

Notas de Aula

Leandro F. Aurichi ¹

24 de março de 2015

¹Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - USP

Sumário

1	Espaços topológicos	5
1.1	Definições básicas	5
	Alongamentos	13
	Exercícios	14
1.2	Bases	15
	Alongamentos	18
	Exercícios	18
1.3	Axiomas de Separação	19
	Alongamentos	24
	Exercícios	24
	Índices	32
	Notação	32
	Índice Remissivo	33

Capítulo 1

Espaços topológicos

1.1 Definições básicas

Um espaço topológico é um espaço dotado de uma noção de proximidade. Uma maneira de dar uma noção de proximidade é de modo quantitativo, como no caso de espaços métricos:

Definição 1.1.1. Seja X um conjunto. Dizemos que (X, d) é um **espaço métrico**, se $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ é uma função que satisfaz:

- (a) $\forall x, y \in X, d(x, y) \geq 0$ e $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$;
- (b) $\forall x, y \in X, d(x, y) = d(y, x)$;
- (c) $\forall x, y, z \in X, d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$.

Desta maneira, temos que uma maneira de medir o quanto um ponto está próximo do outro - simplesmente vemos o valor de d neste dois pontos. Um ponto está mais próximo de outro o quanto menor for o valor de d calculado nestes dois pontos.

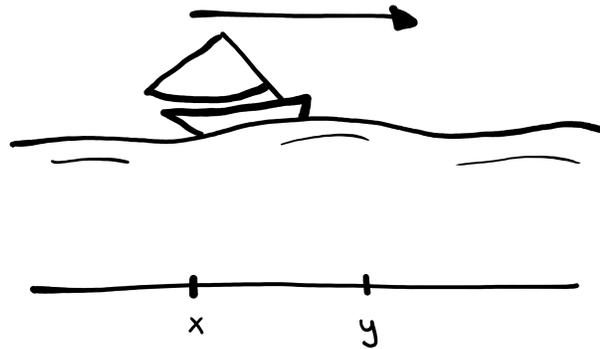
Exemplo 1.1.2. Uma métrica sobre o conjunto dos reais \mathbb{R} é a função $d(x, y) = |x - y|$. Esta é a métrica usual sobre \mathbb{R} .

Para muitos casos, essa noção de proximidade é suficiente. Mas ela não cobre uma gama grande (e importante) de noções em matemática.

O seguinte exemplo é um caso simples onde o conceito não é aplicável: considere um rio com uma correntença razoavelmente forte. Para simplificar, pensemos que esta correnteza anda para a direita e seja tão forte que não seja possível andar rio acima (ou seja, andar para esquerda). Podemos

Para espaços de funções em geral não é possível definir métricas.

representar este rio usando a reta real, mas precisamos de uma noção de proximidade diferente da usual: ao tomarmos dois pontos x, y com $x < y$ queremos que y esteja perto de x mas não que x esteja perto de y (pois a correnteza não permite sair de y e chegar em x). Note que isso não é possível ao usar uma métrica, uma vez que teríamos $d(x, y) = d(y, x)$.



Veja também o Exercício 1.1.53.

Uma maneira de contornar isso é simplesmente abandonar o conceito quantitativo de proximidade dado pela métrica e usarmos um conceito qualitativo. Para isso, vamos precisar de um conceito diferente:

Definição 1.1.3. Seja X um conjunto. Dizemos que uma família não vazia \mathcal{F} de subconjuntos de X é um **filtro** sobre X se:

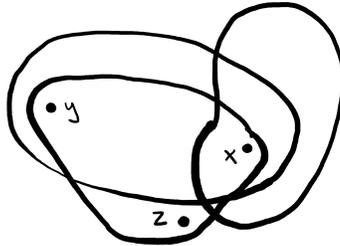
- (a) $\emptyset \notin \mathcal{F}$;
- (b) se $A, B \in \mathcal{F}$, então $A \cap B \in \mathcal{F}$;
- (c) se $A \in \mathcal{F}$ e $A \subset B$, então $B \in \mathcal{F}$.

Agora, em vez de usarmos uma função distância, “atribuímos” a cada ponto um filtro:

Definição 1.1.4. Seja X um conjunto e $x \in X$. Dizemos que uma coleção \mathcal{V} de subconjuntos de X é um **sistema de vizinhanças** para x se \mathcal{V} é um filtro sobre X e cada elemento $V \in \mathcal{V}$ é tal que $x \in V$. Chamamos cada $V \in \mathcal{V}$ de **vizinhança** de x .

A intuição por trás desta definição é que cada elemento de \mathcal{V} representa uma coleção de pontos “próximos” de x . Você pode pensar que um ponto y fixado está mais próximo de x quanto maior for o conjunto

$$\{V \in \mathcal{V} : y \in V\}$$



Desta maneira, na situação representada pela figura, o ponto y está mais próximo de x que o ponto z está.

O próximo exemplo dá uma maneira de traduzirmos para a ideia de vizinhanças o conceito de proximidade dado pela métrica usual em \mathbb{R} .

Exemplo 1.1.5. Fixado $x \in \mathbb{R}$, temos que $\mathcal{V} = \{V : \text{existem } a < x < b \text{ tais que }]a, b[\subset V\}$ é um sistema de vizinhanças para x .

Ao mudarmos ele ligeiramente, obtemos a ideia do exemplo do rio:

Exemplo 1.1.6. Fixado $x \in \mathbb{R}$, temos que $\mathcal{V} = \{V : \text{existe } a > x \text{ tal que }]x, a[\subset V\}$ é um sistema de vizinhanças de x . Ao conjunto dos reais munido com tal conceito de vizinhanças damos o nome de **reta de Sorgenfrey**.

Para tentarmos ver que algo da nossa intuição está sendo capturado neste exemplo, vamos analisar um caso específico. Considere as vizinhanças de 0 como definidas acima. Note que números positivos estão muito mais próximos de 0 do que os números negativos. Note também que isso não ocorre no caso mais simétrico do exemplo anterior.

Com todo esse material, podemos finalmente definir um espaço topológico. Intuitivamente, um espaço topológico nada mais é que um conjunto tal que todos os pontos possuem uma medida qualitativa de proximidade:

Definição 1.1.7. Seja X um conjunto. Fixe, para cada $x \in X$, \mathcal{V}_x um sistema de vizinhanças para x . Chamamos de **espaço topológico** o conjunto X com tal família fixada de sistemas de vizinhanças.

Sim, parece estranho agora que isso seja realmente uma tradução. Mas veremos isso mais formalmente no Alongamento 1.1.42.

Veja a definição “definitiva” em 1.1.12.

Esta não é a definição mais comum, nem mesmo a que vamos mais trabalhar. A versão mais comum e que é mais “curta” de se definir, veremos adiante. Não a apresentamos diretamente por entendermos que ela esconde muito da intuição do que é um espaço topológico.

Um tipo bastante importante de vizinhança são os abertos, que nada mais são do que conjuntos que são vizinhanças de todos os seus pontos:

Definição 1.1.8. Seja X um espaço topológico. Dizemos que $A \subset X$ é um **aberto** se para todo $a \in A$, temos que A é vizinhança de a .

Vejam alguns exemplos:

Exemplo 1.1.9. Se considerarmos \mathbb{R} com a topologia usual (como no Exemplo 1.1.5) e $a < b$, temos que um intervalo $]a, b[$ é aberto. De fato, dado qualquer $x \in]a, b[$, o próprio conjunto $]a, b[$ atesta que $]a, b[$ é uma vizinhança de x . Por outro lado, o conjunto $[a, b[$ não é aberto pois $[a, b[$ não é vizinhança de a .

Exemplo 1.1.10. Se considerarmos \mathbb{R} com a topologia da reta de Sorgenfrey (como no Exemplo 1.1.6 e $a < b$, temos que $]a, b[$ é aberto, pois, para cada $x \in]a, b[$, temos que $[x, b[$ atesta que $]a, b[$ é uma vizinhança de x . De maneira análoga, podemos mostrar que $[a, b[$ também é aberto.

