1 Teoria de conjuntos

Proposição 1. *Se* $f : X \to Y$ *e* $g : Y \to Z$ *são bijeções, então* $(g \circ f)X \to Z$ *é uma bijeção.*

Proof. Temos $g(f(a)) = g(f(b)) \implies f(a) = f(b) \implies a = b$. Logo $g \circ f$ é injetiva.

Tomando $z \in Z$. Como g é sobrejetiva, existe $y \in Y$ tal que $g(y) = z$. Como f é sobrejetiva, existe $x \in X$ tal que $f(x) = y$. Logo existe $x \in X$ tal que $g(f(x)) = g(y) = z$. Logo $g \circ f$ é sobrejetiva. □

2 Conjuntos Finitos e Infinitos

2.1 Números naturais

Temos como conceitos primitivos o conjunto dos naturais, denotado por $\mathbb{N}$, cujos elementos são os números naturais, e uma função $s : \mathbb{N} \to \mathbb{N}$. Para cada $n \in \mathbb{N}$, o número $s(n)$ é o sucessor de n. Temos os axiomas:

Axioma 1. $s : \mathbb{N} \to \mathbb{N}$ *é injetiva.*

Axioma 2. $\mathbb{N} - s(n) = \{1\}$. *Ou seja, só existe um número natural que não é sucessor de nenhum outro, e ele é denotado por* 1.

Proposição 2. *Todo natural diferente de* 1 *possui um antecessor.*

Proof. Seja $n \neq 1$ um número natural. Suponha que não exista n_0 natural com $s(n_0) = n$. Logo $n \notin s(\mathbb{N})$. Logo $n \in \mathbb{N} - s(n)$. Mas $\mathbb{N} - s(n) = \{1\}$. Logo $n = 1$. Contradição. Logo existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que $s(n_0) = n$. □

Observação 2.1. Observe que a função $s : \mathbb{N} \to \mathbb{N} \setminus \{1\}$ é injetiva por definição e sobrejetiva pela proposicao 2.1, logo é uma bijeção entre um subconjunto dos naturais com os naturais.

Axioma 3 (Princípio de indução)**.** *Se* $X \subset \mathbb{N}$ *é um subconjunto tal que:*

$$\begin{cases} 1 \in X \\ \\ n \in X \implies s(n) \in X \end{cases}$$

Então $\mathbb{N} = X$.

Definição 2.1 (Soma)**.** Dados $m, n \in \mathbb{N}$, sua soma $m + n$ é definida como:

$$m + n := s^n(m).$$

A soma deve obedecer

$$m + 1 = s(m) \tag{1}$$

$$m + s(n) = s(m + n) \tag{2}$$

para todos os m, n naturais.

Observação 2.2. Dedekind prova o "Teorema da Definição por Indução" para garantir que a notação $s^n(m)$ faça sentido.

Proposição 3 (Associatividade da Soma)**.** *Para todos* $p, m, n \in \mathbb{N}$*, temos* $m + (n + p) = (m + n) + p$*.*

Proof. Seja $X = \{p \in \mathbb{N}\, | \forall m, n \in \mathbb{N} \,:\, m + (n + p) = (m + n) + p\}$. Da definição de adição, temos pra qualquer m, n que $n + 1 = s(n)$, logo $m + (n + 1) = m + s(n) = s(m + n) = (m + n) + 1 \implies m + (n + 1) = (m + n) + 1$. Logo $1 \in X$. Se $p \in X$, temos $m + (n + p) = (m + n) + p$. Logo

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

$$= s\left(m + (n + p)\right)$$

$$= s\left((m + n) + p\right)$$

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

Logo $p \in X \implies s(p) \in X$. Temos que $X = \mathbb{N}$ pelo princípio de indução. Logo a soma é associativa nos naturais. □

Lema 1 (Comutatividade da soma com o 1)**.** *Para todo* $m \in \mathbb{N}$*, temos* $m + 1 = 1 + m$*.*

