

CAPÍTULO 2. O SISTEMA DE NÚMEROS NATURAIS

SUMÁRIO

1. Axiomas de Peano	1
2. Adição e multiplicação	3
3. Relação de ordem	5
4. Boa ordenação e o segundo princípio de indução	6

Intuitivamente, os números naturais são: 0, o que vem a seguir de 0 chamado 1, depois de 1 a seguir é 2, ... e assim por diante ...

Formalmente, o conjunto de números naturais é definido pelos axiomas de Peano.

1. AXIOMAS DE PEANO

Um conjunto \mathbb{N} , junto com uma função $s: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ (chamada sucessor) representa um sistema de números naturais se as seguintes propriedades (axiomas) são satisfeitas:

P1. Existe um único elemento, denotado por 0, que não é o sucessor de nenhum outro elemento, ou seja,

$$s(n) \neq 0 \quad \text{para todo } n \in \mathbb{N},$$

$$\text{e para todo } m \neq 0 \text{ existe } n \in \mathbb{N} \text{ tal que } s(n) = m.$$

P2. s é injetiva, ou seja, se $s(m) = s(n)$ então $m = n$. Em outras palavras, dois números que têm o mesmo sucessor são iguais.

P3. (Princípio da indução) Se $X \subset \mathbb{N}$ é um subconjunto tal que:

- $0 \in X$,
 - se para todo $n \in X$ tem-se também que $s(n) \in X$
- então $X = \mathbb{N}$.

Lema 1.1. *Para todo $n \in \mathbb{N}$, $s(n) \neq n$, ou seja, todo número natural é diferente do seu sucessor.*

Demonstração. Seja

$$X = \{n \in \mathbb{N} : s(n) \neq n\}.$$

- $0 \in X$ já que 0 não é o sucessor de nenhum número, e em particular, $s(0) \neq 0$.
- Suponha que $n \in X$, ou seja, $s(n) \neq n$.

Como S é injetiva, segue que

$$s(s(n)) \neq s(n),$$

portanto $s(n) \in X$.

Pelo princípio da indução, $X = \mathbb{N}$, ou seja, $s(n) \neq n$ para todo $n \in \mathbb{N}$. □

Observação 1.1. O princípio da indução pode ser enunciado da seguinte maneira equivalente.

Seja $P(n)$ uma propriedade que se refere aos números naturais. Suponha que as seguintes afirmações sejam válidas:

- Base de indução (ou 1º passo)
 $P(0)$ é verdadeira

■ Passo indutivo

Suponha que $P(n)$ seja verdadeira (hipótese de indução).

A partir dessa hipótese, prova-se que $P(s(n))$ seja verdadeira.

Então pelo princípio da indução, $P(n)$ é verdadeira para todo $n \in \mathbb{N}$.

De fato, se definimos

$$X = \{n \in \mathbb{N} : P(n) \text{ é verdadeira}\},$$

tem-se:

■ $0 \in X$

■ Se $n \in X$ então $s(n) \in X$.

Logo, pelo princípio da indução, $X = \mathbb{N}$, ou seja, $P(n)$ é verdadeira para todo $n \in \mathbb{N}$.

Exemplo 1.2. Prove que se $x \neq 1$,

$$1 + x + \cdots + x^n = \frac{x^{n+1} - 1}{x - 1} \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

Ou seja, prove que a propriedade/fórmula $P(n)$:

$$\sum_{k=0}^n x^k = \frac{x^{n+1} - 1}{x - 1}$$

vale para todo $n \in \mathbb{N}$.

Demonstração. Usamos o princípio da indução.

■ 1º passo, ou seja, o caso $n = 0$.

A propriedade $P(0)$ significa $1 = \frac{x - 1}{x - 1}$, que é claramente válida se $x \neq 1$.

■ Passo indutivo.

