

Notas de Aula

Leandro F. Aurichi ¹

7 de março de 2016

¹Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - USP

Sumário

1	Espaços topológicos	5
1.1	Definições básicas	5
	Alguns exemplos de espaços topológicos	9
	Fechados	11
	Fecho, interior e fronteiras	11
	Bases	13
	Alongamentos	16
	Exercícios	18
1.2	Axiomas de Separação	20
	Alongamentos	25
	Exercícios	26
1.3	Axiomas de Enumerabilidade	27
	Alongamentos	31
	Exercícios	32
2	Funções	35
2.1	Funções contínuas	35
	Alongamentos	39
	Exercícios	40
	Índices	46
	Notação	46
	Índice Remissivo	47

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 correnteza 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.

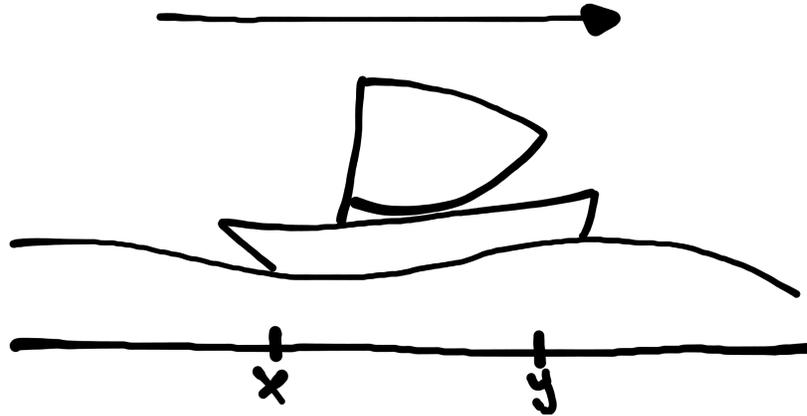


Figura 1.1: Uma correnteza forte

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 1.1.69.

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:

Vamos adotar o * aqui para não confundir com o conceito de vizinhança que será apresentado em 1.1.13. Faremos o análogo em mais algumas definições abaixo.

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 .

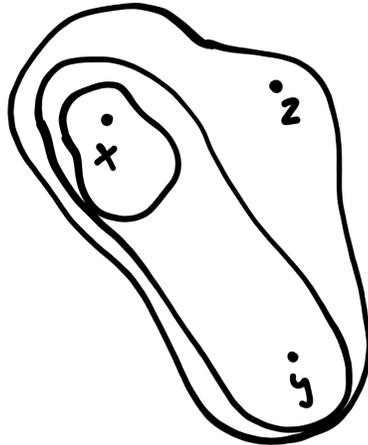


Figura 1.2: O ponto y é o mais próximo de x

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 mais próximo de x é y (e não z).

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 .

Sim, parece estranho agora que isso seja realmente uma tradução. Mas veremos isso mais formalmente no Alongamento 1.1.55.

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, mais uma condição mais técnica, que garante uma certa compatibilidade entre as noções de proximidade de diferentes pontos. Esta condição será dada em termos de certas vizinhanças* especiais:

Veja o Alongamento 1.1.54 para ver tal condição é necessária.

Definição 1.1.7. Seja X um conjunto e seja $(V_x)_{x \in X}$ de forma que cada V_x é um filtro para x . Dizemos que $A \subset X$ é um **aberto*** (com relação a $(V_x)_{x \in X}$) se, para todo $a \in A$, $A \in V_a$. Ou seja, A é uma vizinhança* de todos os seus pontos.

Veja a definição “definitiva” em 1.1.12.

Definição 1.1.8. Dizemos que $(X, (\mathcal{V})_{x \in X})$ é um **espaço topológico*** se, para cada $x \in X$, \mathcal{V}_x é um sistema fundamental de vizinhanças* para x . Além disso, para qualquer $x \in X$ e qualquer $V \in \mathcal{V}_x$, existe $A \in \mathcal{V}_x$ aberto* tal que $x \in A \subset V$.

Esta não é a definição que iremos trabalhar. Optamos por apresentar esta versão por entendermos que a intuição por trás dela é mais aparente do que na definição “definitiva”.

Vejamos alguns exemplos de espaços topológicos*.

Exemplo 1.1.9. Considere \mathbb{R} como no Exemplo 1.1.5 e sejam $a, b \in \mathbb{R}$ com $a < b$. Note 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 . Note que, assim, isso forma um espaço topológico*, pois, para cada $x \in X$, sempre existe A aberto tal que $A \in \mathcal{V}_x$.

Exemplo 1.1.10. Se considerarmos a reta de Sorgenfrey (como no Exemplo 1.1.6) e tomamos $a, b \in \mathbb{R}$ com $a < b$, 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 1.1.51. □

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:

Esta é a definição oficial para espaços topológicos. $\wp(X)$ é a coleção de todos os subconjuntos de X .

(a) $X, \emptyset \in \tau$;

(b) se $A, B \in \tau$, então $A \cap B \in \tau$;

(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**.

Temos que a definição de espaço topológico e a definição de espaço topológico* aqui apresentadas são equivalentes. Começando com um espaço topológico*, note que o conjunto dos abertos* forma uma topologia (basicamente, isso é a Proposição 1.1.11). Mas como recuperar o conceito de vizinhança*? Para isso, basta fazer a seguinte definição:

Definição 1.1.13. Seja (X, τ) um espaço topológico. Dado $x \in X$, dizemos que $V \subset X$ é uma **vizinhança** de x se existe A aberto tal que $x \in A \subset V$.

A coleção das vizinhanças de um ponto, de fato, forma um filtro (ver o Alongamento 1.1.52). Desta maneira, se começamos com um espaço topológico*, temos como definir um espaço topológico e vice e versa. Além disso, essas construções comutam (veja os Alongamentos 1.1.52 e 1.1.53).

Alguns exemplos de espaços topológicos

Vejam alguns exemplos de espaços topológicos. Outros exemplos serão dados no decorrer do texto.

Exemplo 1.1.14. Seja X um conjunto qualquer. Então $\tau = \{\emptyset, X\}$ é uma topologia sobre X (chamada **topologia caótica**).

Exemplo 1.1.15. Seja X um conjunto qualquer. Então $\tau = \wp(X)$ é uma topologia sobre X (chamada **topologia discreta**).

A topologia discreta tem uma caracterização útil:

Proposição 1.1.16. *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

Veja o Alongamento 1.1.55 para notar que diversas maneiras definir a topologia nos reais chegam ao mesmo lugar.

Exemplo 1.1.17. O conjunto \mathbb{R} é um espaço topológico, com a topologia $\tau = \{A \subset \mathbb{R} : \forall x \in A, \exists \varepsilon > 0,]x - \varepsilon, x + \varepsilon[\subset A\}$. Esta é chamada de **topologia usual em \mathbb{R}** .

Exemplo 1.1.18. 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 1.1.67).

De fato, note que $X, \emptyset \in \tau$. 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:

Veja Alongamento 1.1.57.