Proof. Seja $X = \{m \in \mathbb{N}\, | m + 1 = 1 + m\}$. Temos $1 \in X$, pois $1 + 1 = 1 + 1$. Supondo $m \in X$, logo $m + 1 = 1 + m$. Temos

$$1 + s(m) = s(1 + m)$$

$$= s(m + 1)$$

$$= (m + 1) + 1$$

$$= s(m) + 1$$

Como $m \in X \implies s(m) \in X$ e $1 \in X$, temos $X = \mathbb{N}$. □

Proposição 4 (Comutatividade da soma)**.** *Para todos* $m, n \in \mathbb{N}$*, temos* $m + n = n + m$*.*

Proof. Seja $X = \{m \in \mathbb{N}\, | \forall n \in \mathbb{N} \,:\, m + n = n + m\}$. Temos $1 \in X$ pelo Lema

1. Supondo $m \in X$, logo $m + n = n + m$ para todo $n \in \mathbb{N}$. Temos

$$\begin{aligned} n + s(m) &= s(n+m) \\ &= s(m+n) \\ &= (m+n)+1 \\ &= 1+(m+n) \\ &= (1+m)+n \\ &= (m+1)+n \\ &= s(m)+n \end{aligned}$$

Como $1 \in X$ e $m \in X \implies s(m) \in X$, temos $X = \mathbb{N}$ pelo princípio de indução. $\square$

Proposição 5 (Lei do corte)**.** *Para todos $m, n, p \in \mathbb{N}$, temos $m+n = m+p \implies n = p$.*

Proof. Seja $X = \{m \in \mathbb{N} \,|\, \forall n \in \mathbb{N}\, \forall p \in \mathbb{N} \,:\, m+n = m+p \implies n = p\}$. Temos $1 \in X$ pois $1+n = 1+p \implies n+1 = p+1 \implies s(n) = s(p) \implies n = p$ pela injetividade de s. Supondo $m \in X$, temos $m+n = m+p \implies n = p$ para todos n, p naturais. Temos

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

Logo $s(m)+n = s(m)+p \implies n = p$. Como $1 \in X$ e $m \in X \implies s(m) \in X$, temos $X = \mathbb{N}$ pelo princípio de indução. $\square$

Lema 2 (Não existem ciclos nos naturais)**.** *Para todos $m, p \in \mathbb{N}$, temos $m \neq m + p$.*

Proof. Suponha que $m = m + p$ com $m, p \in \mathbb{N}$. Logo $s(m) = s(m + p) \implies m+1 = (m+p)+1 \implies m+1 = m+(p+1) \implies 1 = p+1 \implies s(p) = 1$. Como 1 não é sucessor de nenhum natural, temos uma contradição. Logo $m \neq m + p$ para todos naturais m, p. $\square$

Lema 3 (Unicidade da Tricotomia)**.** *Dados dois naturais m e n, apenas uma das 3 possibilidades ocorre:*

$$\begin{cases} m = n \\ \\ \exists p \in \mathbb{N} \,:\, m = n + p \\ \\ \exists q \in \mathbb{N} \,:\, n = m + q \end{cases}$$

Proof. Pelo lema 2, se $m = n$, não podemos ter $m = n + p = m + p$ ou $n = m + q = n + q$ para algum $p, q \in \mathbb{N}$. Se $\exists p \in \mathbb{N} \,:\, m = n + p$, não podemos ter $m = n$ pelo lema 2 e não podemos ter $\exists q \in \mathbb{N} \,:\, n = m + q$, pois teríamos $m = n + p = (m + q) + p = m + (q + p) \implies m = m + (q + p)$, que contradiz o lema 2. $\square$

Proposição 6 (Tricotomia)**.** *Dados dois naturais m e n, exatamente uma das 3 possibilidades ocorre:*

$$\begin{cases} m = n \\ \\ \exists p \in \mathbb{N} \,:\, m = n + p \\ \\ \exists q \in \mathbb{N} \,:\, n = m + q \end{cases}$$

Proof. Seja $X = \{m \in \mathbb{N} | \forall n \in \mathbb{N} \,:\, (m = n) \vee (\exists p \in \mathbb{N} \,:\, m = n + p) \vee (\exists q \in \mathbb{N} \,:\, n = m + q)\}$, ou seja: o conjunto dos números naturais que satisfazem pelo menos uma das condições da tricotomia para todo n.