Suponha que $P(n)$ valha, ou seja

$$\sum_{k=0}^n x^k = \frac{x^{n+1} - 1}{x - 1}.$$

Vamos provar que $P(n + 1)$ vale também. Tem-se

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{n+1} x^k &= \sum_{k=0}^n x^k + x^{n+1} \\ &= \frac{x^{n+1} - 1}{x - 1} + x^{n+1} \quad (\text{pela hipótese indutiva}) \\ &= \frac{x^{n+1} - 1}{x - 1} + \frac{x^{n+1}(x - 1)}{x - 1} \\ &= \frac{x^{n+1} - 1 + x^{n+2} - x^{n+1}}{x - 1} \\ &= \frac{x^{n+2} - 1}{x - 1}, \end{aligned}$$

provando que $P(n + 1)$ é válida.

Pelo princípio da indução, a fórmula $P(n)$ vale para todo $n \in \mathbb{N}$. □

2. ADIÇÃO E MULTIPLICAÇÃO

Dado um número natural m , definimos a soma $m + 0$ como sendo m , a soma $m + 1$ como sendo o sucessor $s(m)$ de m , a soma $m + 2$ como sendo o sucessor de $m + 1$ e assim por diante.

Formalmente, a adição por n é definida por indução.

Definição 2.1. Seja $m \in \mathbb{N}$. Então

- $m + 0 = m$.
- Se $m + n$ foi definido, então $m + s(n) = s(m + n)$.

Observe que $m + 1 = m + s(0) = s(m)$, isto é, $m + 1$ é o sucessor de m . Então em argumentos por indução, em geral escreveremos $m + 1$ em vez de $s(m)$.

A adição de números naturais satisfaz as seguintes propriedades.

Proposição 2.1. Sejam $m, p, n \in \mathbb{N}$.

- (i) (associatividade) $(m + p) + n = m + (p + n)$.
- (ii) (comutatividade) $m + n = n + m$.
- (iii) Se $m + n = p + n$ então $m = p$.

Demonstração. Vamos provar (i) e (iii). O item (ii) é exercício.

(i) Fixemos $m, p \in \mathbb{N}$ e provemos a seguinte propriedade para todo $n \in \mathbb{N}$.

$$P(n): \quad (m + p) + n = m + (p + n).$$

Usamos indução matemática.

■ Base da indução: seja $n = 0$. Então $(m + p) + 0 = m + p = m + (p + 0)$, logo $P(0)$ vale.

■ Passo de indução: suponha que $P(n)$ seja verdadeiro, isto é,

$$(m + p) + n = m + (p + n).$$

Vamos provar $P(s(n))$. De fato,

$$\begin{aligned} (m + p) + s(n) &= s((m + p) + n) \quad (\text{pela definição da adição}) \\ &= s(m + (p + n)) \quad (\text{pela hipótese de indução}) \\ &= m + s(p + n) \quad (\text{pela definição da adição}) \\ &= m + (p + s(n)) \quad (\text{de novo pela definição da adição}) \end{aligned}$$

o que estabelece $P(s(n))$.

Pelo princípio da indução, $(m + p) + n = m + (p + n)$ vale para todo $n \in \mathbb{N}$.

(iii) Fixamos $m, p \in \mathbb{N}$ e vamos provar por indução em $n \in \mathbb{N}$ que

$$\text{se } m + n = p + n \text{ então } m = p.$$

■ Base de indução: $n = 0$.

Se $m + 0 = p + 0$ então claramente $m = p$.

■ Passo de indução: suponha a afirmação verdadeira para $n \in \mathbb{N}$, ou seja, se $m + n = p + n$ então $m = p$.

Vamos provar a afirmação para $s(n)$. De fato, se

$$m + s(n) = p + s(n),$$

então pela definição da adição tem-se $s(m + n) = s(p + n)$.

Mas como a função sucessão é injetiva, segue que

$m + n = p + n$, e pela hipótese de indução concluímos que $m = p$.