Os abertos tem algumas propriedades a se destacar:

Proposição 1.1.11. *Seja X um espaço topológico. Temos:*

- (a) \emptyset e X são abertos;
- (b) se A e B são abertos, então $A \cap B$ também é;
- (c) se \mathcal{A} é uma família de abertos, então $\bigcup_{A \in \mathcal{A}} A$ é um aberto.

Demonstração. Veja o Alongamento 1.1.40. □

Essas propriedades da última proposição na verdade motivam a definição usual de espaço topológico:

Definição 1.1.12. Dizemos que (X, τ) é um **espaço topológico** se X é um conjunto e $\tau \subset \wp(X)$ é uma família que satisfaz:

- (a) $X, \emptyset \in \tau$;
- (b) se $A, B \in \tau$, então $A \cap B \in \tau$;

$\wp(X)$ é a coleção de todos os subconjuntos de X .

(c) se $\mathcal{A} \subset \tau$, então $\bigcup_{A \in \mathcal{A}} A \in \tau$.

Cada elemento de τ é chamado de **aberto** e a própria família τ é chamada de **topologia**.

Exemplo 1.1.13. Seja X um conjunto qualquer. Então $\tau = \{\emptyset, X\}$ é uma topologia sobre X (chamada **topologia caótica**).

Exemplo 1.1.14. Seja X um conjunto qualquer. Então $\tau = \wp(X)$ é uma topologia sobre X (chamada **topologia discreta**).

Proposição 1.1.15. *Seja X um conjunto qualquer e σ uma topologia sobre X . Então, σ é a topologia discreta se, e somente se, para todo $x \in X$, $\{x\} \in \sigma$.*

Demonstração. Se σ é a topologia discreta, segue da definição que para todo $x \in X$, $\{x\} \in \sigma$.

Reciprocamente, dado um conjunto qualquer $A \subset X$, ele pode ser escrito da forma $A = \bigcup_{x \in A} \{x\}$. Logo, pela definição de topologia, $A \in \sigma$ e, portanto, σ é a topologia discreta. \square

Exemplo 1.1.16. O conjunto \mathbb{R} é um espaço topológico, com a topologia $\tau = \{A \subset \mathbb{R} : \forall x \in A, \exists \varepsilon > 0,]x - \varepsilon, x + \varepsilon[\in A\}$. Esta é chamada de **topologia usual em \mathbb{R}** .

Veja o Alongamento 1.1.42 para notar que diversas maneiras definir a topologia nos reais chegam ao mesmo lugar.

Exemplo 1.1.17. Seja X um conjunto qualquer. Considere $\tau = \{A \subset X : X \setminus A \text{ é finito}\} \cup \{\emptyset\}$. Temos que τ é uma topologia sobre X (chamada **topologia cofinita** - veja também o Exercício 1.1.51).

De fato, $X, \emptyset \in \tau$. Seja \mathcal{A} uma família de elementos de τ . Temos que

$$X \setminus \bigcup_{A \in \mathcal{A}} A = \bigcap_{A \in \mathcal{A}} (X \setminus A)$$

Note que o lado direito da equação é finito pois é interseção de conjuntos finitos. Logo, $\bigcup_{A \in \mathcal{A}} A \in \tau$. Agora, sejam $A_1, A_2 \in \tau$. Note que

$$X \setminus (A_1 \cap A_2) = (X \setminus A_1) \cup (X \setminus A_2)$$

Novamente o lado direito é finito, pois é união finita de conjuntos finitos. Portanto, $A_1 \cap A_2 \in \tau$ e τ é uma topologia sobre X .

Também podemos definir um espaço “menor” que um já fixado:

Definição 1.1.18. Seja (X, τ) um espaço topológico e seja $Y \subset X$. A **topologia de subespaço** sobre Y induzida por (X, τ) é dada por $\tau_Y = \{A \cap Y : A \in \tau\}$. Veja Alongamento 1.1.44.

A menos de menção contrária, sempre que tomarmos $Y \subset X$, onde (X, τ) é um espaço topológico, Y será considerado com a topologia de subespaço.

Com uma métrica, é fácil definir uma topologia:

Proposição 1.1.19. *Seja (X, d) um espaço métrico. Então, $\tau = \{A \subset X : \forall x \in A, \exists r > 0, B_r(x) \subset A\}$, onde $B_r(x) = \{y \in X : d(x, y) < r\}$, é uma topologia sobre X , chamada **topologia induzida pela métrica d** .*

Demonstração. Note que $X \in \tau$ trivialmente e que $\emptyset \in \tau$ por vacuidade. Agora, sejam $A_1, A_2 \in \tau$. Se $A_1 \cap A_2 = \emptyset$, nada há a provar. Caso contrário, seja $x \in A_1 \cap A_2$. Sejam $\varepsilon_1, \varepsilon_2 > 0$ tais que $B_{\varepsilon_1}(x) \subset A_1$ e $B_{\varepsilon_2}(x) \subset A_2$. Seja $\varepsilon = \min\{\varepsilon_1, \varepsilon_2\}$. Note que $B_\varepsilon(x) \subset A_1 \cap A_2$. Finalmente, seja $\mathcal{A} \subset \tau$. Novamente, podemos supor que $\bigcup_{A \in \mathcal{A}} A \neq \emptyset$ pois caso contrário nada há a provar. Seja $x \in \bigcup_{A \in \mathcal{A}} A$. Seja $A \in \mathcal{A}$ tal que $x \in A$. Seja $\varepsilon > 0$ tal que $B_\varepsilon(x) \subset A$. Note que $B_\varepsilon(x) \subset \bigcup_{A \in \mathcal{A}} A$ e, portanto, $\bigcup_{A \in \mathcal{A}} A \in \tau$. \square

Podemos obter a ideia de vizinhança mesmo se começamos com o conceito de aberto:

Definição 1.1.20. Sejam (X, τ) espaço topológico e $x \in X$. Dizemos que V é uma **vizinhança** de x se existe A aberto tal que $x \in A \subset V$.

Um importante conceito é o de conjunto fechado:

Definição 1.1.21. Seja (X, τ) um espaço topológico. Dizemos que $F \subset X$ é um **conjunto fechado** se $X \setminus F$ é aberto.

Exemplo 1.1.22. Em qualquer espaço topológico (X, τ) , X e \emptyset são fechados, pois seus complementares são abertos (em particular, X e \emptyset são abertos e fechados).

Exemplo 1.1.23. Em \mathbb{R} , $[0, 1]$ é fechado já que $\mathbb{R} \setminus [0, 1] =]-\infty, 0[\cup]1, +\infty[$.

Exemplo 1.1.24. Na topologia discreta, qualquer conjunto é fechado. Para isso, basta notar que o complementar de qualquer conjunto é ainda um membro de $\wp(X)$ e, portanto, é aberto.

Exemplo 1.1.25. Na reta de Sorgenfrey, $[a, b[$ é fechado, onde $a < b$. Vamos mostrar que $\mathbb{R} \setminus [a, b[$ é aberto. Se $x \in \mathbb{R} \setminus [a, b[$, então há dois casos a considerar:

- $x \geq b$: basta tomar o aberto $[x, x + 1[$, cuja interseção com $[a, b[$ é vazia;

- $x < a$: podemos considerar o aberto $[x, a[$, que também está contido no complementar de $[a, b[$.

Portanto, o complementar de $[a, b[$ é aberto, como queríamos.

Algo muito comum de se fazer é tomar o menor fechado contendo um determinado conjunto:

Definição 1.1.26. Sejam (X, τ) um espaço topológico e $A \subset X$. Definimos $\overline{A} = \bigcap \{F \subset X : F \text{ é fechado e } A \subset F\}$ (**fecho** de A , também denotado por $\text{Cl}(A)$).