$1 \in X$, pois dado $n \in \mathbb{N}$, temos $n = 1$ ou $n \neq 1$. Se $n = 1$, temos $m = 1 = n$. Se $n \neq 1$, como $\mathbb{N} - s(\mathbb{N}) = \{1\}$, temos que existe um $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que $s(n_0) = n$. Logo $n = n_0 + 1 \implies \exists q \,:\, n = q + 1 = q + m$.

Supondo $m \in X$. Dado $n \in \mathbb{N}$, se $m = n$, temos $s(m) = s(n) = n + 1$, logo $\exists p \in \mathbb{N} \,:\, s(n) = n + p$. Se $\exists p \in \mathbb{N} \,:\, m = n + p$, temos $s(m) = s(n + p) = (n + p + 1) = n + s(p)$, logo $\exists p' \in \mathbb{N} \,:\, s(n) = n + p'$. Se $\exists q \in \mathbb{N} \,:\, n = m + q$ com $q = 1$, temos $n = m + 1 = s(m)$. Se $\exists q \in \mathbb{N} \,:\, n = m + q$ com $q \neq 1$, existe $q_0 \in \mathbb{N}$ tal que $s(q_0) = q$, logo temos $n = m + q = m + s(q_0) = m + (q_0 + 1) = m + 1 + q_0 = s(m) + q_0 \implies \exists q' \in \mathbb{N} \,:\, n = s(m) + q'$.

Como $1 \in X$ e $m \in X \implies s(m) \in X$, temos $X = \mathbb{N}$. Logo para todo par $m, n \in \mathbb{N}$, pelo menos uma das condições da tricotomia ocorre. Pelo lema 3, apenas uma das possbilidades ocorre. $\square$

Definição 2.2 ($<$)**.**

$$m < n \iff \exists p \in \mathbb{N} : n = m + p$$

Dados m, n naturais, dizemos que m é menor que n ($m < n$) quando existe $p \in \mathbb{N}$ tal que $n = m + p$.

Proposição 7. *Temos* $1 < n$ *para todo* $1 \neq n \in \mathbb{N}$ *.*

Proof. Como $n \neq 1$, temos pela proposição que n possui um antecessor. Logo existe n_0 tal que $s(n_0) = n \implies n = 1 + n_0$. Logo $1 < n$. □

Definição 2.3 ($\leq$)**.**

$$m \leq n \iff (m = n) \vee (m < n)$$

Proposição 8 (Transitividade da relação $<$)**.** $m < n \wedge n < p \implies m < p$

Proof. Se $m < n$ e $n < p$, temos $n = m + q$ e $p = n + r$ para algum par $q, r \in \mathbb{N}$. Logo $p = n + r = (m + q) + r = m + (q + r)$. Logo $m < p$. □

Proposição 9 (Tricotomia da relação $<$)**.** *Dados* $m, n \in \mathbb{N}$*, exatamente uma das afirmações ocorre:* $m = n$*, ou* $m < n$*, ou* $n < m$*.*

Proof. Segue diretamente da proposição 6. □

Proposição 10.

$$p \leq q \wedge q \leq p \iff p = q$$

Proof. Supondo $p = q$, temos $p \leq q$ e $q \leq p$.

Supondo $p \leq q \wedge q \leq p$. Se $p = q$, acabou a demonstração. Supondo $p \neq q$. Logo devemos ter $p < q$ e $q < p$ (contradição). Logo devemos ter $p = q$.

□

Proposição 11. *Dados* m, n, p *naturais, temos*

$$m + p < n + p \implies m < n.$$

Proof. Temos $m + p < n + p \implies \exists q \in \mathbb{N} : n + p = (m + p) + q \implies \exists q \in \mathbb{N} : n = m + q \implies m < n$. □

Lema 4.

$$m < n + 1 \iff m \leq n$$

Proof. Supondo $m < n + 1$. Logo existe $q \in \mathbb{N}$ tal que $n + 1 = m + q$. Se $q = 1$, temos $n + 1 = m + 1 \implies n = m \implies m \leq n$. Se $q \neq 1$, existe q_0 tal que $s(q_0) = q$. Logo $n + 1 = m + s(q_0) = m + q_0 + 1 \implies n = m + q_0 \implies m < n \implies m \leq n$.