Definição 1.1.19. Seja (X, τ) um espaço topológico e seja $Y \subset X$. A **topologia de subespaço** sobre Y induzida por (X, τ) é dada por $\tau_Y = \{A \cap Y : A \in \tau\}$.

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.

Finalmente, associada a uma métrica, sempre existe uma topologia.

Proposição 1.1.20. *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

Fechados

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.

Fecho, interior e fronteiras

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:

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

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 $V \cap A \neq \emptyset$.

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

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 1.1.61).

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

- (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 $x \in \bar{A}$, 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 $\bar{A} = A$, obtemos que A é fechado, pois seu fecho é fechado. Reciprocamente, se A é fechado, segue que $A = \bigcap \{F \subset X : F \text{ é fechado e } A \subset F\} = \bar{A}$. O item (b) segue então diretamente de (c), por \bar{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 $\bar{A} = A$ (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 aderente a $[a, b[$ 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 um **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), $\partial\mathbb{Q} = \mathbb{R}$.

Bases

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

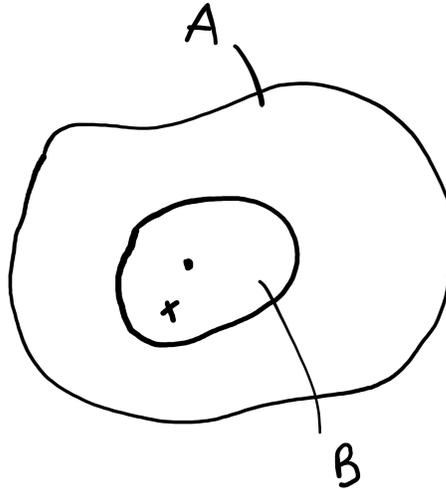


Figura 1.3: O desenho básico de uma base

Definição 1.1.40. 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:

Veja a figura 1.3.

Proposição 1.1.41. 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 1.1.42. $\mathcal{B} = \{]a, b[: a, b \in \mathbb{Q}\}$ 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 1.1.43. 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 1.1.64).

Exemplo 1.1.44. Seja X um conjunto qualquer. $\mathcal{B} = \{\{x\} : x \in X\}$ é uma base para a topologia discreta sobre X (ver Alongamento 1.1.64).

Exemplo 1.1.45. A família $\mathcal{B} = \{[x, y[: x < y\}$ é uma base para a reta de Sorgenfrey (ver Alongamento 1.1.64).

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

Definição 1.1.46. Sejam (X, τ) um espaço topológico e $x \in X$. Dizemos Veja o Exercício 1.1.78 que \mathcal{V} é um **sistema fundamental de vizinhanças** de x se

- (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 1.1.47. 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 1.1.48. 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 1.1.49. 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 1.1.50. *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 1.1.51. Mostre a Proposição 1.1.11.

Alongamento 1.1.52. Fixe um espaço topológico (X, τ) . Considere para cada $x \in X$, \mathcal{V}_x a coleção de todas as vizinhanças de x .

- (a) Mostre que cada \mathcal{V}_x é um filtro.
- (b) Mostre que $(X, (\mathcal{V}_x)_{x \in X})$ é um espaço topológico*.
- (c) Mostre que $\{A \subset X : A \text{ é aberto}^*\} = \tau$.

Alongamento 1.1.53. Fixe um espaço topológico* $(X, (\mathcal{V}_x)_{x \in X})$. Seja $\tau = \{A \subset X : A \text{ é aberto}^*\}$.

- (a) Mostre que τ é uma topologia sobre X .
- (b) Para cada $x \in X$, seja $\mathcal{W}_x = \{V \subset X : V \text{ é vizinhança de } x \text{ em } (X, \tau)\}$. Mostre que, para cada $x \in X$, $\mathcal{W}_x = \mathcal{V}_x$.

Alongamento 1.1.54. Este é um exercício para mostrar que a hipótese de compatibilidade na definição de espaço topológico* é necessária. Considere $X = \mathbb{R}$, $\mathcal{F}_0 = \{A \subset \mathbb{R} : 0 \in A \text{ e } \mathbb{R} \setminus A \text{ é enumerável}\}$ e, para cada $x \neq 0$, $\mathcal{F}_x = \{\mathbb{R}\}$.

- (a) Note que, de fato, cada \mathcal{F}_x é um filtro.
- (b) Considere $\tau = \{A \subset X : \forall a \in A \ A \in \mathcal{F}_a\}$.
- (c) Mostre que τ é uma topologia sobre \mathbb{R} .
- (d) Seja \mathcal{V}_0 a coleção de todas as vizinhanças de 0 na topologia τ . Mostre que $\mathcal{V}_0 \subsetneq \mathcal{F}_0$.

Alongamento 1.1.55. Vejamos que os abertos em \mathbb{R} podem ser obtidos de várias maneiras. Mostre que os abertos são os mesmos se:

- (a) fizermos como no Exemplo 1.1.17;
- (b) usamos as vizinhanças como em 1.1.5
- (c) usamos a métrica de 1.1.2 e depois a Proposição 1.1.20.

Alongamento 1.1.56. Mostre que todo aberto usual nos reais é um aberto na reta de Sorgenfrey.

Alongamento 1.1.57. Mostre que, de fato, a topologia de subespaço é uma topologia.

Alongamento 1.1.58. 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 1.1.59. 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 1.1.60. 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 1.1.61. Mostre o análogo à Proposição 1.1.30 para o interior.

Alongamento 1.1.62. 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 1.1.63. Mostre que a fronteira de um conjunto sempre é fechada.

Alongamento 1.1.64. Mostre as afirmações dos Exemplos 1.1.43, 1.1.44 e 1.1.45.

Alongamento 1.1.65. 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 1.1.66. 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 1.1.67. Na definição da topologia cofinita (Exemplo 1.1.18), poderíamos pedir, em vez que os abertos tivessem complementar finito, que os abertos simplesmente fossem infinitos?

Exercício 1.1.68. 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 1.1.69. 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 1.1.70. 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 1.1.71. 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 1.1.72. 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 1.1.73. Encontre o análogo do Exercício 1.1.72 para abertos.

Exercício 1.1.74. 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 $x \in \bar{A}$ se, e somente se, $d(x, A) = 0$.

Exercício 1.1.75. 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.

Exercício 1.1.76. Sejam (X, τ) um espaço topológico, $A \subset X$, $x \in X$ e \mathcal{V} um sistema fundamental de vizinhanças para x . Mostre que $x \in \bar{A}$ se, e somente se, para todo $V \in \mathcal{V}$, $V \cap A \neq \emptyset$.

Exercício 1.1.77. 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.

- (a) 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 $\tau = \sigma$.
- (b) 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 1.1.78. 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 $x \in A$ existe $V \in \mathcal{V}_x$ tal que $x \in V \subset A$.

Exercício 1.1.79. Dizemos que (X, τ) é um **espaço zero-dimensional** se ele possui uma base formada por abertos fechados.

- (a) Mostre que a reta de Sorgenfrey é zero-dimensional.