Definimos $\overset{\circ}{A} = \bigcup \{V \subset X : V \text{ é aberto e } V \subset A\}$ (**interior** de A , também denotado por $\text{Int}(A)$).

Proposição 1.1.27. Sejam (X, τ) um espaço topológico e $A \subset X$. Então \overline{A} é fechado e $\overset{\circ}{A}$ é aberto.

Demonstração. Decorre diretamente da definição e das propriedades de conjuntos abertos e fechados. \square

Pensando que os abertos que contém um ponto são as possíveis noções de “perto do ponto”, podemos definir a noção de um ponto estar perto de um conjunto se toda vez que olhamos para “perto do ponto”, interceptamos o conjunto:

Definição 1.1.28. Sejam (X, τ) um espaço topológico e $A \subset X$. Dizemos que $x \in X$ é **ponto aderente** a A se para todo aberto V tal que $x \in V$ valer $V \cap A \neq \emptyset$.

Note que esta definição difere da definição que daremos para ponto de acumulação.

Vamos mostrar que o fecho de um conjunto basicamente é a coleção de todos os pontos próximos do conjunto:

Proposição 1.1.29. Sejam (X, τ) um espaço topológico e $A \subset X$. Então $\overline{A} = \{x \in X : x \text{ é ponto aderente de } A\}$.

Demonstração. Chame de D o conjunto dos pontos aderentes a A . Vamos provar que $\overline{A} \subset D$. Seja $x \in \overline{A}$. Seja V aberto tal que $x \in V$ e suponha $V \cap A = \emptyset$. Logo, $A \subset X \setminus V$ que é fechado. Assim, pela definição de \overline{A} , segue que $\overline{A} \subset X \setminus V$, contradição com o fato que $x \in \overline{A}$ e $x \in V$.

Provemos que $D \subset \overline{A}$. Seja $x \in D$ e suponha $x \notin \overline{A}$. Logo, $x \in X \setminus \overline{A}$ que é aberto. Como $x \in D$, temos que $(X \setminus \overline{A}) \cap A \neq \emptyset$. Contradição, pois $A \subset \overline{A}$. \square

Proposição 1.1.30. Sejam (X, τ) espaço topológico e $A, B \subset X$. Temos

Vale um resultado análogo para o interior de um conjunto A . Em particular, A é aberto se, e somente se, $\overset{\circ}{A} = A$ (ver Alongamento 1.1.48).

(a) Se $A \subset B$, então $\overline{A} \subset \overline{B}$;

(b) $\overline{\overline{A}} = \overline{A}$;

(c) $\overline{A} = A$ se, e somente se, A é fechado.

Demonstração. Dado $x \in \overline{A}$, segue que $U \cap A \neq \emptyset$ para todo aberto U que contém x . Como $A \subset B$, segue em particular que $U \cap B \neq \emptyset$. Isto prova (a).

Provemos (c). Naturalmente se $\overline{A} = A$, obtemos que A é fechado, pois seu fecho é fechado. Reciprocamente, se A é fechado, segue que $A = \bigcap \{F \subset X : F \text{ é fechado e } A \subset F\} = \overline{A}$. O item (b) segue então diretamente de (c), por \overline{A} ser fechado. \square

Exemplo 1.1.31. Considere um conjunto X com a topologia discreta. Como todo subconjunto A de X é fechado, segue que $\overline{A} = A$ (e também que $\overset{\circ}{A} = A$).

Exemplo 1.1.32. Em \mathbb{R} , $\overline{[a, b[} = [a, b]$. De fato, b é o único ponto fora de $[a, b[$ que é aderente a $[a, b[$.

Exemplo 1.1.33. Na reta de Sorgenfrey, $\overline{[a, b[} = [a, b]$. Para isso, basta lembrar que $[a, b[$ é fechado.

Exemplo 1.1.34. Em \mathbb{R} , $\overline{\mathbb{Q}} = \mathbb{R}$ e $\overset{\circ}{\mathbb{Q}} = \emptyset$. Ambas as igualdades se devem ao fato de que dado qualquer ponto $q \in \mathbb{Q}$ e $\varepsilon > 0$, $]x - \varepsilon, x + \varepsilon[$ contém pontos de \mathbb{Q} e de $\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$. O mesmo vale na reta de Sorgenfrey.

Algumas vezes, um ponto pode estar próximo tanto de um conjunto, como de seu complementar:

Definição 1.1.35. Sejam (X, τ) um espaço topológico e $A \subset X$. Dizemos que $x \in X$ é **ponto de fronteira** de A se para todo $V \subset X$ aberto tal que $x \in V$, temos $V \cap A \neq \emptyset$ e $V \cap (X \setminus A) \neq \emptyset$.

Notação 1.1.36. $\partial A = \{x \in X : x \text{ é ponto de fronteira de } A\}$.

Exemplo 1.1.37. Em \mathbb{R} , $\partial[a, b[= \{a, b\}$. Enquanto que na reta de Sorgenfrey temos que $\partial[a, b[= \emptyset$.

Observação 1.1.38. A igualdade acima vale de modo geral. Se A é um subconjunto aberto e fechado de um espaço topológico (X, τ) , então $\partial A = \emptyset$.

Exemplo 1.1.39. Em \mathbb{R} (ou na reta de Sorgenfrey), $\partial\mathbb{Q} = \mathbb{R}$.

Alongamentos

Alongamento 1.1.40. Mostre a Proposição 1.1.11.

Alongamento 1.1.41. Mostre que se começamos com abertos, definimos vizinhanças e depois abertos novamente (usando essas vizinhanças), chegamos à mesma topologia. Mostre também o caminho inverso.

Alongamento 1.1.42. Vejamos que os abertos em \mathbb{R} podem ser obtidos de várias maneiras. Mostre que os abertos são os mesmos se fizermos:

- (a) como no Exemplo 1.1.16;
- (b) usamos as vizinhanças como em 1.1.5
- (c) usamos a métrica de 1.1.2 e depois a Proposição 1.1.19.

Alongamento 1.1.43. Mostre que todo aberto usual nos reais é um aberto na reta de Sorgenfrey.

Alongamento 1.1.44. Mostre que, de fato, a topologia de subespaço é uma topologia.

Alongamento 1.1.45. Considere $[0, 1]$ com a topologia de subespaço de \mathbb{R} . Mostre que $[0, \frac{1}{2}[$ é aberto em $[0, 1]$ mas não é aberto em \mathbb{R} .

Alongamento 1.1.46. Seja (X, τ) um espaço topológico. Mostre que são verdadeiras:

- (a) X, \emptyset são fechados;
- (b) Se $F, G \subset X$ são fechados, então $F \cup G$ é fechado;
- (c) Se \mathcal{F} é uma família não vazia de fechados, então $\bigcap_{F \in \mathcal{F}} F$ é um fechado.

Alongamento 1.1.47. Sejam (X, τ) um espaço topológico e $A \subset X$. Dizemos que $x \in X$ é **ponto interior** de A se existe V aberto tal que $x \in V \subset A$. Mostre que $\overset{\circ}{A} = \{x \in X : x \text{ é ponto interior de } A\}$.

Alongamento 1.1.48. Mostre o análogo à Proposição 1.1.30 para o interior.

Alongamento 1.1.49. Sejam (X, τ) espaço topológico e $A \subset X$. Mostre as seguintes afirmações:

- (a) $\partial A = \overline{A} \cap \overline{X \setminus A}$

(b) $\overset{\circ}{A} \cap \partial A = \emptyset$

(c) $\partial A = \overline{A} \setminus \overset{\circ}{A}$

(d) $\overline{A} = A \cup \partial A$

Alongamento 1.1.50. Mostre que a fronteira de um conjunto sempre é fechada.