Pelo princípio de indução, a conclusão segue. □

Seja m um número natural. Definimos $m \cdot 0 = 0$, $m \cdot 1 = m$, $m \cdot 2 = m + m$, $m \cdot 3 = m + m + m$ e etc. Formalmente, a multiplicação de números naturais é definida por indução como seguinte.

Definição 2.2. Seja $m \in \mathbb{N}$. Então,

- $m \cdot 0 = 0$
- Se $m \cdot n$ já foi definido então definimos $m \cdot s(n) = m \cdot n + m$.

Como $s(n) = n + 1$, temos que $m \cdot (n + 1) = m \cdot n + m$.

Em particular, $m \cdot 1 = m \cdot 0 + m = 0 + m = m$, $m \cdot 2 = m \cdot 1 + m = m + m$ e etc., como intuitivamente esperado.

A multiplicação de números naturais satisfaz as seguintes propriedades.

Proposição 2.2. Sejam $m, p, n \in \mathbb{N}$.

- (i) (distributividade) $m \cdot (p + n) = m \cdot p + m \cdot n$
- (ii) (associatividade) $m \cdot (p \cdot n) = (m \cdot p) \cdot n$
- (iii) (comutatividade) $m \cdot n = n \cdot m$
- (iv) Se $m \cdot p = n \cdot p$ e $p \neq 0$ então $m = n$.

Demonstração. Vamos provar a distributividade e deixar as outras propriedades como exercícios.

(i) Fixamos $m, p \in \mathbb{N}$ e vamos provar por indução que $\forall n \in \mathbb{N}$,

$$m \cdot (p + n) = m \cdot p + m \cdot n.$$

■ Base de indução: $n = 0$. Temos

$$m \cdot (p + 0) = m \cdot p = m \cdot p + m \cdot 0.$$

■ Passo de indução: suponha que

$$m \cdot (p + n) = m \cdot p + m \cdot n.$$

Vamos provar a mesma propriedade para $s(n)$. De fato,

$$\begin{aligned} m \cdot (p + s(n)) &= m \cdot s(p + n) \\ &= m \cdot (p + n) + m \\ &= (m \cdot p + m \cdot n) + m \\ &= m \cdot p + (m \cdot n + m) \\ &= m \cdot p + m \cdot s(n). \end{aligned}$$

Pelo princípio da indução, a distributividade vale para todo $n \in \mathbb{N}$. □

Observação 2.1. Pelo princípio da indução, dada uma propriedade $P(n)$ que se refere aos números naturais, para provar que ela seja verdadeira para todo $n \geq n_0$ basta provar as seguintes afirmações:

- 1) Base de indução. $P(n_0)$ é verdadeira.
- 2) Passo indutivo. Suponha que $P(n)$ seja verdadeira para algum $n \geq n_0$. Então $P(s(n))$ é verdadeira.

De fato, podemos definir o conjunto

$$X = \{m \in \mathbb{N} : P(n_0 + m) \text{ é verdadeira}\}.$$

Temos que:

- $0 \in X$ já que $P(n_0)$ é verdadeira (pela base de indução).
- Se $m \in X$, então para $n := n_0 + m$ temos que $P(n) = P(n_0 + m)$ é verdadeira. Então, pelo passo indutivo, $P(n + 1) = P(n_0 + m + 1)$ é verdadeira, ou seja, $m + 1 \in X$.

Logo, $X = \mathbb{N}$, ou seja, $P(n)$ é verdadeira para todo $n \geq n_0$.

Exemplo 2.1. Para todo $n \geq 1$,

$$1 + 2 + \dots + n = \frac{n \cdot (n + 1)}{2}.$$

Na verdade deveríamos escrever a fórmula acima como

$$2 \cdot (1 + 2 + \dots + n) = n \cdot (n + 1),$$

já que ainda não definimos frações.

Demonstração. Base de indução: começamos com $n = 1$. A fórmula se torna $2 \cdot 1 = 1 \cdot 2$ que evidentemente vale.