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

Exercício 1.1.80. 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 1.1.81. 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 $(X, [\mathcal{B}])$.

1.2 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 1.2.27).

Num espaço T_0 , pelo menos um dos abertos da Figura 1.4 existe.

Num espaço T_0 , os abertos **Definição 1.2.1.** Dizemos que um espaço topológico (X, τ) é T_0 se para “diferenciam” pontos, isto quaisquer $x, y \in X$ distintos existir um aberto A tal que $(x \in A \text{ e } y \notin A)$ ou é, dados dois pontos distintos, existe ao menos um aberto que os distingue. $(x \notin A \text{ e } y \in A)$.

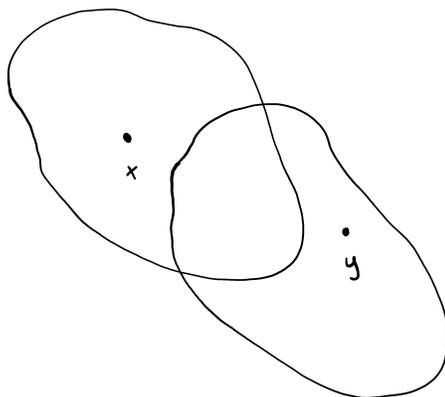


Figura 1.4: Abertos diferentes para pontos diferentes

Vejamos alguns exemplos de espaços que não são T_0 . Exemplos que satisfazem tal propriedade serão dados no decorrer do texto (veja também o Exercício 1.2.24).

Exemplo 1.2.2. Qualquer conjunto X com mais de dois pontos, munido da topologia caótica não é T_0 .

Exemplo 1.2.3. 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 $x \in A$ e $y \notin A$ ou $y \in A$ e $x \notin A$. Logo (X, τ) não é T_0 .

Proposição 1.2.4. 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,

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

$\mathcal{B}_x = \{A \in \tau : x \in A\}$ 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 1.4 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 1.2.5. 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 1.2.6. (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 1.2.7. 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.

Num espaço de Hausdorff, os abertos “separam” pontos.

Definição 1.2.8. 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 $A \cap B = \emptyset$.

Exemplo 1.2.9. 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 1.2.10. Considere (X, d) um espaço métrico. Então tal espaço é de Hausdorff (com a topologia induzida pela métrica).

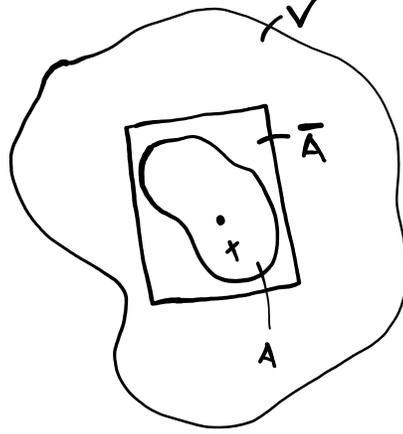


Figura 1.5: Comportamento de vizinhanças em espaços T_3

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 $d(x, y) = r$. □

Definição 1.2.11. Dizemos que (X, τ) é T_3 se, para quaisquer $x \in X$ e Num espaço topológico regular, os abertos “separados” $F \subset X$ 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.

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

Proposição 1.2.12. *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 $x \in A \subset \overline{A} \subset V$.* Veja a Figura 1.5.

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

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

abertos disjuntos tais que $x \in A$ e $X \setminus V \subset B$. Assim, $A \subset X \setminus B$ que é fechado. Logo, $\overline{A} \subset X \setminus B \subset V$.

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 $x \in A \subset \overline{A} \subset X \setminus F$. Note que $x \in A$, $F \subset X \setminus \overline{A}$ e $A \cap (X \setminus \overline{A}) = \emptyset$. \square

Corolário 1.2.13. *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 1.2.22. \square

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

Exemplo 1.2.14. \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 1.2.15. A reta de Sorgenfrey é regular (veja o Exemplo 1.1.48, e considere o Corolário 1.2.13).

Veja o Exercício 1.2.30 para um exemplo de um espaço de Hausdorff que não seja regular.

Num espaço normal, os abertos separam os fechados disjuntos.

Definição 1.2.16. 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.

Exemplo 1.2.17. Vamos mostrar mais para frente que todo métrico é normal (Corolário ??).

Exemplo 1.2.18. 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

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

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

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 1.2.19. 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:

Proposição 1.2.20. *Todo espaço enumerável e regular é normal.*

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

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 1.2.12), 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 $z \in A_n^*$ e $z \in B_m^*$.

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

Alongamento 1.2.22. Demonstre o Corolário 1.2.13.

Alongamento 1.2.23. 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 $F \subset U \subset \bar{U} \subset V$ ”.

Exercícios

Exercício 1.2.24. Dê um exemplo de um espaço T_0 que não seja T_1 .

Exercício 1.2.25. (X, τ) é T_0 se, e somente se, para quaisquer $x, y \in X$ distintos tivermos $\overline{\{x\}} \neq \overline{\{y\}}$.

Exercício 1.2.26. Seja (X, τ) um espaço topológico. São equivalentes:

- (a) (X, τ) é T_1 ;
- (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 fundamental de vizinhanças para x tal que $\bigcap_{V \in \mathcal{V}_x} V = \{x\}$;

Exercício 1.2.27. 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 1.2.28. 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 1.2.29. Mostre que se Y é subespaço fechado de um espaço normal, então Y também é normal.

Exercício 1.2.30. 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. Vamos chamar tal espaço de **reta esburacada**.

- (a) Mostre que isso é uma base para 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 1.2.31. Mostre que \mathbb{Q} com a topologia induzida pela reta de Sorgenfrey é normal.

1.3 Axiomas de Enumerabilidade

Nesta seção vamos começar a investigar quando a existência de determinados conjuntos enumeráveis nos dão propriedades importantes sobre o espaço. Tais propriedades serão muito usadas no decorrer do texto.

Definição 1.3.1. Dizemos que um espaço topológico (X, τ) satisfaz o **primeiro axioma de enumerabilidade** (*1st countable*) se, para todo $x \in X$, existe um sistema fundamental de vizinhanças enumerável. Neste caso, também dizemos que (X, τ) tem **bases locais enumeráveis**.

Veja o Alongamento 1.3.24 para ver que um ponto ter um sistema fundamental de vizinhanças enumerável é equivalente a ter uma base local enumerável.

Exemplo 1.3.2. Todo espaço métrico (X, d) satisfaz o primeiro axioma de enumerabilidade. Para isso, basta notar que $\{B_{\frac{1}{n}}(x) : n \in \mathbb{N}_{>0}\}$ é um sistema fundamental de vizinhanças para cada $x \in X$.

Exemplo 1.3.3. A reta de Sorgenfrey satisfaz o primeiro axioma de enumerabilidade, já que $\{[x, x + \frac{1}{n}[: n \in \mathbb{N}_{>0}\}$ é um sistema fundamental de vizinhanças para cada $x \in X$.