Exercícios

Exercício 1.1.51. Na definição da topologia cofinita (Exemplo 1.1.17), poderíamos pedir, em vez que os abertos tivessem complementar finito, que os abertos simplesmente fossem infinitos?

Exercício 1.1.52. Dizemos que duas métricas sobre um mesmo espaço X são **métricas equivalentes** se elas induzem a mesma topologia. Mostre que se (X, d) é um espaço métrico qualquer, então existe uma outra métrica d' sobre X equivalente a d e que é limitada (isto é, existe $L > 0$ tal que $d'(x, y) \leq L$ para todo $x, y \in X$).

Exercício 1.1.53. Seja X um conjunto. Chamamos de **assimétrica** (na maioria dos livros, **quasi-métrica**), uma função $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ satisfazendo:

(i) $\forall x, y \in X, d(x, y) \geq 0$ e $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$;

(ii) $\forall x, y, z \in X, d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$.

(a) Mostre que $\tau = \{A \subset X : \forall x \in A, \exists r > 0, B_r(x) \subset A\}$, onde $B_r(x) = \{y \in X : d(x, y) < r\}$ é uma topologia sobre X (como fizemos com uma métrica);

(b) Considere seguinte função sobre \mathbb{R} :

$$d(x, y) = \begin{cases} y - x & \text{se } y \geq x \\ 1 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

para $x, y \in \mathbb{R}$. Mostre que d é uma assimétrica sobre \mathbb{R} . Mostre que a topologia induzida por ela é a mesma da reta de Sorgenfrey.

Exercício 1.1.54. Sejam (X, d) um espaço métrico e $Y \subset X$. Note que a restrição de d a Y induz uma métrica sobre Y . Mostre que a topologia induzida por tal métrica e a topologia induzida de subespaço de X coincidem.

Exercício 1.1.55. Sejam (X, τ) um espaço topológico e $Y \subset X$ subespaço. Mostre que $F \subset Y$ é fechado em Y se, e somente se, existe $F' \subset X$ fechado em X tal que $F = F' \cap Y$.

Exercício 1.1.56. Sejam (X, τ) um espaço topológico e $Y \subset X$ subespaço fechado. Mostre que $F \subset Y$ é fechado em Y se, e somente se, F é fechado em X .

Exercício 1.1.57. Encontre o análogo do Exercício 1.1.56 para abertos.

Exercício 1.1.58. Seja (X, d) um espaço métrico. Dados $A \subset X$ não vazio e $x \in X$, definimos $d(x, A)$ (**distância de ponto a conjunto**) como $d(x, A) = \inf\{d(x, a) : a \in A\}$. Mostre que $x \in \overline{A}$ se, e somente se, $d(x, A) = 0$.

Exercício 1.1.59. Sejam (X, τ) um espaço topológico, $A \subset X$, $x \in X$ e \mathcal{V} um sistema fundamental de vizinhanças para x . Mostre que $x \in \overline{A}$ se, e somente se, para todo $V \in \mathcal{V}$, $V \cap A \neq \emptyset$.

Exercício 1.1.60. Considere $\tau = \{A \subset \mathbb{Z} : \text{para todo } a \in A, \text{ existe } b \in \mathbb{N}_{>0} \text{ tal que } \{a + bz : z \in \mathbb{Z}\} \subset A\}$.

- (a) Mostre que τ é uma topologia sobre \mathbb{Z} .
- (b) Mostre que não existe um aberto não vazio que seja finito.
- (c) Mostre que, dados $a \in \mathbb{Z}$ e $b \in \mathbb{N}_{>0}$, o conjunto $S(a, b) = \{a + bz : z \in \mathbb{Z}\}$ é aberto e fechado.
- (d) Mostre que $\mathbb{Z} \setminus \{-1, 1\} = \bigcup_{p \text{ é primo}} S(0, p)$.
- (e) Mostre que existem infinitos primos.

1.2 Bases

Uma base nada mais é que uma subfamília de abertos que é suficiente para recuperarmos todos os abertos por meio de uniões:

Definição 1.2.1. Seja (X, τ) um espaço topológico. Dizemos que $\mathcal{B} \subset \tau$ é uma **base** para (X, τ) se para todo aberto não vazio $A \in \tau$, existe uma família $\mathcal{A} \subset \mathcal{B}$ de elementos da base tal que $A = \bigcup_{B \in \mathcal{A}} B$.

Uma importante caracterização para bases é o seguinte resultado:

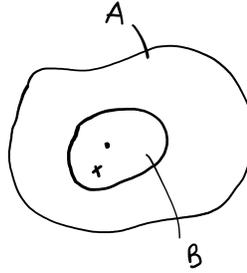


Figura 1.1: O desenho básico de uma base

Veja a figura 1.1.

Proposição 1.2.2. *Uma família \mathcal{B} de subconjuntos de τ é uma base para (X, τ) se, e somente se, para todo aberto não vazio $A \in \tau$ e todo $x \in A$, existe $B \in \mathcal{B}$ de forma que $x \in B \subset A$.*

Demonstração. Suponha que \mathcal{B} seja uma família como no enunciado e seja $A \in \tau$. Para cada elemento $x \in A$, existe um conjunto $B_x \in \mathcal{B}$ tal que $x \in B_x \subset A$. Segue, então, que $A = \bigcup_{x \in A} B_x$.

Reciprocamente, sejam $x \in X$ e $A \in \tau$. Como podemos escrever $A = \bigcup \mathcal{B}'$ com $\mathcal{B}' \subset \mathcal{B}$, tomamos $B \in \mathcal{B}'$ tal que $x \in B$. Além disso, temos que $B \subset A$. \square

Exemplo 1.2.3. $\mathcal{B} = \{]a, b[: a, b \in \mathbb{Q}\}$ é uma base para a topologia usual de \mathbb{R} .

De fato, seja $x \in \mathbb{R}$ e $A \in \tau$. Pela definição de τ , existe $\varepsilon > 0$ tal que tal que $]x - \varepsilon, x + \varepsilon[\subset A$. Note que existem $a, b \in \mathbb{Q}$ tais que

$$x - \varepsilon < a < x < b < x + \varepsilon$$

Logo, $B =]a, b[\in \mathcal{B}$ e $x \in B \subset A$.

Exemplo 1.2.4. Seja (X, d) um espaço métrico qualquer. Então, $\mathcal{B} = \{B_{\frac{1}{n}}(x) : x \in X, n \in \mathbb{N}_{>0}\}$ é uma base para (X, d) (ver Alongamento 1.2.12).

Exemplo 1.2.5. Seja X um conjunto qualquer. $\mathcal{B} = \{\{x\} : x \in X\}$ é uma base para a topologia discreta sobre X (ver Alongamento 1.2.12).

Exemplo 1.2.6. A família $\mathcal{B} = \{[x, y[: x < y\}$ é uma base para a reta de Sorgenfrey (ver Alongamento 1.2.12).

Em algum sentido, uma base é um conjunto suficiente para determinar todos os abertos. Podemos fazer o análogo para vizinhanças:

Definição 1.2.7. Sejam (X, τ) um espaço topológico e $x \in X$. Dizemos que \mathcal{V} é um **sistema fundamental de vizinhanças** de x se Veja o Exercício 1.2.16

- (a) Para todo $V \in \mathcal{V}$, V é vizinhança de x ;
- (b) Para todo aberto $A \subset X$ tal que $x \in A$, existe $V \in \mathcal{V}$ tal que $x \in V \subset A$.

No caso em que os elementos de \mathcal{V} são abertos, chamamos \mathcal{V} de **base local** para x .

Exemplo 1.2.8. Em \mathbb{R} , $\mathcal{V}_1 = \{]x - \frac{1}{n}, x + \frac{1}{n}[: n \in \mathbb{N}_{>0}\}$ é um sistema fundamental de vizinhanças de x (mais que isso, como todos os membros de \mathcal{V}_1 são abertos, \mathcal{V}_1 é uma base local de x).

