

MAT77C - Fundamentos de Análise - Lista 8

Fabio Zhao Yuan Wang*

1. **Sejam $a, b \in \mathbb{R}$ em que $a < b$. Mostre que (a, b) , $(-\infty, b)$, $(a, +\infty)$ são conjuntos abertos.**

Dem: Vejamos que $A = (a, b)$ é um conjunto aberto. Note que para todo $x \in A$, $x \in \mathbb{R}$ e $a < x < b$, (1.0). Sejam $\bar{a} = x - a$ e $\bar{b} = b - x$. Como $x > a$, segue que $\bar{a} = x - a > 0$, ou seja $\bar{a} > 0$, analogamente temos $\bar{b} > 0$. Com isto, considere $r = \min(\bar{a}, \bar{b})$, vejamos então, que para todo $x \in A$, $(x - \frac{r}{2}, x + \frac{r}{2}) \subset A$. Ora, como $r = \min(\bar{a}, \bar{b})$, segue que $r \leq \bar{a}$ e $r \leq \bar{b}$. Ao considerar $r \leq \bar{a}$, isto é, $-r \geq -\bar{a}$, podemos verificar que,

$$x - \frac{r}{2} \geq x - \frac{\bar{a}}{2} = x - \frac{x - a}{2} = \frac{x + a}{2},$$

e, como $x > a$, segue que $x - \frac{r}{2} \geq \frac{x+a}{2} > \frac{a+a}{2} = a$, isto é, $x - \frac{r}{2} > a$. Agora, considere $r \leq \bar{b}$, ou seja,

$$x + \frac{r}{2} \leq x + \frac{\bar{b}}{2} = x + \frac{b - x}{2} = \frac{b + x}{2},$$

mas como $x < b$, segue que $x + \frac{r}{2} < \frac{b+b}{2} = b$, portanto $x + \frac{r}{2} < b$. Ademais, visto que $\bar{b} > 0$ e $\bar{a} > 0$, temos que $r = \min(\bar{a}, \bar{b}) > 0$, ou seja, $-r < r$. Isto posto, temos que,

$$a < x - \frac{r}{2} < x + \frac{r}{2} < b \quad (1.1)$$

e como para todo $x \in A$ temos (1.0), então (1.1) pode ser expressa por $(x - \frac{r}{2}, x + \frac{r}{2}) \subset A$. Com isso, podemos concluir que $A \subset \text{int}(A)$. Mais ainda, pela definição de pontos interiores, temos que $\text{int}(A) \subset A$, portanto $A = \text{int}(A)$ que, pela definição de abertos, segue que $A = (a, b)$ é um aberto, como queríamos.

Vejamos que $B = (-\infty, b)$ é um conjunto aberto. Análogo ao caso anterior, considere $\bar{b} = b - x > 0$ tal que $x \in B$. Como $x + \frac{\bar{b}}{2} = \frac{b+x}{2} < \frac{b+b}{2} = b$, e $- \bar{b} < \bar{b}$, então



$$x - \frac{\bar{b}}{2} < x + \frac{\bar{b}}{2} < b \quad (1.2)$$

e, visto que $x \in B$ se, e somente se, $x \in \mathbb{R}$ e $x < b$, segue que $(x - \frac{\bar{b}}{2}, x + \frac{\bar{b}}{2}) \subset B$, (1.3). Mais ainda, como para todo $x \in B$ temos (1.2), e por conseguinte (1.3), então $B \subset \text{int}(B)$ e, da definição de pontos interiores, $\text{int}(B) \subset B$, ou seja $B = \text{int}(B)$. Em vista disso, pela definição de abertos, segue que B é aberto, como queríamos.

Vejamos agora que $C = (a, +\infty)$ é um conjunto aberto. Como visto anteriormente, sejam $x \in A$ e $\bar{a} = x - a > 0$. Visto que $x - \frac{\bar{a}}{2} = \frac{x+a}{2} > a$ e $- \bar{a} < \bar{a}$, então,

$$a < x - \frac{\bar{a}}{2} < x + \frac{\bar{a}}{2}, \quad (1.4)$$

Portanto $(x - \frac{\bar{a}}{2}, x + \frac{\bar{a}}{2}) \subset C$, (1.5). Já que para todo $x \in C$ temos (1.5), segue que $C \subset \text{int}(C)$, e da definição de pontos interiores, $\text{int}(C) \subset C$, ou seja $C = \text{int}(C)$, sendo assim, C é aberto, como queríamos. \square

*  Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cidade, Paraná, Brasil.  fabioyuan@gmail.com.

