

TEXtos
UNIVERSITÁRIOS

A. Hefez

* * * * *

*Elementos de
Aritmética*

* * * * *

$$* \left(\frac{p}{q} \right) \left(\frac{q}{p} \right) = (-1)^{\frac{p-1}{2} \frac{q-1}{2}}$$



Índice

1	Os Números Naturais	1
1.1	Adição e Multiplicação	1
1.2	Subtração	6
1.3	Axioma de Indução	7
2	Aplicações da Indução	14
2.1	Definição por Recorrência	14
2.2	Binômio de Newton	17
2.3	Própriedade da Boa Ordem	20
2.4	Aplicações Lúdicas	23
3	Divisão nos Naturais	30
3.1	Divisibilidade	30
3.2	Divisão Euclidiana	35
3.3	A Aritmética na Magna Grécia	40
4	Representação dos Números Naturais	43
4.1	Sistemas de Numeração	43
4.2	Jogo de Nim	50
5	Algoritmo de Euclides	53
5.1	Máximo Divisor Comum	53
5.2	Propriedades do mdc	58
5.3	Mínimo Múltiplo Comum	63
6	Aplicações do Máximo Divisor Comum	66
6.1	Equações Diofantinas Lineares	66
6.2	Expressões Binômias	74
6.3	Números de Fibonacci	79

7 Números Primos	82
7.1 Teorema Fundamental da Aritmética	82
7.2 Sobre a Distribuição dos Números Primos	88
7.3 Pequeno Teorema de Fermat	92
7.4 O Renascimento da Aritmética	96
8 Números Especiais	97
8.1 Primos de Fermat e de Mersenne	97
8.2 Números Perfeitos	101
8.3 Decomposição do Fatorial em Fatores Primos	104
8.4 Euler, um Gigante da Matemática	108
9 Congruências	110
9.1 Aritmética dos Restos	110
9.2 Aplicações	119
9.3 Congruências e Números Binomiais	123
9.4 Gauss, um Príncipe da Matemática	126
10 Os Teoremas de Euler e Wilson	129
10.1 Teorema de Euler	129
10.2 Teorema de Wilson	138
11 Resolução de Congruências	141
11.1 Resolução de Congruências Lineares	141
11.2 Teorema Chinês dos Restos	144
11.3 Congruências Quadráticas	147
11.4 Lei da Reciprocidade Quadrática	150
Sugestões aos Problemas	161
Índice Analítico	167

Prefácio

O nosso objetivo aqui é estudar as propriedades dos números naturais junto com as suas operações de adição e de multiplicação, enfatizando as questões relacionadas com a divisibilidade.

Este livro cobre o material para um primeiro curso de Aritmética e destina-se à formação básica dos alunos de graduação em Matemática, e, à formação complementar daqueles que estão no exercício da docência no ensino fundamental e médio.

Apesar deste material não ser ensinado neste grau de detalhe e de profundidade nas escolas, ele deve, obrigatoriamente, fazer parte da bagagem mínima de todo professor de Matemática.

A Aritmética, como usualmente é chamada a parte elementar da Teoria dos Números, teve como principal marco inicial a obra *Os Elementos*, de Euclides (aprox. 300 AC), encontrando o seu auge nos trabalhos de Pierre de Fermat (1601-1665) e Leonhard Euler (1707-1783), o que a levou a se tornar um dos principais pilares da Matemática. A partir do início do século 19, graças à obra de Carl Friedrich Gauss (1777-1855), a Aritmética transforma-se em Teoria dos Números e começa a ter um desenvolvimento extraordinário. Estes são os quatro principais protagonistas da história que iremos contar aqui.

A Gauss deve-se a fecunda idéia, entre muitas outras, de efetuar a fatoração de números naturais em anéis de números algébricos. Esta idéia foi grandemente desenvolvida nos trabalhos de Ernst Kummer, Richard Dedekind e Leopold Kronecker, iniciando o que se chama atualmente a Teoria Algébrica dos Números. Por outro lado, com os trabalhos de Lejeune Dirichlet e Bernhard Riemann, também no século 19, foram utilizadas técnicas de Análise Real e Complexa para se compreender melhor a distribuição dos números primos, iniciando, assim, uma outra maneira de se tratar os problemas da Aritmética, a Teoria Analítica dos Números. Hoje, há uma terceira abordagem, a Geometria Aritmética, cujos métodos são tomados da Geometria Algébrica e cujos precursores foram Emil Artin, Helmut Hasse, Louis Joel Mordell e André Weil. Esta última abordagem tem se mostrado extremamente fecunda, permitindo provar profundos teoremas em Teoria dos Números, e culminando com a publicação, em 1995, da demonstração, por Andrew Wiles, do chamado Último Teorema de Fermat.

O livro é organizado como segue: são onze capítulos, divididos em seções. Cada seção contém inúmeros exemplos e, ao seu final, uma lista de problemas numerados com três

números; o primeiro indicando o capítulo, o segundo, a seção e o terceiro, o problema em si. Além disso, no final da maioria dos capítulos, o leitor encontrará uma lista de problemas suplementares. Os problemas marcados com asterisco são aqueles que têm alguma sugestão para a sua resolução, ou mesmo, a própria, no final do livro.

Para tornar possível a utilização do livro em um curso semestral, algumas seções, a critério do professor, poderão ser omitidas sem comprometer a compreensão do todo. Essas seções são as seguintes: 4.2, 6.2, 6.3, 8.2, 8.3, 9.3, 11.3 e 11.4.

Este livro foi escrito com base em notas de aula de um curso semestral de Aritmética que ministrei em 2003, no âmbito do *Projeto de Melhoria de Ensino da Matemática no Estado do Rio de Janeiro*, organizado pela SBM e patrocinado pela FAPERJ, aos quais agradeço pela oportunidade concedida.

1

Os Números Naturais

Os números naturais formam um dos conceitos mais antigos concebidos pelo ser humano. Entretanto, a sua evolução de uma noção intuitiva para um conceito mais elaborado foi muito lenta. Só no final do século 19, quando os fundamentos de toda a matemática foram questionados e intensamente repensados, é que a noção de número passou a ser baseada em conceitos da teoria dos conjuntos, considerados mais primitivos.

Neste curso, não pretendemos descrever a evolução do conceito de número natural, nem tentar explicar sua natureza, mas apenas estudar algumas das suas propriedades.

Como em tudo há sempre um ponto de partida, o nosso será o de admitir que o leitor esteja familiarizado com o conjunto dos números naturais

$$\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\},$$

juntamente com as operações de adição $(a, b) \mapsto a + b$ e de multiplicação $(a, b) \mapsto a \cdot b$ (ou $(a, b) \mapsto ab$).

A nossa abordagem será essencialmente axiomática; ou seja, a partir de uma lista razoavelmente pequena de propriedades básicas dos números naturais e das duas operações, iremos obter as demais propriedades.

A lista de axiomas que adotaremos não será a menor possível, pois, quanto menor for esta lista, mais demorado será chegar aos resultados mais relevantes da teoria.

Existe uma axiomática idealizada no final do século 19 pelo matemático italiano Giuseppe Peano que, com quatro axiomas, consegue não só definir a adição e a multiplicação nos naturais, como também deduzir as propriedades que assumiremos aqui como axiomas.

1.1 Adição e Multiplicação

1) A adição e a multiplicação são *bem definidas*:

$$\forall a, b, a', b' \in \mathbb{N}, \quad a = a' \text{ e } b = b' \implies a + b = a' + b' \text{ e } a \cdot b = a' \cdot b'.$$

2) A adição e a multiplicação são *comutativas*:

$$\forall a, b \in \mathbb{N}, \quad a + b = b + a \quad \text{e} \quad a \cdot b = b \cdot a.$$

3) A adição e a multiplicação são *associativas*:

$$\forall a, b, c \in \mathbb{N}, \quad (a + b) + c = a + (b + c) \quad \text{e} \quad (a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c).$$

4) A adição e a multiplicação possuem *elementos neutros*:

$$\forall a \in \mathbb{N}, \quad a + 0 = a \quad \text{e} \quad a \cdot 1 = a.$$

5) A multiplicação é *distributiva* com relação à adição:

$$\forall a, b, c \in \mathbb{N}, \quad a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c.$$

A Propriedade 1 é que permite somar, a ambos os lados de uma igualdade, um dado número, ou multiplicar ambos os membros por um mesmo número.

Algumas vezes, trabalharemos com outros conjuntos, diferentes dos naturais, munidos de operações de adição e multiplicação que possuem as propriedades de (1) a (5) acima. Neste caso, diremos que os elementos de tais conjuntos, juntamente com as duas operações, estão sujeitos às leis básicas da aritmética. Por exemplo, sabemos que os números inteiros relativos, os números racionais, os números reais e os números complexos estão sujeitos às leis básicas da aritmética. Alertamos o leitor quanto ao fato de que estes números só serão utilizados nos exemplos e nos problemas; nunca, porém, em lugar essencial para o desenvolvimento da teoria.

Usaremos a notação

$$\mathbb{N}^* = \{1, 2, 3, \dots\}.$$

Vamos admitir, também, que os números naturais possuam as propriedades a seguir:

6) *Integridade*: Dados $a, b \in \mathbb{N}^*$, tem-se que $a \cdot b \in \mathbb{N}^*$.

Equivalentemente, pela formulação contrapositiva:

$$\forall a, b \in \mathbb{N}, \quad a \cdot b = 0 \implies a = 0 \text{ ou } b = 0.$$

7) *Tricotomia*: Dados $a, b \in \mathbb{N}$, uma, e apenas uma, das seguintes possibilidades é verificada:

- i) $a = b$
- ii) $\exists c \in \mathbb{N}^*, b = a + c$
- iii) $\exists c \in \mathbb{N}^*, a = b + c$.

Diremos que a é *menor do que* b , simbolizado por $a < b$, toda vez que a propriedade (ii) acima é verificada.

Com esta definição, temos que a propriedade (iii) acima equivale a afirmar que $b < a$. Assim, a tricotomia nos diz que, dados $a, b \in \mathbb{N}$, uma, e somente uma, das seguintes condições é verificada:

- i) $a = b$
- ii) $a < b$
- iii) $b < a$.

Utilizaremos a notação $b > a$, que se lê b é maior do que a , para representar $a < b$.

Decorre, das definições, que $0 < a$, para todo $a \in \mathbb{N}^*$. De fato, para todo $a \in \mathbb{N}^*$, temos que $0 + a = a$, o que implica $0 < a$.

Temos, também, que se $a + b = 0$, então $a = b = 0$. De fato, se $a \neq 0$ teríamos $b < 0$, o que é absurdo, logo $a = 0$. Analogamente, mostra-se que $b = 0$. Portanto, se $a \in \mathbb{N}^*$ ou $b \in \mathbb{N}^*$, então $a + b \in \mathbb{N}^*$.

Proposição 1.1.1. $a \cdot 0 = 0$ para todo $a \in \mathbb{N}$.

DEMONSTRAÇÃO: Temos que

$$a \cdot 0 = a(0 + 0) = a \cdot 0 + a \cdot 0.$$

Se $a \cdot 0 \neq 0$, então teríamos $a \cdot 0 \in \mathbb{N}^*$ e, portanto, seguiria, da igualdade acima, que $a \cdot 0 > a \cdot 0$, o que é absurdo. Logo $a \cdot 0 = 0$.

□

Proposição 1.1.2. A relação “menor do que” é transitiva:

$$\forall a, b, c \in \mathbb{N}, \quad a < b \text{ e } b < c \implies a < c.$$

DEMONSTRAÇÃO: Supondo $a < b$ e $b < c$, temos que existem $d, f \in \mathbb{N}^*$ tais que $b = a + d$ e $c = b + f$. Logo, usando a associatividade da adição, temos que

$$c = b + f = (a + d) + f = a + (d + f),$$

com $d + f \in \mathbb{N}^*$, o que implica que $a < c$.

□

Proposição 1.1.3. A adição é compatível e cancelativa com respeito à relação “menor do que”:

$$\forall a, b, c \in \mathbb{N}, \quad a < b \iff a + c < b + c.$$

DEMONSTRAÇÃO: Suponha que $a < b$. Logo, existe $d \in \mathbb{N}^*$, tal que $b = a + d$. Somando c a ambos os lados desta última igualdade, pela comutatividade e associatividade da adição, temos

$$b + c = c + b = c + (a + d) = (c + a) + d = (a + c) + d,$$

o que mostra que $a + c < b + c$.

Reciprocamente, suponha que $a + c < b + c$. Pela tricotomia, temos três possibilidades:
 (i) $a = b$. Isto acarretaria $a + c = b + c$, portanto, falso. (ii) $b < a$. Isto acarretaria, pela primeira parte da demonstração, que $b + c < a + c$; também é falso. (iii) $a < b$. Esta é a única possibilidade que resta.

□

Proposição 1.1.4. A multiplicação é compatível e cancelativa com respeito à relação “menor do que”:

$$\forall a, b \in \mathbb{N}, \forall c \in \mathbb{N}^*, a < b \iff a \cdot c < b \cdot c.$$

DEMONSTRAÇÃO: Suponha que $a < b$. Logo, existe $d \in \mathbb{N}^*$ tal que $b = a + d$. Multiplicando por c ambos os lados dessa última igualdade, pelas propriedades comutativa e distributiva da multiplicação, decorre

$$b \cdot c = c \cdot b = c \cdot (a + d) = c \cdot a + c \cdot d = a \cdot c + c \cdot d,$$

o que mostra que $a \cdot c < b \cdot c$, pois, pela integridade, $c \cdot d \in \mathbb{N}^*$.

Reciprocamente, suponha que $a \cdot c < b \cdot c$. Pela tricotomia, temos três possibilidades a analisar:

(i) $a = b$. Isto acarretaria $a \cdot c = b \cdot c$, o que é falso. (ii) $b < a$. Isto acarretaria, pela primeira parte da demonstração, que $b \cdot c < a \cdot c$, o que também é falso. (iii) $a < b$. Esta é a única possibilidade válida.

□

Proposição 1.1.5. A adição é compatível e cancelativa com respeito à igualdade:

$$\forall a, b, c \in \mathbb{N}, a = b \iff a + c = b + c.$$

DEMONSTRAÇÃO: A implicação $a = b \implies a + c = b + c$ é consequência do fato da adição ser bem definida (Propriedade 1).

Suponha agora que $a + c = b + c$. Temos três possibilidades:

- (i) $a < b$. Pela Proposição 1.1.3, temos que $a + c < b + c$, o que é um absurdo.
- (ii) $b < a$. Pelo mesmo argumento acima, $b + c < a + c$, o que é também um absurdo.
- (iii) $a = b$. Esta é a única alternativa válida.

□

Proposição 1.1.6. A multiplicação é compatível e cancelativa com respeito à igualdade:

$$\forall a, b \in \mathbb{N}, \forall c \in \mathbb{N}^*, a = b \iff a \cdot c = b \cdot c.$$

DEMONSTRAÇÃO: A implicação $a = b \implies a \cdot c = b \cdot c$ decorre imediatamente do fato da multiplicação ser bem definida (Propriedade 1).

Suponha agora que $a \cdot c = b \cdot c$. Temos três possibilidades:

- $a < b$. Pela Proposição 1.1.4, temos que $a \cdot c < b \cdot c$, o que é um absurdo.
- $b < a$. Pelo mesmo argumento acima, $b \cdot c < a \cdot c$, o que é um absurdo.
- $a = b$. Esta é a única alternativa válida.

□

Note que a relação $<$ não é uma relação de ordem, pois não é reflexiva. Podemos, entretanto, através dela, obter uma relação de ordem, como descrevemos a seguir.

Diremos que a é menor ou igual do que b , ou que b é maior ou igual do que a , escrevendo $a \leq b$ ou $b \geq a$, se $a < b$ ou $a = b$.

Note que $a \leq b$ se, e somente se, existe $c \in \mathbb{N}$, tal que $b = a + c$. Com isto, é fácil verificar que esta nova relação é efetivamente uma relação de ordem, pois possui as seguintes propriedades:

- É reflexiva: $\forall a, a \leq a$.
- É anti-simétrica: $\forall a, b, a \leq b$ e $b \leq a \implies a = b$.
- É transitiva: $\forall a, b, c, a \leq b$ e $b \leq c \implies a \leq c$.

Problemas

1.1.1 Mostre que a relação \leq é uma relação de ordem em \mathbb{N} .

1.1.2 Mostre, $\forall a, b, c \in \mathbb{N}$, que

- $a < b \implies a \leq b$.
- $a < b$ e $b \leq c \implies a < c$.
- $a \leq b$ e $b < c \implies a < c$.

1.1.3 Levando em conta a tricotomia,

- mostre que a negação de $a < b$ é $a \geq b$.
- qual é a negação de $a \geq b$?
- qual é a negação de $a = b$?

1.1.4 Mostre que

- $\forall a, b, c \in \mathbb{N}, a \leq b \iff a + c \leq b + c$.
- $\forall a, b \in \mathbb{N}, \forall c \in \mathbb{N}^*, a \leq b \iff a \cdot c \leq b \cdot c$.

1.1.5 Mostre, $\forall a, b, c, d \in \mathbb{N}$, que

- $a < b$ e $c < d \implies a + c < b + d$ e $a \cdot c < b \cdot d$.
- $a \leq b$ e $c \leq d \implies a + c \leq b + d$ e $a \cdot c \leq b \cdot d$.

1.1.6 Sejam a e b números naturais.

- Mostre que, se $a + b = a$, então $b = 0$.
- Mostre que, se $a \cdot b = a$, então $a = 0$ ou $b = 1$.
- Mostre que, se $a \cdot a = a$, então $a = 0$ ou $a = 1$.

1.2 Subtração

Dados dois números naturais a e b com $a \leq b$, sabemos que existe um número natural c tal que $b = a + c$. Neste caso, definimos o número b menos a , denotado por $b - a$, como sendo o número c . Em símbolos:

$$b - a = c.$$

Dizemos que c é o resultado da *subtração* de a de b .

Portanto, temos por definição

$$c = b - a \iff b = a + c.$$

No universo dos números naturais, nem sempre existe a subtração de dois números; só existe $b - a$ quando $a \leq b$.

Note que $a - a = 0$ para todo $a \in \mathbb{N}$, e que, por definição, $(b - a) + a = b$.

Exemplo 1.2.1. $8 - 5 = 3$, $3 - 2 = 1$, $8 - 3 = 5$,

$$(8 - 5) - 2 = 3 - 2 = 1, \quad 8 - (5 - 2) = 8 - 3 = 5.$$

Os dois últimos exemplos mostram que a subtração não é associativa.

Proposição 1.2.1. Sejam $a, b, c \in \mathbb{N}$. Se $a \leq b$, então

$$c \cdot (b - a) = c \cdot b - c \cdot a.$$

DEMONSTRAÇÃO: Note que, se $b \geq a$, então $c \cdot b \geq c \cdot a$, o que nos diz que $c \cdot b - c \cdot a$ está bem definido.

Suponha agora que $b - a = d$, logo $b = a + d$. Multiplicando por c ambos os membros desta última igualdade, obtemos $c \cdot b = c \cdot (a + d) = c \cdot a + c \cdot d$, o que implica

$$c \cdot d = c \cdot b - c \cdot a.$$

Substituindo d por $b - a$ na igualdade acima, obtemos

$$c \cdot (b - a) = c \cdot b - c \cdot a.$$

□

Problemas

1.2.1 Sejam a, b e c números naturais tais que $a - (b - c)$ esteja bem definido. Mostre que $(a + c) - b$ está bem definido e que

$$a - (b - c) = (a + c) - b.$$

1.2.2 Sejam a, b e c números naturais tais que $b + c \leq a$. Mostre que $a - (b + c)$ e $(a - b) - c$ estão bem definidos e que vale a igualdade

$$a - (b + c) = (a - b) - c.$$

1.2.3 Sejam a, b e c números naturais tais que $0 < c < b < a$. Mostre que $0 < b - c < a - c < a$.

1.2.4 Sejam a, b e c números naturais tais que $c \leq b \leq a$. Mostre que $b - c \leq a - c \leq a$.

1.2.5 Sejam $a, b, c \in \mathbb{N}$ tais que $a \leq c$ e $b \leq c$. Mostre que, se $c - a \leq c - b$, então $a \geq b$.

1.2.6 Sejam $a, b, c, d \in \mathbb{N}$ tais que $a \leq b$ e $c \leq d$. Mostre que

$$b - a \leq d - c \iff b + c \leq a + d.$$

1.3 Axioma de Indução

As propriedades dos números naturais e de suas operações que descrevemos até o momento não bastam para caracterizá-los. Por exemplo, os números racionais não negativos, assim como os números reais não negativos possuem todas as propriedades acima. No entanto, há uma propriedade adicional que só os naturais possuem, que é o *Axioma de Indução* que passamos a descrever.