$\mathcal{V}_2 = \{[x - \frac{1}{n}, x + \frac{1}{n}] : n \in \mathbb{N}_{>0}\}$ é um sistema fundamental de vizinhanças de x .

Exemplo 1.2.9. Na reta de Sorgenfrey, $\mathcal{V} = \{[x, x + \frac{1}{n}[: n \in \mathbb{N}_{>0}\}$ é um sistema fundamental de vizinhanças de x .

Exemplo 1.2.10. Considere X com a topologia discreta. $\mathcal{V}_1 = \{\{x\}\}$ é um sistema fundamental de vizinhanças de x , bem como $\mathcal{V}_2 = \{A \subset X : x \in A\}$.

O próximo resultado mostra como bases do espaço original se relacionam com as de um subespaço:

Proposição 1.2.11. *Se \mathcal{B} é uma base para (X, τ) , então $\mathcal{B}' = \{B \cap Y : B \in \mathcal{B}\}$ é uma base para $Y \subset X$ com a topologia de subespaço.* Podemos fazer o análogo com sistemas fundamentais de vizinhanças.

Demonstração. Sejam $A' \in \tau_Y$ e $x \in A'$. Pela definição de topologia de subespaço, existe $A \in \tau$ tal que $A' = A \cap Y$ e, assim, $x \in A$. Logo, pelo fato de \mathcal{B} ser base, existe $B \in \mathcal{B}$ tal que $x \in B \subset A$. Logo, $x \in B \cap Y \subset A \cap Y$ e, portanto, \mathcal{B}' é uma base para (Y, τ_Y) . □

Alongamentos

Alongamento 1.2.12. Mostre as afirmações dos Exemplos 1.2.4, 1.2.5 e 1.2.6.

Alongamento 1.2.13. Seja (X, τ) espaço topológico. Sejam $x \in X$ e V aberto tal que $x \in V$. Mostre que $\{A \in \tau : x \in A \subset V\}$ é um sistema fundamental de vizinhanças para x .

Alongamento 1.2.14. Sejam (X, τ) espaço topológico, $x \in X$, \mathcal{V} sistema fundamental de vizinhanças de x e $W \subset X$ vizinhança de x . Mostre que $\{V \cap W : V \in \mathcal{V}\}$ é um sistema fundamental de vizinhanças de x .

Exercícios

Exercício 1.2.15. Seja X um conjunto e sejam τ e σ topologias sobre X . Sejam \mathcal{B} e \mathcal{C} bases para (X, τ) e (X, σ) respectivamente.

- Suponha que para todo $x \in X$ e todo $B \in \mathcal{B}$ e $C \in \mathcal{C}$ tais que $x \in B$ e $x \in C$ existam $C' \in \mathcal{C}$ e $B' \in \mathcal{B}$ tais que $x \in C' \subset B$ e $x \in B' \subset C$. Mostre que $\tau = \sigma$.
- Suponha que para todo $x \in X$ e todo $B \in \mathcal{B}$ tal que $x \in B$ exista $C \in \mathcal{C}$ tal que $x \in C \subset B$. É verdade que $\sigma = \tau$? Se não for verdade, vale alguma das inclusões?

Exercício 1.2.16. Seja (X, τ) espaço topológico. Para cada $x \in X$, seja \mathcal{V}_x um sistema fundamental de vizinhanças para x . Mostre que, dado $A \subset X$, A é aberto se, e somente se, para todo $x \in X$ existe $V \in \mathcal{V}_x$ tal que $x \in V \subset A$.

Exercício 1.2.17. Dizemos que (X, τ) é um **espaço zero-dimensional** se ele possui uma base formada por abertos fechados.

- Mostre que a reta de Sorgenfrey é zero-dimensional.
- Mostre que tanto $\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ quanto \mathbb{Q} são zero-dimensionais (considerados com a topologia de subsespaço).
- Mostre que se Y é subespaço de um espaço zero-dimensional, então Y também é zero-dimensional.

Exercício 1.2.18. Sejam (X, τ) um espaço topológico e \mathcal{B} base para (X, τ) . Mostre que τ é a menor topologia que contém \mathcal{B} . Isto é, mostre que $\tau = \bigcap_{\sigma \in T} \sigma$ onde $T = \{\sigma : \sigma \text{ é uma topologia para } X \text{ tal que } \mathcal{B} \subset \sigma\}$.

Exercício 1.2.19. Dado um conjunto X e uma família \mathcal{B} de subconjuntos de X , chamamos de **topologia gerada** por X o conjunto $[\mathcal{B}] = \bigcap_{\tau \in T} \tau$, onde $T = \{\tau \subset \wp(X) : \tau \text{ é topologia sobre } X \text{ e } \mathcal{B} \subset \tau\}$.

- (a) Mostre que T definido acima é não vazio (e, portanto, podemos tomar a intersecção).
- (b) Mostre que $[\mathcal{B}]$ é uma topologia sobre X .
- (c) Mostre que, se \mathcal{B} satisfaz:
- (i) $\forall x \in X, \exists B \in \mathcal{B}$ tal que $x \in B$;
 - (ii) $\forall A, B \in \mathcal{B}, \forall x \in A \cap B, \exists C \in \mathcal{B}$ tal que $x \in C \subset A \cap B$.

então \mathcal{B} é uma base para $(X, [\mathcal{B}])$.

1.3 Axiomas de Separação

Muitas vezes, só a definição de topologia é muito simples para que possamos trabalhar. Nesta seção veremos algumas hipóteses adicionais que podemos pedir num espaço topológico. As hipóteses desta seção tem como objetivo, por exemplo, exigir que a topologia sobre o espaço seja rica o suficiente para diferenciar os pontos do espaço, ou separar os pontos entre si ou até mesmo separar fechados. Apresentaremos as propriedades em ordem de “força” (veja o Exercício 1.3.27).

Num espaço T_0 , pelo menos um dos abertos da Figura 1.2 existe.

Definição 1.3.1. Dizemos que um espaço topológico (X, τ) é T_0 se para quaisquer $x, y \in X$ distintos existir um aberto A tal que $(x \in A \text{ e } y \notin A)$ ou $(x \notin A \text{ e } y \in A)$.

Num espaço T_0 , os abertos “diferenciam” pontos, isto é, dados dois pontos distintos, existe ao menos um aberto que os distingue.

Vejam alguns exemplos de espaços que não são T_0 . Exemplos que satisfazem tal propriedade serão dados no decorrer do texto (veja também o Exercício 1.3.24).

Exemplo 1.3.2. Qualquer conjunto X com mais de dois pontos, munido da topologia caótica não é T_0 .

Exemplo 1.3.3. Seja X um conjunto qualquer com pelo menos dois elementos. Fixe $x, y \in X$ distintos e defina $\tau = \{A \subset X : x, y \in A \text{ ou } A = \emptyset\}$. É fácil ver que (X, τ) é um espaço topológico. Contudo, não existe aberto em X tal que $x \in A \text{ e } y \notin A$ ou $y \in A \text{ e } x \notin A$. Logo (X, τ) não é T_0 .

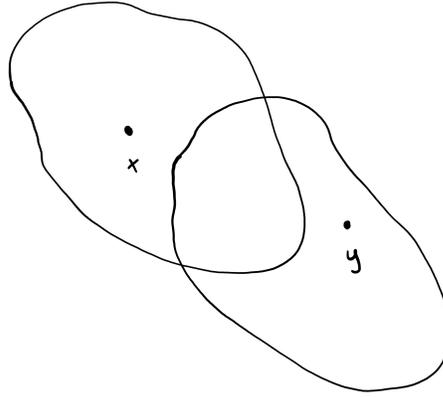


Figura 1.2: Abertos diferentes para pontos diferentes

Esse resultado deixa claro que os pontos próximos de um ponto são diferentes dos próximos a outro num espaço T_0 .