2. Seja $A \subset \mathbb{R}$. Mostre que $a \in A$ é um ponto de acumulação de A se, e somente se, toda vizinhança V de a , contém um ponto de $A \setminus \{a\}$, isto é, $V \cap (A \setminus \{a\}) \neq \emptyset$.

Dem: Suponhamos que $a \in A$ é um ponto de acumulação de A , ou seja, existe uma sequência $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ tal que $x_n \in A \setminus \{a\}$ e $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$. Como $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$, para todo $\epsilon > 0$ existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que, para $n \in \mathbb{N}$, temos $|x_n - a| < \epsilon$ com $n \geq n_0$, ou seja

$$|x_n - a| < \epsilon \iff -\epsilon < x_n - a < \epsilon \implies a - \epsilon < x_n < a + \epsilon \quad (2.1)$$

e, como (2.1) vale para todo $\epsilon > 0$, é conveniente escolher um ϵ suficiente pequeno, tal que $(a - \epsilon, a + \epsilon)$ é uma vizinhança de a de raio ϵ centrada em a que esteja contida em A e que denotaremos por $V_\epsilon(a)$. Com isto, como $\epsilon > 0$, existe um ponto $a - \frac{\epsilon}{2} \in (a - \epsilon, a + \epsilon) = V_\epsilon(a) = V_\epsilon(a) \cap A$ que é diferente de a , ou seja, em particular, $a - \frac{\epsilon}{2} \in (V_\epsilon(a) \cap A) \setminus \{a\} = V_\epsilon(a) \cap (A \setminus \{a\})$. Com isto, temos o que queríamos.

Por outro lado, suponhamos que toda vizinhança V de a contém um ponto de $A \setminus \{a\}$, (2.2). Ora, como (2.2) vale para qualquer vizinhança $V(a)$, então, seja $V(a) = (\alpha, \beta)$, tal que $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ e $\alpha < \beta$. Da hipótese, sabemos que $V(a) \cap (A \setminus \{a\}) \neq \emptyset$, portanto, podemos construir uma sequência $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ em $V(a)$ tal que $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$. Com isto, sejam $\bar{\alpha} = a - \alpha$ e $\bar{\beta} = \beta - a$, e $r = \min(\bar{\alpha}, \bar{\beta})$, e, considere a sequência $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ tal que $x_n = a + \frac{r}{n+1}$. Note que $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$, mais ainda, por construção, para todo $n \in \mathbb{N}$, $x_n \in V(a) \setminus \{a\}$, portanto, a é um ponto de acumulação, como queríamos. \square

3. Mostre que todo conjunto enumerável tem interior vazio. Dê exemplos de conjuntos com interior vazio.

Exemplos de conjuntos com interior vazio:

(a) Qualquer conjunto unitário, isto é, $A = \{a\}$ onde $a \in \mathbb{R}$, tem interior vazio, visto que para todo $\epsilon > 0$, $(a - \epsilon, a + \epsilon) \not\subset A$. **Exemplo:** $A_0 = \{0\}$, $A_1 = \{1\}$, $A_{-1} = \{-1\}$ tem interior vazio.

(b) Qualquer conjunto finito contido nos reais, isto é, $A = \{x_0, \dots, x_n\}$ onde $n \in \mathbb{N}$ e $x_k \in \mathbb{R}$ para todo $k \in \mathbb{Z} \cap [0, n]$ e $x_i < x_j$ quando $i < j$, tem interior vazio.

Demonstração alternativa para este caso em específico: Considere $d = \min\{|x_i - x_{i+1}|; i = 0, 1, \dots, n-1\}$, para cada $d > \epsilon_0 > 0$ e $k \in \mathbb{Z} \cap [0, n]$, não existe $a \in A$ tal que $a \neq x_k$ e $a \in (x_k - \epsilon_0, x_k + \epsilon_0)$, já que, caso contrário, violaríamos a definição de d ; ou seja, $(x_k - \epsilon_0, x_k + \epsilon_0) \not\subset A$. Note que, para todo $\epsilon > 0$ existe pelo menos um ϵ_0 como descrito anteriormente, tal que $I_{0,k} = (x_k - \epsilon_0, x_k + \epsilon_0) \subset (x_k - \epsilon, x_k + \epsilon) = I_{1,k}$ com $k \in \mathbb{Z} \cap [0, n]$, portanto, como $I_{0,k} \not\subset A$, $I_{0,k} \subset I_{1,k}$ e $I_{0,k} \cap I_{1,k} \neq \emptyset$, segue que $I_{1,k} \not\subset A$, em outras palavras, para cada $k \in \mathbb{Z} \cap [0, n]$ e $\epsilon > 0$, temos que $(x_k - \epsilon, x_k + \epsilon) \not\subset A$, isto é, $\text{int}(A) = \emptyset$.