Se $m \leq n$, temos $m \leq n < n + 1 \implies m < n + 1$. □

Definição 2.4 (Multiplicação)**.** Para todo $m \in \mathbb{N}$, seja $f_m : \mathbb{N} \to \mathbb{N}$ que associa cada $p \in \mathbb{N}$ a $f_m(p) = m + p$. Dados $m, n \in \mathbb{N}$, o produto entre naturais satisfaz $m \cdot 1 = m$ e $m \cdot (n+1) = (f_m)^n(m)$.

Lema 5 (Distributiva do sucessor)**.**

$$m \cdot (n+1) = mn + m$$

Proof. Se $n = 1$, temos $m \cdot (1+1) = (f_m)^1(m) = f_m(m) = m + m = m \cdot 1 + m$. Se $n \neq 1$, existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que $s(n_0) = n$. Logo temos $m \cdot (n+1) = (f_m)^n(m) = (f_m)^{s(n_0)}(m) = f_m((f_m)^{n_0}(m)) = f_m(m(n_0+1)) = f_m(m \cdot n) = mn + m$. $\square$

Proposição 12 (Distributiva à esquerda)**.**

$$m \cdot (n+p) = mn + mp$$

Proof. Seja $X = \{p \in \mathbb{N} | \forall m, n \in \mathbb{N} : n \cdot (m+p) = nm + np\}$. Temos $1 \in X$ pelo lema 2.1. Supondo $p \in X$. Temos

$$\begin{aligned} n \cdot (m + s(p)) &= n \cdot ((m+p)+1) \\ &= n \cdot (m+p) + n \\ &= nm + np + n \\ &= nm + n(p+1) \\ &= nm + n \cdot s(p) \end{aligned}$$

Como $p \in X \implies s(p) \in X$ e $1 \in X$, temos $X = \mathbb{N}$. $\square$

Proposição 13 (Distributiva à direita)**.**

$$(m+n) \cdot p = mp + np$$

Proof. Seja $X = \{p \in \mathbb{N} | \forall m, n \in \mathbb{N} : (m+n) \cdot p = mp + np\}$. Temos $1 \in X$, pos $(m+n)\cdot 1 = m+n = m\cdot 1 + n\cdot 1$. Supondo $p \in X$. Temos

$$\begin{aligned}(m+n)\cdot s(p) &= (m+n)\cdot(p+1)\\ &= (m+n)\cdot p + (m+n)\\ &= mp+np+m+n\\ &= mp+m+np+n\\ &= m(p+1)+n(p+1)\\ &= m\cdot s(p) + n\cdot s(p)\end{aligned}$$

Como $p \in X \implies s(p) \in X$ e $1 \in X$, temos $X = \mathbb{N}$. □

Proposição 14 (Associatividade)**.**

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

Proof. Seja $X = \{p \in \mathbb{N} | \forall m, n \in \mathbb{N} : m\cdot(n\cdot p) = (m\cdot n)\cdot p\}$. Temos $m\cdot(n\cdot 1) = m\cdot n = (m\cdot n)\cdot 1$, logo $1 \in X$.

Supondo $p \in X$. Temos

$$\begin{aligned}m\cdot(n\cdot s(p)) &= m\cdot(n\cdot(p+1))\\ &= m\cdot(n\cdot p+n)\\ &= m\cdot(n\cdot p)+m\cdot n\\ &= (m\cdot n)\cdot p+(m\cdot n)\\ &= (m\cdot n)\cdot(p+1)\\ &= (m\cdot n)\cdot s(p)\end{aligned}$$