Proposição 1.3.4. *Um espaço topológico (X, τ) é T_0 se, e somente se, para quaisquer $x, y \in X$ distintos e para quaisquer bases locais $\mathcal{B}_x, \mathcal{B}_y$ para x e y respectivamente, tivermos que $\mathcal{B}_x \neq \mathcal{B}_y$.*

Demonstração. Suponha (X, τ) T_0 . Tomemos $x, y \in X$ pontos distintos e $\mathcal{B}_x, \mathcal{B}_y$ bases locais arbitrárias para x e y respectivamente. Por X ser T_0 , existe um aberto A tal que $x \in A$ e $y \notin A$, ou $x \notin A$ e $y \in A$. Sem perda de generalidade, suponha o primeiro caso. Por \mathcal{B}_x ser base, existe $B \in \mathcal{B}_x$ tal que $x \in B \subset A$. Como $y \notin A$, segue que $y \notin B$ e, por tanto, $B \notin \mathcal{B}_y$, mostrando que $\mathcal{B}_x \neq \mathcal{B}_y$.

Reciprocamente, suponha que para quaisquer $x, y \in X$ distintos, toda base local de x seja distinta de qualquer base local de y . Em particular, $\mathcal{B}_x = \{A \in \tau : x \in A\}$ e $\mathcal{B}_y = \{A \in \tau : y \in A\}$ são bases locais de x e y respectivamente. Logo, $\mathcal{B}_x \neq \mathcal{B}_y$ pela hipótese. Assim, existe $B \in \mathcal{B}_x$ tal que $B \notin \mathcal{B}_y$ ou existe $B \in \mathcal{B}_y$ tal que $B \notin \mathcal{B}_x$. \square

Já nos espaços T_1 , exigimos que ambos os abertos da Figura 1.2 existam.

Note que ser T_1 é “mais forte” do que ser T_0 , pois enquanto o último exige a existência de um aberto que satisfaça ao menos um dentre dois casos, ser T_1 exige a existência de abertos que satisfaçam ambos os casos.

Definição 1.3.5. Dizemos que um espaço topológico (X, τ) é T_1 se, e somente se, para quaisquer $x, y \in X$ distintos, existir A aberto tal que $x \in A$ e $y \notin A$.

Provavelmente a caracterização mais importante de T_1 é a seguinte:

Proposição 1.3.6. (X, τ) é T_1 se, e somente se, para todo $x \in X$, $\{x\}$ é fechado.

Demonstração. Suponha (X, τ) um espaço T_1 . Sejam $x, y \in X$ tais que $x \neq y$. Como (X, τ) é T_1 , existe um aberto A tal que $y \in A$ e $x \notin A$, isto é, $A \cap \{x\} = \emptyset$. Logo, $y \notin \overline{\{x\}}$. Assim, o único ponto que pode pertencer a $\overline{\{x\}}$ é o próprio x . Ou seja $\overline{\{x\}} = \{x\}$.

Reciprocamente, sejam $x, y \in X$ distintos. Como $\{x\}$ é fechado para qualquer $x \in X$, então $X \setminus \{x\}$ é um conjunto aberto. Assim, $X \setminus \{x\}$ é um aberto tal que $y \in X \setminus \{x\}$ e $x \notin X \setminus \{x\}$. \square

Exemplo 1.3.7. Um conjunto X com a topologia cofinita é sempre T_1 . De fato, dados $x, y \in X$ distintos, o complementar de $\{x\}$ é um aberto que não contém x mas contém y .

Para espaços de Hausdorff, já exigimos que os abertos em volta dos pontos sejam disjuntos.

Definição 1.3.8. Dizemos que (X, τ) é T_2 (**espaço de Hausdorff**) se para todo $x, y \in X$ distintos, existem A, B abertos tais que $x \in A$, $y \in B$ e $A \cap B = \emptyset$. Num espaço de Hausdorff, os abertos “separam” pontos.

Exemplo 1.3.9. X munido da topologia cofinita é T_1 , mas não é T_2 se X for infinito. De fato, sejam $x, y \in X$ distintos e abertos A, B tais que $x \in A$ e $y \in B$. Temos que $A = X \setminus F_1$ e $B = X \setminus F_2$, com F_1, F_2 finitos. Logo, $A \cap B = X \setminus (F_1 \cup F_2)$ e, como X é infinito, $A \cap B$ é necessariamente não vazio.

Proposição 1.3.10. Considere (X, d) um espaço métrico. Então tal espaço é de Hausdorff (com a topologia induzida pela métrica).

Demonstração. Sejam $x, y \in X$ distintos. Seja $r = d(x, y) > 0$. Vamos mostrar que $B_{\frac{r}{2}}(x) \cap B_{\frac{r}{2}}(y) = \emptyset$. Suponha que não. Seja $a \in B_{\frac{r}{2}}(x) \cap B_{\frac{r}{2}}(y)$. Então

$$d(x, y) \leq d(x, a) + d(a, y) < \frac{r}{2} + \frac{r}{2} = r,$$

absurdo, pois $d(x, y) = r$. \square

Definição 1.3.11. Dizemos que (X, τ) é T_3 se, para quaisquer $x \in X$ e $F \subset X$ fechado tais que $x \notin F$ existirem A, B abertos tais que $x \in A$, $F \subset B$ e $A \cap B = \emptyset$. Se, além disso, (X, τ) é T_1 , dizemos que (X, τ) é um **espaço regular**¹. Num espaço topológico regular, os abertos “separam” pontos de fechados.

¹essa nomenclatura não é padrão - às vezes se supõe T_1 para regulares, às vezes não

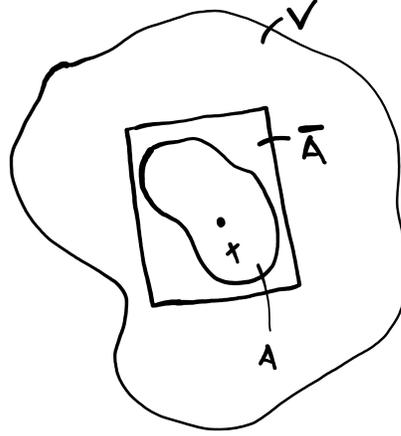


Figura 1.3: Comportamento de vizinhanças em espaços T_3

O próximo resultado é provavelmente a principal caracterização de espaços T_3 :

Veja a Figura 1.3.

Proposição 1.3.12. *Seja (X, τ) um espaço topológico. (X, τ) é T_3 se, e somente se, para todo $x \in X$ e para todo aberto V tal que $x \in V$, existe um aberto A tal que $x \in A \subset \bar{A} \subset V$.*

Demonstração. Suponha (X, τ) espaço T_3 . Sejam $x \in X$ e $V \in \tau$ tal que $x \in V$. Note que $X \setminus V$ é um fechado e $x \notin X \setminus V$. Então existem A, B abertos disjuntos tais que $x \in A$ e $X \setminus V \subset B$. Assim, $A \subset X \setminus B$ que é fechado. Logo, $\bar{A} \subset X \setminus B \subset V$.

Reciprocamente, mostremos que (X, τ) é T_3 . Sejam $x \in X$ e $F \subset X$ fechado tais que $x \notin F$. Então $X \setminus F$ é aberto e contém x . Logo, existe A aberto tal que $x \in A \subset \bar{A} \subset X \setminus F$. Note que $x \in A$, $F \subset X \setminus \bar{A}$ e $A \cap (X \setminus \bar{A}) = \emptyset$. \square

Corolário 1.3.13. *Um espaço topológico (X, τ) é T_3 se, e somente se, para todo $x \in X$ existe um sistema fundamental de vizinhanças fechadas para x .*

Demonstração. Veja o Alongamento 1.3.22. \square

Neste e no próximo exemplo já estamos supondo claro que os espaços em questão são T_1 .