Exemplo: $A_0 = \{0, 1\}$, $A_1 = \{0, 1, 2\}$, $A_3 = \{0, 1, 2, 3\}$ tem interior vazio.

Antes da demonstração, devemos relembrar da seguinte proposição e de um teorema demonstrados em aula.

Proposição: Seja A um conjunto contável. Se $B \subset A$, então B é contável.

A proposição acima é logicamente equivalente a seguinte afirmação:

Proposição: Sejam dois conjuntos A e B tais que $B \subset A$. Se A é contável então B é contável.

Mais ainda, a contrapositiva da reescrita proposta nos diz que:

Lema: Sejam dois conjuntos A e B tais que $B \subset A$. Se B não é contável, então A não é contável.

Teorema: Todo intervalo I , não-degenerado é não-enumerável.

Demonstração do exercício proposto: Seja um conjunto qualquer $A \subset \mathbb{R}$ enumerável, ou seja, contável, e, afim de contradição, suponha que $\text{int}(A) \neq \emptyset$, isto é, existe pelo menos um $a \in \text{int}(A) \subset A$. Note que, se $A = \emptyset$, temos uma contradição; Visto que há pelo menos um $a \in \text{int}(A)$, da definição de ponto interior, existe $\epsilon > 0$ tal que $(a - \epsilon, a + \epsilon) \subset A$. Como $(a - \epsilon, a + \epsilon)$ é um intervalo não-degenerado, do teorema citado, segue que $(a - \epsilon, a + \epsilon)$ é não-enumerável, portanto $(a - \epsilon, a + \epsilon)$ não é contável. Daqui, visto que $\text{int}(A) \subset A$ e $\text{int}(A)$ não é contável, segue do lema acima que A não é contável, o que contradiz a hipótese. Portanto $\text{int}(A) = \emptyset$, como queríamos. \square

4. Sejam $A, B \subset \mathbb{R}$. Mostre que

a) $\text{int}(A \cup B) = \text{int}(A) \cup \text{int}(B)$

Dem: Primeiro, vejamos o que é a união de interiores de dois conjuntos. Da definição de união, para todo $x \in (\text{int}(A) \cup \text{int}(B))$, $x \in \text{int}(A)$ ou $x \in \text{int}(B)$. Daqui, dividiremos o problema em 3 casos:

- i. Se $x \in \text{int}(A)$, da definição de interior, existe $\epsilon_A > 0$ tal que $(x - \epsilon_A, x + \epsilon_A) \subset A$;
- ii. Se $x \in \text{int}(B)$, da definição de interior, existe $\epsilon_B > 0$ tal que $(x - \epsilon_B, x + \epsilon_B) \subset B$;
- iii. Se $x \in \text{int}(A)$ e $x \in \text{int}(B)$, dos dois itens anteriores, existe $\epsilon_{AB} > 0$ tal que $(x - \epsilon_{AB}, x + \epsilon_{AB}) \subset A \cap B$.

Agora, vejamos o que acontece quando $x \in \text{int}(A \cup B)$. Da definição de interior, temos que existe $\epsilon > 0$ tal que $(x - \epsilon, x + \epsilon) = I \subset (A \cup B)$. Da definição de subconjunto, para todo $y \in I$, temos que $y \in (A \cup B)$, isto é, $y \in A$ ou $y \in B$. Desta forma, é evidente que $I \subset A$, $I \subset B$ ou $I \subset (A \cap B)$, o que são equivalentes a (i.), (ii.) e (iii.), respectivamente. Com isto, temos que $\text{int}(A \cup B) = \text{int}(A) \cup \text{int}(B)$, como queríamos \square