Como $p \in X \implies s(p) \in X$ e $1 \in X$, temos $X = \mathbb{N}$. □

Lema 6 (Comutatividade com 1)**.**

$$m\cdot 1 = 1\cdot m$$

Proof. Seja $X = \{m \in \mathbb{N} | m \cdot 1 = 1 \cdot m\}$. Temos $1 \cdot 1 = 1 \cdot 1$, logo $1 \in X$. Supondo $m \in X$. Temos

$$s(m) \cdot 1 = (m+1) \cdot 1$$

$$= m + 1$$

$$= m \cdot 1 + 1 \cdot 1$$

$$= 1 \cdot m + 1 \cdot 1$$

$$= 1 \cdot (m+1)$$

$$= 1 \cdot s(m)$$

Como $m \in X \implies s(m) \in X$ e $1 \in X$, temos $X = \mathbb{N}$. □

Proposição 15 (Comutatividade)**.**

$$m \cdot n = n \cdot m$$

Proof. Seja $X = \{n \in \mathbb{N} | \forall m \in \mathbb{N} : m \cdot n = n \cdot m\}$. Temos $1 \in X$ pelo lema 6. Supondo $n \in X$. Temos

$$m \cdot s(n) = m \cdot (n+1)$$

$$= mn + m \cdot 1$$

$$= nm + 1 \cdot m$$

$$= (n+1) \cdot m$$

$$= s(n) \cdot m$$

Como $p \in X \implies s(p) \in X$ e $1 \in X$, temos $X = \mathbb{N}$. □

Proposição 16 (Monotonicidade)**.**

$$m < n \implies mp < np$$

Proof. Supondo $m < n$. Logo $n = m + q$ com $q \in \mathbb{N}$. Logo $np = (m + q)p = mp + qp$. Como $qp \in \mathbb{N}$, temos $mp < np$. □

Proposição 17 (Lei do cancelamento)**.**

$$mp < np \implies m < n$$

Proof. Supondo $mp < np$. Pela tricotomia, temos $n < m$, $m = n$, ou $m < n$. Se $n < m$, temos $np < mp$ (contradição). Se $m = n$, temos $mp = np$ (contradição). Logo devemos ter $m < n$.

□

Definição 2.5 (Elemento Mínimo)**.** Dado $X \subset \mathbb{N}$, dizemo que $p \in X$ é o menor elemento (ou elemento mínimo) de X se $\forall n \in X \ : \ p \leq n$.

Observação 2.3. Como $\forall n \in \mathbb{N} \ : \ 1 \leq n$, temos que $1 \in X$ implica 1 menor elemento de X.

Proposição 18. *O elemento mínimo de um conjunto $X \subset \mathbb{N}$, quando existir, é unico.*

Proof. Suponha que dado um conjunto $X \subset \mathbb{N}$, existam $p, q \in X$ elementos mínimos. Logo $p \leq q$ e $q \leq p$. Logo $p = q$. □

Definição 2.6 (Maior elemento)**.** Dado $X \subset \mathbb{N}$, dizemo que $p \in X$ é o maior elemento (ou elemento máximo) de X se $\forall n \in X \ : \ p \geq n$.

Proposição 19. *Os naturais não possuem maior elemento.*

Proof. Suponha que $x \in \mathbb{N}$ seja o maior elemento de $\mathbb{N}$. Teríamos $s(x) \in \mathbb{N}$ e $x < s(x)$ (contradição). Logo os naturais não possuem maior elemento. □

Proposição 20. *O elemento máximo de um conjunto $X \subset \mathbb{N}$, quando existir, é unico.*

Proof. Exercício. □

Definição 2.7 (I_n)**.**

$$I_n := \{x \in \mathbb{N} \,|\, x \leq n\}$$

Teorema 1 (Princípio da boa Ordenação)**.** *Todo subconjunto $A \neq \varnothing$ dos naturais admite menor elemento.*

Proof. Dado $A \subset \mathbb{N}$ não vazio. Se $1 \in A$, temos 1 menor elemento.