8) *Axioma de Indução:* Seja S um subconjunto de \mathbb{N} tal que

- i) $0 \in S$.
- ii) S é fechado com respeito à operação de “somar 1” a seus elementos, ou seja,

$$\forall n, n \in S \implies n + 1 \in S.$$

Então, $S = \mathbb{N}$.

Se $A \subset \mathbb{N}$ e $a \in \mathbb{N}$, usaremos a seguir a seguinte notação:

$$a + A = \{a + x; x \in A\}.$$

É imediato verificar que

$$a + \mathbb{N} = \{m \in \mathbb{N}; m \geq a\}.$$

Segue-se, do Axioma de Indução, o seguinte importante instrumento para provar teoremas:

Teorema 1.3.1 (Princípio de Indução Matemática). *Seja $a \in \mathbb{N}$ e seja $p(n)$ uma sentença aberta em n ¹. Suponha que*

- (i) *$p(a)$ é verdade, e que*
 - (ii) *$\forall n \geq a, p(n) \implies p(n+1)$ é verdade,*
- então, $p(n)$ é verdade para todo $n \geq a$.*

DEMONSTRAÇÃO: Seja $\mathcal{V} = \{n \in \mathbb{N}; p(n)\}$; ou seja, \mathcal{V} é o subconjunto dos elementos de \mathbb{N} para os quais $p(n)$ é verdade.

Considere o conjunto

$$S = \{m \in \mathbb{N}; a + m \in \mathcal{V}\},$$

que verifica trivialmente $a + S \subset \mathcal{V}$.

Como, pela condição (i), temos que $a + 0 = a \in \mathcal{V}$, segue-se que $0 \in S$.

Por outro lado, se $m \in S$, então $a + m \in \mathcal{V}$ e, por (ii), temos que $a + m + 1 \in \mathcal{V}$; logo $m + 1 \in S$. Assim, pelo Axioma de Indução, temos que $S = \mathbb{N}$. Portanto,

$$\{m \in \mathbb{N}; m \geq a\} = a + \mathbb{N} \subset \mathcal{V},$$

o que prova o resultado. □

É preciso que o leitor note que, para provar que $p(n) \implies p(n+1)$ é verdade para todo n , o que se faz é mostrar que, se $p(n)$ é verdade para algum n , então $p(n+1)$ é verdade, já que a implicação é verdade sempre que $p(n)$ é falso. Isto pode gerar alguma confusão, pois poder-se-ia pensar que estamos usando a tese do teorema para provar o teorema, o que não é o caso, pois a tese é que $p(n)$ é verdade para todo $n \geq a$.

Corolário 1. *Não existe nenhum número natural n tal que $0 < n < 1$.*

DEMONSTRAÇÃO: O enunciado acima é equivalente a dizer que

$$p(n) : n > 0 \implies n \geq 1$$

é verdade para todo $n \in \mathbb{N}$.

¹Uma sentença aberta em n é uma frase de conteúdo matemático onde figura a letra n como palavra e que se torna uma sentença verdadeira ou falsa quando n é substituído por um número natural bem determinado.

Sendo $0 > 0$ falso, segue-se que $p(0) : 0 > 0 \implies 0 \geq 1$ é verdade.

Por outro lado, note que $p(n+1) : n+1 > 0 \implies n+1 \geq 1$ é verdade para todo $n \in \mathbb{N}$. De fato, $n+1 \geq 1$ é verdade para todo $n \in \mathbb{N}$, pois é equivalente, por cancelamento, a $n \geq 0$, o que é sempre verdade.

Logo, sendo $p(n+1)$ verdade para todo n , segue-se que $p(n) \implies p(n+1)$ é verdade para todo $n \in \mathbb{N}$.

Portanto, o resultado decorre do Princípio de Indução Matemática.

□

Corolário 2. *Dado um número natural n qualquer, não existe nenhum número natural m tal que $n < m < n+1$.*

DEMONSTRAÇÃO: Suponha, por absurdo, que exista um número natural m com $n < m < n+1$. Logo, existiria um número $k \in \mathbb{N}^*$ tal que $n+k = m < n+1$, que, pela Proposição 1.1.3, implicaria que $0 < k < 1$, o que é uma contradição, tendo em vista o Corolário 1 acima.

□

Corolário 3. *Sejam $a, b \in \mathbb{N}$. Se $a \cdot b = 1$, então $a = b = 1$.*

DEMONSTRAÇÃO: Inicialmente, note que $a \neq 0$ e $b \neq 0$, pois, caso contrário, $a \cdot b = 0$.

Agora, se $a \neq 1$ e $b \neq 1$, então, pelo Corolário 1, segue-se que $a > 1$ e $b > 1$. Logo, $a \cdot b > b > 1$; contradição. Portanto, $a = 1$ ou $b = 1$. Qualquer uma dessas possibilidades implica $a = b = 1$.

□

É necessário que o leitor não confunda *Indução Matemática* com *indução empírica*. Nas ciências naturais, é comum, após um certo número (sempre finito) de experimentos, enunciar leis gerais que governam o fenômeno em estudo. Essas leis são tidas como verdades, até prova em contrário. A Indução Matemática serve para estabelecer verdades matemáticas válidas sobre subconjuntos infinitos de \mathbb{N} . Não se trata de mostrar que determinada sentença aberta é verdade para um grande número de casos, mas, trata-se de provar que tal sentença é verdade para todo número natural maior ou igual do que um certo $a \in \mathbb{N}$.

Por exemplo, considere a sentença aberta²

$$p(n) : n = n + (n-1)(n-2)\cdots(n-10^6).$$

²Nos exemplos, bem como nos problemas, usaremos livremente números reais, supondo conhecidas suas propriedades. No entanto, no desenvolvimento da teoria, faremos apenas uso de conceitos previamente definidos.

Temos que $p(1), p(2), \dots, p(1.000.000)$ são verdade. Poderíamos achar que um milhão de testes bastariam para concluir que $p(n)$ é verdade para todo $n \in \mathbb{N}$. Qual não seria a nossa decepção se, ao testarmos $n = 1.000.001$, encontrássemos que $p(1.000.001)$ é falso?

O tipo de “indução” que faríamos acima é o que o filósofo e matemático Bertrand Russel chamou de *indução galinácea*. E a historinha que ele conta à respeito é, mais ou menos, a seguinte:

Havia uma galinha nova no quintal de uma velha senhora. Diariamente, ao entardecer, a boa senhora levava milho às galinhas. No primeiro dia, a galinha, desconfiada, esperou que a senhora se retirasse para se alimentar. No segundo dia, a galinha, prudentemente, foi se alimentando enquanto a senhora se retirava. No nonagésimo dia, a galinha, cheia de intimidade, já não fazia caso da velha senhora. No centésimo dia, ao se aproximar a senhora, a galinha, por indução, foi ao encontro dela para reclamar o seu milho. Qual não foi a sua surpresa quando a senhora pegou-a pelo pescoço com a intenção de pô-la na panela.

Vejamos agora como pode-se usar o Princípio de Indução Matemática para provar os mais variados resultados.

Exemplo 1.3.1. Este exemplo ilustra o primeiro registro da utilização do Princípio de Indução Matemática feita por Francesco Maurolycus em 1575. Trata-se da determinação de uma fórmula exata em função de $n \geq 1$ para a soma dos n primeiros números naturais ímpares. Ou seja, busca-se uma fórmula para

$$S_n = 1 + 3 + 5 + \dots + (2n - 1).$$

Vamos calcular S_n para alguns valores de n :

$$S_1 = 1, \quad S_2 = 4, \quad S_3 = 9, \quad S_4 = 16, \quad S_5 = 25.$$

Os casos particulares acima nos conduzem a conjecturar que $S_n = n^2$. Mas como ter certeza de que não estamos cometendo o engano da galinha de Bertrand Russel? Bom, o único jeito é usar o Princípio de Indução Matemática.

Definamos $p(n) : S_n = n^2$.

Temos que $p(1) : S_1 = 1 = 1^2$, portanto verdade. Para provar que $p(n) \implies p(n+1)$ é verdade para todo $n \in \mathbb{N}$, basta mostrar que, se supusermos $p(n)$ verdade, então $p(n+1)$ é verdade, qualquer que seja $n \in \mathbb{N}$.

De fato, supondo $p(n)$ verdade, ou seja, $S_n = n^2$, e somando $2n + 1$ a ambos os lados desta última igualdade, obtemos:

$$S_{n+1} = S_n + 2n + 1 = n^2 + 2n + 1 = (n+1)^2,$$

o que nos diz que $p(n+1)$ é verdade.

Pelo Princípio de Indução Matemática, $p(n)$ é verdade para todo $n \in \mathbb{N}^*$.

Exemplo 1.3.2. Vamos determinar uma fórmula para a soma dos n primeiros números naturais não nulos. Seja

$$S_n = 1 + 2 + \cdots + n.$$

Somando a igualdade acima, membro a membro, com ela mesma, porém com as parcelas do segundo membro em ordem invertida, temos que

$$\begin{array}{rcl} S_n & = & 1 + 2 + \cdots + n \\ S_n & = & n + (n-1) + \cdots + 1 \\ \hline 2S_n & = & (n+1) + (n+1) + \cdots + (n+1) \end{array}$$

Daí segue-se que $2S_n = n(n+1)$, e, portanto,

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

Conta-se a seguinte história sobre Carl Friederich Gauss quando ainda garoto. Na escola, o professor, para aquietar a turma de Gauss, mandou os alunos calcularem a soma de todos os números naturais de 1 a 100. Qual não foi a surpresa quando, pouco tempo depois, o menino deu a resposta: 5050. Indagado como tinha descoberto tão rapidamente o resultado, Gauss, então com nove anos de idade, descreveu o método acima.

Pelas suas contribuições à Matemática, Gauss é considerado um dos maiores matemáticos de todos os tempos, tendo dedicado boa parte de seu talento à aritmética, sua área de interesse preferida.

Vamos agora verificar a validade da fórmula acima por indução. Note que

$$S_1 = 1 = \frac{1(1+1)}{2}.$$

Suponha agora que $S_n = n(n+1)/2$. Somando $n+1$ a ambos os membros desta igualdade, obtemos:

$$S_{n+1} = S_n + n + 1 = \frac{n(n+1)}{2} + n + 1 = \frac{n(n+1) + 2(n+1)}{2} = \frac{(n+1)(n+2)}{2},$$

o que mostra que a fórmula vale para todo $n \in \mathbb{N}^*$.

Seja A um conjunto qualquer. Uma *sequência* em A é uma função

$$\begin{array}{ccc} s : & \mathbb{N}^* & \longrightarrow A \\ & n & \mapsto s(n) \end{array}$$

É praxe denotar o número $s(n)$ por s_n . Uma sequência s também será denotada por (s_n) .

Problemas

1.3.1 Mostre as seguintes fórmulas por indução:

a) $1^2 + 2^2 + \cdots + n^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$

b) $1^3 + 2^3 + \cdots + n^3 = \left[\frac{n(n+1)}{2} \right]^2$

c) $\frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \cdots + \frac{1}{n(n+1)} = \frac{n}{n+1}$

d) $\frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \frac{1}{2 \cdot 3 \cdot 4} + \cdots + \frac{1}{n(n+1)(n+2)} = \frac{n(n+3)}{4(n+1)(n+2)}$

1.3.2 Uma *progressão aritmética* (PA) é uma seqüência de números reais (a_n) tal que a_1 é dado e, para todo $n \in \mathbb{N}^*$, tem-se que

$$a_{n+1} = a_n + r,$$

onde r é um número real fixo chamado *razão*.

a) Mostre que $a_n = a_1 + (n-1)r$.

b) Se $S_n = a_1 + \cdots + a_n$, mostre que $S_n = na_1 + \frac{n(n-1)}{2}r = \frac{(a_1 + a_n)n}{2}$.

1.3.3 Uma *progressão geométrica* (PG) é uma seqüência de números reais (a_n) tal que a_1 é dado e, para todo $n \in \mathbb{N}^*$, tem-se que

$$a_{n+1} = a_n \cdot q,$$

onde q é um número real fixo, diferente de 0 e de 1, chamado *razão*.

a) Mostre que $a_n = a_1 \cdot q^{n-1}$.

b) Se $S_n = a_1 + \cdots + a_n$, mostre que $S_n = a_1 \frac{q^n - 1}{q - 1}$.

1.3.4 Uma *progressão aritmético-geométrica* é uma seqüência de números reais (a_n) tal que a_1 é dado e, para todo $n \in \mathbb{N}^*$, tem-se que

$$a_{n+1} = qa_n + r,$$

onde q e r são números reais dados, com $q \neq 1$.

a) Mostre que $a_n = a_1 \cdot q^{n-1} + r \frac{q^{n-1} - 1}{q - 1}$.

b) Se $S_n = a_1 + \cdots + a_n$, mostre que

$$S_n = qr \frac{q^{n-1} - 1}{(1-q)^2} - a_1 \frac{q^n - 1}{1-q} + r \frac{n-1}{1-q}.$$

1.3.5 Ache uma fórmula para cada uma das seguintes somas:

- a) $2 + 4 + \cdots + 2n$.
- b) $2 + 5 + 8 + \cdots + (3n - 1)$.

1.3.6 Ache uma fórmula para cada uma das seguintes somas:

- a) $2 + 4 + 8 + \cdots + 2^n$.
- b) $\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \cdots + \frac{1}{2^n}$.

Para quanto tende a soma em (b) quando o número de parcelas aumenta indefinidamente?

1.3.7 Uma vitória régia encontra-se em um tanque de água. Sabendo que ela dobra de área a cada dia, e que, no final de 20 dias, ela ocupa toda a superfície do tanque, em qual dia ela ocupará a metade da superfície do tanque?

1.3.8 Em uma cidade de 5000 habitantes, alguém resolve espalhar um boato. Considerando que, a cada 10 minutos, uma pessoa é capaz de contar o caso para 3 pessoas desinformadas, determine em quanto tempo toda a cidade fica conhecendo o boato.

1.3.9 Sejam A e B dois conjuntos com n e m elementos, respectivamente. Mostre, por indução sobre n , que o número de funções de A em B é m^n .

2

Aplicações da Indução

Neste capítulo, exploraremos o Princípio de Indução Matemática, mostrando algumas de suas inúmeras aplicações.

2.1 Definição por Recorrência

O que realmente significa uma expressão da forma

$$1 + 3 + 5 + \cdots + (2n - 1),$$

que consideramos no Exemplo 1.3.1?

Apesar de intuirmos o que quer dizer, isso formalmente ainda não faz sentido, pois só sabemos somar números aos pares. Para dar um sentido preciso a este tipo de expressão, vamos utilizar o Princípio de Indução Matemática como descrito a seguir.

Para definir uma expressão E_n , para todo $n \in a + \mathbb{N}$, basta definirmos E_a e mostrar como obter E_{n+1} a partir de E_n , para todo $n \in a + \mathbb{N}$.

De fato, consideremos a sentença aberta

$$p(n) : E_n \text{ está definido}$$

e provemos, por Indução Matemática, que $p(n)$ é verdade para todo $n \in a + \mathbb{N}$.

Temos, por construção dos E_n , que $p(a)$ é verdade e que, para todo $n \in \mathbb{N}$, $p(n) \Rightarrow p(n+1)$ é também verdade. Logo, pelo Princípio de Indução Matemática, temos que $p(n)$ é verdade para todo $n \in a + \mathbb{N}$.

Neste caso, dizemos que E_n foi *definido por recorrência*.

Por exemplo, usamos recorrência para definir progressões aritméticas (Problema 1.3.2) e progressões geométricas (Problema 1.3.3).

Algumas vezes, definiremos uma expressão E_n por recorrência através de uma dada função avaliada em vários termos anteriores, $E_{n-1}, E_{n-2}, \dots, E_{n-r}$. Isto definirá, sem ambigüidade, E_n , desde que se conheçam as expressões de E_1, \dots, E_r .

Exemplo 2.1.1. Seja (a_n) uma seqüência de elementos de um conjunto munido de duas operações sujeitas às leis básicas da aritmética. Para dar sentido às somas

$$S_n = a_1 + a_2 + \cdots + a_n,$$

basta pôr $S_1 = a_1$ e, supondo S_n definido, definir

$$S_{n+1} = S_n + a_{n+1}.$$

Somas como S_n serão também denotadas com a notação de somatórios:

$$S_n = \sum_{i=1}^n a_i.$$

Exemplo 2.1.2. Define-se o *fatorial* de um número natural n , denotado por $n!$, como:

$$0! = 1, \quad (n+1)! = n! \cdot (n+1).$$

Exemplo 2.1.3. Seja a um elemento de um conjunto A munido de duas operações sujeitas às leis básicas da aritmética. Vamos definir as potências a^n com $n \in \mathbb{N}$ por recorrência.

Ponhamos $a^1 = a$ e $a^0 = 1$, se $a \neq 0$. Supondo a^n definido, defina

$$a^{n+1} = a^n \cdot a.$$

É fácil, por meio de indução, provar as propriedades usuais das potências.

Proposição 2.1.1. Sejam $a, b \in A$ e $m, n \in \mathbb{N}^*$. Então,

- i) $a^m \cdot a^n = a^{m+n}$.
- ii) $(a^m)^n = a^{mn}$.
- iii) $(a \cdot b)^n = a^n \cdot b^n$.

DEMONSTRAÇÃO: Provaremos (i), deixando o restante como exercício.

Fixemos a e m arbitrariamente e demonstremos a relação por indução sobre n . Temos claramente, pelas definições, que

$$a^m \cdot a^1 = a^m \cdot a = a^{m+1}.$$

Por outro lado, supondo que $a^m \cdot a^n = a^{m+n}$, temos que

$$a^m \cdot a^{n+1} = a^m \cdot (a^n \cdot a) = (a^m \cdot a^n) \cdot a = a^{m+n} \cdot a = a^{m+n+1}.$$

Isto, pelo Princípio de Indução Matemática, prova a nossa propriedade. □

Problemas

2.1.1 Sejam (a_i) , (b_i) duas seqüências de elementos de um conjunto A munido de duas operações sujeitas às leis básicas da aritmética e seja $c \in A$.

a) Mostre que

$$\sum_{i=1}^n (a_i + b_i) = \sum_{i=1}^n a_i + \sum_{i=1}^n b_i.$$

b) Mostre que

$$c \cdot \sum_{i=1}^n a_i = \sum_{i=1}^n c \cdot a_i.$$

c) Mostre que

$$\sum_{i=1}^n (a_{i+1} - a_i) = a_{n+1} - a_1.$$

2.1.2* Mostre que

$$\sum_{i=1}^n i(i+1) = \frac{n(n+1)(n+2)}{3}.$$

2.1.3 Calcule uma expressão condensada para as somas:

- a) $1 + (1+2) + (1+2+3) + \cdots + (1+2+\cdots+n)$.
- b) $1 \cdot 2 \cdot 3 + 2 \cdot 3 \cdot 4 + 3 \cdot 4 \cdot 5 + \cdots + n(n+1)(n+2)$.
- c) $1 \cdot 3 + 3 \cdot 5 + 5 \cdot 7 \cdots + (2n-1)(2n+1)$.
- d) $1 + (1+2^2) + (1+2^2+3^2) + \cdots + (1+2^2+3^2+\cdots+n^2)$.

2.1.4 a) Considere, para $i \in \mathbb{N}^*$, a seguinte identidade:

$$(i+1)^5 - i^5 = 5i^4 + 10i^3 + 10i^2 + 5i + 1.$$

Efetue o somatório de ambos os lados para i variando de 1 a n . Utilizando os Problemas 2.1.1 e 1.3.1, determine uma fórmula para $\sum_{i=1}^n i^4$.

b) Proceda de modo análogo para achar uma fórmula para $\sum_{i=1}^n i^5$.

c) Mostre como isto pode ser generalizado.

2.1.5 Demonstre as propriedades (ii) e (iii) na Proposição 2.1.1.

2.1.6 Sejam $n, a \in \mathbb{N}$

- a) Mostre que existe $m \in \mathbb{N}$ tal que $(a+1)^n = ma + 1$.
- b) Mostre que, se $a > 0$, então existe $m \in \mathbb{N}$ tal que $(a-1)^{2n+1} = ma - 1$.
- c) Mostre que, se $a > 1$, então existe $m \in \mathbb{N}$ tal que $(a-1)^{2n} = ma + 1$.

2.1.7 Dados $a, b \in \mathbb{N}$ e $n, m \in \mathbb{N}^*$, mostre que

- i) $a < b \iff a^n < b^n$.
- ii) para $a > 1$, $m < n \iff a^m < a^n$.

2.1.8 Mostre por indução que

- $2^n > n$, para todo natural n .
- $n! > 2^n$, para todo n natural com $n \geq 4$.
- $n! > 3^n$, para todo n natural com $n \geq 7$.