b) $\text{int}(A \cap B) = \text{int}(A) \cap \text{int}(B)$

Dem: Seja $x \in \text{int}(A) \cap \text{int}(B)$. Da definição de interseção, $x \in \text{int}(A)$ e $x \in \text{int}(B)$, desta forma, da definição de interior, segue que existe $\epsilon_A > 0$ tal que $(x - \epsilon_A, x + \epsilon_A) = I_A \subset A$ e existe $\epsilon_B > 0$ tal que $(x - \epsilon_B, x + \epsilon_B) = I_B \subset B$. Note que $x \in I_A$ e $x \in I_B$, portanto, $x \in (I_A \cap I_B)$ e $(I_A \cap I_B) \subset (A \cap B)$, (\star). Daqui, seja $\epsilon = \min\{\epsilon_A, \epsilon_B\} > 0$, e por (\star), temos que $(x - \epsilon, x + \epsilon) \subset (A \cap B)$, isto é, $x \in \text{int}(A \cap B)$, deste modo $(\text{int}(A) \cap \text{int}(B)) \subset \text{int}(A \cap B)$. Vejamos que $\text{int}(A \cap B) \subset (\text{int}(A) \cap \text{int}(B))$. Ora, seja $x \in \text{int}(A \cap B)$, isto é, existe $\epsilon > 0$ tal que $(x - \epsilon, x + \epsilon) = I \subset (A \cap B)$, que, da definição de interseção, $I \subset A$ e $I \subset B$, ou seja $x \in \text{int}(A)$ e $x \in \text{int}(B)$, portanto $x \in (\text{int}(A) \cap \text{int}(B))$, e, por conseguinte, segue que $\text{int}(A \cap B) \subset (\text{int}(A) \cap \text{int}(B))$. Com isto, $\text{int}(A \cap B) = \text{int}(A) \cap \text{int}(B)$, como queríamos. \square

5. Sobre conjuntos abertos e fechados.

a) **Encontre um exemplo de interseção infinita de conjuntos abertos que não é um conjunto aberto.**

Seja A_n intervalos não-degenerados definidos por $A_n = \left(-\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right)$ onde $n \in \mathbb{N}$. Como visto no exercício 1, para todo $n \in \mathbb{N}$, A_n é um conjunto aberto. Considere a interseção infinita $I = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n$. Note que, para todo $n \in \mathbb{N}$, $0 < \frac{1}{n}$ e $-\frac{1}{n} < 0$, portanto, para todo $n \in \mathbb{N}$, temos $0 \in A_n$, ou seja, $\{0\} \subset I$. Vejamos que $I/\{0\} = \emptyset$. Afim de contradição, suponhamos que existe $x \in I/\{0\}$. Visto que $x \neq 0$, seja $d = |x| > 0$, e, da definição dos intervalos A_n , temos, por conseguinte, que $1 > |x| = d > 0$, ou seja, $\frac{1}{d} > 1$. Daqui, seja $n_0 = \left\lceil \frac{1}{d} \right\rceil$ o menor inteiro maior que $\frac{1}{d}$, ou seja, $\frac{1}{d} < n_0$, e, como $n_0 \in \mathbb{N}$, segue que existe um intervalo $A_{n_0} = \left(-\frac{1}{n_0}, \frac{1}{n_0}\right)$. Já que $\frac{1}{d} < n_0$, então, $\frac{1}{n_0} < d = |x|$, portanto, $x \notin A_{n_0}$, ou seja $x \notin I$,

uma contradição. Com isto, podemos concluir que $I = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n = \{0\}$, e, como visto no exercício 3 desta lista, segue que $I \neq \text{int}(I)$, portanto, I não é aberto, como queríamos.

b) **Encontre um exemplo de união infinita de conjuntos fechados que não é um conjunto fechado.**

Ora, das leis de De Morgan, sabemos que $(\bigcap_{\lambda \in \Lambda} X_\lambda)^c = \bigcup_{\lambda \in \Lambda} X_\lambda^c$, e como um conjunto é fechado se seu complementar é aberto, considere $A_n^c = (-\infty, -\frac{1}{n}] \cup [\frac{1}{n}, \infty)$ onde $n \in \mathbb{N}$. Visto que os intervalos $A_n = (-\frac{1}{n}, +\frac{1}{n})$ são abertos, segue que A_n^c é fechado para todo $n \in \mathbb{N}$. Mais ainda, como $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n = \{0\}$ não é aberto, da contrapositiva da definição de fechado, segue que $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n^c = \mathbb{R}/\{0\}$ não é fechado, como queríamos.

6. **Seja $A = (1, 2) \cup \{3\}$. Mostre que**

a) Se $x \in \mathbb{R}$ é tal que $x < 1$, $2 < x < 3$ ou $x > 3$, então $x \notin \bar{A}$.

Dem: Ora, afim de contradição suponhamos que $x \in \bar{A}$, portanto, existe uma sequência $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$, com $x_n \in A$ para todo $n \in \mathbb{N}$, tal que $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x$. Da definição de limite, para todo $\epsilon > 0$ existe $n_0 \in \mathbb{N}$, tal que $|x_n - x| < \epsilon$ para todo inteiro $n \geq n_0$, ou seja, em particular, para todo $\epsilon > 0$, existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que $x - \epsilon < x_{n_0} < x + \epsilon$, deste modo, para todo ϵ existe $\tau \in A$, tal que $\tau \in (x - \epsilon, x + \epsilon)$, (*).