O primeiro axioma de enumerabilidade tem bastante em comum com o conceito de sequência convergente:

Definição 1.3.4. Seja (X, τ) um espaço topológico. Seja $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ uma sequência de pontos de X . Dizemos que $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ **converge** para $x \in X$ se, para toda vizinhança V de x , existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que para todo $n \geq n_0$, $x_n \in V$. Notação: $x_n \rightarrow x$.

Note que esta definição permanece equivalente se trocarmos vizinhança por aberto contendo o ponto (veja o Alongamento 1.3.25).

Proposição 1.3.5. *Seja (X, τ) um espaço topológico e $x_n \rightarrow x$. Então, $x \in \overline{\{x_n : n \in \mathbb{N}\}}$.*

Demonstração. Seja V vizinhança de x . Seja n_0 da definição de convergência. Note que $x_{n_0} \in V \cap \{x_n : n \in \mathbb{N}\}$. □

Corolário 1.3.6. *Seja (X, τ) espaço topológico e $Y \subset X$. Sejam $x \in X$ e $(y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ uma sequência de pontos de Y . Se $y_n \rightarrow x$, então $x \in \overline{Y}$.*

Para espaços que satisfazem o primeiro axioma de enumerabilidade, ser ponto aderente pode ser caracterizado por limite de seqüências:

Proposição 1.3.7. *Seja (X, τ) um espaço topológico com bases locais enumeráveis. Sejam $Y \subset X$ e $x \in X$. Então, $x \in \overline{Y}$ se, e somente se, existe $(y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ seqüência de pontos de Y tal que $y_n \rightarrow x$.*

A hipótese sobre as bases locais é necessária. Veja o Exemplo 1.3.9.

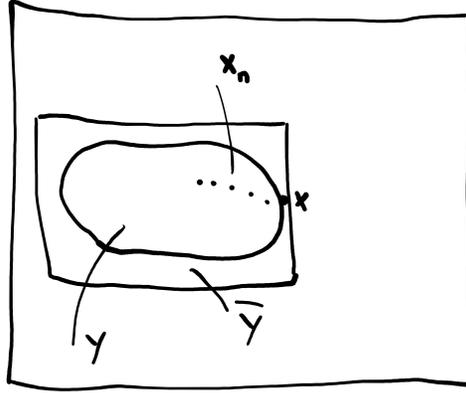


Figura 1.6: Aderência em termos de convergência

Demonstração. Um lado já está feito (vale mesmo sem a hipótese sobre as bases).

Suponha que $x \in \bar{Y}$ e seja $\mathcal{V} = \{V_n : n \in \mathbb{N}\}$ sistema fundamental de vizinhanças para x . Para cada $n \in \mathbb{N}$, escolha $y_n \in \left(\bigcap_{k \leq n} V_k\right) \cap Y$. Mostremos que $y_n \rightarrow x$. Seja V vizinhança de x . Como \mathcal{V} é sistema fundamental de vizinhanças de x , existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que $V_{n_0} \subset V$. Seja $n \geq n_0$. Note que $y_n \in \bigcap_{k \leq n} V_k \subset V_{n_0} \subset V$. \square

Espaços de Hausdorff tem a propriedade da unicidade de limites:

Proposição 1.3.8. *Seja (X, τ) um espaço topológico de Hausdorff. Se $x_n \rightarrow x$ e $x_n \rightarrow y$, então $x = y$.*

Demonstração. Suponha, por contradição, que $x \neq y$. Sejam U e V abertos disjuntos tais que $x \in U$ e $y \in V$. Então, existem $n_1, n_2 \in \mathbb{N}$ tais que para todo $n \geq n_1$, $x_n \in U$ e para todo $n \geq n_2$, $x_n \in V$. Seja $n_0 = \max\{n_1, n_2\}$, segue que $x_{n_0} \in U \cap V$, que é uma contradição. \square

Exemplo 1.3.9. Na reta esburacada, se uma sequência $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ é tal que $x_n \rightarrow x$ para algum x , então existe $n \in \mathbb{N}$ tal que $x_n = x$. De fato, temos que $\{x_n : n \in \mathbb{N}\}$ é fechado por ser enumerável (veja o Exercício 1.2.30). Em particular, note que $0 \in]0, 1[$ mas não existe sequência em $]0, 1[$ que

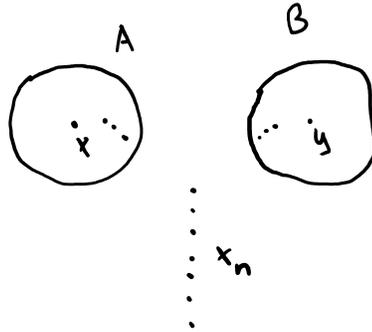


Figura 1.7: A unicidade de limites de seqüências

converge para 0. Com isso, temos que a reta esburacada não tem bases locais enumeráveis.

Definição 1.3.10. Seja (X, d) um espaço métrico. Dizemos que uma seqüência $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ de pontos de X é uma **seqüência de Cauchy** se, para todo $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$, existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que para $n, m \geq n_0$, $d(x_n, x_m) < \varepsilon$.

Proposição 1.3.11. *Seja (X, d) um espaço métrico e $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ uma seqüência de pontos de X tal que $x_n \rightarrow x$. Então, $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ é uma seqüência de Cauchy.*

Demonstração. Seja $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$. Seja n_0 tal que, para todo $n \geq n_0$, $d(x_n, x) < \frac{\varepsilon}{2}$. Assim, dados $n, m \geq n_0$, temos

$$d(x_n, x_m) \leq d(x_n, x) + d(x, x_m) < \varepsilon$$

□

Definição 1.3.12. Seja (X, d) um espaço métrico. (X, d) é dito **espaço métrico completo** se toda seqüência $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ de Cauchy é convergente.

O segundo axioma de enumerabilidade é uma versão global do primeiro:

Definição 1.3.13. Dizemos que (X, τ) satisfaz o **segundo axioma de enumerabilidade** (*2nd countable*) se admite uma base enumerável.

Exemplo 1.3.14. A reta real satisfaz o segundo axioma de enumerabilidade, já que $\{]a, b[: a, b \in \mathbb{Q}\}$ é uma base.

Proposição 1.3.15. *Se um espaço topológico (X, τ) satisfaz o segundo axioma de enumerabilidade, então também satisfaz o primeiro axioma de enumerabilidade.*

Demonstração. Seja \mathcal{B} uma base para (X, τ) . Então, $\mathcal{B}_x = \{B \in \mathcal{B} : x \in B\}$ é uma base local para x . \square

Exemplo 1.3.16. A reta de Sorgenfrey não satisfaz o segundo axioma de enumerabilidade. De fato, suponha, por contradição, que satisfaça. Seja \mathcal{B} uma base enumerável. Para cada $x \in X$, seja $B_x \in \mathcal{B}$ tal que $x \in B_x \subset [x, x + 1[$. Note que se $x \neq y$, então $B_x \neq B_y$. De fato, sem perda de generalidade, suponha que $x < y$ e note que $x \notin B_y$, pois $B_y \subset [y, y + 1[$. Logo, $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{B}$ definida por $f(x) = B_x$ é injetora, o que é uma contradição, pois \mathcal{B} é enumerável e \mathbb{R} não.