2.2 Binômio de Newton

Considere a expressão $(1 + X)^n$, onde X é uma indeterminada e n é um número natural não nulo. É claro que o desenvolvimento dessa potência é um polinômio de grau n em X cujos coeficientes são números naturais:

$$(1 + X)^n = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \cdots + a_{n-1} X^{n-1} + a_n X^n.$$

O coeficiente a_i , $i = 0, \dots, n$, será denotado pelo símbolo $a_i = \binom{n}{i}$ e será chamado de *número binomial*.

Observe que, tomando $X = 1$ no desenvolvimento de $(1 + X)^n$, obtemos a seguinte identidade:

$$2^n = \binom{n}{0} + \binom{n}{1} + \cdots + \binom{n}{n}.$$

Queremos agora determinar fórmulas explícitas para esses números binomiais.

Como os coeficientes do termo independente de X , do termo em X e do termo em X^n no desenvolvimento de $(1 + X)^n$ são, respectivamente, 1, n e 1, temos que

$$\binom{n}{0} = 1, \quad \binom{n}{1} = n \quad \text{e} \quad \binom{n}{n} = 1$$

Se $i > n$, é cômodo definir $\binom{n}{i} = 0$.

Lema 2.2.1 (Relação de Stifel). *Para todo $n \in \mathbb{N}^*$ e todo $i \in \mathbb{N}$ com $0 \leq i \leq n$, tem-se que*

$$\binom{n}{i} + \binom{n}{i+1} = \binom{n+1}{i+1}.$$

DEMONSTRAÇÃO: Para $i = n$, a relação acima é trivialmente verificada. Para $0 \leq i < n$, as relações decorrem, imediatamente, das seguintes igualdades:

$$\begin{aligned} \binom{n+1}{0} + \binom{n+1}{1} X + \cdots + \binom{n+1}{n} X^n + \binom{n+1}{n+1} X^{n+1} = \\ (1 + X)^{n+1} = (1 + X) \left[\binom{n}{0} + \binom{n}{1} X + \cdots + \binom{n}{n-1} X^{n-1} + \binom{n}{n} X^n \right] = \end{aligned}$$

$$\binom{n}{0} + \left[\binom{n}{0} + \binom{n}{1} \right] X + \cdots + \left[\binom{n}{n-1} + \binom{n}{n} \right] X^n + \binom{n}{n} X^{n+1}.$$

□

Lema 2.2.2. Para todos $n, i \in \mathbb{N}^*$, com $1 \leq i \leq n$, tem-se que

$$i! \binom{n}{i} = n(n-1) \cdots (n-i+1).$$

DEMONSTRAÇÃO: Vamos provar isto por indução sobre n . A igualdade é trivialmente verificada para $n = 1$. Suponha que as igualdades sejam válidas para algum $n \in \mathbb{N}^*$ e todo i com $1 \leq i \leq n$. Pela relação de Stifel, temos, para $i \leq n$, que

$$i! \binom{n+1}{i} = i(i-1)! \binom{n}{i-1} + i! \binom{n}{i} =$$

$$in(n-1) \cdots (n-i+2) + n(n-1) \cdots (n-i+1) =$$

$$n(n-1) \cdots (n-i+2)(i+n-i+1) =$$

$$(n+1)n(n-1) \cdots (n+1-i+1),$$

o que prova a igualdade para $n+1$ e para todo i com $1 \leq i \leq n$. Uma verificação direta mostra que a fórmula também vale para $i = n+1$. Portanto, a igualdade vale para todo n e todo i com $1 \leq i \leq n$.

□

Segue-se daí que, para $n, i \in \mathbb{N}^*$ com $1 \leq i \leq n$, vale a seguinte fórmula para os coeficientes binomiais:

$$\binom{n}{i} = \frac{n(n-1) \cdots (n-i+1)}{i!} = \frac{n!}{i!(n-i)!}.$$

Note que os termos extremos nas igualdades acima têm sentido e são iguais quando $i = 0$.

Da fórmula acima, decorre imediatamente, para todo $n \in \mathbb{N}$ e todo i com $0 \leq i \leq n$, a seguinte identidade fundamental:

$$\binom{n}{i} = \binom{n}{n-i}.$$

Teorema 2.2.1 (Binômio de Newton). Sejam a e b números reais¹ e seja $n \in \mathbb{N}^*$. Tem-se que

$$(a+b)^n = a^n + \binom{n}{1} a^{n-1}b + \binom{n}{2} a^{n-2}b^2 + \cdots + \binom{n}{n-1} ab^{n-1} + b^n.$$

DEMONSTRAÇÃO: Se $a = 0$, o resultado é óbvio. Se $a \neq 0$, substitua X por $\frac{b}{a}$ na expansão de $(1+X)^n$ e multiplicar ambos os lados por a^n .

□

Exemplo 2.2.1.

$$(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$$

$$(a+b)^3 = a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3$$

$$(a+b)^4 = a^4 + 4a^3b + 6a^2b^2 + 4ab^3 + b^4.$$

Problemas

2.2.1* Demonstre a identidade das colunas:

$$\binom{i}{i} + \binom{i+1}{i} + \cdots + \binom{n}{i} = \binom{n+1}{i+1}.$$

2.2.2 Demonstre a identidade das diagonais:

$$\binom{n}{0} + \binom{n+1}{1} + \binom{n+2}{2} + \cdots + \binom{n+m}{m} = \binom{n+m+1}{m}.$$

2.2.3* a) Demonstre, para todos $n, m, k \in \mathbb{N}^*$, a identidade de Euler:

$$\sum_{i=0}^k \binom{m}{i} \binom{n}{k-i} = \binom{n+m}{k}.$$

b) Em particular, deduza a identidade de Lagrange:

$$\sum_{i=0}^n \binom{n}{i}^2 = \binom{2n}{n}.$$

2.2.4 Sejam $n, a \in \mathbb{N}^*$. Calcule as somas:

$$\text{a)} \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} a^i \quad \text{b)} \sum_{i=0}^n i \binom{n}{i} a^i \quad \text{c)} \sum_{i=0}^n i(i-1) \binom{n}{i} a^i \quad \text{d)} \sum_{i=0}^n i^2 \binom{n}{i} a^i$$

¹No corpo da nossa exposição utilizaremos apenas a expansão de $(1+X)^n$.

2.2.5* a) Mostre que $\binom{n}{i}$ é o número de subconjuntos distintos com i elementos de um conjunto com n elementos.

b) Mostre que o conjunto das partes de um conjunto com n elementos tem 2^n elementos.

c) Usando os itens acima, dê uma outra prova para a igualdade:

$$\binom{n}{0} + \binom{n}{1} + \cdots + \binom{n}{n} = 2^n.$$

2.2.6 Seja $n \in \mathbb{N}^*$. Mostre que

$$\binom{n}{i} < \binom{n}{i+1}, \text{ se } 0 \leq i < \frac{n-1}{2}; \text{ e que}$$

$$\binom{n}{i} > \binom{n}{i+1}, \text{ se } i > \frac{n+1}{2}$$

2.3 Propriedade da Boa Ordem

Seja S um subconjunto de \mathbb{N} . Dizemos que um número natural a é um menor elemento de S se possui as seguintes propriedades:

- i) $a \in S$,
- ii) $\forall n \in S, a \leq n$.

É imediato verificar que, se S possui um menor elemento, este é único. De fato, se a e a' são menores elementos de S , então $a \leq a'$ e $a' \leq a$, o que implica que $a = a'$ (propriedade anti-simétrica da relação de ordem).

O menor elemento de S , quando existe, é denotado por $\min S$.

O Axioma de Indução tem a seguinte consequência notável:

Teorema 2.3.1 (Propriedade da Boa Ordem). *Todo subconjunto não vazio de \mathbb{N} possui um menor elemento.*

DEMONSTRAÇÃO: A demonstração será feita por redução ao absurdo.

Seja S um subconjunto não vazio de \mathbb{N} e suponha, por absurdo, que S não possui um menor elemento. Queremos mostrar que S é vazio, conduzindo a uma contradição.

Considere o conjunto T , complementar de S em \mathbb{N} . Queremos, portanto, mostrar que $T = \mathbb{N}$.

Defina o conjunto

$$I_n = \{k \in \mathbb{N}; k \leq n\},$$

e considere a sentença aberta

$$p(n) : I_n \subset T.$$

Como $0 \leq n$ para todo n , segue-se que $0 \in T$, pois, caso contrário, 0 seria um menor elemento de S . Logo, $p(0)$ é verdade.

Suponha agora que $p(n)$ seja verdade. Se $n + 1 \in S$, como nenhum elemento de I_n está em S , teríamos que $n + 1$ é um menor elemento de S , o que não é permitido. Logo, $n + 1 \in T$, seguindo daí que

$$I_{n+1} = I_n \cup \{n + 1\} \subset T,$$

o que prova que $\forall n, I_n \subset T$; portanto, $\mathbb{N} \subset T \subset \mathbb{N}$ e, consequentemente, $T = \mathbb{N}$.

□

A Propriedade da Boa Ordem tem várias outras aplicações, conforme veremos ao longo desse livro. Vejamos agora uma dessas aplicações.

Um subconjunto A de \mathbb{N} será dito *limitado superiormente* se for vazio ou se existir um número $n \in \mathbb{N}$ tal que

$$\forall x \in A, x \leq n.$$

Neste caso, diremos que n é uma *cota superior* para A .

Diremos que um elemento $a \in \mathbb{N}$ é o *maior elemento* de A , se a é uma cota superior de A com $a \in A$. É imediato verificar que o maior elemento de um conjunto, se existe, é único. Nesse caso, ele será denotado por $\max A$.

Corolário. *Seja A um subconjunto de \mathbb{N} não vazio e limitado superiormente; então A possui um maior elemento.*

DEMONSTRAÇÃO: Suponha que n seja uma cota superior para A . Logo $x \leq n$ para todo $x \in A$. Considere o conjunto

$$B = \{y \in \mathbb{N}; y = n - x, \text{ com } x \in A\}.$$

O conjunto B é não vazio, logo, pela Propriedade da Boa Ordem, ele tem um menor elemento $n - a$. Vamos mostrar que $a = \max A$. De fato, $a \in A$, e se $x \in A$, temos que $n - x \in B$ e portanto, $n - x \geq n - a$, o que implica que $x \leq a$ (veja Problema 1.2.5).

□

O resultado a seguir nos dirá que as potências de um número natural maior do que 1 não formam um conjunto limitado superiormente.

Lema 2.3.1. *Sejam a e m dois números naturais com $a > 1$. Então, existe um número natural n tal que $a^n > m$.*

DEMONSTRAÇÃO: Definamos $A = \{a^n; n \in \mathbb{N}\}$ e suponhamos, por absurdo, que $a^n \leq m$ para todo $n \in \mathbb{N}$. Portanto, o conjunto A é limitado superiormente e, consequentemente, pelo corolário acima, possui um maior elemento; isto é, existe $r \in \mathbb{N}$ tal que $x \leq a^r$ para todo x em A . Mas, sendo $a \geq 2$, segue-se que

$$a^{r+1} \geq 2a^r > a^r,$$

contradizendo o fato de $a^{r+1} \in A$ e a^r ser o maior elemento de A .

□

O Princípio de Indução Matemática admite uma variante que é muito útil e que damos a seguir.

Teorema 2.3.2 (Princípio de Indução Matemática, 2ª Forma). *Seja*

p(n) uma sentença aberta tal que

- i) *p(a) é verdade, e que*
- ii) $\forall n, p(a) \text{ e } p(a+1) \text{ e } \dots \text{ e } p(n) \implies p(n+1) \text{ é verdade,}$
então, p(n) é verdade para todo } n \geq a.

DEMONSTRAÇÃO: Considere o conjunto

$$\mathcal{V} = \{n \in a + \mathbb{N}; p(n)\}.$$

Queremos provar que o conjunto $\mathcal{W} = (a + \mathbb{N}) \setminus \mathcal{V}$ é vazio. Suponha, por absurdo, que vale o contrário. Logo, pela Propriedade da Boa Ordem, \mathcal{W} teria um menor elemento k , e, como sabemos de (i) que $a \notin \mathcal{W}$, segue-se que existe n tal que $k = a + n > a$. Portanto, $a, a+1, \dots, k-1 \notin \mathcal{W}$; logo $a, a+1, \dots, k-1 \in \mathcal{V}$. Por (ii) conclui-se que $k = k-1+1 \in \mathcal{V}$, o que contradiz o fato de $k \in \mathcal{W}$.

□

Problemas

2.3.1* Usando a Propriedade da Boa Ordem, dê uma outra prova do Corolário 1 do Teorema 1.3.1.

2.3.2* Mostre que \mathbb{N} possui a *Propriedade Arquimediana*. Ou seja, mostre que, dados $a, b \in \mathbb{N}$ com $0 < a < b$, existe $n \in \mathbb{N}$ tal que $na > b$.

2.3.3* Supondo válida a Propriedade da Boa Ordem, mostre que vale o Axioma de Indução.

2.4 Aplicações Lúdicas

Mostraremos nesta seção algumas aplicações lúdicas da indução matemática.

Exemplo 2.4.1. A TORRE DE HANÓI E O FIM DO MUNDO

Este é um jogo bastante popular e pode ser facilmente fabricado ou ainda encontrado em lojas de brinquedos de madeira.

O jogo consiste de n discos de diâmetros distintos com um furo no seu centro e uma base onde estão fincadas três hastas. Numa das hastas estão enfiados os discos de modo que nenhum disco esteja sobre um outro de diâmetro menor (veja figura abaixo).



O jogo consiste em transferir a pilha de discos para uma outra haste, deslocando um disco de cada vez, de modo que, a cada passo, a regra acima seja observada.

As perguntas naturais que surgem são as seguintes:

1. O jogo tem solução para cada $n \in \mathbb{N}$?
2. Caso afirmativo, qual é o número mínimo j_n de movimentos para resolver o problema com n discos?

Usando Indução Matemática, vamos ver que a resposta à primeira pergunta é afirmativa qualquer que seja o valor de n . Em seguida, deduziremos uma fórmula que nos fornecerá o número j_n .

Considere a sentença aberta

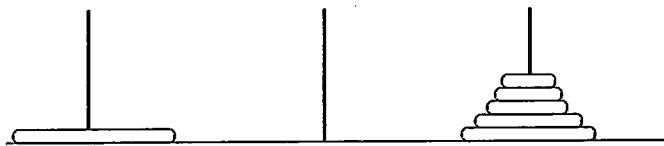
$$p(n) : \text{O jogo com } n \text{ discos tem solução.}$$

Obviamente, $p(1)$ é verdade. Vamos agora provar que é verdade a seguinte sentença:

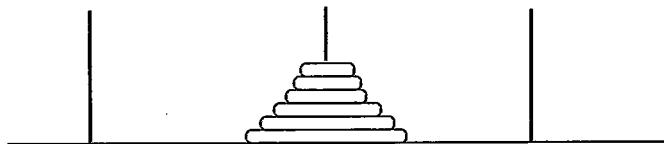
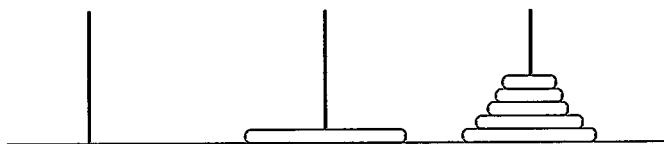
$$\forall n, \quad p(n) \implies p(n+1).$$

De fato, vamos supor, para um valor de n arbitrário, que $p(n)$ é verdade, ou seja, que o jogo com n discos tem solução, e provar que o jogo com $n+1$ discos tem solução.

Para ver isto, inicialmente resolva o problema para os n discos superiores da pilha, transferindo-os para uma das hastas livre (isto é possível, pois o problema com n discos tem solução):



Em seguida, transfira o disco que restou na pilha original (o maior dos discos) para a haste vazia. Feito isto, resolva novamente o problema para os n discos que estão juntos, transferindo-os para a haste que contém o maior dos discos:



Isto mostra que o problema com $n + 1$ discos possui solução, e, portanto, pelo Princípio de Indução, que $p(n)$ é verdade para todo $n \in \mathbb{N}^*$.

Para determinar uma fórmula para j_n , veja que, para resolver o problema para $n + 1$ discos com o menor número de passos, temos, necessariamente, que passar duas vezes pela solução mínima do problema com n discos. Temos, então, que

$$j_{n+1} = 2j_n + 1.$$

Obtemos, assim, uma progressão aritmético-geométrica (j_n) cujo termo geral é, pelo Problema 1.3.4, dado por

$$j_n = 2^n - 1.$$

Este jogo foi idealizado e publicado pelo matemático francês Edouard Lucas, em 1882, que, para dar mais sabor à sua criação, inventou a seguinte lenda:

Na origem do tempo, num templo oriental, Deus colocou 64 discos perfurados de ouro puro ao redor de uma de três colunas de diamante e ordenou a um grupo de sacerdotes que movessem os discos de uma coluna para outra, respeitando as regras acima explicadas. Quando todos os 64 discos fossem transferidos para uma outra coluna, o mundo acabaria.

O leitor não deve preocupar-se com a iminência do fim do mundo pois, se, a cada segundo, um sacerdote movesse um disco, o tempo mínimo para que ocorresse a fatalidade seria de $2^{64} - 1$ segundos e isto daria, aproximadamente, um bilhão de séculos!

Exemplo 2.4.2. O ENIGMA DO CAVALO DE ALEXANDRE, O GRANDE

Num mosaico romano, Bucéfalo, o cavalo de Alexandre, o Grande, é representado como um fogoso corcel cor de bronze. Neste exemplo, vamos “provar” que isto é uma falácia.

Incialmente, “provaremos” que todos os cavalos têm mesma cor. De fato, considere a sentença aberta:

$$p(n) : \text{Num conjunto com } n \text{ cavalos, todos têm a mesma cor.}$$

Note que $p(1)$ é obviamente verdade. Agora, suponha o resultado válido para conjuntos contendo n cavalos. Considere um conjunto

$$\mathcal{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_n, C_{n+1}\}$$

com $n + 1$ cavalos. Decomponemos o conjunto \mathcal{C} numa união de dois conjuntos:

$$\mathcal{C} = \mathcal{C}' \cup \mathcal{C}'' = \{C_1, \dots, C_n\} \cup \{C_2, \dots, C_{n+1}\}.$$

Pela hipótese indutiva, ie., que, num conjunto com n cavalos, todos têm mesma cor, segue-se que os cavalos em \mathcal{C}' têm mesma cor; idem para os cavalos em \mathcal{C}'' . Como

$$C_2 \in \mathcal{C}' \cap \mathcal{C}'',$$

segue-se que os cavalos de \mathcal{C}' têm a mesma cor dos cavalos de \mathcal{C}'' , permitindo concluir, assim, que todos os cavalos em \mathcal{C} têm a mesma cor.

Assim, a nossa “demonstração” por indução está terminada, provando que $p(n)$ é verdade para todo $n \in \mathbb{N}$.

Agora, toda criança sabe que Marengo, o famoso cavalo de Napoleão, era branco. Logo, Bucéfalo deveria ser branco.

Onde está o erro nesta prova? Para achá-lo, sugerimos ao leitor tentar provar que $p(1) \implies p(2)$.

Exemplo 2.4.3. O PROBLEMA DA MOEDA FALSA

Têm-se 2^n moedas, sendo uma delas falsa, com peso menor do que as demais. Dispõe-se de uma balança de dois pratos, mas sem nenhum peso. Vamos mostrar, por indução sobre n , que é possível achar a moeda falsa com n pesagens.

Para $n = 1$, isto é fácil de ver, pois, dadas as duas moedas, basta pôr uma moeda em cada prato da balança e descobre-se imediatamente qual é a moeda falsa.

Suponha, agora, que o resultado seja válido para algum valor de n e que se tenha que achar a moeda falsa dentre 2^{n+1} moedas dadas. Separemos as 2^{n+1} moedas em 2 grupos de 2^n moedas cada. Coloca-se um grupo de 2^n moedas em cada prato da balança. Assim, poderemos decobrir em que grupo de 2^n moedas encontra-se a moeda falsa. Agora, pela hipótese de indução, descobre-se a moeda falsa com n pesagens, que, junto com a pesagem já efetuada, perfazem o total de $n + 1$ pesagens.

No Capítulo 4, resolveremos este problema para um número qualquer de moedas.

Exemplo 2.4.4. OS COELHOS DE FIBONACCI

Trata-se do seguinte problema proposto e resolvido por Leonardo de Pisa em seu livro, *Liber Abacci* de 1202: *Quot paria coniculorum in uno anno ex uno pario germinentur.*

Trocando em miúdos: um casal de coelhos recém-nascidos foi posto num lugar cercado. Determinar quantos casais de coelhos ter-se-ão após um ano, supondo que, a cada mês, um casal de coelhos produz outro casal e que um casal começa a procriar dois meses após o seu nascimento.