Vejamos o caso onde $x < 1$. Fixando $\epsilon = \frac{1-x}{2} > 0$ e, de (*), tendo em vista que

$$1 = \frac{1+1}{2} > \frac{1+x}{2} = x + \frac{1-x}{2} = x + \epsilon$$

e, mais ainda, que todo número real menor que 1 não está em A , segue que existe $\tau \in A$ tal que $\tau \in (x - \epsilon, x + \epsilon) \not\subset A$, isto é, $\tau \in A$ e $\tau \notin A$, uma contradição, portanto, para todo $x < 1$, temos $x \notin \bar{A}$, como queríamos.

Para o caso $x > 3$. Fixando $\epsilon = \frac{x-3}{2} > 0$, e, de (*), tendo em vista que

$$3 = \frac{3+3}{2} < \frac{3+x}{2} = x - \frac{x-3}{2} = x - \epsilon$$

e, que todo número real maior que 3 não está em A , segue que existe $\tau \in A$ tal que $\tau \in (x - \epsilon, x + \epsilon) \not\subset A$, isto é, $\tau \in A$ e $\tau \notin A$, uma contradição, portanto, para todo $x > 3$, temos $x \notin \bar{A}$, como queríamos.

Para $2 < x < 3$, fixando $\epsilon = \min\{\frac{x-2}{2}, \frac{3-x}{2}\}$, e, de (*), tendo em vista que,

$$3 = \frac{3+3}{2} > \frac{3+x}{2} = x + \frac{3-x}{2} \geq x + \epsilon \quad (1)$$

e que,

$$2 = \frac{2+2}{2} < \frac{x+2}{2} = x - \frac{x-2}{2} \quad (2a)$$

De (2a), se $\epsilon = \frac{x-2}{2}$, então $2 < x - \epsilon$, mais ainda, se $\epsilon = \frac{3-x}{2} < \frac{x-2}{2}$, então $-\epsilon > -\frac{x-2}{2}$, desta forma,

$$2 < x - \frac{x-2}{2} \leq x - \epsilon \quad (2)$$

Note que, para todo $y \in (2, 3)$ temos que $y \notin A$, e, de (1) e (2), temos que $(x - \epsilon, x + \epsilon) \subset (2, 3)$ e existe $\tau \in A$ tal que $\tau \in (x - \epsilon, x + \epsilon)$, ou seja, $\tau \in A$ e $\tau \notin A$, uma contradição. Com isto, temos que $x \notin \bar{A}$, como queríamos \square

b) Se $x \in \mathbb{R}$ é tal que $x < 1$ ou $x > 2$, então $x \notin A'$.

Ora, afim de contradição, suponhamos que $x \in A'$, isto é, existe uma sequência $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ com $x_n \in A \setminus \{x\}$ tal que $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x$. Da definição de limite, temos que para todo $\epsilon > 0$ existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que $|x_n - x| < \epsilon$ com $x \in \mathbb{N}_{\geq n_0}$. Ou seja, em particular, tomando $\tau = x_{n_0}$, para todo $\epsilon > 0$, existe $\tau \in A \setminus \{x\}$ tal que $|\tau - x| < \epsilon$, (*).

Se $x > 3$, fixando $\epsilon = \frac{x-3}{2} > 0$, de (*), existe $\tau \in A \setminus \{x\}$ tal que $\tau \in \left(x - \frac{x-3}{2}, x + \frac{x-3}{2}\right)$, portanto $\tau \in \left(\frac{x+3}{2}, \frac{3x-3}{2}\right)$. Mas, como

$$3 = \frac{3+3}{2} < \frac{x+3}{2}$$

segue que $\left(\frac{x+3}{2}, \frac{3x-3}{2}\right) \cap A \setminus \{x\} = \emptyset$, ou seja $\tau \in \emptyset$, contradição, como queríamos.

Se $x = 3$, fixando $\epsilon = \frac{1}{2} > 0$, de (*), temos que existe $\tau \in A \setminus \{x\}$ tal que $\tau \in \left(x - \frac{1}{2}, x + \frac{1}{2}\right)$, mas, por construção, $\left(x - \frac{1}{2}, x + \frac{1}{2}\right) \cap A \setminus \{x\} = \emptyset$, portanto $\tau \in \emptyset$, uma contradição, como queríamos.

Se $2 < x < 3$