Supondo $1 \notin A$. Logo $1 \in \mathbb{N} - A$. Seja $X = \{x \in \mathbb{N} \,|\, I_n \subset \mathbb{N} - A\}$. Como $1 \in \mathbb{N} - A$, temos $I_1 = \{1\} \subset \mathbb{N} - A$, logo $1 \in X$. Como A é não vazio, existe $a \in A$. Logo $a \notin \mathbb{N} - A$. Temos $a \leq a \implies a \in I_a$. Logo $I_a \not\subset \mathbb{N} - A$. Logo $a \notin X$. Temos $1 \in X$ e $X \neq \mathbb{N}$, logo o axioma da indução deve falhar. Logo deve existir $n \in X$ com $n + 1 = s(n) \notin X$.

Afirmo que $n+1$ é o menor elemento de A. Como $n \in X$, temos $I_n \subset \mathbb{N} - A$, logo $x \leq n \implies x \in \mathbb{N} - A$. Como $n + 1 \notin X$, temos $I_{n+1} \not\subset \mathbb{N} - A$.

Logo existe um $m \in I_{n+1}$ com $m \notin \mathbb{N} - A \implies m \in A$. Observe que $m \in I_{n+1} \implies m \leq n+1 \implies m = n+1 \vee m < n+1$. Se $m < n+1$, temos pelo Lema 4 que $m \leq n$, que implica $m \in I_n$, logo $m \in \mathbb{N} - A$ (contradição). Logo devemos ter $m = n+1$. Temos portanto que $n+1 \in A$.

Suponha que exista $p \in A$ tal que $p < n+1$. Teríamos $p \leq n \implies p \in I_n \implies p \in \mathbb{N} - A \implies p \notin A$. Contradição. Logo temos $n+1 \leq p$ para todo $p \in A$. Logo $n+1$ é o menor elemento de A. □

Teorema 2 (Indução completa)**.** *Seja* $X \subset \mathbb{N}$ *tal que* $(\forall m \in \mathbb{N} : m < n \implies m \in X) \implies n \in X$. *Então* $X = \mathbb{N}$

Proof. Temos $1 \in X$, pois $1 \notin X$ implicaria na existência de um $m < 1$ com $m \notin X$. Supondo $X \neq \mathbb{N}$ e $A = \mathbb{N} - X$. Como $X \neq \mathbb{N}$, temos $A \neq \emptyset$. Logo A possui um menor elemento $a \in A$. Se $p \in \mathbb{N}$ com $p < a$, então $p \notin A$, logo $p \in X$. Como $\forall p \in \mathbb{N} : p < a \implies p \in X$, temos $a \in X$. Contradição. Logo A é vazio. Logo $X = \mathbb{N}$. □

3 Conjuntos Finitos e Infinitos

Definição 3.1 (Conjuntos finitos)**.** Um conjunto X é finito quando for vazio ou quando existir para algum $n \in \mathbb{N}$ uma bijeção $\phi : I_n \to X$

Definição 3.2 (Tamanho de um conjunto)**.** Dado um conjunto finito. Dizemos que ele tem zero elementos se for vazio e que ele tem n elementos se tiver bijeção com I_n.

Observação 3.1. O conjunto I_n é finito e possui n elementos.

Proposição 21. *Se* $f : X \to Y$ *é uma bijeção, então* X *é finito se, e somente se,* Y *for finito.*

Proof. Se X for finito, então existe um bijeção $\phi : I_n \to X$. A composição $(\phi \circ f) : I_n \to Y$ é uma bijeção, logo Y é finito. O caso Y finito é análogo. □

Teorema 3. *Seja* $A \subset I_n$ *não vazio. Se exite uma bijeção* $f : I_n \to A$*, então* $A = I_n$.

Proof. Seja $X = \{n \in \mathbb{N} \mid \forall A \subset I_n : (\text{Existe uma bijeção } f : A \to I_n) \implies A = I_n\}$. Temos $1 \in X$, pois $I_1 = \{1\}$ e $A \subset I_1 \implies A = \{1\} = I_1$. Supondo $n \in X$. Seja $A \subset I_{n+1}$ com uma bijeção $f : I_{n+1} \to A$. Restringindo f a I_n, obtemos $f' : I_n \to A - \{f(n+1)\}$. Se $A - \{f(n+1)\} \subset I_n$, temos por $n \in X$ que □