Exemplo 1.3.14. \mathbb{R} é regular. De fato, para cada $x \in \mathbb{R}$,

$$\left\{ \left[x - \frac{1}{n}, x + \frac{1}{n} \right] : n \in \mathbb{N} \right\}$$

é um sistema fundamental de vizinhanças fechadas para x .

Exemplo 1.3.15. A reta de Sorgenfrey é regular (veja o Exemplo 1.2.9, e considere o Corolário 1.3.13).

Veja o Exercício 1.3.30 para um exemplo de um espaço de Hausdorff que não seja regular.

Definição 1.3.16. Dizemos que (X, τ) é T_4 se, para quaisquer $F, G \subset X$ fechados disjuntos, existirem A, B abertos disjuntos tais que $F \subset A$, $G \subset B$. Se, além disso, (X, τ) é T_1 , dizemos que (X, τ) é **espaço normal**².

Num espaço normal, os abertos separam os fechados disjuntos.

Exemplo 1.3.17. Vamos mostrar mais para frente que todo métrico é normal (Corolário ??).

Exemplo 1.3.18. A reta de Sorgenfrey é normal. Vamos provar tal afirmação. Primeiramente, note que ela é T_1 .

Sejam F, G fechados disjuntos. Para cada $a \in F$ e cada $b \in G$, sejam $x(a)$ e $y(b)$ de forma que

$$[a, x(a)[\cap G = \emptyset \text{ e } [b, y(b)[\cap F = \emptyset.$$

Podemos fazer isso pois os complementares de F e G são abertos. Sejam

$$A = \bigcup_{a \in F} [a, x(a)[\text{ e } B = \bigcup_{b \in G} [b, y(b)[.$$

Note que $F \subset A$ e $G \subset B$, os quais são abertos. Vamos mostrar que $A \cap B = \emptyset$. Suponha que não. Então existe $c \in A \cap B$. Para tanto, existem $a \in F$ e $b \in G$ tais que $c \in [a, x(a)[\cap [b, y(b)[$.

Caso $a < b$: então $x(a) < b$, pois $b \notin [a, x(a)[$, logo $[a, x(a)[\cap [b, y(b)[= \emptyset$, absurdo. Se $b < a$, obtém-se uma contradição de maneira análoga. É claro que $a = b$ não pode ocorrer por estarmos supondo $F \cap G = \emptyset$.

Exemplo 1.3.19. Veremos mais para frente que o quadrado da reta de Sorgenfrey é regular mas não é normal (Proposição ??).

Veremos que até regularidade, as propriedades desta seção são “bem comportadas” e muitas vezes a verificação de se um espaço tem ou não a propriedade é elementar. Mas com a normalidade, a situação muda. Desta forma, um tipo de resultado bastante útil é quando podemos “subir” alguma propriedade até a normalidade. O próximo resultado vai nesta direção: veremos que para um espaço enumerável ser normal basta ele ser regular. A ideia para a demonstração será usada outras vezes no decorrer do texto:

Note que na verdade estamos provando que todo espaço T_3 enumerável é T_4 .

Proposição 1.3.20. *Todo espaço enumerável e regular é normal.*

Demonstração. Sejam F e G fechados disjuntos. Faça $F = \{x_n : n \in \mathbb{N}\}$ e $G = \{y_n : n \in \mathbb{N}\}$. Como o espaço é regular, para cada $m \in \mathbb{N}$, existe A_m aberto tal que $x_m \in A_m$ e $\overline{A_m} \cap G = \emptyset$ (pela Proposição 1.3.12), bem como B_m aberto tal que $y_m \in B_m$ e $\overline{B_m} \cap F = \emptyset$.

Para cada $n \in \mathbb{N}$, defina

$$A_n^* = A_n \setminus \bigcup_{k \leq n} \overline{B_k} \text{ e } B_n^* = B_n \setminus \bigcup_{k \leq n} \overline{A_k}.$$

Note que A_n^* e B_n^* são abertos (pois $A \setminus B = A \cap (X \setminus B)$ para $A, B \subset X$).

Sejam $A = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n^*$ e $B = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_n^*$. Note que $F \subset A$ e $G \subset B$ (em particular, observe que $A_n^* \cap F = A_n \cap F$). Vamos mostrar que $A \cap B = \emptyset$. Suponha que não. Então existe $z \in A \cap B$. Sejam $m, n \in \mathbb{N}$ tais que $z \in A_m^*$ e $z \in B_n^*$.

Vamos fazer o caso $n \leq m$, o outro é análogo. Então $z \in A_n^* = A_n \setminus \bigcup_{k \leq n} \overline{B_k}$ e $z \in B_m^* = B_m \setminus \bigcup_{k \leq m} \overline{A_k}$. Note que, como $m \geq n$, $z \notin \bigcup_{k \leq m} \overline{A_k} \supset \overline{A_n} \supset A_n \supset A_n^*$, contradição, pois supomos $z \in A_n^*$. \square

Alongamentos

Alongamento 1.3.21. Mostre que um espaço finito é T_1 se, e somente se, tem a topologia discreta.

Alongamento 1.3.22. Demonstre o Corolário 1.3.13.

Alongamento 1.3.23. Seja (X, τ) espaço topológico. Mostre que T_4 é equivalente à seguinte propriedade: “Para todo F fechado e todo V aberto tal que $F \subset V$, existe um aberto U tal que $F \subset U \subset \overline{U} \subset V$ ”.

Exercícios

Exercício 1.3.24. Dê um exemplo de um espaço T_0 que não seja T_1 .

Exercício 1.3.25. (X, τ) é T_0 se, e somente se, para quaisquer $x, y \in X$ distintos tivermos $\overline{\{x\}} \neq \overline{\{y\}}$.

Exercício 1.3.26. Seja (X, τ) um espaço topológico. São equivalentes:

(a) (X, τ) é T_1 ;

²novamente, tal nomenclatura não é completamente padrão. Às vezes se supõe T_1 , às vezes não.

- (b) $\forall x \in X$, existe \mathcal{A} uma coleção de abertos tal que $\bigcap_{A \in \mathcal{A}} A = \{x\}$;
- (c) $\forall x \in X$ existe \mathcal{V}_x um sistema fundamenta de vizinhanças para x tal que $\bigcap_{V \in \mathcal{V}_x} V = \{x\}$;

Exercício 1.3.27. Prove a cadeia de implicações: (X, τ) é normal $\Rightarrow (X, \tau)$ é regular $\Rightarrow (X, \tau)$ é $T_2 \Rightarrow (X, \tau)$ é $T_1 \Rightarrow (X, \tau)$ é T_0 .

Exercício 1.3.28. Sejam (X, τ) espaço topológico e $Y \subset X$ subespaço. Mostre que se (X, τ) é T_i para $i = 0, \dots, 3$, então Y também é.

Exercício 1.3.29. Mostre que se Y é subespaço fechado de um espaço normal, então Y também é normal.

Exercício 1.3.30. Considere \mathbb{R} com a topologia gerada pelos conjuntos da forma

$$]a, b[\setminus C$$

onde $a < b \in \mathbb{Q}$ e $C \subset \mathbb{R}$ é enumerável.

- (a) Mostre que isso é uma base tal topologia;
- (b) Mostre que tal espaço é de Hausdorff;
- (c) Mostre que todo subconjunto enumerável é fechado;
- (d) Mostre que tal espaço não é regular.

Exercício 1.3.31. Mostre que \mathbb{Q} com a topologia induzida pela reta de Sorgenfrey é normal.

Dicas de alguns exercícios

1.1.49

d Para o lado $\bar{A} \subset A \cup \partial A$, considere $x \in \bar{A}$. Note que se $x \in A$, é trivial. No caso que $x \notin A$, mostre que $x \in \partial A$.

1.1.60

e Suponha que não e use os itens anteriores.