Definição 1.3.17. Seja (X, τ) um espaço topológico. Dizemos que $D \subset X$ é denso em X se $\overline{D} = X$.

Definição 1.3.18. Dizemos que (X, τ) satisfaz o **terceiro axioma de enumerabilidade** (*3rd countable*) se admite um subconjunto denso enumerável. Neste caso, dizemos também que (X, τ) é um **espaço separável**.

Exemplo 1.3.19. Temos que a reta real e a reta de Sorgenfrey são separáveis pois em ambos os casos \mathbb{Q} é denso.

O segundo axioma de enumerabilidade implica no terceiro (e já vimos que ele implica no primeiro também):

Proposição 1.3.20. *Se um espaço topológico (X, τ) satisfaz o segundo axioma de enumerabilidade, então ele é separável.*

Demonstração. Seja $\mathcal{B} = \{B_n : n \in \mathbb{N}\}$ uma base para (X, τ) . Para cada $n \in \mathbb{N}$, seja $x_n \in B_n$ (podemos supor sem perda de generalidade que $B_n \neq \emptyset$). Vamos mostrar que $D = \{x_n : n \in \mathbb{N}\}$ é denso. Sejam $x \in X$ e V vizinhança de x . Como \mathcal{B} é base, existe $B_n \in \mathcal{B}$ tal que $x \in B_n \subset V$. Note que $x_n \in B_n$. Portanto, $x_n \in V \cap D$. \square

No caso de métricos, vale a volta:

Note que a reta de Sorgenfrey nos dá que a hipótese de metrizabilidade é necessária. **Proposição 1.3.21.** *Se (X, d) é um espaço métrico e separável, então (X, d) satisfaz o segundo axioma de enumerabilidade.*

Demonstração. Seja $\{x_n : n \in \mathbb{N}\}$ denso em X . Considere

$$\mathcal{B} = \{B_{\frac{1}{m}}(x_n) : n \in \mathbb{N}, m \in \mathbb{N}_{>0}\}.$$

Vamos mostrar que \mathcal{B} é base. Sejam A aberto e $x \in A$. Seja $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$ tal que $B_\varepsilon(x) \subset A$. Seja $m \in \mathbb{N}$ tal que $\frac{1}{m} < \frac{\varepsilon}{2}$. Como $\{x_n : n \in \mathbb{N}\}$ é denso em X , existe $x_n \in B_{\frac{1}{m}}(x)$. Vamos mostrar que $x \in B_{\frac{1}{m}}(x_n) \subset B_\varepsilon(x)$. Primeiramente, note que $x \in B_{\frac{1}{m}}(x_n)$, pois $d(x, x_n) < \frac{1}{m}$. Temos também que $B_{\frac{1}{m}}(x_n) \subset B_\varepsilon(x)$, pois, dado $a \in B_{\frac{1}{m}}(x_n)$, temos

$$d(a, x) \leq d(a, x_n) + d(x_n, x) < \frac{1}{m} + \frac{1}{m} < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon.$$

□

Definição 1.3.22. Dizemos que o espaço topológico (X, τ) é um **espaço metrizável** se existe uma métrica sobre X que induz a topologia τ .

Com o que temos até o momento, já conseguimos dizer em alguns casos quando um espaço não é metrizável:

Exemplo 1.3.23. A reta de Sorgenfrey não é um espaço metrizável. De fato, temos que este é um espaço separável mas que não admite uma base enumerável. Assim, pela Proposição 1.3.21, que ele não é metrizável.

Veremos outros critérios ao longo do texto.

Alongamentos

Alongamento 1.3.24. Sejam (X, τ) espaço topológico e $x \in X$. Mostre que são equivalentes:

- (i) x admite um sistema fundamental de vizinhanças enumerável;
- (ii) x admite uma base local enumerável.

Alongamento 1.3.25. Sejam (X, τ) espaço topológico, $x \in X$ e $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ sequência de pontos de X . Mostre que são equivalentes:

- (i) $x_n \rightarrow x$.
- (ii) para todo V aberto tal que $x \in V$, existe n_0 tal que, se $n \geq n_0$, então $x_n \in V$.

(iii) dado \mathcal{V} sistema fundamental de vizinhanças para x , para todo $V \in \mathcal{V}$, existe n_0 tal que, se $n \geq n_0$, então $x_n \in V$.

Alongamento 1.3.26. Seja (X, τ) um espaço topológico. Mostre que $D \subset X$ é denso se, e somente se, para todo aberto não vazio A , $A \cap D \neq \emptyset$.

Alongamento 1.3.27. Mostre que se (X, τ) é um espaço topológico enumerável que satisfaz o primeiro axioma de enumerabilidade, então (X, τ) também satisfaz o segundo axioma de enumerabilidade.

Alongamento 1.3.28. Mostre que todo subespaço de um espaço que satisfaça o primeiro axioma de enumerabilidade também satisfaz o primeiro axioma de enumerabilidade.

Alongamento 1.3.29. Mostre que todo subespaço de um espaço com base enumerável tem base enumerável.

Alongamento 1.3.30. Mostre que se (X, τ) satisfaz o primeiro axioma de enumerabilidade, então todo $x \in X$ admite um sistema fundamental de vizinhanças abertas enumerável e decrescente, isto é, $(V_n)_{n \in \mathbb{N}}$ é tal que $V_{n+1} \subset V_n$.

Exercícios

Exercício 1.3.31. Mostre que a reta esburacada não é metrizável.

Exercício 1.3.32. Mostre que na reta esburacada as únicas sequências convergentes são as quase constantes. Uma sequência $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ é dita uma **sequência quase constante** se existem x e n_0 tais que $x_n = x$ para todo $n \geq n_0$.

Exercício 1.3.33. Seja (X, τ) um espaço topológico. Seja $D \subset X$ denso. Considerando D como subespaço, mostre que se $E \subset D$ é denso em D , então E é denso em X .

Exercício 1.3.34. Mostre que todo subespaço de um espaço que tenha base enumerável é separável.

Exercício 1.3.35. O exemplo deste exercício é chamado de **plano de Niemytski**.

Considere $X = \{(x, y) : x, y \in \mathbb{R}, y \geq 0\}$ com a topologia de forma que:

- (i) se (x, y) é tal que $y > 0$, então uma vizinhança básica de (x, y) é da forma de uma bola aberta centrada em (x, y) que não intercepta o eixo x , isto é $B_\varepsilon((x, y))$ com $0 < \varepsilon < y$;

- (ii) Para os pontos da forma $(x, 0)$, uma vizinhança de tal ponto é da forma de uma bola aberta contida em $\{(a, b) : b > 0\}$ e que tangencie o eixo x no ponto $(x, 0)$ (inclua o ponto em tal vizinhança). Ou seja, $B_y((x, y)) \cup \{(x, 0)\}$.

onde $B_r((x, y))$ é a bola com a métrica usual do \mathbb{R}^2 .