Passo de indução: suponha que

$$2 \cdot (1 + 2 + \dots + n) = n \cdot (n + 1)$$

e vamos provar o mesmo para $n + 1$. De fato,

$$\begin{aligned} 2 \cdot (1 + 2 + \dots + n + (n + 1)) &= 2 \cdot (1 + 2 + \dots + n) + 2 \cdot (n + 1) \\ &= n \cdot (n + 1) + 2 \cdot (n + 1) \quad (\text{pela hipótese de indução}) \\ &= (n + 2) \cdot (n + 1) = (n + 1) \cdot (n + 2). \end{aligned}$$

Pelo princípio da indução, a fórmula vale para todo $n \geq 1$. □

3. RELAÇÃO DE ORDEM

Intuitivamente, dados dois números naturais m e n , temos que $m \leq n$ se m vem antes de n na enumeração

$$0, 1, 2, \dots, m, \dots, n, \dots$$

dos números naturais, ou seja, se $n = m$ ou se n é o sucessor de m , ou se n é o sucessor do sucessor de m , ou ... Formalmente,

Definição 3.1. $m \leq n$ se existe $k \in \mathbb{N}$ tal que $n = m + k$.

Além disso, escrevemos $m < n$ se $m \leq n$ e $m \neq n$. Então $m < n$ se e somente se existe $k \neq 0$ tal que $n = m + k$.

Ademais, $n \geq m$ significa $m \leq n$ enquanto $n > m$ significa $m < n$.

Proposição 3.1. A relação \leq é uma relação de ordem em \mathbb{N} .

Demonstração. Vamos verificar as três propriedades de uma relação de ordem.

1) Reflexividade: para todo $n \in \mathbb{N}$, tem-se $n \leq n$ já que $n = n + 0$.

2) Antissimetria: temos que provar que se $m \leq n$ e $n \leq m$ então $m = n$.

Como $m \leq n$, existe $k \in \mathbb{N}$ tal que $n = m + k$.

Como $n \leq m$, existe $l \in \mathbb{N}$ tal que $m = n + l$.

Portanto

$$n = m + k = (n + l) + k = n + (l + k),$$

e daí, $k + l = 0$.

Mas neste caso $l = 0$. De fato, se $l \neq 0$ então l é o predecessor de algum número natural p , isto é, $l = s(p)$, então

$$0 = k + l = k + s(p) = s(k + p),$$

contradição com o primeiro axioma de Peano.

Portanto $l = 0$ e daí $m = n + 0 = n$.

3) Transitividade: Sejam $m, n, p \in \mathbb{N}$ e suponha que $m \leq n$ e $n \leq p$. Então existem $k, l \in \mathbb{N}$ tais que $n = m + k$ e $p = n + l$. Portanto

$$p = n + l = (m + k) + l = m + (k + l),$$

mostrando que $m \leq p$. □

A relação de ordem é compatível com as operações algébricas, no sentido que

$$\text{se } m \leq n \text{ então } m + p \leq n + p \text{ e } m \cdot p \leq n \cdot p.$$

De fato, $m \leq n$ implica a existência de $k \in \mathbb{N}$ tal que $n = m + k$. Logo

$$n + p = (m + k) + p = (m + p) + k,$$

mostrando que $m + p \leq n + p$.

Deixamos a outra relação como exercício.

A relação de ordem em \mathbb{N} é total, no sentido que quaisquer dois números naturais são comparáveis (um é menor do que ou igual ao outro). Isto não é verdadeiro para qualquer relação de ordem (por exemplo a inclusão de conjuntos não é uma ordem total: dados dois conjuntos A e B , é possível que $A \not\subset B$ e $B \not\subset A$).

Lema 3.1. *Sejam $m, n \in \mathbb{N}$. Então $m \leq n$ ou $n \leq m$.*

Demonstração. Fixemos $m \in \mathbb{N}$ e provemos por indução que todo número natural n é comparável com m .

■ 1º passo: $n = 0$. Claramente $0 \leq m$ porque $m = 0 + m$.