Leonardo apresenta a seguinte solução:

mês	número de casais do mês anterior	número de casais recém-nascidos	total
1 ^º	0	1	1
2 ^º	1	0	1
3 ^º	1	1	2
4 ^º	2	1	3
5 ^º	3	2	5
6 ^º	5	3	8
7 ^º	8	5	13
8 ^º	13	8	21
9 ^º	21	13	34
10 ^º	34	21	55
11 ^º	55	34	89
12 ^º	89	55	144

Portanto, o número de casais de coelhos num determinado mês é igual ao número total

de casais do mês anterior acrescido do número de casais nascidos no mês em curso, que é igual ao número total de casais do mês anterior ao anterior.

Se denotarmos o número de coelhos existentes no n -ésimo mês por u_n , temos, então, que

$$u_n = u_{n-1} + u_{n-2}, \quad u_1 = u_2 = 1.$$

Essas relações definem, por recorrência, uma seqüência de números naturais, chamada de *seqüência de Fibonacci*, cujos elementos, chamados de *números de Fibonacci*, possuem propriedades aritméticas notáveis que ainda hoje são objeto de investigação.

Uma recorrência² do tipo

$$x_n = x_{n-1} + x_{n-2} \quad (2.1)$$

só permite determinar o elemento x_n se conhecermos os elementos anteriores x_{n-1} e x_{n-2} , que, para serem calculados, necessitam do conhecimento dos dois elementos anteriores, etc. Fica, portanto, univocamente definida a seqüência quando são dados x_1 e x_2 . A seqüência de Fibonacci corresponde à recorrência (2.1), onde $x_1 = x_2 = 1$.

Quando é dada uma recorrência, um problema importante é determinar uma fórmula para o termo geral da seqüência sem recorrer aos termos anteriores. No caso da seqüência de Fibonacci, existe uma fórmula chamada fórmula de Binet, que apresentamos a seguir.

Proposição 2.4.1. *Para todo $n \in \mathbb{N}^*$, tem-se que*

$$u_n = \frac{\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n}{\sqrt{5}}$$

DEMONSTRAÇÃO: Procuremos as progressões geométricas $v_n = q^n$, com $q \neq 0$, que satisfazem à recorrência (2.1). Temos que

$$q^n = q^{n-1} + q^{n-2},$$

cujas soluções são

$$q' = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \quad \text{e} \quad q'' = \frac{1 - \sqrt{5}}{2}.$$

Defina $v_n = q'^n$ e $w_n = q''^n$. Note que, como as duas seqüências v_n e w_n satisfazem à recorrência (2.1), então, para todo α e β reais, a seqüência $u_n = \alpha v_n + \beta w_n$ também satisfaz à recorrência. Agora impomos $u_1 = u_2 = 1$, o que nos dá um sistema de duas equações com as duas incógnitas α e β , cujas soluções são $\alpha = \frac{1}{\sqrt{5}}$ e $\beta = -\frac{1}{\sqrt{5}}$.

□

²Uma recorrência é uma fórmula que define um elemento de uma seqüência a partir de termos anteriores.

É notável que seja necessário recorrer a fórmulas envolvendo números irracionais para representar os elementos da seqüência de Fibonacci que são números naturais.

Leonardo de Pisa, filho de Bonacci, e por isso apelidado Fibonacci, teve um papel fundamental no desenvolvimento da Matemática no mundo ocidental. Em 1202, publicou o livro *Liber Abacci*, que continha todo o conhecimento sobre números e álgebra da época. Esta obra foi responsável pela introdução na Europa do sistema de numeração indo-árabico e pelo posterior desenvolvimento da álgebra e da aritmética no ocidente.

Problemas

2.4.1 Mostre que o problema da moeda falsa para 3^n moedas também se resolve com n pesagens.

2.4.2* Mostre que a seqüência de Fibonacci satisfaz às seguintes identidades:

- a) $u_1 + u_2 + \cdots + u_n = u_{n+2} - 1$.
- b) $u_1 + u_3 + \cdots + u_{2n-1} = u_{2n}$.
- c) $u_2 + u_4 + \cdots + u_{2n} = u_{2n+1} - 1$.
- d) $u_1^2 + u_2^2 + \cdots + u_n^2 = u_n u_{n+1}$.

2.4.3* Dados $n, m \in \mathbb{N}^*$, com $n \geq 2$, mostre que

$$u_{n+m} = u_{n-1}u_m + u_nu_{m+1}.$$

2.4.4* Dado $n \in \mathbb{N}$, com $n \geq 2$, mostre que

- a) $u_{2n-1} = u_{n-1}^2 + u_n^2$.
- b) $u_{2n} = u_{n+1}^2 - u_{n-1}^2$.
- c) $u_{3n} = u_{n+1}^3 + u_n^3 - u_{n-1}^3$.

Problemas Suplementares

2.S.1 Sejam $n, m \in \mathbb{N}^*$, com $m \geq 2$. Mostre que

$$\sum_{i=1}^n i(i+1)\cdots(i+m-2) = \frac{1}{m}n(n+1)\cdots(n+m-1).$$

2.S.2* Dada a recorrência $a_{n+2} = 2a_{n+1} + a_n$, com $a_0 = a_1 = 1$, ache uma fórmula para a_n .

2.S.3* Dada a recorrência $a_n = a_{n-1} + n$, onde $a_0 = 1$, calcule uma expressão para a_n .

2.S.4* A PIZZA DE STEINER³. Determine o número máximo de regiões em que n retas dividem o plano.

2.S.5 Dada a seqüência de Fibonacci (u_n), mostre, por indução sobre n , que

- a) $u_n^2 = u_{n-1}u_{n+1} + (-1)^{n+1}$.
- b) $u_{2n}^2 = u_1u_2 + u_2u_3 + u_3u_4 + \cdots + u_{2n-1}u_{2n}$.
- c) $u_{2n+1}^2 - 1 = u_1u_2 + u_2u_3 + u_3u_4 + \cdots + u_{2n}u_{2n+1}$.

2.S.6* Sabendo que $q = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$ é raiz da equação $x^2 = x + 1$, mostre que $q^n = u_nq + u_{n-1}$.

2.S.7* Prove que

$$u_3 + u_6 + u_9 + \cdots + u_{3n} = \frac{u_{3n+2} - 1}{2}.$$

³O nome do problema é uma homenagem a Jacob Steiner (1796-1863), proeminente geômetra que deu a solução deste problema em 1826.

3

Divisão nos Naturais

Como a divisão de um número natural por outro nem sempre é possível, expressa-se esta possibilidade através da relação de divisibilidade.

Quando não existir uma relação de divisibilidade entre dois números, veremos que, ainda assim, será possível efetuar uma “divisão com resto pequeno”, chamada de *divisão euclidiana*. O fato de sempre ser possível efetuar tal divisão é responsável por inúmeras propriedades dos naturais que exploraremos neste e nos próximos capítulos.

3.1 Divisibilidade

Dados dois números naturais a e b com $a \neq 0$, diremos que a divide b , escrevendo $a|b$, quando existir $c \in \mathbb{N}$ tal que $b = a \cdot c$. Neste caso, diremos também que a é um *divisor* ou um *fator* de b ou, ainda, que b é um *múltiplo* de a .

Observe que a notação $a|b$ não representa nenhuma operação em \mathbb{N} , nem representa uma fração. Trata-se de uma sentença que diz ser verdade que existe c tal que $b = ac$. A negação dessa sentença é representada por $a \nmid b$, significando que não existe nenhum número natural c tal que $b = ac$.

Exemplo 3.1.1. $1|0, 2|0; 1|6, 2|6, 3|6, 6|6; 1|3, 3|3; 3 \nmid 4; 2 \nmid 5$.

Suponha que $a|b$ e seja $c \in \mathbb{N}$ tal que $b = ac$. O número natural c é chamado de *quociente* de b por a e denotado por $c = \frac{b}{a}$.

Por exemplo,

$$\frac{0}{1} = 0, \quad \frac{0}{2} = 0, \quad \frac{6}{1} = 6, \quad \frac{6}{2} = 3, \quad \frac{6}{3} = 2, \quad \frac{6}{6} = 1.$$

Note, ainda, a semelhança entre as definições da relação de divisibilidade e da relação

de ordem em \mathbb{N} :

$$a \leq b \iff \exists c \in \mathbb{N}; b = a + c,$$

$$a|b \iff \exists c \in \mathbb{N}; b = a \cdot c.$$

A divisibilidade é, portanto, a contrapartida multiplicativa em \mathbb{N} da relação de ordem (note, porém, que não vale a tricotomia para a relação de divisibilidade).

Estabeleceremos a seguir algumas propriedades da divisibilidade.

Proposição 3.1.1. *Sejam $a, b \in \mathbb{N}^*$ e $c \in \mathbb{N}$. Tem-se que*

- i) $1|c$, $a|a$ e $a|0$.
- ii) se $a|b$ e $b|c$, então $a|c$.

DEMONSTRAÇÃO: (i) Isto decorre das igualdades $c = 1 \cdot c$, $a = a \cdot 1$ e $a \cdot 0 = 0$.
(ii) $a|b$ e $b|c$ implica que existem $f, g \in \mathbb{N}$, tais que $b = a \cdot f$ e $c = b \cdot g$. Substituindo o valor de b da primeira equação na outra, obtemos

$$c = b \cdot g = (a \cdot f) \cdot g = a \cdot (f \cdot g),$$

o que nos mostra que $a|c$.

□

O item (i) da proposição acima nos diz que todo número natural é divisível por 1 e, se não nulo, por si mesmo.

Proposição 3.1.2. *Se $a, b, c, d \in \mathbb{N}$, com $a \neq 0$ e $c \neq 0$, então*

$$a|b \text{ e } c|d \implies a \cdot c|b \cdot d.$$

DEMONSTRAÇÃO: Se $a|b$ e $c|d$, então $\exists f, g \in \mathbb{N}$, $b = a \cdot f$ e $d = c \cdot g$. Portanto, $b \cdot d = (a \cdot c)(f \cdot g)$, logo, $a \cdot c|b \cdot d$.

□

Em particular, se $a|b$, então $a \cdot c|b \cdot c$, para todo $c \in \mathbb{N}^*$.

Proposição 3.1.3. *Sejam $a, b, c \in \mathbb{N}$, com $a \neq 0$, tais que $a|(b + c)$. Então*

$$a|b \iff a|c.$$

DEMONSTRAÇÃO: Como $a|(b + c)$, existe $f \in \mathbb{N}$ tal que $b + c = f \cdot a$.

Agora, se $a|b$, temos que existe $g \in \mathbb{N}$ tal que $b = a \cdot g$. Juntando as duas igualdades acima, temos

$$a \cdot g + c = f \cdot a = a \cdot f,$$

onde segue-se que $a \cdot f > a \cdot g$, e, consequentemente, $f > g$. Portanto, da igualdade acima e da Proposição 1.2.1, obtemos

$$c = a \cdot f - a \cdot g = a \cdot (f - g),$$

o que implica que $a|c$, já que $f - g \in \mathbb{N}$.

A prova da outra implicação é totalmente análoga.

□

A proposição a seguir tem uma demonstração muito semelhante à da proposição anterior e será deixada como exercício.

Proposição 3.1.4. *Sejam $a, b, c \in \mathbb{N}$, com $a \neq 0$ e $b \geq c$, tais que $a|(b - c)$. Então*

$$a|b \iff a|c.$$

Proposição 3.1.5. *Se $a, b, c \in \mathbb{N}$, com $a \neq 0$, e $x, y \in \mathbb{N}$ são tais que $a|b$ e $a|c$, então $a|(xb + yc)$; e se $xb \geq yc$, então $a|(xb - yc)$.*

DEMONSTRAÇÃO: $a|b$ e $a|c$ implicam que existem $f, g \in \mathbb{N}$ tais que $b = af$ e $c = ag$. Logo,

$$xb \pm yc = x(af) \pm y(ag) = a(xf \pm yg),$$

o que prova o resultado, pois, nas condições dadas, $xf \pm yg \in \mathbb{N}$.

□

Proposição 3.1.6. *Dados $a, b \in \mathbb{N}^*$, temos que*

$$a|b \implies a \leq b.$$

DEMONSTRAÇÃO: De fato, se $a|b$, existe $c \in \mathbb{N}^*$ tal que $b = ac$. Como, do Corolário 1 do Teorema 1.3.1, $c \geq 1$, segue-se que $a \leq ac = b$.

□

Em particular, se $a|1$, então $a \leq 1$ e, portanto, $a = 1$.

Claramente, a recíproca da Proposição 3.1.6 não é válida, pois, por exemplo, $3 \geq 2$; e, no entanto, 2 não divide 3.

Note que a relação de divisibilidade em \mathbb{N}^* é uma relação de ordem, pois

- i) é reflexiva: $\forall a \in \mathbb{N}^*$, $a|a$. (Proposição 3.1.1(i)),
- ii) é transitiva: se $a|b$ e $b|c$, então $a|c$. (Proposição 3.1.1(ii)),
- iii) é anti-simétrica: se $a|b$ e $b|a$, então $a = b$. (Segue-se da Proposição 3.1.6).

As proposições a seguir serão de grande utilidade.

Proposição 3.1.7. *Sejam $a, b, n \in \mathbb{N}$, com $a > b > 0$. Temos que $a - b$ divide $a^n - b^n$.*

DEMONSTRAÇÃO: Vamos provar isto por indução sobre n .

É óbvio que a afirmação é verdade para $n = 0$, pois $a - b$ divide $a^0 - b^0 = 0$.

Suponhamos, agora, que $a - b | a^n - b^n$. Escrevamos

$$a^{n+1} - b^{n+1} = aa^n - ba^n + ba^n - bb^n = (a - b)a^n + b(a^n - b^n).$$

Como $a - b | a - b$ e, por hipótese, $a - b | a^n - b^n$, decorre da igualdade acima e da Proposição 3.1.5 que $a - b | a^{n+1} - b^{n+1}$. Estabelecendo o resultado para todo $n \in \mathbb{N}$.

□

Proposição 3.1.8. *Sejam $a, b, n \in \mathbb{N}$, com $a + b \neq 0$. Temos que $a + b$ divide $a^{2n+1} + b^{2n+1}$.*

DEMONSTRAÇÃO: Vamos provar isto também por indução sobre n .

A afirmação é, obviamente, verdade para $n = 0$, pois $a + b$ divide $a^1 + b^1 = a + b$.

Suponhamos, agora, que $a + b | a^{2n+1} + b^{2n+1}$. Escrevamos

$$\begin{aligned} a^{2(n+1)+1} + b^{2(n+1)+1} &= a^2a^{2n+1} - b^2a^{2n+1} + b^2a^{2n+1} + b^2b^{2n+1} = \\ &(a^2 - b^2)a^{2n+1} + b^2(a^{2n+1} + b^{2n+1}). \end{aligned}$$

Como $a + b | a^2 - b^2$ e, por hipótese, $a + b | a^{2n+1} + b^{2n+1}$, decorre das igualdades acima e da Proposição 3.1.5 que $a + b | a^{2(n+1)+1} + b^{2(n+1)+1}$. Estabelecendo, assim, o resultado para todo $n \in \mathbb{N}$.

□

Proposição 3.1.9. *Sejam $a, b, n \in \mathbb{N}$, com $a \geq b > 0$. Temos que $a + b$ divide $a^{2n} - b^{2n}$.*

DEMONSTRAÇÃO: Novamente usaremos indução sobre n .

A afirmação é verdade para $n = 0$, pois $a + b$ divide $a^0 - b^0 = 0$.

Suponhamos, agora, que $a + b | a^{2n} - b^{2n}$. Escrevamos

$$\begin{aligned} a^{2(n+1)} - b^{2(n+1)} &= a^2a^{2n} - b^2a^{2n} + b^2a^{2n} - b^2b^{2n} = \\ &(a^2 - b^2)a^{2n} + b^2(a^{2n} - b^{2n}). \end{aligned}$$

Como $a + b | a^2 - b^2$ e, por hipótese, $a + b | a^{2n} - b^{2n}$, decorre das igualdades acima e da Proposição 3.1.5 que $a + b | a^{2(n+1)} + b^{2(n+1)}$. Estabelecendo, desse modo, o resultado para todo $n \in \mathbb{N}$.

□

Problemas

3.1.1 Sejam $a, c \in \mathbb{N}^*$ e $b \in \mathbb{N}$. Mostre que

$$ac|bc \iff a|b.$$

3.1.2 (ENC-98)¹ A soma de todos os múltiplos de 6 que se escrevem (no sistema decimal) com dois algarismos é:

- (A) 612 (B) 648 (C) 756 (D) 810 (E) 864

3.1.3 Com quanto zeros termina o número 100!?

- 3.1.4*** a) Mostre que o produto de i números naturais consecutivos é divisível por $i!$.
 b) Mostre que $6|n(n+1)(2n+1)$, para todo $n \in \mathbb{N}$.

3.1.5 Mostre, por indução matemática, que, para todo $n \in \mathbb{N}$,

- a) $8|3^{2n} + 7$ b) $9|10^n + 3 \cdot 4^{n+2} + 5$
 c) $9|n4^{n+1} - (n+1)4^n + 1$ d) $169|3^{3n+3} - 26n - 27$

3.1.6 Mostre que $13|2^{70} + 3^{70}$.

3.1.7 Mostre que, para todo n ,

- | | | |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| a) $9 10^n - 1$ | b) $8 3^{2n} - 1$ | c) $53 7^{4n} - 2^{4n}$ |
| d) $3 10^n - 7^n$ | e) $13 9^{2n} - 2^{4n}$ | f) $6 5^{2n+1} + 1$ |
| g) $19 3^{2n+1} + 4^{4n+2}$ | h) $17 10^{2n+1} + 7^{2n+1}$ | i) $14 3^{4n+2} + 5^{2n+1}$ |

3.1.8 Sejam $a > b \geq 0$ números naturais.

- a) Mostre que, para todo $n \in \mathbb{N}$, $n \geq 2$,

$$\frac{a^n - b^n}{a - b} = a^{n-1} + a^{n-2} \cdot b + \cdots + a \cdot b^{n-2} + b^{n-1}.$$

- b) Mostre que, para todo $n \in \mathbb{N}^*$,

$$\frac{a^{2n+1} + b^{2n+1}}{a + b} = a^{2n} - a^{2n-1} \cdot b + \cdots - a \cdot b^{2n-1} + b^{2n}.$$

- c) Mostre que, para todo $n \in \mathbb{N}^*$,

$$\frac{a^{2n} - b^{2n}}{a + b} = a^{2n-1} - a^{2n-2} \cdot b + \cdots + a \cdot b^{2n-2} - b^{2n-1}.$$

¹Exame Nacional de Cursos, MEC/INEP.

3.1.9* Para quais valores de $a \in \mathbb{N}$

- a) $a - 2|a^3 + 4?$
- b) $a + 3|a^3 - 3?$
- c) $a + 2|a^4 + 2?$
- d) $a + 2|a^4 + 2a^3 + a^2 + 1?$

3.1.10 Mostre que, para todos $a, m, n \in \mathbb{N}$,

$$m > n \implies a^{2^n} + 1|a^{2^m} - 1.$$

3.1.11* Mostre, para todo $n \in \mathbb{N}^*$, que $n^2|(n+1)^n - 1$.

3.1.12* Mostre, para todo $a \in \mathbb{N}$, que

- a) $2|a^2 - a$
- b) $3|a^3 - a$
- c) $5|a^5 - a$
- d) $7|a^7 - a$

3.1.13 Mostre que existem infinitos valores de n em \mathbb{N} para os quais $8n^2 + 5$ é divisível por 7 e por 11.

3.2 Divisão Euclidiana

Mesmo quando um número natural a não divide o número natural b , Euclides², nos seus *Elementos*, utiliza, sem enunciá-lo explicitamente, o fato de que é sempre possível efetuar a divisão de b por a , com resto. Este resultado, cuja demonstração damos abaixo, não só é um importante instrumento na obra de Euclides, como também é um resultado central da teoria.

Teorema 3.2.1 (Divisão Euclidiana). *Sejam a e b dois números naturais com $0 < a < b$. Existem dois únicos números naturais q e r tais que*

$$b = a \cdot q + r, \quad \text{com } r < a.$$

DEMONSTRAÇÃO: Suponha que $b > a$ e considere, enquanto fizer sentido, os números

$$b, b - a, b - 2a, \dots, b - n \cdot a, \dots$$

Pela Propriedade da Boa Ordem, o conjunto S formado pelos elementos acima tem um menor elemento $r = b - q \cdot a$. Vamos provar que r tem a propriedade requerida, ou seja, que $r < a$.

Se $a|b$, então $r = 0$ e nada mais temos a provar. Se, por outro lado, $a \nmid b$, então $r \neq a$, e, portanto, basta mostrar que não pode ocorrer $r > a$. De fato, se isto ocorresse, existiria

²para saber mais sobre a obra de Euclides, leia a nota histórica no final deste capítulo.

um número natural $c < r$ tal que $r = c + a$. Conseqüentemente, sendo $r = c + a = b - q \cdot a$, teríamos

$$c = b - (q + 1) \cdot a \in S, \text{ com } c < r,$$

contradição com o fato de r ser o menor elemento de S .