- (a) Mostre que isso define uma topologia.
- (b) Mostre que tal espaço é de Hausdorff.
- (c) Mostre que tal espaço é regular.
- (d) Mostre que tal espaço é separável.
- (e) Mostre que o eixo x ($\{(x, 0) : x \in \mathbb{R}\}$) com a topologia de subespaço tem a topologia discreta.
- (f) Mostre que tal espaço não tem base enumerável.
- (g) Mostre que tal espaço não é metrizável.
- (h) Mostre que não é verdade que todo subespaço de um espaço separável é separável (compare com o Exercício 1.3.34).

Exercício 1.3.36. Mostre que a reta esburacada não é separável.

Exercício 1.3.37. Mostre que, se (X, τ) é um espaço regular que satisfaz o segundo axioma de enumerabilidade, então (X, τ) é um espaço normal.

Exercício 1.3.38. Sejam (X, τ) um espaço topológico, \mathcal{B} uma base enumerável para (X, τ) e seja \mathcal{C} uma base qualquer para (X, τ) . Então, existe uma família enumerável $\mathcal{C}' \subset \mathcal{C}$ que é base para (X, τ) .

Capítulo 2

Funções

2.1 Funções contínuas

Uma maneira de entender a definição de função contínua é a seguinte: imagine que f seja uma máquina de transformar algo em outra coisa. Para exemplificar, imaginemos que f transforma farinha em pizza. Assim, se queremos obter “ y m² de pizza”, precisamos fornecer x kg de farinha, de forma que $f(x) = y$. Mas, como toda medição acarreta em erros, este processo não tem precisão absoluta. Desta forma, para obtermos “ y m² de pizza” dentro de uma margem de erro T (tolerância), precisamos fornecer x kg dentro de uma precisão P (exigida pela f). Vamos dizer que f é contínua se dada uma tolerância qualquer, sempre podemos encontrar uma precisão que satisfaça o processo.

O que não seria nada ruim. Mas não sei de onde viria o molho.

Traduzindo para a nossa linguagem, dados (X, τ) e (Y, ρ) espaços topológicos, f será contínua no ponto x se para toda tolerância T em torno de $f(x)$, existe uma precisão P em torno de x de forma que $f[P] \subset T$. Note que essa última condição simplesmente quer dizer que todo os pontos que satisfazem a precisão tem imagem dentro da tolerância. Finalmente, note que estar dentro de uma precisão ou de uma tolerância é simplesmente estar “próximo” de um determinado ponto. Ou seja, basta trabalharmos com estes dois conceitos como sendo vizinhanças:

Definição 2.1.1. Sejam (X, τ) e (Y, ρ) espaços topológicos e seja $f : X \rightarrow Y$ uma função. Seja também $x \in X$. Dizemos que f é uma função **função contínua no ponto** x se, para toda vizinhança A de $f(x)$ existe uma vizinhança B de x tal que $f[B] \subset A$.

Veja o Alongamento 2.1.17 para ver que esse conceito de fato generaliza aquele normalmente visto em cursos de Cálculo.

Da mesma forma que obtemos uma definição mais simples (e menos intuitiva) quando abandonamos vizinhanças e definimos abertos diretamente

de uma forma global para o espaço, também temos uma definição para funções contínuas (de maneira global):

Definição 2.1.2. Sejam (X, τ) e (Y, ρ) espaços topológicos e seja $f : X \rightarrow Y$ uma função. Dizemos que f é uma **função contínua** se, para todo aberto A de Y , temos que $f^{-1}[A]$ é aberto em X (i.e., $\forall A \in \rho \ f^{-1}[A] \in \tau$).

De fato, os conceitos apresentados são versões globais e locais de uma mesma coisa:

Proposição 2.1.3. *Sejam (X, τ) e (Y, σ) espaços topológicos e $f : X \rightarrow Y$ uma função. Então f é contínua se, e somente se, para todo $x \in X$, f é contínua no ponto x .*

Demonstração. Suponha f contínua e $x \in X$. Seja A vizinhança de $f(x)$ e A' aberto tal que $f(x) \in A' \subset A$. Assim, $f^{-1}[A']$ é aberto, com $x \in f^{-1}[A']$ (portanto, vizinhança de x) e $f[f^{-1}[A']] \subset A' \subset A$.

Agora, suponha que para todo $x \in X$, f é contínua em x . Seja A aberto em Y . Para cada $x \in X$ tal que $f(x) \in A$, seja B_x vizinhança de x tal que $f[B_x] \subset A$. Como B_x é vizinhança de x , existe B'_x aberto tal que $x \in B'_x \subset B_x$. Assim, $f^{-1}[A] = \bigcup_{x \in f^{-1}[A]} B'_x$ é aberto. \square

Exemplo 2.1.4. Considere (X, τ) um espaço topológico. Então a função $I : X \rightarrow X$ dada por $I(x) = x$ para todo $x \in X$ (**função identidade**) é contínua (a verificação é imediata).

Exemplo 2.1.5. Qualquer função constante é contínua. De fato, sejam (X, τ) e (Y, σ) espaços topológicos e considere uma função constante $f : X \rightarrow Y$ dada por $f(x) = k$. Seja A um aberto de (Y, σ) . Então,

$$f^{-1}[A] = \begin{cases} \emptyset, & k \notin A \\ X, & k \in A \end{cases}$$

Ou seja, em ambos os casos $f^{-1}[A]$ é um aberto de (X, τ) .

Com a definição global de continuidade, prova-se o seguinte resultado facilmente:

Este resultado é lido como **Proposição 2.1.6.** *Sejam (X_1, τ_1) , (X_2, τ_2) e (X_3, τ_3) espaços topológicos e sejam $g : X_1 \rightarrow X_2$ e $f : X_2 \rightarrow X_3$ funções contínuas. Então, $f \circ g : X_1 \rightarrow X_3$ é contínua.* O que era de se esperar.

