y = 0, x^2 + z^2 = 1\}$ no sentido indicado é dada por $g : [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{R}^3$ com

$$g(\theta) = (\cos \theta, 0, \sin \theta).$$

Assim o trabalho realizado por G ao longo de C é

$$\begin{aligned} \int_C G \cdot dg &= \int_0^{2\pi} G(g(t)) \cdot g'(t) dt \\ &= \int_0^{2\pi} (-\sin \theta, 0, \cos \theta) \cdot (-\sin \theta, 0, \cos \theta) d\theta \\ &= 2\pi. \end{aligned}$$

O campo G não é um gradiente, porque o integral de G ao longo da curva regular e fechada C não é zero, ou seja, $\int_C G \cdot dg \neq 0$.

(c) Começa-se por ver que o campo G é fechado pois

$$\begin{aligned} \frac{\partial G_1}{\partial z} &= \frac{z^2 - x^2}{x^2 + z^2} = \frac{\partial G_3}{\partial x}, \\ \frac{\partial G_1}{\partial x} &= 0 = \frac{\partial G_2}{\partial z} \text{ e} \\ \frac{\partial G_2}{\partial z} &= 0 = \frac{\partial G_3}{\partial y}. \end{aligned}$$

A elipse E e a circunferência C da alínea anterior são caminhos homotópicos no domínio do campo G , logo, pela invariância de integrais de linha de campos fechados sobre caminhos fechados homotópicos, tem-se

$$\int_E G \cdot dh = \int_C G \cdot dg = 2\pi.$$

(3 val.) (4) Seja $A \subset [0, 1]$ um conjunto da forma $A = \cup_{i=1}^{+\infty}]a_i, b_i[$ com $\sum_{i=1}^{+\infty} (b_i - a_i) < 1$ e tal que todos os racionais de $]0, 1[$ pertencem a A . Mostre que a fronteira de A não tem medida nula.

Resolução:

Seja $I = [0, 1]$ e ∂A a fronteira de A .

Vai-se primeiro mostrar que $I \setminus A = \partial A$:

Considere-se $x \in I \setminus A$. Qualquer vizinhança de x contém um número racional de $]0, 1[$ (qualquer intervalo aberto não vazio contém números racionais). Como o conjunto A contém todos os racionais de $]0, 1[$, conclui-se que qualquer uma destas vizinhanças contém um ponto de A . Assim, qualquer vizinhança de x intersecta A e $I \setminus A$ (pois $x \in I \setminus A$), o que implica que $x \in \partial A$ e, conseqüentemente, $I \setminus A \subset \partial A$. Por outro lado, como A é um conjunto aberto, tem-se $\partial A \subset (I \setminus A)$, pelo que $\partial A = I \setminus A$.

Conclui-se assim que $[0, 1] = A \cup (I \setminus A) = A \cup \partial A$.

Se ∂A tivesse medida nula, para qualquer $\varepsilon > 0$ existiria uma colecção numerável de intervalos limitados $\{I_k\}_{k=1}^{+\infty}$, tais que

$$A \subset \bigcup_{k=1}^{+\infty} I_k \quad \text{e} \quad \sum_{k=1}^{+\infty} \text{vol}(I_k) < \varepsilon.$$

Considere-se $L = \sum_{i=1}^{+\infty} (b_i - a_i) < 1$. Escolhendo $\varepsilon < 1 - L$, poder-se-ia considerar uma cobertura numerável de $[0, 1]$, $\{U_j\}_{j=1}^{+\infty}$, formada pelos intervalos $\{]a_i, b_i[\}_{i=1}^{+\infty}$ (cobertura de A) e pelos intervalos $\{I_k\}_{k=1}^{+\infty}$ (cobertura de ∂A). Ter-se-ia então

$$1 = \text{vol}[0, 1] \leq \sum_{j=1}^{+\infty} \text{vol}(U_j) < L + \varepsilon < 1,$$

o que é absurdo. Conclui-se assim que a fronteira de A não tem medida nula.