■ Passo indutivo: suponha que para um número natural n , temos $m \leq n$ ou $n \leq m$. Vamos provar o mesmo para $s(n) = n + 1$.

Se $m \leq n$, como $n < n + 1$, por transitividade temos $m \leq n + 1$.

Se $n \leq m$, podemos supor que $n \neq m$ (o caso $n = m$ já foi tratado acima).

Logo existe $k \neq 0$ tal que $m = n + k$.

Como $k \neq 0$, existe $l \in \mathbb{N}$ tal que $k = s(l) = l + 1$.

Então

$$m = n + (l + 1) = (n + 1) + l,$$

mostrando que $n + 1 \leq m$.

Pelo princípio de indução, $m \leq n$ ou $n \leq m$ para todo $n \in \mathbb{N}$. □

4. BOA ORDENAÇÃO E O SEGUNDO PRINCÍPIO DE INDUÇÃO

Seja $X \subset \mathbb{N}$ um subconjunto de números naturais.

Definição 4.1. Um número natural p é um mínimo de X se $p \in X$ e $p \leq n$ para todo $n \in X$.

Observe que se X admite um mínimo, ele é único. De fato, se p, q são mínimos de X , então $p \leq q$ (porque o número $q \in X$) e $q \leq p$ (porque $p \in X$), logo $p = q$.

Exemplo 4.1. 0 é claramente o mínimo de \mathbb{N} .

7 é claramente o mínimo de $\{7, 10, 13\}$.

Similarmente, p é um máximo de X se $p \in X$ e $p \geq n$ para todo $n \in X$. O máximo de um conjunto, se existir, deve ser único.

Exemplo 4.2. Claramente 13 é o máximo de $\{7, 10, 13\}$.

O conjunto de todos os números naturais \mathbb{N} não admite um máximo.

De fato, suponha por contradição que $n \in \mathbb{N}$ seja o máximo de \mathbb{N} . Mas $n + 1 \in \mathbb{N}$ e $n + 1 > n$ (claramente $n + 1 \geq n$ e como foi provado no início do capítulo, $n + 1 = s(n) \neq n$). Chegamos a uma contradição com o fato do número n ser o máximo de \mathbb{N} . Logo \mathbb{N} não tem máximo.

Enquanto subconjuntos de números naturais podem não admitir um máximo, o mínimo sempre existe, e esse resultado se chama o “Princípio da Boa Ordenação” dos números naturais.

Teorema 4.3 (O princípio da boa ordenação). *Todo subconjunto não vazio $A \subset \mathbb{N}$ possui um mínimo.*

Ideia da prova: vamos pensar num algoritmo para encontrar o mínimo de A .

- Se $0 \in A$, então 0 deve ser o mínimo de A .
- Se $0 \notin A$, o algoritmo verifique se $1 \in A$ ou $1 \notin A$. No primeiro caso, 1 deve ser o mínimo de A .
- Se $1 \notin A$ mas $2 \in A$ então 2 é o mínimo de A (já que $0 \notin A$ e $1 \notin A$).
- ⋮
- Se $0 \notin A, 1 \notin A, \dots, n \notin A$, verificamos se $n + 1 \in A$ ou $n + 1 \notin A$ e assim por diante.

O algoritmo tem que parar; se não, esgotamos todos os números naturais. Este procedimento leva à seguinte prova formal.

Demonstração. Suponha por contradição que A não possui mínimo. Vamos provar por indução que para todo $n \in \mathbb{N}$,

$P(n) : 0 \notin A, 1 \notin A, \dots, n \notin A$.

1º passo: $n = 0$. $0 \notin A$ porque se $0 \in A$ então 0 seria o mínimo de A .

Passo indutivo: Suponha que $P(n)$ valha, i.e.,

$0 \notin A, 1 \notin A, \dots, n \notin A$.

Neste caso, se $n + 1 \in A$ então $n + 1$ seria o mínimo de A , já que todos os números menores do que $n + 1$ não são elementos de A . Mas supomos que A não tenha mínimo, então $n + 1 \notin A$.