Portanto, temos que $b = a \cdot q + r$ com $r < a$, o que prova a existência de q e r .

Agora, vamos provar a unicidade. Note que, dados dois elementos distintos de S , a diferença entre o maior e o menor desses elementos, sendo um múltiplo de a , é pelo menos a . Logo, se $r = b - a \cdot q$ e $r' = b - a \cdot q'$, com $r < r' < a$, teríamos $r' - r \geq a$, o que acarretaria $r' \geq r + a \geq a$, absurdo. Portanto, $r = r'$

Daí segue-se que $b - a \cdot q = b - a \cdot q'$, o que implica que $a \cdot q = a \cdot q'$ e, portanto, $q = q'$.

□

Nas condições do teorema acima, os números q e r são chamados, respectivamente, de *quociente* e de *resto* da divisão de b por a .

Note que o resto da divisão de b por a é zero se, e somente se, a divide b .

Note que a demonstração do teorema fornece um algoritmo (i.e. um procedimento executável) para calcular o quociente e o resto da divisão de um número por outro, por subtrações sucessivas.

Exemplo 3.2.1. Vamos achar o quociente e o resto da divisão de 19 por 5.

Considere as diferenças sucessivas:

$$19 - 5 = 14, \quad 19 - 2 \cdot 5 = 9, \quad 19 - 3 \cdot 5 = 4 < 5.$$

Isto nos dá $q = 3$ e $r = 4$.

Aparentemente, não haveria necessidade de se provar a unicidade de q e r no Teorema 3.2.1, já que o resultado da subtração a cada passo do algoritmo é único e, portanto, r e q têm valores bem determinados. O fato é que apresentamos um método para determinar q e r , satisfazendo as condições do teorema, mas nada nos garante que, utilizando um outro método, não obteríamos outros valores para q e r ; daí a necessidade de se provar a unicidade.

Exemplo 3.2.2. Vamos mostrar aqui que o resto da divisão de 10^n por 9 é sempre 1, qualquer que seja o número natural n .

Isto será feito por indução. Para $n = 0$, temos que $10^0 = 9 \cdot 0 + 1$; portanto, o resultado vale.

Suponha, agora, o resultado válido para um dado n , isto é $10^n = 9 \cdot q + 1$. Considere a igualdade

$$10^{n+1} = 10 \cdot 10^n = (9 + 1)10^n = 9 \cdot 10^n + 10^n = 9 \cdot 10^n + 9 \cdot q + 1 = 9(10^n + q) + 1,$$

provando que o resultado vale para $n + 1$ e, consequentemente, vale para todo $n \in \mathbb{N}$.

Note que este resultado decorre também do Problema 3.1.7(a), pois lá pedia-se para mostrar que $9|10^n - 1$; portanto, sendo isso verdade, temos que $10^n - 1 = 9q$ e, consequentemente, $10^n = 9q + 1$.

Corolário. *Dados dois números naturais a e b com $1 < a \leq b$, existe um número natural n tal que*

$$na \leq b < (n+1)a.$$

DEMONSTRAÇÃO: Pela divisão euclidiana, temos que existem $q, r \in \mathbb{N}$ com $r < a$, univocamente determinados, tais que $b = a \cdot q + r$. Basta agora tomar $n = q$. □

A afirmação contida no corolário acima, feita, sem demonstração, por Euclides nos *Elementos*, é o que lhe permitia deduzir a divisão euclidiana. O corolário também nos fornece uma outra prova da Propriedade Arquimediana (Problema 2.3.2); isto é, dados $a, b \in \mathbb{N}^*$, quaisquer, existe $m \in \mathbb{N}$ tal que $ma > b$. De fato, se $a > b$, basta tomar $m = 1$. Se $a \leq b$, basta tomar $m = n + 1$ na desigualdade do corolário acima.

Exemplo 3.2.3. Dado um número natural $n \in \mathbb{N}^*$ qualquer, temos duas possibilidades:

- i) o resto da divisão de n por 2 é 0, isto é, existe $q \in \mathbb{N}$ tal que $n = 2q$; ou
- ii) o resto da divisão de n por 2 é 1, ou seja, existe $q \in \mathbb{N}$ tal que $n = 2q + 1$.

Portanto, os números naturais se dividem em duas classes, a dos números da forma $2q$ para algum $q \in \mathbb{N}$, chamados de *números pares*, e a dos números da forma $2q+1$, chamados de *números ímpares*. Os naturais são classificados em pares e ímpares, pelo menos, desde Pitágoras, 500 anos antes de Cristo.

A paridade de um número natural é o caráter do número ser par ou ímpar. É fácil determinar a paridade da soma e do produto de dois números a partir da paridade dos mesmos (veja Problema 3.2.3).

Exemplo 3.2.4. Mais geralmente, fixado um número natural $m \geq 2$, pode-se sempre escrever um número qualquer n , de modo único, na forma $n = mk + r$, onde $k, r \in \mathbb{N}$ e $r < m$.

Por exemplo, todo número natural n pode ser escrito em uma, e somente uma, das seguintes formas: $3k$, $3k + 1$, ou $3k + 2$.

Ou ainda, todo número natural n pode ser escrito em uma, e somente uma, das seguintes formas: $4k$, $4k + 1$, $4k + 2$, ou $4k + 3$.

Exemplo 3.2.5. Dados $a, n \in \mathbb{N}^*$, com $a > 2$ e ímpar, vamos determinar a paridade de $(a^n - 1)/2$.

Como a é ímpar, temos que $a^n - 1$ é par, e, portanto $(a^n - 1)/2$ é um número natural. Logo, é legítimo querer determinar a sua paridade.

Temos, pelo Problema 3.1.8(a), que

$$\frac{a^n - 1}{2} = \frac{a - 1}{2} (a^{n-1} + \cdots + a + 1).$$

Sendo a ímpar, temos que $a^{n-1} + \cdots + a + 1$ é par ou ímpar, segundo n é par ou ímpar (veja Problema 3.2.3). Portanto, a nossa análise se reduz à procura da paridade de $(a-1)/2$.

Sendo a ímpar, ele é da forma $4k+1$ ou $4k+3$. Se $a = 4k+1$, então $(a-1)/2$ é par, enquanto que, se $a = 4k+3$, então $(a-1)/2$ é ímpar.

Resumindo, temos que $(a^n - 1)/2$ é par se, e somente se, n é par ou a é da forma $4k+1$.

Exemplo 3.2.6. Vamos achar os múltiplos de 5 que se encontram entre 1 e 253. Estes são todos os múltiplos de 5 que cabem em 253. Pelo algoritmo da divisão temos que

$$253 = 5 \cdot 50 + 3,$$

ou seja, o maior múltiplo de 5 que cabe em 253 é $5 \cdot 50$, onde 50 é o quociente da divisão de 253 por 5. Portanto, os múltiplos de 5 entre 1 e 253 são

$$1 \cdot 5, 2 \cdot 5, 3 \cdot 5, \dots, 50 \cdot 5,$$

e, consequentemente, são em número de 50.

Mais geralmente, dados $a, b \in \mathbb{N}$ com $a < b$, o número de múltiplos não nulos de a menores ou iguais a b é igual ao quociente da divisão de b por a .

Problemas

3.2.1 Ache o quociente e o resto da divisão

- a) de 27 por 5. b) de 38 por 7.

3.2.2 Mostre como, usando uma calculadora que só realiza as quatro operações, pode-se efetuar a divisão euclidiana de dois números naturais em apenas três passos. Aplique o seu método para calcular o quociente e o resto da divisão de 3721056 por 18735.

3.2.3 Discuta a paridade

- a) da soma de dois números.
- b) da diferença de dois números.
- c) do produto de dois números.
- d) da potência de um número.
- e) da soma de n números ímpares.

3.2.4 a) Mostre que um número natural a é par se, e somente se, a^n é par, qualquer que seja $n \in \mathbb{N}^*$.

b) Mostre que $a^n \pm a^m$ é sempre par, quaisquer que sejam $n, m \in \mathbb{N}^*$.

c) Mostre que, se a e b são ímpares, então $a^2 + b^2$ é divisível por 2 mas não divisível por 4.

3.2.5 Quais são os números que, quando divididos por 5, deixam resto igual

a) à metade do quociente? b) ao quociente?

c) ao dobro do quociente? d) ao triplo do quociente?

3.2.6 Seja n um número natural. Mostre que um, e apenas um, número de cada terna abaixo é divisível por 3.

a) $n, n+1, n+2$ b) $n, n+2, n+4$

c) $n, n+10, n+23$ d) $n, n+1, 2n+1$

3.2.7 Mostre que

a) se n é ímpar, então $n^2 - 1$ é divisível por 8.

b) se n não é divisível por 2, nem por 3, então $n^2 - 1$ é divisível por 24.

c) $\forall n \in \mathbb{N}, 4 \nmid n^2 + 2$.

3.2.8 Sejam dados os números naturais a, m e n tais que $1 < a < m < n$.

a) Quantos múltiplos de a existem entre m e n ?

b) Quantos múltiplos de 7 existem entre 123 e 2551?

c) Quantos múltiplos de 7 existem entre 343 e 2551?

3.2.9(ENC-2000) Mostre que, se um inteiro é, ao mesmo tempo, um cubo e um quadrado, então ele é da forma $5n, 5n+1$, ou $5n+4$.

3.2.10(ENC-2000) a) Mostre que, se um número a não é divisível por 3, então a^2 deixa resto 1 na divisão por 3.

b) A partir desse fato, prove que, se a e b são inteiros tais que 3 divide $a^2 + b^2$, então a e b são divisíveis por 3.

3.2.11(ENC-2001) Seja N um número natural; prove que a divisão de N^2 por 6 nunca deixa resto 2.

3.2.12(ENC-2002) O resto da divisão do inteiro N por 20 é 8. Qual é o resto da divisão de N por 5?

3.2.13 Mostre que, se n é ímpar, então a soma de n termos consecutivos de uma PA é sempre divisível por n .

3.2.14 Ache o menor múltiplo de 5 que deixa resto 2 quando dividido por 3 e por 4.

Problemas Suplementares

3.S.1 Mostre, para todo $n \in \mathbb{N}$, que

- a) $6|n^3 + 11n$
- b) $9|4^n + 15n - 1$
- c) $3^{n+2}|10^{3n} - 1$
- d) $7|2^{3n} - 1$
- e) $8|3^{2n} + 7$
- f) $7|3^{2n+1} + 2^{n+2}$
- g) $a^2 - a + 1|a^{2n+1} + (a - 1)^{n+2}$, para todo $a \in \mathbb{N}$

3.S.2 Mostre que, se um inteiro é um quadrado e um cubo, então é da forma $7k$ ou $7k + 1$.

3.S.3* a) Mostre que um quadrado perfeito ímpar é da forma $4n + 1$.

b) Mostre que nenhum elemento da seqüência $11, 111, 1111, \dots$ é um quadrado perfeito.

3.S.4 a) Mostre que todo quadrado perfeito é da forma $5k$ ou $5k \pm 1$.

b) Com que algarismo pode terminar um quadrado perfeito?

c) Se três inteiros positivos verificam $a^2 = b^2 + c^2$, então entre eles há um múltiplo de 2 e um múltiplo de 5.

d) A soma dos quadrados de dois inteiros ímpares não pode ser um quadrado perfeito.

3.S.5 Mostre que, de n inteiros consecutivos, um, e apenas um, deles é divisível por n .

3.S.6* Um número é dito livre de quadrados se não for divisível pelo quadrado de nenhum número diferente de 1.

- a) Determine qual é o maior número de números naturais consecutivos livres de quadrados.
- b) Defina números livres de cubos e resolva o problema correspondente.

3.S.7 Seja $m \in \mathbb{N}$. Pode o número $m(m+1)$ ser a sétima potência de um número natural? (generalize).

3.S.8 Dados $a, b \in \mathbb{N}$, quantos números naturais divisíveis por b existem na seqüência $a, 2a, \dots, ba$?

3.S.9 Sejam $a, d \in \mathbb{N}^*$. Mostre que, na seqüência $a + 0d, a + d, a + 2d, a + 3d, \dots$ ou não existe nenhum quadrado ou existem infinitos quadrados.

3.3 A Aritmética na Magna Grécia

Segundo os historiadores, foi Tales de Mileto (640-546 AC) quem introduziu o estudo da Matemática na Grécia. Tales teria trazido para a Grécia os rudimentos da geometria e da aritmética que aprendera com os sacerdotes egípcios, iniciando a intensa atividade matemática que ali se desenvolveu por mais de 5 séculos.

A diferença entre a matemática dos egípcios e a dos gregos era que, para os primeiros, tratava-se de uma arte que os auxiliava em seus trabalhos de engenharia e de agrimensura,

enquanto que, com os segundos, assumia um caráter científico, dada a atitude filosófica e especulativa que os gregos tinham face à vida.

Em seguida, foram Pitágoras de Samos (580?-500? AC) e sua escola (que durou vários séculos) que se encarregaram de ulteriormente desenvolver e difundir a Matemática pela Grécia e suas colônias. A escola pitagórica atribuía aos números um poder místico, adotando a aritmética como fundamento de seu sistema filosófico. Quase nada sobrou dos escritos originais dessa fase da matemática grega, chegando até nós apenas referências e comentários feitos por outros matemáticos posteriores.

Os gregos tinham uma forte inclinação para a filosofia e a lógica, tendo isto influenciado fortemente toda a sua cultura e, em particular, o seu modo de fazer matemática. Um importante exemplo disso foi a grande influência que sobre ela exerceu Platão (429-348 AC), que, apesar de não ser matemático, nela via um indispensável treinamento para o filósofo, ressaltando a metodologia axiomático-dedutiva a ser seguida em todos os campos do conhecimento. O domínio da geometria era uma condição necessária aos aspirantes para o ingresso na sua academia. A preferência de Platão pelos aspectos mais teóricos e conceituais o fazia estabelecer uma clara diferenciação entre a ciência dos números, que chamava aritmética, e a arte de calcular, que chamava logística, a qual desprezava por ser “infantil e vulgar”.

Com toda esta herança cultural, surge por volta de 300 AC, em Alexandria, um tratado que se tornaria um dos marcos mais importantes da Matemática, *Os Elementos* de Euclides³. Pouco se sabe sobre os dados biográficos deste grande matemático, tendo chegado a nós, através de sucessivas edições, este tratado composto por treze livros, onde se encontra sistematizada a maior parte do conhecimento matemático da época.

Aparentemente, Euclides não criou muitos resultados, mas teve o mérito de estabelecer um padrão de apresentação e de rigor na Matemática jamais alcançado anteriormente, tido como o exemplo a ser seguido nos milênios que se sucederam. Dos treze livros de *Os Elementos*, dez versam sobre geometria e três, sobre aritmética. Nos três livros de aritmética, Livros VII, VIII e IX, Euclides desenvolve a teoria dos números naturais, sempre com uma visão geométrica (para ele, números representam segmentos e números ao quadrado representam áreas). No Livro VII, são definidos os conceitos de divisibilidade, de número primo, de números perfeitos, de máximo divisor comum e de mínimo múltiplo comum, entre outros. No mesmo livro, além das definições acima, todas bem postas e até hoje utilizadas, encontra-se enunciada (sem demonstração) a divisão com resto de um número natural por outro, chamada divisão euclidiana (nossa Teorema 3.2.1). Com o uso iterado desta divisão, Euclides estabelece o algoritmo mais eficiente, até hoje conhecido, para o cálculo do máximo divisor comum de dois inteiros (Proposições 1 e 2 nos *Elementos*), chamado de

³Sobre Euclides e a sua obra recomendamos a leitura de *Os Elementos de Euclides*, de João Bosco Pitombeira, Cadernos da RPM, Volume 5, N. 1, 1994; ou ainda, *Euclides, a conquista do espaço*, por Carlos Tomei, Odysseus, São Paulo, 2003.

Algoritmo de Euclides, que apresentaremos no Capítulo 5. No Livro VIII, são estudadas propriedades de seqüências de números em progressão geométrica. No Livro IX, Euclides mostra, de modo magistral, que a quantidade de números primos supera qualquer número dado; em outras palavras, existem infinitos números primos (Proposição 20 nos *Elementos*; nosso Teorema 7.2.1). Euclides também prova que todo número natural se escreve de modo essencialmente único como produto de números primos, resultado hoje chamado de Teorema Fundamental da Aritmética (Proposição 14 nos *Elementos*; nosso Teorema 7.1.1). É também provado um resultado que dá uma condição necessária para que um número natural seja perfeito (Proposição 35 em *Os Elementos*; parte de nosso Teorema 8.2.1).

Após Euclides, a aritmética estagnou por cerca de 500 anos, ressuscitando com os trabalhos de Diofanto de Alexandria, que viveu por volta de 250 DC. A obra que Diofanto nos legou chama-se *Aritmética* e foi escrita em treze volumes, dos quais apenas sete nos chegaram. Trata-se do primeiro tratado de álgebra hoje conhecido, pois a abordagem de Diofanto era totalmente algébrica, não sendo revestida de nenhuma linguagem ou interpretação geométrica, como o faziam todos os seus predecessores. A maioria dos problemas estudados por Diofanto em *Aritmética* visava encontrar soluções em números racionais, muitas vezes contentando-se em encontrar apenas uma solução, de equações algébricas com uma ou várias incógnitas.

Um dos problemas tratados por Diofanto era a resolução em números racionais, ou inteiros, da equação pitagórica $x^2 + y^2 = z^2$, chegando a descrever todas as suas soluções. Este problema teve o poder de inspirar o matemático francês Pierre Fermat mais de 1300 anos depois, traçando os rumos futuros que a Matemática iria tomar, como veremos mais adiante.

4

Representação dos Números Naturais

O sistema universalmente utilizado pelas pessoas comuns para representar os números naturais é o sistema decimal posicional. Este sistema de numeração, que é uma variante do sistema sexagesimal utilizado pelos babilônios 1700 anos antes de Cristo, foi desenvolvido na China e na Índia. Existem documentos do século VI comprovando a utilização desse sistema. Posteriormente, foi se espalhando pelo Oriente Médio, por meio das caravanas, tendo encontrado grande aceitação entre os povos árabes. A introdução do sistema decimal na Europa foi tardia por causa dos preconceitos da Idade Média. Por exemplo, num documento de 1299, os banqueiros de Florença condenavam o seu uso.

O sistema começou a ter maior difusão na Europa a partir de 1202, quando da publicação do livro *Liber Abacci*, de Fibonacci. Vários séculos se passaram para que, finalmente, esse sistema fosse adotado sem restrições pelos europeus.

Há outros sistemas de numeração em uso, notadamente os sistemas binário ou em bases potências de 2, que são correntemente usados em computação. Uma característica comum a esses sistemas de numeração é o fato de serem todos sistemas posicionais com base constante.

4.1 Sistemas de Numeração

No sistema decimal, todo número é representado por uma seqüência formada pelos algarismos

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,

acrescidos do símbolo 0 (zero), que representa a ausência de algarismo. Por serem dez os algarismos, o sistema é chamado decimal.

O sistema é também chamado posicional, pois cada algarismo, além do seu valor intrínseco, possui um peso que lhe é atribuído em função da posição que ele ocupa no número.

Esse peso, sempre uma potência de dez, varia do seguinte modo:

O algarismo da extrema direita tem peso 1; o seguinte, sempre da direita para a esquerda, tem peso dez; o seguinte tem peso cem; o seguinte tem peso mil, etc.

Portanto, os números de um a nove são representados pelos algarismos de 1 a 9, correspondentes. O número dez é representado por 10, o número cem por 100, o número mil por 1000.

Por exemplo, o número 12019, na base 10, é a representação de

$$1 \cdot 10^4 + 2 \cdot 10^3 + 0 \cdot 10^2 + 1 \cdot 10 + 9 = 1 \cdot 10^4 + 2 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10 + 9.$$

Cada algarismo de um número possui uma *ordem* contada da direita para a esquerda. Assim, no exemplo acima, o primeiro 1 que aparece¹ é de segunda ordem, enquanto que o último é de quinta ordem. O 9 é de primeira ordem, enquanto que o 2 é de quarta ordem.

Cada terna de ordens, também contadas da direita para a esquerda, forma uma *classe*. As classes são, às vezes, separadas umas das outras por meio de um ponto.