Demonstração. Seja A um aberto em X_3 . Como f é contínua, temos que $f^{-1}[A]$ é aberto em X_2 . Agora, como g é contínua, $g^{-1}[f^{-1}[A]]$ é aberto em X_1 . Mas, como $g^{-1}[f^{-1}[A]] = (f \circ g)^{-1}[A]$, a proposição está provada. \square

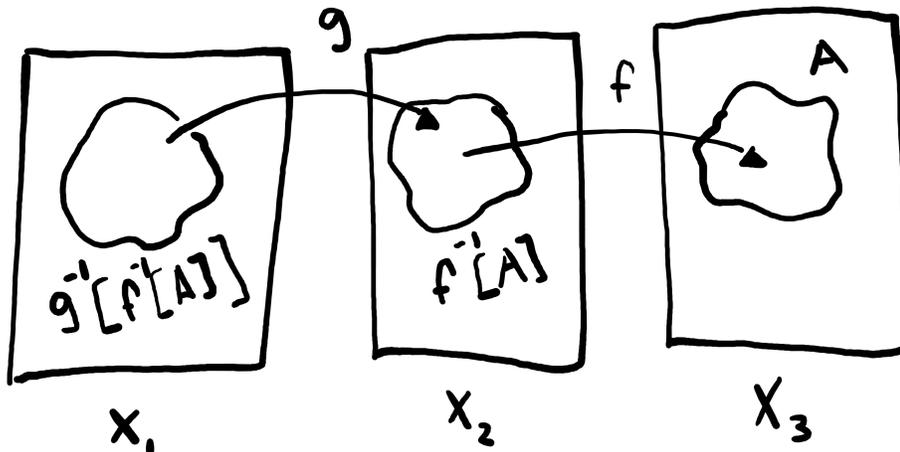


Figura 2.1: Composta de contínuas é contínua (vá da direita para a esquerda)

Densos são “empurrados” por funções contínuas:

Proposição 2.1.7. *Sejam (X, τ) e (Y, ρ) espaços topológicos e $f : X \rightarrow Y$ uma função contínua sobrejetora. Se $D \subset X$ é denso em X , então, $f[D]$ é denso em Y .*

Demonstração. Seja $A \subset Y$ aberto não vazio. Note que $f^{-1}[A]$ é aberto em X . Como f é sobrejetor, $f^{-1}[A] \neq \emptyset$. Logo, existe $d \in D$ tal que $d \in f^{-1}[A]$, ou seja, $f(d) \in A$. Portanto, $f[D] \cap A \neq \emptyset$. \square

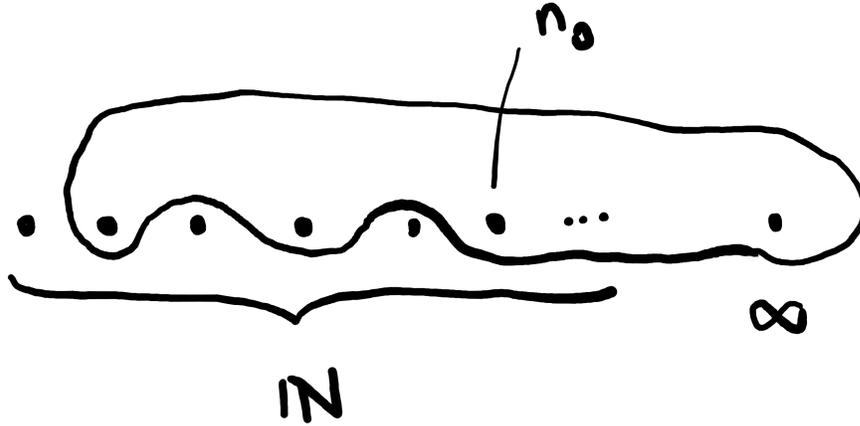
Corolário 2.1.8. *Imagem contínua de um espaço separável é separável.*

O seguinte exemplo será útil no estudo de sequências convergentes:

Exemplo 2.1.9. Considere o conjunto $\mathbb{N} \cup \{\infty\}$ com a topologia gerada pelos conjuntos

- (a) $\{n\}$, $n \in \mathbb{N}$;
- (b) $\{\infty\} \cup A$, em que $A \subset \mathbb{N}$ e $\mathbb{N} \setminus A$ é finito.

Note que, desta forma, um conjunto contendo ∞ é aberto se, e somente se, apenas uma quantidade finita de elementos de \mathbb{N} não pertence a ele. Chamamos este espaço de **espaço da sequência convergente**.

Figura 2.2: Típica vizinhança de ∞

Proposição 2.1.10. *Seja (X, τ) espaço topológico e seja $f : \mathbb{N} \cup \{\infty\} \rightarrow X$ uma função $(\mathbb{N} \cup \{\infty\})$ com a topologia do exemplo anterior). Então, f é contínua se, e somente se, $f(n) \rightarrow f(\infty)$ (i.e., a sequência $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$, em que cada $x_n = f(n)$, é convergente para $x = f(\infty)$).*

Demonstração. Suponha f contínua. Seja A aberto tal que $f(\infty) \in A$. Como f é contínua, $f^{-1}[A]$ é aberto. Logo, $\mathbb{N} \setminus f^{-1}[A]$ é finito, ou seja, existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que para $n \geq n_0$, $n \in f^{-1}[A]$. Logo, para $n \geq n_0$, $f(n) \in A$.

Agora, suponha que $f(n) \rightarrow f(\infty)$. É imediato que f é contínua em todo $n \in \mathbb{N}$. Mostremos que f é contínua em ∞ . Seja A aberto tal que $f(\infty) \in A$. Como $f(n) \rightarrow f(\infty)$, existe n_0 tal que para $n \geq n_0$, $f(n) \in A$. Logo, $\{n : n \geq n_0\} \subset f^{-1}[A]$ e $\infty \in \{n : n \geq n_0\} \cup \{\infty\} \subset f^{-1}[A]$. \square

Funções contínuas também “empurram” sequências convergentes:

Proposição 2.1.11. *Sejam (X, τ) e (Y, ρ) espaços topológicos, $f : X \rightarrow Y$ função contínua e $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ uma sequência convergente para $x \in X$. Então, $f(x_n) \rightarrow f(x)$.*

Demonstração. Considere a função $h : \mathbb{N} \cup \{\infty\} \rightarrow X$, com $h(n) = x_n$ e $h(\infty) = x$. Note que h é contínua pela proposição anterior. Note também que $f \circ h$ é contínua, pois é composta de contínuas. Note que $(f \circ h)(n) =$

$f(x_n)$, para $n \in \mathbb{N}$ e que $(f \circ h)(\infty) = f(\infty)$. Logo, pela proposição anterior, aplicada a $f \circ h$, temos $f(x_n) \rightarrow f(x)$. \square

No caso de espaços “ricos” em sequências convergentes, também temos a volta do resultado anterior:

Proposição 2.1.12. *Sejam (X, τ) e (Y, ρ) espaços topológicos, onde (X, τ) possui bases locais enumeráveis. Dada $f : X \rightarrow Y$ uma função, temos que f é contínua se, e somente se, para toda sequência $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ em X tal que $x_n \rightarrow x$, temos que $f(x_n) \rightarrow f(x)$.* Veja também o Exercício 2.1.22.

Demonstração. Já está feito supondo f contínua.