1.2.15

a Comece com $A \in \tau$ e $x \in A$. Use o fato que \mathcal{B} é base. Depois use a propriedade do enunciado. Mostre que $A \in \sigma$.

1.3.21 Veja a Proposição 1.1.15.

1.3.30

a Mostre que tal conjunto é fechado por intersecções finitas.

d Considere o conjunto $\{\frac{1}{n} : n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}\}$. Mostre que tal conjunto não pode ser separado do ponto 0.

1.3.31 Lembre que os racionais são enumeráveis.

Soluções de alguns exercícios

1.1.46

b Vamos mostrar que $X \setminus (F \cup G)$ é aberto. Se mostrarmos que $X \setminus (F \cup G) = (X \setminus F) \cap (X \setminus G)$, seguirá que o complementar de $F \cup G$ é aberto por ser a interseção (finita) de abertos, o que acarretará que $F \cup G$ é fechado. De fato, se $x \in X \setminus (F \cup G)$, segue que $x \in X$ e $x \notin F$ e $x \notin G$, e daí decorre que $x \in (X \setminus F) \cap (X \setminus G)$. Reciprocamente, se $x \in (X \setminus F) \cap (X \setminus G)$, segue que $x \in X$ e $x \notin F$ e $x \notin G$, ou equivalentemente, $x \in X$ e $x \notin F \cup G$, acarretando a igualdade desejada.

c Note que se \mathcal{A} é uma família não vazia de conjuntos, então

$$X \setminus \bigcap_{A \in \mathcal{A}} A = \bigcup_{A \in \mathcal{A}} X \setminus A$$

Da igualdade acima, e do fato de que cada membro de \mathcal{F} possui o complementar aberto, o temos (c).

1.1.47 Por definição, $\overset{\circ}{A}$ é a reunião dos abertos contidos em A . Daí, se $x \in V$ para algum V aberto contido em A , temos $x \in \overset{\circ}{A}$. A recíproca é imediata.

1.1.55 Seja $F \subset Y$ fechado em Y . Então $Y \setminus F$ é aberto em Y . Logo, existe $A \subset X$ um aberto em X tal que $A \cap Y = Y \setminus F$. Vamos mostrar que $F' = X \setminus A$ satisfaz o que desejamos. Primeiramente, note que F' é fechado em X (pois é complementar de um aberto). Agora só precisamos mostrar que, de fato,

$$F = F' \cap Y$$

Seja $y \in F$. Então $y \notin Y \setminus F$ e, portanto, $y \notin A$. Assim, $y \in X \setminus A$ e, portanto, $y \in Y \cap (X \setminus A) = F'$. A outra inclusão segue de maneira análoga (é um bom alongamento para o leitor).

Agora precisamos mostrar que, dado F' fechado em X , $F' \cap Y$ é fechado em Y . Isso decorre imediatamente do fato que $Y \setminus (Y \cap F') = Y \cap (X \setminus F')$. Logo, $Y \setminus (Y \cap F')$ é aberto em Y e, portanto, $Y \cap F'$ é fechado em Y .

1.1.56 Suponha $F \subset Y$ fechado em Y . Então existe $F' \subset X$ fechado em X tal que $F' \cap Y = F$. Logo, F' é fechado em X (por ser interseção de fechados). Agora suponha $F \subset Y$ fechado em X . Note que $F = F \cap Y$ e, portanto, F é fechado em Y .

1.1.57 Sejam (X, τ) um espaço topológico e $Y \subset X$ um subespaço aberto. Então $A \subset Y$ é aberto em Y se, e somente se, for aberto em X .

A demonstração é análoga a da Proposição **1.1.56**.

1.1.59 Suponha $x \in \bar{A}$. Seja $V \in \mathcal{V}$, então existe $U \subset V$ aberto tal que $x \in U$. Como $x \in \bar{A}$, obtemos $U \cap A \neq \emptyset$ e, portanto, $V \cap A \neq \emptyset$.

Suponha que para todo $V \in \mathcal{V}$, $V \cap A \neq \emptyset$. Seja $U \subset X$ aberto tal que $x \in U$. Como \mathcal{V} é sistema fundamental de vizinhanças de x , existe $V \in \mathcal{V}$ tal que $x \in V \subset U$. Logo, como $V \cap A \neq \emptyset$, segue que $U \cap A \neq \emptyset$.

1.3.22 Supondo $(X, \tau) T_3$ e fixando $x \in X$, a família $\mathcal{V}_x = \{\bar{A} : A \in \tau \text{ e } x \in A\}$ é um sistema fundamental de vizinhanças fechadas para x . Reciprocamente, supondo a existência de um sistema fundamental de vizinhanças fechadas, basta aplicar a Proposição ?? para concluir que (X, τ) é T_3 .

1.3.25 Procedamos pela contrapositiva.

Suponha $\overline{\{x\}} = \overline{\{y\}}$, para quaisquer $x, y \in X$ distintos. Isso equivale a afirmar que a é ponto de acumulação de $\{x\}$ se, e somente se, a é ponto de acumulação de $\{y\}$ ou, equivalentemente, todo aberto que contém x também contém y , isto é, (X, τ) não é T_0 .

1.3.26 Supondo $(X, \tau) T_1$, provemos (b). Basta considerar $\mathcal{A} = \{A \in \tau : x \in A\}$. Por construção, vale que $\{x\} \subset \bigcap \mathcal{A}$. Por outro lado, se existisse $y \neq x$ tal que $y \in \bigcap \mathcal{A}$, então todo aberto de A que contém x também conteria y , o que contraria a hipótese de estarmos supondo $(X, \tau) T_1$.

Agora suponha que para todo $x \in X$, existe uma coleção \mathcal{A}_x de abertos tal que $\bigcap \mathcal{A}_x = \{x\}$. Defina $B_x = \{A \in \tau | x \in A\}$ e $\mathcal{V}_x = \{U \in \tau : (\exists A, B)(A \in \mathcal{A}_x \text{ e } B \in B_x)(U = A \cap B)\}$. Claramente, \mathcal{V}_x é sfv para x e $\bigcap \mathcal{V}_x = \{x\}$.

Finalmente, se para cada $x \in X$ existir um sfv \mathcal{V}_x para x tal que $\bigcap \mathcal{V}_x = \{x\}$, então para $x \neq y$, segue que existem sistemas de vizinhanças \mathcal{V}_x e \mathcal{V}_y para x e y , respectivamente, tais que $\{x\} = \bigcap \mathcal{V}_x \neq \bigcap \mathcal{V}_y = \{y\}$, ou seja,

existem abertos $A_y \in \mathcal{V}_y$ e $A_x \in \mathcal{V}_x$ tais que $x \in A_x$ mas $y \notin A_x$ e $y \in A_y$ mas $x \notin A_y$, donde (X, τ) é T_1 .

1.3.27 Se (X, τ) é normal, então em particular $\{x\}$ é fechado. Assim, sejam F um fechado e $x \in X$ tais que $x \notin F$, isto é, $\{x\}$ e F são fechados disjuntos. Por X ser T_4 , existem abertos A e B disjuntos tais que $\{x\} \subset A$ e $F \subset B$, isto é, (X, τ) é T_3 e, por ser T_1 , X é regular.

Se (X, τ) for regular, novamente $\{x\}$ é fechado, para qualquer $x \in X$. Em particular, se $x \neq y$, $x \notin \{y\}$, logo existem abertos disjuntos A, B tais que $x \in A$ e $\{y\} \subset B$, logo (X, τ) é de Hausdorff.

Daí, se (X, τ) é Hausdorff, dados $x \neq y$ elementos de X , existem abertos disjuntos A, B tais que $x \in A$ e $y \in B$, em particular, por serem disjuntos, $x \in A$ e $y \notin A$ e $y \in B$ e $x \notin B$, implicando em (X, τ) ser T_1 .

Se (X, τ) é T_1 , então claramente também é T_0 .

Notação

Índice Remissivo