Logo $0 \notin A, 1 \notin A, \dots, n \notin A$ e $n + 1 \notin A$, ou seja, $P(n + 1)$ vale.

Pelo princípio de indução, $P(n)$ vale para todo $n \in \mathbb{N}$. Em particular, $n \notin A \forall n \in \mathbb{N}$, isto é, $A = \emptyset$, uma contradição.

Logo, A possui um mínimo. □

Usando o princípio da boa ordenação derivaremos um princípio de indução mais forte.

Teorema 4.4 (O segundo princípio de indução). *Seja $X \subset \mathbb{N}$ e suponha que*

- $0 \in X$,
- se $0 \in X, \dots, n \in X$ então $n + 1 \in X$.

Nestas condições, $X = \mathbb{N}$.

Em outras palavras, o segundo princípio de indução nos permite trabalhar com uma hipótese de indução mais forte, a saber, em vez de apenas supor que $n \in X$, supomos que todos os números naturais menores do que ou iguais a n pertençam a X .

Demonstração. Claramente $X = \mathbb{N}$ sse $X^c = \mathbb{N} \setminus X = \emptyset$.

Suponha por contradição que $X^c \neq \emptyset$. Então, pelo princípio da boa ordenação, existe um mínimo m de X^c .

Como $0 \in X$, tem-se $0 \notin X^c$ então $m \neq 0$.

Logo $m = n + 1$ para algum $n \in \mathbb{N}$.

Como $n + 1$ é o mínimo de X^c , então necessariamente $0 \notin X^c, 1 \notin X^c, \dots, n \notin X^c$, ou seja, $0 \in X, \dots, n \in X$.

Mas neste caso, pela hipótese de indução, $n + 1 \in X$, em contradição com o fato de que $n + 1 \in X^c$.

Portanto $X^c = \emptyset$ e daí $X = \mathbb{N}$. \square

O segundo princípio de indução nos permite definir objetos por recorrência que depende de mais de um termo.

Exemplo 4.5 (A sequência de Fibonacci). Definimos $F_0 = 0$, $F_1 = 1$ e para todo $n \geq 1$, $F_{n+1} = F_n + F_{n-1}$.

Em outras palavras, $\{F_n\}_{n \geq 0}$ é definida por uma recorrência de ordem 2. Similarmente podemos definir recorrências de qualquer ordem.

Definição 4.2. Um número natural p é primo se $p \neq 1$ e p não se pode escrever como $p = m \cdot n$ com $m, n \in \mathbb{N}$, e $m < p$, $n < p$.

Por exemplo 2, 3, 5, 7, 11, 13 e etc. são números primos, mas $4 = 2 \cdot 2$, $6 = 2 \cdot 3$, $8 = 2 \cdot 4$, $12 = 3 \cdot 4$ e etc. não são primos.

Teorema 4.6. *Todo número natural $n \geq 2$ ou é primo ou pode ser escrito como um produto de números primos.*

Demonstração. Seja

$$X = \{n \geq 2 : n \text{ é primo ou pode ser decomposto como produto de primos}\}.$$

Vamos provar por indução que X é o conjunto de todos os números naturais $n \geq 2$.

■ 1º passo: $n = 2$ já é primo, então $2 \in X$.

■ Passo indutivo: suponha que $2, \dots, n \in X$, ou seja, para todo $k \leq n$, $k \in X$.

Vamos provar que $n + 1 \in X$.

Se $n + 1$ é primo, automaticamente $n + 1 \in X$.

Se $n + 1$ não é primo, então existem $k, l \in \mathbb{N}$, $k < n + 1$, $l < n + 1$ tais que $n + 1 = k \cdot l$.

Logo $k \leq n$, $l \leq n$, e pela hipótese indutiva, k e l são produtos de primos. Logo $n + 1 = k \cdot l$ também é um produto de primos.

Pelo 2º princípio de indução, todo número $n \geq 2$ é primo ou produto de primos. \square