Damos a seguir os nomes das primeiras classes e ordens:

Classe das Unidades	$\left\{ \begin{array}{ll} \text{unidades} & 1^{\text{a}} \text{ ordem} \\ \text{dezenas} & 2^{\text{a}} \text{ ordem} \\ \text{centenas} & 3^{\text{a}} \text{ ordem} \end{array} \right.$
Classe do Milhar	$\left\{ \begin{array}{ll} \text{unidades de milhar} & 4^{\text{a}} \text{ ordem} \\ \text{dezenas de milhar} & 5^{\text{a}} \text{ ordem} \\ \text{centenas de milhar} & 6^{\text{a}} \text{ ordem} \end{array} \right.$
Classe do Milhão	$\left\{ \begin{array}{ll} \text{unidades de milhão} & 7^{\text{a}} \text{ ordem} \\ \text{dezenas de milhão} & 8^{\text{a}} \text{ ordem} \\ \text{centenas de milhão} & 9^{\text{a}} \text{ ordem} \end{array} \right.$

Os sistemas de numeração posicionais baseiam-se no seguinte resultado, que é uma aplicação da divisão euclidiana.

Teorema 4.1.1. *Dados $a, b \in \mathbb{N}$, com $b > 1$, existem números naturais c_0, c_1, \dots, c_n menores do que b , univocamente determinados, tais que $a = c_0 + c_1b + c_2b^2 + \dots + c_nb^n$.*

DEMONSTRAÇÃO: Vamos demonstrar o teorema usando a segunda forma do Princípio de Indução Matemática sobre a . Se $a = 0$, ou se $a = 1$, basta tomar $n = 0$ e $c_0 = a$.

Supondo o resultado válido para todo natural menor do que a , vamos prová-lo para a . Pela divisão euclidiana, existem q e r únicos tais que

$$a = bq + r, \text{ com } r < b.$$

¹Não se esqueça, sempre da direita para a esquerda.

Como $q < a$ (verifique), pela hipótese de indução, segue-se que existem números naturais n' e $d_0, d_1, \dots, d_{n'}$, com $d_j < b$, para todo j , tais que

$$q = d_0 + d_1 b + \cdots + d_{n'} b^{n'}.$$

Levando em conta as igualdades acima destacadas, temos que

$$a = bq + r = b(d_0 + d_1 b + \cdots + d_{n'} b^{n'}) + r,$$

onde o resultado segue-se pondo $c_0 = r$, $n = n' + 1$ e $c_j = d_{j-1}$ para $j = 1, \dots, n$.

A unicidade segue-se facilmente das unicidades acima estabelecidas.

□

A representação dada no teorema acima é chamada de expansão relativa à base b . Quando $b = 10$, essa expansão é chamada *expansão decimal*, e quando $b = 2$, ela toma o nome de expansão binária.

A demonstração do Teorema também nos fornece um algoritmo para determinar a expansão de um número qualquer relativamente à base b .

Trata-se de aplicar, sucessivamente, a divisão euclidiana, como segue:

$$a = bq_0 + r_0, \quad r_0 < b,$$

$$q_0 = bq_1 + r_1, \quad r_1 < b,$$

$$q_1 = bq_2 + r_2, \quad r_2 < b,$$

e assim por diante. Como $a > q_0 > q_1 > \dots$, deveremos, em um certo ponto, ter $q_{n-1} < b$ e, portanto, de

$$q_{n-1} = bq_n + r_n,$$

decorre que $q_n = 0$, o que implica $0 = q_n = q_{n+1} = q_{n+2} = \dots$, e, portanto, $0 = r_{n+1} = r_{n+2} = \dots$.

Temos, então, que

$$a = r_0 + r_1 b + \cdots + r_n b^n.$$

A expansão numa dada base b nos fornece um método para representar os números naturais. Para tanto, escolha um conjunto S de b símbolos

$$S = \{ s_0, s_1, \dots, s_{b-1} \},$$

com $s_0 = 0$, para representar os números de 0 a $b - 1$. Um número natural a na base b se escreve da forma

$$x_n x_{n-1} \dots x_1 x_0,$$

com $x_0, \dots, x_n \in S$, e n variando, dependendo de a , representando o número

$$x_0 + x_1 b + \cdots + x_n b^n.$$

No sistema decimal, isto é, de base $b = 10$, usa-se

$$S = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}.$$

Se $b \leq 10$, utilizam-se os símbolos $0, 1, \dots, b - 1$. Se $b > 10$, costuma-se usar os símbolos de 0 a 9, acrescentando novos símbolos para $10, \dots, b - 1$.

Exemplo 4.1.1. No sistema de base $b = 2$, temos que

$$S = \{0, 1\},$$

e todo número natural é representado por uma seqüência de 0 e 1. Por exemplo, o número 10 na base 2 representa o número 2 (na base 10). Temos também que

$$100 = 2^2, \quad 101 = 1 + 2^2, \quad 111 = 1 + 2 + 2^2, \quad 1011 = 1 + 2 + 2^3.$$

O sistema na base 2 é habitualmente utilizado nos computadores.

Exemplo 4.1.2. Vamos representar o número 723 na base 5.

Por divisão euclidiana sucessiva,

$$723 = 144 \cdot 5 + 3, \quad 144 = 28 \cdot 5 + 4, \quad 28 = 5 \cdot 5 + 3, \quad 5 = 1 \cdot 5 + 0, \quad 1 = 0 \cdot 5 + 1.$$

Portanto,

$$723 = 3 + 4 \cdot 5 + 3 \cdot 5^2 + 0 \cdot 5^3 + 1 \cdot 5^4,$$

e, consequentemente, 723 na base 5 se representa por 10343.

Daremos a seguir critérios de divisibilidade por 5, por 10, por 3 e por 9 para números representados na base 10.

Proposição 4.1.1. *Seja $a = r_n \cdots r_1 r_0$ um número representado no sistema decimal. Uma condição necessária e suficiente para que a seja divisível por 5 (respectivamente por 10) é que r_0 seja 0 ou 5 (respectivamente 0).*

DEMONSTRAÇÃO: Sendo $a = 10 \cdot (r_n \cdots r_1) + r_0$, temos que a é divisível por 5 se, e somente se, r_0 é divisível por 5, e, portanto, $r_0 = 0$ ou $r_0 = 5$. Por outro lado, a é divisível por 10 se, e somente se, r_0 é divisível por 10, o que somente ocorre quando $r_0 = 0$.

□

Proposição 4.1.2. Seja $a = r_n \cdots r_1 r_0$ um número representado no sistema decimal. Uma condição necessária e suficiente para que a seja divisível por 3 ou por 9 é que $r_n + \cdots + r_1 + r_0$ seja divisível por 3 ou por 9, respectivamente.

DEMONSTRAÇÃO: Temos que

$$\begin{aligned} a - (r_n + \cdots + r_1 + r_0) &= r_n 10^n + \cdots + r_1 10 + r_0 - (r_n + \cdots + r_1 + r_0) = \\ &r_n (10^n - 1) + \cdots + r_1 (10 - 1). \end{aligned}$$

Como o termo à direita nas igualdades acima é divisível por 9 (veja o Exemplo 3.2.2), temos, para algum número q , que

$$a = (r_n + \cdots + r_1 + r_0) + 9q,$$

de onde segue-se o resultado, em virtude das Proposições 3.1.3 e 3.1.4.

□

Exemplo 4.1.3. O Nove Misterioso. Peça para alguém escolher, em segredo, um número natural com, pelo menos, três algarismos (no sistema decimal, é claro). Peça, ainda, para que efetue uma permutação qualquer dos seus algarismos, obtendo um novo número, e que subtraia o menor do maior dos dois números. Finalmente, peça ao seu parceiro de jogo para reter um dos algarismos diferente de zero desse novo número e divulgar os restantes. É possível adivinhar o algarismo retido!

Vamos desvendar o mistério. Seja $a = r_n \cdots r_1 r_0$ o número secreto e seja a' o número obtido pela permutação dos algarismos de a . Pela demonstração da Proposição 4.1.2 sabemos que existem $q, q' \in \mathbb{N}$ tais que

$$a = (r_n + \cdots + r_1 + r_0) + 9q \quad \text{e} \quad a' = (r_n + \cdots + r_1 + r_0) + 9q'.$$

Logo, a diferença entre o maior e o menor desses números é divisível por 9. Portanto, para adivinhar o algarismo que falta, basta descobrir, dentre os números de 1 a 9, quanto devemos somar à soma dos algarismos divulgados para que o resultado seja divisível por 9.

A exclusão do zero no algarismo retido é para eliminar uma possível ambigüidade que ocorre quando a soma dos algarismos divulgados seja já múltiplo de 9; neste caso, o algarismo escondido tanto poderia ser o nove quanto o zero.

A representação binária tem peculiaridades interessantes, como veremos a seguir. Inicialmente extraímos um corolário imediato do Teorema 4.1.1.

Corolário. Todo número natural se escreve de modo único como soma de potências distintas de 2.

Determinar a expansão binária de um número a é ainda mais fácil do que determinar a sua expansão relativa a um número $b \neq 2$.

De fato, escreve-se a lista de números começando com a , seguido pelo quociente q_0 da divisão de a por 2, seguido pelo quociente q_1 da divisão de q_0 por 2, seguido pelo quociente q_2 da divisão de q_1 por 2, etc. (Note que a divisão por 2 é tão fácil que pode ser feita mentalmente.)

Na divisão euclidiana sucessiva, temos que, se a é ímpar, então $r_0 = 1$; caso contrário, $r_0 = 0$; temos $r_1 = 1$ se q_0 é ímpar, e $r_1 = 0$, caso contrário. Em geral, $r_{i+1} = 1$ se q_i é ímpar, e $r_{i+1} = 0$, caso contrário. Até encontrarmos $q_{n-1} = 1$, quando colocamos $r_n = 1$. Segue-se, portanto, que

$$a = r_0 + r_1 \cdot 2 + \cdots + r_n \cdot 2^n.$$

Exemplo 4.1.4. O método acima, para determinar expansões binárias, permite desenvolver um algoritmo utilizado pelos antigos egípcios para calcular o produto de dois números usando apenas multiplicações e divisões por 2, além de adições. Este método tem a vantagem de apenas necessitar do conhecimento da tabuada do 2.

De fato, para efetuar a multiplicação de a por b , escreve-se a como soma de potências de 2:

$$a = r_0 + r_1 2 + \cdots + r_n 2^n,$$

com cada r_i zero ou um. Logo,

$$a \cdot b = r_0 \cdot b + r_1 \cdot 2b + \cdots + r_n \cdot 2^n b.$$

Escrevem-se duas colunas de números, uma ao lado da outra, onde, na coluna da esquerda, colocam-se, um em cada linha, os números $a, q_0, q_1, \dots, q_{n-1}$ ($= 1$) (como descritos acima) e, na coluna da direita, também um em cada linha, os números $b, 2b, 4b, \dots, 2^n b$. Como a paridade do elemento da coluna da esquerda na linha $i - 1$ determina se $r_i = 0$ ou $r_i = 1$, quando somarmos os elementos da coluna da direita que correspondem a elementos ímpares da coluna da esquerda, obteremos $a \cdot b$.

Vejamos um exemplo. Vamos multiplicar 523 por 37.

$$\begin{array}{r}
 37 \\
 18 \\
 9 \\
 4 \\
 2 \\
 1
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{r}
 523 \\
 1046 \\
 2092 \\
 4184 \\
 8368 \\
 16736
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 + \\
 + \\
 + \\
 + \\
 +
 \end{array}$$

Portanto,

$$37 \cdot 523 = 523 + 2092 + 16736 = 19351$$

Exemplo 4.1.5. O Problema da Moeda Falsa.

Vamos generalizar a solução do problema da moeda falsa, que discutimos no Exemplo 2.4.3, para um número arbitrário de moedas.

Seja m o número total de moedas, das quais uma é falsa. Escrevamos a expansão binária de m :

$$m = 2^{n_1} + 2^{n_2} + \cdots + 2^{n_r}.$$

Vamos mostrar que n_1 pesagens são suficientes para descobrir a moeda falsa. A demonstração será feita usando a segunda forma do Princípio de Indução sobre n_1 .

Suponha $n_1 = 1$, ou seja, temos, no máximo, três moedas. Pondo uma moeda em cada prato da balança, descobre-se imediatamente a moeda falsa e, portanto, o resultado é trivialmente verificado. Suponha o resultado verdadeiro para todo $n' < n_1$.

Sejam agora $2^{n_1} + 2^{n_2} + \cdots + 2^{n_r}$ moedas, das quais uma é falsa. Separemos as moedas em 2 lotes com, respectivamente, 2^{n_1} e $2^{n_2} + \cdots + 2^{n_r}$ moedas cada um. Começamos analisando o primeiro lote com 2^{n_1} moedas. Se a moeda falsa está neste lote, com o método discutido no Capítulo 2, sabemos que podemos descobrir a moeda falsa com, no máximo, n_1 pesagens. Se este lote não contém a moeda falsa, descobrimos isto com apenas uma pesagem (põe-se metade das moedas do lote em cada prato; se a balança se equilibrar, a moeda falsa não se encontra aí) e descartamos o lote todo. Sobram, então, $2^{n_2} + \cdots + 2^{n_r}$ moedas a serem analisadas. Pela hipótese de indução, bastam n_2 pesagens para descobrir a moeda falsa, que, juntamente com a pesagem já realizada, perfazem um total de $n_2 + 1$ pesagens que certamente é menor ou igual do que n_1 .

Problemas

4.1.1 Mostre que, na base 10, o algarismo das unidades de um quadrado perfeito só pode ser 0, 1, 4, 5, 6 ou 9.

4.1.2 Um certo número de três algarismos na base 10 aumenta de 36 se permutarmos os dois algarismos da direita, e diminui de 270 se permutarmos os dois algarismos da esquerda. O que acontece ao número se permutarmos os dois algarismos extremos?

4.1.3 [Critério de divisibilidade por uma potência de 2] Seja dado um número a , representado na base 10 por $a = a_n a_{n-1} \dots a_0$. Usando o fato de que $2^k | 10^k$, mostre que 2^k divide a se, e somente se, o número $a_{k-1} \dots a_1 a_0$ é divisível por 2^k . Em particular, a é divisível por 2 se, e somente se, a_0 é 0, 2, 4, 6 ou 8; também, a é divisível por 4 se, e somente se, $a_1 a_0$ é divisível por 4.

4.1.4 Escolha um número abc de três algarismos no sistema decimal, de modo que os algarismos das centenas a e o das unidades c difiram de, pelo menos, duas unidades. Considere os números abc e cba e subtraia o menor do maior, obtendo o número xyz . A soma de xyz com zyx vale 1089. Justifique este fato.

- 4.1.5** Seja dado o número 4783 na base 10; escreva-o nas seguintes bases: 2, 3, 4, 7, 12 e 15.
- 4.1.6** O número 3416 está na base 7; escreva-o nas bases 5 e 12.
- 4.1.7** Um número na base 10 escreve-se 37; em que base escrever-se-á 52?
- 4.1.8** Considere 73 na base 10; em que base ele se escreverá 243?
- 4.1.9** Escreva a tabuada na base 5. Use-a para calcular $132 + 413$ e $23 \cdot 342$.
- 4.1.10** Utilize o método dos antigos egípcios para calcular $527 \cdot 72$.

4.2 Jogo de Nim

Trata-se de um antigo jogo chinês de palitos jogado por duas pessoas. Este jogo foi objeto, em 1901, de um artigo científico na prestigiosa revista *Annals of Mathematics*, de autoria de C.L. Bouton, mostrando que há uma estratégia que, se adotada pelo jogador que inicia o jogo, ele sempre ganhará.

Há várias versões deste jogo, cada uma com uma estratégia própria.

VARIANTE 1 Dispõe-se sobre uma mesa um certo número N de palitos. Estipula-se que cada jogador, na sua vez, possa retirar, no mínimo, 1 palito e, no máximo, n palitos, com $n > 1$. Supõe-se, ainda, que nem N nem $N - 1$ sejam múltiplos de $n + 1$. Perde o jogador que retirar o último palito. A estratégia para que o primeiro jogador ganhe sempre é descrita a seguir.

Seja q o quociente e r o resto da Divisão Euclidiana de N por $n + 1$. Por hipótese, tem-se que $r > 1$. Divida mentalmente os palitos em q grupos de $n + 1$ palitos mais um grupo com $r - 1$ palitos, restando ainda um palito. O jogador que começa retira esses $r - 1$ palitos. O segundo jogador, ao retirar de 1 a n palitos, deixará o primeiro jogador na situação confortável de retirar o que sobra no primeiro grupo de $n + 1$ palitos. Isto se repete para cada grupo de $n + 1$ palitos, fazendo que, no final, sobre 1 palito na vez do segundo jogador, provocando a sua derrota.

Faça um experimento com $N = 34$ e $n = 3$.

VARIANTE 2 Da mesma forma que a variante anterior, dispõe-se sobre uma mesa um certo número N de palitos e estipula-se que cada jogador, na sua vez, possa retirar, no mínimo, 1 palito e, no máximo, um número n pré-fixado de palitos, com $n > 1$. Supõe-se, ainda, que N não seja múltiplo de $n + 1$. Ganza o jogador que retirar o último palito. Vamos descrever a nova estratégia para que o primeiro jogador ganhe sempre.

¹O leitor interessado poderá ler mais sobre esse jogo na Revista do Professor de Matemática, N^º 6.

Seja q o quociente e r o resto da Divisão Euclidiana de N por $n + 1$. Por hipótese, tem-se que $1 \leq r \leq n$. Divilda mentalmente os palitos em q grupos de $n + 1$ palitos mais um grupo com r palitos. O jogador que começa retira os r palitos. O segundo jogador, ao retirar de 1 a n palitos, deixará o primeiro jogador na situação confortável de retirar o que sobra no primeiro grupo de $n + 1$ palitos. Isto se repete para cada grupo de $n + 1$ palitos, fazendo sempre com que, depois do segundo jogador realizar a sua jogada, sobre no grupo um número tal de palitos que possam ser retirados de uma só vez pelo primeiro jogador, levando-o à vitória.

A seguir, discutiremos uma variante mais complexa do jogo.

VARIANTE 3 Dispõe-se sobre uma mesa 15 palitos separados em três grupos, de 3, 5 e 7 palitos, respectivamente (pode-se generalizar o jogo com três grupos com número arbitrário, porém, distinto de palitos).

||| ||||| |||||

Cada jogador, na sua vez, deve retirar um número qualquer de palitos de um, e de apenas um, dos grupos. Os jogadores se alternam e quem retirar o último palito ganha o jogo.

Vamos estabelecer uma estratégia de tal modo que, quem iniciar a partida fazendo uma boa abertura e seguindo certas regras, sempre vencerá.

Para isto, a cada jogada, escreve-se o número de palitos de cada grupo na base 2, colocando-os um em cada linha, de modo que os algarismos das unidades se correspondam. Por exemplo, no início da partida tem-se

Grupo 1	11
Grupo 2	101
Grupo 3	111

Somando os três números acima como se fosse na base 10, obtemos o número 223, que chamaremos, a cada etapa, de chave do jogo. O primeiro jogador poderá, então, com uma jogada, tornar todos os algarismos da chave pares. Por exemplo, poderá retirar um palito do grupo 3, obtendo

Grupo 1	11
Grupo 2	101
Grupo 3	110
<hr/>	
222	

Agora, qualquer jogada que o segundo jogador efetue transformará a chave 222 numa chave com, pelo menos, um algarismo ímpar, o que, mediante uma jogada conveniente, poderá ser recolocado na situação de ter todos os algarismos pares.

Uma situação em que todos os algarismos da chave são pares será chamada de posição segura, enquanto que, quando pelo menos um dos algarismos da chave é ímpar, será uma posição insegura.

Pode-se mostrar que, de uma posição segura, qualquer que seja a jogada, só se pode chegar a uma posição insegura. Mostra-se também que, de uma posição insegura, pode-se, com uma jogada conveniente, sempre retornar a uma posição segura. Como 000 é uma posição segura, ganhará o jogo quem sempre se mantiver em posições seguras.

Problemas

4.2.1 Demonstre que as afirmações feitas na variante 3 do jogo de Nim são verdadeiras.

4.2.2 Determine, em cada caso apresentado abaixo, se a posição é segura ou insegura.

- a) || | |
- b) ||| | | | |
- c) ||| | | |
- d) | | |

5

Algoritmo de Euclides

Os conceitos e resultados contidos neste capítulo encontram-se, em sua maioria, no Livro VII dos *Elementos* de Euclides. É notável a sua atualidade, apesar dos quase dois milênios e meio que nos separam de sua criação.

5.1 Máximo Divisor Comum

Dados dois números naturais a e b , não simultaneamente nulos, diremos que o número natural $d \in \mathbb{N}^*$ é um *divisor comum* de a e b se $d|a$ e $d|b$.

Por exemplo, os números 1, 2, 3 e 6 são os divisores comuns de 12 e 18.

A definição que se segue é exatamente a definição dada por Euclides nos *Elementos* e se constitui em um dos pilares da sua aritmética.