Para a recíproca, sejam $x \in X$ e $(B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ base local para x . Seja A aberto em Y tal que $f(x) \in A$. Mostremos que existe V aberto tal que $x \in V \subset f^{-1}[A]$. Suponha, por contradição, que não existe. Então, para todo $n \in \mathbb{N}$, temos que $\bigcap_{k \leq n} B_k \not\subset f^{-1}[A]$. Seja $x_n \in \bigcap_{k \leq n} B_k$ tal que $f(x_n) \notin A$. Agora, observe que $x_n \rightarrow x$. De fato, seja $V \ni x$ aberto. Existe $n \in \mathbb{N}$ tal que $x \in B_n \subset V$. Portanto, para todo $m \geq n$, $x_m \in V$. Note, também, que $f(x_n) \not\rightarrow f(x)$. De fato, veja que $f(x) \in A$, que é aberto e para todo $n \in \mathbb{N}$, $f(x_n) \notin A$, que é contradição. \square

Corolário 2.1.13. *Sejam (X, d_1) e (Y, d_2) espaços métricos e $f : X \rightarrow Y$ uma função. Então, f é contínua se, e somente se, para toda sequência $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ em X tal que $x_n \rightarrow x$, temos que $f(x_n) \rightarrow f(x)$.*

Alongamentos

Alongamento 2.1.14. Mostre que $f : X \rightarrow Y$ é contínua se, e somente se, $f^{-1}[F]$ é fechado (em X) para todo $F \subset Y$ fechado.

Alongamento 2.1.15. Mostre que na definição de função contínua poderíamos supor os abertos sendo básicos (isto é, tanto os abertos em X como em Y serem elementos de bases \mathcal{B}_X e \mathcal{B}_Y fixadas previamente).

Alongamento 2.1.16. Mostre o análogo do Alongamento anterior para a definição de continuidade num ponto, trocando vizinhança por “elemento de uma base local” fixada.

Alongamento 2.1.17. Sejam (X_1, d_1) e (X_2, d_2) espaços métricos e $f : X_1 \rightarrow X_2$ uma função. Mostre que, para cada $x \in X_1$, são equivalentes: Para aqueles que gostam de ε 's e δ 's.

- (a) f contínua em x (com as topologia induzidas pelas métricas);
- (b) $\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0, \forall y \in X, d_1(x, y) < \delta \rightarrow d_2(f(x), f(y)) < \varepsilon$.

Alongamento 2.1.18. Sejam (X, τ) e (Y, σ) espaços topológicos e $Z \subset X$ subespaço de X . Seja $f : X \rightarrow Y$ uma função contínua. Mostre que $(f \upharpoonright Z) : Z \rightarrow Y$ é contínua.

Exercícios

Exercício 2.1.19. Seja (X, τ) espaço topológico. Seja A um aberto fechado em X . Mostre que a **função característica** de A é contínua. Isto é, que a função $\chi_A : X \rightarrow \{0, 1\}$ dada por

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

é contínua (considere em $\{0, 1\}$ a topologia discreta (ou a induzida por \mathbb{R} , que dá na mesma)).

Exercício 2.1.20. Sejam (X, τ) e (Y, σ) espaços topológicos. Sejam $F_1, \dots, F_n \subset X$ fechados tais que $\bigcup_{i=1}^n F_i = X$. Seja $f : X \rightarrow Y$ uma função.

- (a) Mostre que se $f \upharpoonright F_i$ é contínua para todo $i = 1, \dots, n$, então f é contínua;
- (b) Note que a volta é imediata (mesmo que cada F_i não seja fechado).
- (c) Dê um exemplo para mostrar que a hipótese de que cada F_i ser fechado é necessária no item (a).

Exercício 2.1.21. Sejam (X, τ) e (Y, σ) espaços topológicos. Seja $(A_i)_{i \in I}$ família de abertos de X tal que $\bigcup_{i \in I} A_i = X$. Seja $f : X \rightarrow Y$.

- (a) Mostre que se $f \upharpoonright A_i$ é contínua para todo $i \in I$, então f é contínua.
- (b) Note que a volta é imediata (mesmo que cada A_i não seja aberto).

Exercício 2.1.22. Sejam (X, τ) e (Y, ρ) espaços topológicos, sendo que (X, τ) satisfaz o primeiro axioma de enumerabilidade. Mostre que podemos melhorar a Proposição 2.1.12 para $f : X \rightarrow Y$ é contínua se, e somente, para toda sequência $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ convergente em X , temos que $(f(x_n))_{n \in \mathbb{N}}$ é convergente.

Dicas de alguns exercícios

1.1.62

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 $x \in \partial A$.

1.1.75

e Suponha que não e use os itens anteriores.

1.1.77

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 $A \in \sigma$.

1.2.21 Veja a Proposição **1.1.16**.

1.2.30

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.

1.2.31 Lembre que os racionais são enumeráveis.

1.3.27 Fixe uma base local enumerável para cada ponto, mostre que a união de todas elas forma uma base.

1.3.37 Veja a demonstração da proposição **1.2.20**. Use o fato da existência de uma base enumerável para construir o análogo das famílias $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ e $(B_n)_{n \in \mathbb{N}}$.

1.3.38 Considere $\mathcal{A} = \{(B_1, B_2) \in \mathcal{B}^2 : B_1 \subset B_2\}$. Fixe $C' \in \mathcal{C}$. Para cada $(B_1, B_2) \in \mathcal{A}$, se existir $C \in \mathcal{C}$ de forma que $B_1 \subset C \subset B_2$, então escolha C_{B_1, B_2} como um destes elementos. Se não existir, simplesmente faça $C_{B_1, B_2} = C'$. Note que $\mathcal{C}' = \{C_{B_1, B_2} : (B_1, B_2) \in \mathcal{A}\}$ é enumerável. Mostre que \mathcal{C}' é base.

2.1.20

a Use o Alongamento 2.1.14.

c Considere $X = [0, 1]$, $F_1 = \{0\}$ e $F_2 =]0, 1]$.

2.1.22 Suponha $x_n \rightarrow x$. Note que a sequência $y_{2n} = x_n$ e $y_{2n+1} = x$ também é convergente.

Soluções de alguns exercícios

1.1.59

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).

1.1.60 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.

1.1.71 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 .

1.1.72 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 .

1.1.73 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 **1.1.72**.

1.1.76 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 $U \cap A \neq \emptyset$.

1.2.22 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 podemos concluir que (X, τ) é T_3 .

1.2.25 Procedamos pela contrapositiva.

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

1.2.26 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 .

1.2.27 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 .

1.3.26 Suponha que exista um aberto não vazio A tal que $A \cap D = \emptyset$. Então, $X \setminus A$ é um fechado diferente de X de modo que $D \subset (X \setminus A)$. Então, como \overline{D} é a interseção de todos os fechados que contém D , segue que $\overline{D} \neq X$ e D não é denso.

Agora, suponha que para qualquer aberto não vazio A , temos que $A \cap D \neq \emptyset$. Seja F um fechado tal que $D \subset F$, segue que $X \setminus F$ é um aberto tal que $(X \setminus F) \cap D = \emptyset$. Logo $X \setminus F = \emptyset$ e, então, $F = X$. Portanto, X é o único fechado que contém D e $\overline{D} = X$.

2.1.18 Seja A um aberto em Y . Então, como f é contínua, $f^{-1}[A]$ é um aberto em X , e portanto, $f^{-1}[A] \cap Z$ é um aberto de Z . Por outro lado, como $(f \upharpoonright Z)^{-1}[A] = f^{-1}[A] \cap Z$, temos que $f \upharpoonright Z$ é contínua.

Notação

Índice Remissivo