Diremos que d é um *máximo divisor comum* (mdc) de a e b se possuir as seguintes propriedades:

- i) d é um divisor comum de a e de b , e
- ii) d é divisível por todo divisor comum de a e b .

A condição (ii) acima pode ser reenunciada como se segue:

ii') Se c é um divisor comum de a e b , então $c|d$.

Portanto, se d é um mdc de a e b e c é um divisor comum desses números, então $c \leq d$. Isto nos mostra que o máximo divisor comum de dois números é efetivamente o maior dentre todos os divisores comuns desses números.

Em particular, isto nos mostra que, se d e d' são dois mdc de um mesmo par de números, então $d \leq d'$ e $d' \leq d$, e, consequentemente, $d = d'$. Ou seja, o mdc de dois números, quando existe, é único.

O mdc de a e b , quando existe (veremos mais adiante que sempre existe o mdc de dois números naturais não simultaneamente nulos), será denotado por (a, b) . Como o mdc de a

e b não depende da ordem em que a e b são tomados, temos que

$$(a, b) = (b, a).$$

Em alguns casos particulares, é facil verificar a existência do mdc. Por exemplo, se a e b são números naturais, tem-se claramente que $(0, a) = a$, $(1, a) = 1$ e que $(a, a) = a$. Mais ainda, temos que

$$a|b \iff (a, b) = a. \quad (5.1)$$

De fato, se $a|b$, temos que a é um divisor comum de a e b , e, se c é um divisor comum de a e b , então c divide a , o que mostra que $a = (a, b)$.

Reciprocamente, se $(a, b) = a$, segue-se que $a|b$.

A demonstração da existência do mdc de qualquer par de números naturais, não ambos nulos, é bem mais sutil. Poder-se-ia, como se faz usualmente no Ensino Fundamental, definir o máximo divisor comum de dois números a e b como sendo o maior elemento do conjunto de todos os divisores comuns desses números, o que de imediato garantiria a sua existência. De qualquer modo, seria necessário provar a propriedade (ii) da definição de mdc, pois é ela que possibilita provar os resultados subsequentes, e não o fato do mdc ser o maior dos divisores comuns.

Para provar a existência do máximo divisor comum, Euclides utiliza, essencialmente, o resultado abaixo.

Lema 5.1.1 (Lema de Euclides). *Sejam $a, b, n \in \mathbb{N}$ com $a < na < b$. Se existe $(a, b - na)$, então (a, b) existe e*

$$(a, b) = (a, b - na).$$

DEMONSTRAÇÃO: Seja $d = (a, b - na)$. Como $d|a$ e $d|(b - na)$, segue que d divide $b = b - na + na$. Logo, d é um divisor comum de a e b . Suponha agora que c seja um divisor comum de a e b ; logo, c é um divisor comum de a e $b - na$ e, portanto, $c|d$. Isso prova que $d = (a, b)$.

□

Observação 5.1.1 Com a mesma técnica usada na prova do Lema de Euclides, poder-se-ia provar que, para todos $a, b, n \in \mathbb{N}$,

$$(a, b) = (a, b + na),$$

ou que, se $na > b$, então

$$(a, b) = (a, na - b).$$

O Lema de Euclides é efetivo para calcular mdc, conforme veremos nos exemplos a seguir, e será fundamental para estabelecermos o algoritmo de Euclides, que permitirá, com muita eficiência, calcular o mdc de dois números naturais quaisquer.

Exemplo 5.1.1. Dados $a, m \in \mathbb{N}$ com $a > 1$, temos que

$$\left(\frac{a^m - 1}{a - 1}, a - 1 \right) = (a - 1, m).$$

De fato, chamando de d o primeiro membro da igualdade, temos, pelo Problema 3.1.8(a), que

$$\begin{aligned} d &= (a^{m-1} + a^{m-2} + \cdots + a + 1, a - 1) = \\ &= ((a^{m-1} - 1) + (a^{m-2} - 1) + \cdots + (a - 1) + m, a - 1). \end{aligned}$$

Como, pela Proposição 3.1.7, temos que

$$a - 1 | (a^{m-1} - 1) + (a^{m-2} - 1) + \cdots + (a - 1),$$

segue-se que $(a^{m-1} - 1) + (a^{m-2} - 1) + \cdots + (a - 1) = n(a - 1)$ para algum $n \in \mathbb{N}$, e, portanto, pela Observação 5.1.1, tem-se que

$$d = (n(a - 1) + m, a - 1) = (a - 1, n(a - 1) + m) = (a - 1, m).$$

Exemplo 5.1.2. Vamos, neste exemplo, determinar os valores de a e n para os quais $a + 1$ divide $a^{2n} + 1$.

Note inicialmente que

$$a + 1 | a^{2n} + 1 \iff (a + 1, a^{2n} + 1) = a + 1.$$

Como $a^{2n} + 1 = (a^{2n} - 1) + 2$, e $a + 1 | a^{2n} - 1$ (veja Proposição 3.1.9), segue-se, pela Observação 5.1.1, que para todo n ,

$$(a + 1, a^{2n} + 1) = (a + 1, (a^{2n} - 1) + 2) = (a + 1, 2).$$

Portanto, $a + 1 | a^{2n} + 1$, para algum $n \in \mathbb{N}$, se, e somente se, $a + 1 = (a + 1, 2)$, o que ocorre se, e somente se, $a = 0$ ou $a = 1$.

Exemplo 5.1.3. Vamos, neste exemplo, determinar os valores de a e n para os quais $a + 1$ divide $a^{2n+1} - 1$.

Note que

$$(a + 1, a^{2n+1} - 1) = (a + 1, a(a^{2n} - 1) + a - 1) = (a + 1, a - 1).$$

Portanto, $a + 1 | a^{2n+1} - 1$, para algum $n \in \mathbb{N}$, se, e somente se,

$$a + 1 = (a + 1, a^{2n+1} - 1) = (a + 1, a - 1),$$

o que ocorre se, e somente se, $a = 1$.

Algoritmo de Euclides

A seguir, apresentaremos a prova construtiva da existência do mdc dada por Euclides (Os Elementos, Livro VII, Proposição 2). O método, chamado de *Algoritmo de Euclides*, é um primor do ponto de vista computacional e pouco conseguiu-se aperfeiçoá-lo em mais de dois milênios.

Dados $a, b \in \mathbb{N}$, podemos supor $a \leq b$. Se $a = 1$ ou $a = b$, ou ainda $a|b$, já vimos que $(a, b) = a$. Suponhamos, então, que $1 < a < b$ e que $a \nmid b$. Logo, pela divisão euclidiana, podemos escrever

$$b = aq_1 + r_1, \quad \text{com } r_1 < a.$$

Temos duas possibilidades:

a) $r_1|a$, e, em tal caso, por (5.1) e pelo Lema 5.1.1,

$$r_1 = (a, r_1) = (a, b - q_1a) = (a, b),$$

e termina o algoritmo, ou

b) $r_1 \nmid a$, e, em tal caso, podemos efetuar a divisão de a por r_1 , obtendo

$$a = r_1q_2 + r_2, \quad \text{com } r_2 < r_1.$$

Novamente, temos duas possibilidades:

a') $r_2|r_1$, e, em tal caso, novamente, por (5.1) e pelo Lema 5.1.1,

$$r_2 = (r_1, r_2) = (r_1, a - q_2r_1) = (r_1, a) = (b - q_1a, a) = (b, a) = (a, b),$$

e paramos, pois termina o algoritmo, ou

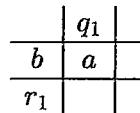
b') $r_2 \nmid r_1$, e, em tal caso, podemos efetuar a divisão de r_1 por r_2 , obtendo

$$r_1 = r_2q_3 + r_3, \quad \text{com } r_3 < r_2.$$

Este procedimento não pode continuar indefinidamente, pois teríamos uma seqüência de números naturais $a > r_1 > r_2 > \dots$ que não possui menor elemento, o que não é possível pela Propriedade da Boa Ordem. Logo, para algum n , temos que $r_n|r_{n-1}$, o que implica que $(a, b) = r_n$.

O algoritmo acima pode ser sintetizado e realizado na prática, como mostramos a seguir.

Inicialmente, efetuamos a divisão $b = aq_1 + r_1$ e colocamos os números envolvidos no seguinte diagrama:



A seguir, continuamos efetuando a divisão $a = r_1 q_2 + r_2$ e colocamos os números envolvidos no diagrama

	q_1	q_2
b	a	r_1
r_1	r_2	

Prosseguindo, enquanto for possível, teremos

	q_1	q_2	q_3	\cdots	q_{n-1}	q_n	q_{n+1}
b	a	r_1	r_2	\cdots	r_{n-2}	r_{n-1}	$r_n = (a, b)$
r_1	r_2	r_3	r_4	\cdots	r_n		

Exemplo 5.1.4. Calculemos o mdc de 372 e 162:

	2	3	2	1	2
372	162	48	18	12	6
48	18	12	6		

Observe que, no exemplo acima, o Algoritmo de Euclides nos fornece:

$$6 = 18 - 1 \cdot 12$$

$$12 = 48 - 2 \cdot 18$$

$$18 = 162 - 3 \cdot 48$$

$$48 = 372 - 2 \cdot 162$$

Donde se segue que

$$6 = 18 - 1 \cdot 12 = 18 - 1 \cdot (48 - 2 \cdot 18) = 3 \cdot 18 - 48 =$$

$$3 \cdot (162 - 3 \cdot 48) - 48 = 3 \cdot 162 - 10 \cdot 48 =$$

$$3 \cdot 162 - 10 \cdot (372 - 2 \cdot 162) = 23 \cdot 162 - 10 \cdot 372.$$

Temos, então, que

$$(372, 162) = 6 = 23 \cdot 162 - 10 \cdot 372.$$

Note que conseguimos, através do uso do Algoritmo de Euclides, de trás para frente, escrever $6 = (372, 162)$ como múltiplo de 162 menos um múltiplo de 372.

O Algoritmo de Euclides nos fornece, portanto, um meio prático de escrever o mdc de dois números como diferença entre dois múltiplos dos números em questão. Esta é uma propriedade geral do mdc que redemonstraremos com todo rigor na próxima seção.

Problemas

5.1.1 Para cada par de números naturais a e b dados abaixo, ache (a, b) e determine números naturais m e n tais que

$$(a, b) = na - mb \text{ ou } (a, b) = mb - na.$$

- a) 637 e 3887
- b) 648 e 1218
- c) 551 e 874
- d) 7325 e 8485
- e) 987654321 e 123456789

5.1.2 Seja $n \in \mathbb{N}$. Mostre que

- a) $(n, 2n + 1) = 1$
- b) $(n + 1, n^2 + n + 1) = 1$
- c) $(2n + 1, 9n + 4) = 1$
- d) $(n! + 1, (n + 1)! + 1) = 1$

5.1.3 Mostre que $(a, a + b)|b$, quaisquer que sejam $a, b \in \mathbb{N}$.

5.1.4 Dados $a, m \in \mathbb{N}$ com $a \geq 1$, mostre que

$$\text{a) } \left(\frac{a^{2m} - 1}{a + 1}, a + 1 \right) = (a + 1, 2m) \quad \text{b) } \left(\frac{a^{2m+1} + 1}{a + 1}, a + 1 \right) = (a + 1, 2m + 1)$$

5.1.5 Calcule

$$\text{a) } \left(\frac{2^{40} + 1}{2^8 + 1}, 2^8 + 1 \right) \quad \text{b) } \left(\frac{2^{50} + 1}{2^{10} + 1}, 2^{10} + 1 \right)$$

5.1.6 Um prédio possui duas escadarias, uma delas com 1000 degraus e a outra com 800 degraus. Sabendo que os degraus das duas escadas só estão no mesmo nível quando conduzem a um andar, descubra quantos andares tem o prédio.

5.2 Propriedades do mdc

Sejam $a, b \in \mathbb{N}^*$. Definimos o conjunto

$$J(a, b) = \{x \in \mathbb{N}^*; \exists u, v \in \mathbb{N}, x = ua - vb\}.$$

Por definição, temos que

$$J(b, a) = \{y \in \mathbb{N}^*; \exists u, v \in \mathbb{N}, y = vb - ua\}.$$

Lema 5.2.1. Tem-se que

$$J(a, b) = J(b, a) \neq \emptyset.$$

DEMONSTRAÇÃO: Inicialmente, mostraremos que os dois conjuntos são iguais. Pelo caráter simétrico do resultado com relação a a e b , basta mostrar que $J(a, b) \subset J(b, a)$.

Seja $x \in J(a, b)$, então $x = ua - vb$ com $u, v \in \mathbb{N}$. Pela Propriedade Arquimediana (veja Problema 2.3.2), existem números naturais $\lambda, \mu \in \mathbb{N}$ tais que $\lambda a > v$ e $\mu b > u$. Tomando $\rho = \max\{\lambda, \mu\}$, tem-se que $\rho a > v$ e $\rho b > u$. Portanto,

$$x = ua - vb = (\rho a - v)b - (\rho b - u)a \in J(b, a).$$

Agora, note que $a \in J(a, b)$ e, portanto, $J(a, b) \neq \emptyset$.

□

O resultado acima e a Propriedade da Boa Ordem garantem que existe $\min J(a, b)$.

Teorema 5.2.1. *Sejam $a, b \in \mathbb{N}^*$ e seja $d = \min J(a, b)$. Tem-se que*

- i) d é o mdc de a e b ii) $J(a, b) = \{nd; n \in \mathbb{N}\}$.

DEMONSTRAÇÃO: (i) Suponha que c divida a e b ; logo, c divide todos os números naturais da forma $ua - vb$; portanto, divide todos os elementos de $J(a, b)$, e, consequentemente, $c|d$.

Vamos agora mostrar que d divide todos os elementos de $J(a, b)$. Seja $x \in J(a, b)$ e suponha, por absurdo, que $d \nmid x$. Logo, pela Divisão Euclidiana,

$$x = dq + r, \text{ com } 0 < r < d.$$

Como $x = ua - vb$ e $d = mb - na$, para alguns $u, v, m, n \in \mathbb{N}$, segue-se que

$$r = (u + qn)a - (v + qm)b \in J(a, b),$$

o que é um absurdo, pois $d = \min J(a, b)$ e $r < d$. Em particular, $d|a$ e $d|b$.

(ii) Dado que $ld = l(na - mb) = (ln)a - (lm)b \in J(a, b)$, é claro que

$$\{ld; l \in \mathbb{N}\} \subset J(a, b),$$

Por outro lado, já provamos que todo $x \in J(a, b)$ é tal que $d|x$, e, portanto,

$$J(a, b) \subset \{ld; l \in \mathbb{N}\}.$$

□

O Teorema acima nos dá uma outra demonstração da existência do mdc de dois números. Note que essa demonstração, ao contrário da prova de Euclides, não é construtiva, no sentido de que não nos fornece nenhum meio prático para achar o mdc dos dois números.

Corolário 1. *Quaisquer que sejam $a, b, n \in \mathbb{N}^*$, $(na, nb) = n(a, b)$.*

DEMONSTRAÇÃO: Note inicialmente que

$$J(na, nb) = nJ(a, b) = \{nx; x \in J(a, b)\}.$$

Agora, o resultado segue-se do teorema e do fato de que

$$\min nJ(a, b) = n \min J(a, b).$$

□

Corolário 2. *Dados $a, b \in \mathbb{N}$, tem-se que $\left(\frac{a}{(a, b)}, \frac{b}{(a, b)}\right) = 1$.*

DEMONSTRAÇÃO: Pelo Corolário 1, temos que

$$(a, b) \left(\frac{a}{(a, b)}, \frac{b}{(a, b)} \right) = \left((a, b) \frac{a}{(a, b)}, (a, b) \frac{b}{(a, b)} \right) = (a, b),$$

o que prova o resultado.

□

Dois números naturais a e b serão ditos *primos entre si*, ou *coprimos*, se $(a, b) = 1$; ou seja, se o único divisor comum de ambos é 1.

Proposição 5.2.1. *Dois números naturais a e b são primos entre si se, e somente se, existem números naturais n e m tais que $na - mb = 1$.*

DEMONSTRAÇÃO: Suponha que a e b são primos entre si. Logo, $(a, b) = 1$. Como, pelo Teorema 5.2.1, temos que existem números naturais n e m tais que $na - mb = (a, b) (= 1)$, segue-se a primeira parte da proposição.

Reciprocamente, suponha que existam números naturais n e m tais que $na - mb = 1$. Se $d = (a, b)$, temos que $d|(na - mb)$, o que mostra que $d|1$, e, portanto, $d = 1$.

□

A Proposição 5.2.1 estabelece uma crucial relação entre as estruturas aditiva e multiplicativa dos números naturais, o que permitirá provar, entre vários outros resultados, o importante teorema a seguir.

Teorema 5.2.2. *Sejam a, b e c números naturais. Se $a|b \cdot c$ e $(a, b) = 1$, então $a|c$.*

DEMONSTRAÇÃO: Se $a|b \cdot c$, então existe $e \in \mathbb{N}$ tal que $bc = ae$.

Se $(a, b) = 1$, então, pela Proposição 5.2.1, temos que existem $m, n \in \mathbb{N}$ tais que

$$na - mb = 1.$$

Multiplicando por c ambos os lados da igualdade acima, temos que

$$c = nac - mbc.$$

Substituindo bc por ae nesta última igualdade, temos que

$$c = nac - mae = a(nc - me)$$

e, portanto, $a|c$. □

Corolário. Dados $a \in \mathbb{N}$ e $b, c \in \mathbb{N}^*$, temos que

$$b|a \text{ e } c|a \iff \frac{bc}{(b, c)}|a.$$

DEMONSTRAÇÃO: De fato, temos que $a = nb = mc$ para alguns $n, m \in \mathbb{N}$. Logo,

$$n \frac{b}{(b, c)} = m \frac{c}{(b, c)}.$$

Como $\left(\frac{b}{(b, c)}, \frac{c}{(b, c)}\right) = 1$, segue-se que $\frac{b}{(b, c)}|m$, o que implica que $c \frac{b}{(b, c)}|cm$. Como $cm = a$, o resultado se segue. □

A noção de mdc pode ser generalizada como se segue.

Um número natural d será dito mdc de dados números naturais a_1, \dots, a_n se possuir as seguintes propriedades:

- i) d é um divisor comum de a_1, \dots, a_n .
- ii) Se c é um divisor comum de a_1, \dots, a_n , então $c|d$.

O mdc, quando existe, é certamente único e será representado por

$$(a_1, \dots, a_n).$$

Proposição 5.2.2. Dados números naturais a_1, \dots, a_n , existe o seu mdc e

$$(a_1, \dots, a_n) = (a_1, \dots, (a_{n-1}, a_n)).$$

DEMONSTRAÇÃO: Vamos provar a proposição por indução sobre n (≥ 2). Para $n = 2$, sabemos que o resultado é válido. Suponha que o resultado vale para n . Para provar que o resultado é válido para $n + 1$, basta mostrar que

$$(a_1, \dots, a_n, a_{n+1}) = (a_1, \dots, (a_n, a_{n+1})),$$

pois isso provará também a existência.

Seja $d = (a_1, \dots, (a_n, a_{n+1}))$. Logo, $d|a_1, \dots, d|a_{n-1}$ e $d|(a_n, a_{n+1})$. Portanto, $d|a_1, \dots, d|a_{n-1}, d|a_n$ e $d|a_{n+1}$.

Por outro lado, seja c um divisor comum de a_1, \dots, a_n, a_{n+1} ; logo, c é um divisor comum de a_1, \dots, a_{n-1} e (a_n, a_{n+1}) ; e, portanto, $c|d$.

□

Para calcular o número (a_1, \dots, a_n) , pode-se usar recursivamente o Algoritmo de Euclides.

Problemas

5.2.1 Mostre que, se $(a, b) = 1$, $a|c$ e $b|c$, então $a \cdot b|c$.

5.2.2 a) Mostre que, se $(a, b) = 1$, então $(a \cdot c, b) = (c, b)$.

b) Mostre que $(a \cdot c, b) = 1$ se, e somente se, $(a, b) = (c, b) = 1$.

5.2.3 Suponha que $(a, b) = (a, d) = (c, b) = (c, d) = 1$.

a) Mostre que $(a \cdot c, b \cdot d) = 1$.

b) Mostre que $(a^n, b^m) = 1$, $\forall n, m \in \mathbb{N}$.

c) Mostre que, se $a > b$ e $n \in \mathbb{N}$, então $(a + b, b^n) = (a - b, b^n) = 1$.

5.2.4 a) Mostre que, se n é ímpar, $n(n^2 - 1)$ é divisível por 24.

b) Mostre que 24 divide $n(n^2 - 1)(3n + 2)$ para todo $n \in \mathbb{N}$.

5.2.5* a) Mostre que $n^5 - n$ é divisível por 30.

b) Mostre que n^5 e n possuem o mesmo algarismo das unidades.

5.2.6 Mostre que $a|bc$ se, e somente se, $\frac{a}{(a, b)}|c$.

5.2.7 Sejam a e b dois números naturais com $a < b$ e $(a, b) = 1$.

a) Mostre que $(b + a, b - a)$ é 1 ou 2.

b) Mostre que $(a + b, a^2 + b^2)$ é 1 ou 2.

5.2.8* Sejam $a, b, m \in \mathbb{N}^*$, com $(a, b) = 1$.

a) Se $a > b$, mostre que $\left(a - b, \frac{a^m - b^m}{a - b}\right) = (a - b, m)$.

b) Se m é ímpar, mostre que $\left(a+b, \frac{a^m + b^m}{a+b}\right) = (a+b, m)$.

5.2.9 Mostre que, se $a, b, x, y \in \mathbb{N}$, com $ax - by = (a, b)$, então $(x, y) = 1$.

5.2.10 Calcule $(1116, 984, 852)$.

5.2.11 Três números naturais são ditos primos entre si se $(a, b, c) = 1$. Mostre que três números naturais, dois a dois primos entre si, são primos entre si. Mostre que não vale a recíproca; isto é, ache três números naturais primos entre si, mas não dois a dois primos entre si.

5.2.12 Mostre que, para todo $n \in \mathbb{N}^*$, tem-se que $n+1$ divide $\binom{2n}{n}$

5.3 Mínimo Múltiplo Comum

Diremos que um número é um *múltiplo comum* de dois números naturais dados se ele é simultaneamente múltiplo de ambos os números.

Em qualquer caso, o número ab é sempre um múltiplo comum de a e b .

Diremos que um número m é um *mínimo múltiplo comum (mmc)* de a e b se possuir as seguintes propriedades:

- (i) m é um múltiplo comum de a e b , e
- (ii) se c é um múltiplo comum de a e b , então $m|c$.

Por exemplo, 12 é um múltiplo comum de 2 e 3, mas não é um mmc destes números. O número 6 é um mmc de 2 e 3.

Se c é um múltiplo comum de a e b , então, do item (ii) da definição acima, temos que $m|c$, e, portanto, $m \leq c$, o que nos diz que o mínimo múltiplo comum, se existe, é único e é o menor dos múltiplos comuns de a e b .

O mínimo múltiplo comum de a e b , se existe, é denotado por $[a, b]$.

Proposição 5.3.1. *Dados dois números naturais a e b , temos que $[a, b]$ existe e*

$$a, b = ab.$$

DEMONSTRAÇÃO: Ponhamos $m = \frac{ab}{(a, b)}$. Como

$$m = a \frac{b}{(a, b)} = b \frac{a}{(a, b)},$$

temos que $a|m$ e $b|m$.

Seja c um múltiplo comum de a e b ; logo, $c = na = n'b$. Segue daí que

$$n \frac{a}{(a, b)} = n' \frac{b}{(a, b)}.$$

Como, pelo Corolário 2 do Teorema 5.2.1, $\frac{a}{(a, b)}$ e $\frac{b}{(a, b)}$ são primos entre si, segue-se, do Teorema 5.2.2, que $\frac{a}{(a, b)}$ divide n' , e, portanto, $m = \frac{a}{(a, b)}b$ divide $n'b$ que, é igual a c .

□

Em virtude da Proposição acima, o mínimo múltiplo comum de dois inteiros pode ser encontrado por meio do Algoritmo de Euclides para o cálculo do mdc, pois basta dividir o produto dos dois números pelo seu mdc.

Corolário. *Se a e b são números naturais primos entre si, então $[a, b] = ab$.*

Exemplo 5.3.1. Sejam b e m dois números naturais. Vamos mostrar que, na seqüência de números

$$b, 2b, 3b, \dots, mb,$$

existem exatamente (b, m) números divisíveis por m . De fato, os números da seqüência divisíveis por m são múltiplos de b e m ; logo, múltiplos de $[b, m]$. Esses são:

$$[b, m], 2[b, m], 3[b, m], \dots, (b, m)[b, m] (= mb)$$

Portanto, tem-se (b, m) números divisíveis por m na seqüência.

Podemos estender a noção de mmc para vários números, como faremos a seguir.

Diremos que m é um mmc de a_1, \dots, a_n se m é um múltiplo comum de a_1, \dots, a_n , e, se para todo múltiplo comum m' desses números, tem-se que $m|m'$. É fácil ver que o mmc, se existe, é único, sendo denotado por $[a_1, \dots, a_n]$.

Proposição 5.3.2. *Sejam a_1, \dots, a_n números naturais. Então existe o número $[a_1, \dots, a_n]$ e*

$$[a_1, \dots, a_{n-1}, a_n] = [a_1, \dots, [a_{n-1}, a_n]].$$

DEMONSTRAÇÃO: Basta provar que, se existe $[a_1, \dots, [a_{n-1}, a_n]]$, vale a igualdade acima. A existência do mdc segue facilmente disso, por indução.

Seja $m = [a_1, \dots, [a_{n-1}, a_n]]$. Logo, a_1, \dots, a_{n-2} e $[a_{n-1}, a_n]$ dividem m . Como $a_{n-1}|[a_{n-1}, a_n]$ e $a_n|[a_{n-1}, a_n]$, segue que m é um múltiplo comum de a_1, \dots, a_n .

Por outro lado, suponha que m' seja um múltiplo comum de a_1, \dots, a_n . Logo, $a_1|m', \dots, a_{n-2}|m'$ e $[a_{n-1}, a_n]|m'$; daí segue que $m = [a_1, \dots, [a_{n-1}, a_n]]$ divide m' .

□

Problemas

5.3.1 Calcule o mmc dos pares de números do Problema 5.1.1.

5.3.2 a) Se m é um múltiplo comum de a e b , mostre que

$$m = [a, b] \iff \left(\frac{m}{a}, \frac{m}{b} \right) = 1.$$

b) Se $ra = sb$, mostre que

$$\frac{ra}{(r, s)} = \frac{sb}{(r, s)} = [a, b].$$

5.3.3 Sejam a, b, c três números naturais. Mostre que

$$abc = [a, b, c](ab, ac, bc).$$

5.3.4 Sejam $a, b \in \mathbb{N}$ e seja $n \in \mathbb{N}^*$; mostre que

$$[na, nb] = n[a, b].$$

5.3.5 Seja $n \in \mathbb{N}^*$; calcule $[n^2 + 1, n + 1]$.

5.3.6 a) Mostre que $(a, b) = [a, b] \iff a = b$.

b) Mostre que, se $b = a^2$, então, $[a, b] = (a, b)^2$.

5.3.7 Sejam $a, b \in \mathbb{N}^*$. Considere o conjunto

$$M(a, b) = \{x \in \mathbb{N}^*; \exists n, m \in \mathbb{N}^* \text{ tais que } x = na \text{ e } x = mb\}.$$

a) Mostre que $[a, b] = \min M(a, b)$.

b) Conclua que todo elemento de $M(a, b)$ é múltiplo de $\min M(a, b)$.

5.3.8 Sejam $d, m \in \mathbb{N}^*$. Mostre que uma condição necessária e suficiente para que existam $a, b \in \mathbb{N}$ tais que $(a, b) = d$ e $[a, b] = m$ é que $d|m$.

5.3.9 Sejam $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{N}$. Mostre que

$$(a_i, a_j) = 1, i \neq j \iff [a_1, \dots, a_n] = a_1 \cdots a_n.$$

5.3.10 Sejam $a, b, c \in \mathbb{N}^*$. Mostre que

a) $(a, [b, c]) = [(a, b), (a, c)]$;

b) $[a, (b, c)] = ([a, b], [a, c])$.

6

Aplicações do Máximo Divisor Comum

6.1 Equações Diofantinas Lineares

A resolução de vários problemas de aritmética recai na resolução, em números naturais, de equações do tipo

$$aX - bY = c,$$

ou, ainda, do tipo

$$aX + bY = c,$$

com $a, b, c \in \mathbb{N}$.

Tais equações são chamadas *equações diofantinas lineares* em homenagem a Diofanto de Alexandria (aprox. 300 DC).

Nem sempre estas equações possuem solução. Por exemplo, as equações

$$4X - 6Y = 3 \quad \text{e} \quad 4X + 6Y = 2$$

não possuem nenhuma solução em números naturais x_0, y_0 pois, caso contrário, para a primeira equação, teríamos $4x_0 - 6y_0$ par e, portanto, nunca igual a 3; e, para a segunda equação, teríamos $4x_0 + 6y_0 > 2$.

É, então, natural perguntar-se em que condições tais equações possuem soluções e, caso tenham, como determiná-las?

A resposta para as equações do tipo $aX - bY = c$ é relativamente fácil e será dada nas duas proposições a seguir.

Proposição 6.1.1. *Sejam $a, b \in \mathbb{N}^*$ e $c \in \mathbb{N}$. A equação $aX - bY = c$ admite solução em números naturais se, e somente se, $(a, b)|c$.*

DEMONSTRAÇÃO: Pelo Teorema 5.2.1, temos que

$$J(a, b) = \{na - mb \in \mathbb{N}; n, m \in \mathbb{N}\} = (a, b)\mathbb{N}.$$

É claro que a equação $aX - bY = c$ possui solução se, e somente se, $c \in J(a, b)$, o que é equivalente a $c \in (a, b)\mathbb{N}$, que, por sua vez, é equivalente a $(a, b)|c$.

□

Se a equação $aX - bY = c$ tem solução, então ela é equivalente à equação

$$a_1X - b_1Y = c_1,$$

onde

$$a_1 = \frac{a}{(a, b)}, \quad b_1 = \frac{b}{(a, b)}, \quad c_1 = \frac{c}{(a, b)}.$$

Note que $(a_1, b_1) = 1$ e, portanto, podemos nos restringir às equações do tipo

$$aX - bY = c, \quad \text{com } (a, b) = 1,$$

que sempre têm soluções.

Uma solução minimal de $aX - bY = c$ é uma solução x_0, y_0 da equação, tal que, se x_1, y_1 é uma solução qualquer da equação, então $x_0 \leq x_1$.

Mostraremos a seguir como as soluções da equação diofantina $aX - bY = c$, com $(a, b) = 1$, podem ser determinadas a partir da solução minimal x_0, y_0 .

Proposição 6.1.2. Seja x_0, y_0 a solução minimal da equação $aX - bY = c$, onde $(a, b) = 1$. Então, as soluções x, y em \mathbb{N} da equação são

$$x = x_0 + tb, \quad y = y_0 + ta, \quad t \in \mathbb{N}.$$

DEMONSTRAÇÃO: Seja x, y uma solução de $aX - bY = c$, logo,

$$ax_0 - by_0 = ax - by = c.$$

Conseqüentemente,

$$a(x - x_0) = b(y - y_0). \tag{6.1}$$

Como $(a, b) = 1$, segue-se que $b|(x - x_0)$. Logo,

$$x - x_0 = tb, \quad t \in \mathbb{N}.$$

Substituindo a expressão de $x - x_0$ acima em (6.1), segue-se que

$$y - y_0 = ta,$$

o que prova que as soluções são do tipo exibido.

Por outro lado, x, y , como no enunciado, é solução, pois

$$ax - by = a(x_0 + tb) - b(y_0 + ta) = ax_0 - by_0 = c.$$

□

Note que a equação $aX - bY = c$, com $(a, b) = 1$, admite infinitas soluções.

A seguir, descreveremos um método para encontrar a solução minimal de uma equação do tipo $aX - bY = c$, quando $(a, b) = 1$.

Se a, b e c são números pequenos, a solução pode ser encontrada por inspeção. Em geral, o método descrito abaixo sempre permitirá achar a solução minimal.

Usando o algoritmo euclidiano, é possível escrever

$$na - mb = (a, b) = 1 \text{ ou } m'b - n'a = (a, b) = 1.$$

No caso em que $1 = m'b - n'a$, escolha $\rho \in \mathbb{N}$ tal que $\rho b > n'$ e $\rho a > m'$, logo,

$$1 = (\rho b - n')a - (\rho a - m')b.$$

Portanto, pode-se sempre escrever $1 = na - mb$, para alguns $n, m \in \mathbb{N}$.

Multiplicando ambos os membros da igualdade acima por c , obtemos

$$c = cna - cmb.$$

Logo, $x_1 = cn$ e $y_1 = cm$ é uma solução particular da equação. Pela Proposição 6.1.2, temos que a solução minimal é $x_0 = x_1 - tb$ e $y_0 = y_1 - ta$ para o maior valor de t , de modo que ainda se tenha

$$cn - tb = x_1 - tb \geq 0 \quad \text{e} \quad cm - ta = y_1 - ta \geq 0.$$

Exemplo 6.1.1. Resolvamos a equação $24X - 14Y = 18$.

A equação tem solução, pois $(24, 14)|18$; e é equivalente a $12X - 7Y = 9$.

Vamos, em seguida, achar a solução minimal x_0, y_0 desta última equação. Pelo algoritmo euclidiano, temos

$$12 = 7 \cdot 1 + 5$$

$$7 = 5 \cdot 1 + 2$$

$$5 = 2 \cdot 2 + 1$$

Substituindo as equações acima umas nas outras, obtemos

$$1 = 12 \cdot 3 - 7 \cdot 5,$$

e, portanto,

$$9 = 12 \cdot 27 - 7 \cdot 45.$$

Logo, $x_1 = 27$ e $y_1 = 45$ é solução particular da equação. A partir desta solução, vamos, com o auxílio do método acima exposto, determinar a solução minimal. Ponhamos

$$x = 27 - t7, \quad y = 45 - t12,$$

e determinemos o maior valor de $t \in \mathbb{N}$, de modo que $x, y \in \mathbb{N}$. Isto ocorre quando $t = 3$, dando a solução minimal $x_0 = 6$ e $y_0 = 9$.

As soluções da equação são, portanto,

$$x = 6 + t7, \quad y = 9 + t12.$$

Exemplo 6.1.2. Resolvamos a equação $14X - 24Y = 18$.

A equação tem solução, pois $(14, 24) | 18$, e é equivalente a $7X - 12Y = 9$.

Vamos, em seguida, achar a solução minimal x_0, y_0 desta última equação. Pelos cálculos feitos no Exemplo 6.1.1, temos que

$$9 = 12 \cdot 27 - 7 \cdot 45 = 7(4 \cdot 12 - 45) - 12(4 \cdot 7 - 27) = 7 \cdot 3 - 12 \cdot 1,$$

o que nos dá a solução minimal $x_0 = 3$ e $y_0 = 1$.

Portanto, as soluções da equação são dadas por

$$x = 3 + t12, \quad y = 1 + t7.$$

Para responder às mesmas perguntas formuladas acima para as equações do tipo $aX + bY = c$, vamos precisar do resultado a seguir.

Proposição 6.1.3. Sejam $a, b \in \mathbb{N}^*$, com $(a, b) = 1$. Todo número natural c pode ser escrito (de modo único) de uma e, somente uma, das seguintes formas:

$$c = na + mb, \quad \text{ou} \quad c = na - mb, \quad \text{com } n < b.$$

DEMONSTRAÇÃO: **EXISTÊNCIA:** Sabemos que existem $u, v \in \mathbb{N}$ tais que $ua - vb = (a, b) = 1$. Multiplicando ambos os lados desta última igualdade por c , temos que

$$auc - bvc = c.$$

Pela divisão euclidiana, temos que existem $q, n \in \mathbb{N}$ com $n < b$ tais que $uc = qb + n$. Substituindo esse valor de uc na igualdade acima, obtemos

$$c = na + qab - vcb.$$

Se $qa \geq vc$, pondo $m = qa - vc$, temos que $c = na + mb$.

Se $vc \geq qa$, pondo $m = vc - qa$, temos que $c = na - mb$.

UNICIDADE: Suponhamos que

$$na \pm mb = n'a \pm m'b, \quad \text{com } n, n' < b.$$

Temos três possibilidades para analisar:

$$na + mb = n'a - m'b, \quad na + mb = n'a + m'b, \quad na - mb = n'a - m'b.$$

Inicialmente, mostraremos que a primeira possibilidade só ocorre quando $n = n'$ e $m = m' = 0$. Para isto, basta mostrar que $n = n'$, pois teríamos

$$0 = na + mb - (n'a - m'b) = mb + m'b = b(m + m'),$$

o que implicaria que $m + m' = 0$ e, portanto, que $m = m' = 0$.

Para mostrar que $n = n'$, suponhamos, por absurdo, que $n' \neq n$. Logo, necessariamente, $n' > n$. Portanto,

$$(n' - n)a = (m + m')b.$$

Como $(a, b) = 1$, temos que $a|(m + m')$ e, portanto, $m + m' = ra$. Logo, $(n' - n)a = (m + m')b = rab$. Daí segue que $(n' - n) = rb$, o que é absurdo, pois $n' - n < b$ e $rb \geq b$. Portanto, $n = n'$, seguindo assim a unicidade.

As outras duas possibilidades podem ser tratadas de modo semelhante e são deixadas como exercício para o leitor.

□

Sejam $a, b \in \mathbb{N}^*$. Definimos o conjunto

$$S(a, b) = \{xa + yb; x, y \in \mathbb{N}\}.$$

É claro que $aX + bY = c$, com $(a, b) = 1$, tem solução se, e somente se, $c \in S(a, b)$. Portanto, é de fundamental importância caracterizar os elementos do conjunto $S(a, b)$.

Proposição 6.1.4. $c \in S(a, b)$ se, e somente se, existem $n, m \in \mathbb{N}$, com $n < b$ (univocamente determinados) tais que $c = na + mb$

DEMONSTRAÇÃO: É claro que, se $c = na + mb$, então $c \in S(a, b)$. Por outro lado, se $c \in S(a, b)$, então $c = xa + yb$ com $x, y \in \mathbb{N}$. Pela divisão euclidiana, $x = bq + n$, com $n < b$; logo, substituindo o valor de x desta última igualdade na igualdade acima, obtemos que $c = na + mb$, onde $n < b$, e $m = aq + y$.

□

Definamos o *conjunto de lacunas* de $S(a, b)$ como sendo o conjunto

$$L(a, b) = \mathbb{N} \setminus S(a, b).$$

Corolário. Temos que

$$L(a, b) = \{na - mb \in \mathbb{N}; n < b, m \in \mathbb{N}\}.$$

DEMONSTRAÇÃO: Isto decorre imediatamente das Proposições 6.1.3 e 6.1.4. □

Teorema 6.1.1. A equação $aX + bY = c$, onde $(a, b) = 1$, tem solução em números naturais se, e somente se,

$$c \notin L(a, b) = \{na - mb \in \mathbb{N}; n < b, m \in \mathbb{N}\}.$$

DEMONSTRAÇÃO: Como a equação $aX + bY = c$ tem solução se, e somente se, $c \in S(a, b)$, o resultado segue-se do Corolário. □

Note que o conjunto $L(a, b)$ é finito e o seu maior elemento é

$$\max L(a, b) = (b - 1)a - b.$$

Portanto, se

$$c \geq (b - 1)a - b + 1 = (b - 1)(a - 1),$$

a equação $aX + bY = c$ admite solução; se $c = (b - 1)(a - 1) - 1$, ela não admite solução.

Na prática, não é difícil decidir se a equação $aX + bY = c$ admite solução.

Se $(a, b) \nmid c$, a equação não tem solução. Se $(a, b) \mid c$, a equação é equivalente a uma outra com $(a, b) = 1$. Com o algoritmo euclidiano, escreva

$$1 = (a, b) = n'a - m'b.$$

Logo,

$$c = cn'a - cm'b.$$

Agora, com a divisão euclidiana, escreva $cn' = qb + n$ com $n < b$, logo,

$$c = \begin{cases} na + (qa - cm')b \in S(a, b), & \text{se } qa \geq cm' \\ na - (cm' - qa)b \in L(a, b), & \text{se } cm' > qa \end{cases}$$

A equação tem solução no primeiro caso, mas, não no segundo.

A solução n, m da equação $aX + bY = c$, com $n < b$, é uma solução minimal, no sentido de que se x, y é uma solução, então $x \geq n$.

Proposição 6.1.5. Suponha que a equação $aX + bY = c$, com $(a, b) = 1$, tenha solução e seja $x_0 = n, y_0 = m$ a solução minimal. As soluções x, y da equação são dadas pelas fórmulas

$$x = n + tb, \quad e \quad y = m - ta.$$

DEMONSTRAÇÃO: Temos que $an + bm = ax + by = c$. Logo,

$$a(x - n) = b(m - y),$$

que, de modo totalmente análogo ao que foi feito na demonstração da Proposição 6.1.2, implica no resultado. □

Note que este tipo de equação tem, no máximo, um número finito de soluções, correspondentes aos seguintes valores de t :

$$0, 1, \dots, \left[\frac{m}{a} \right],$$

onde $\left[\frac{m}{a} \right]$ representa o quociente da divisão euclidiana de m por a .

Exemplo 6.1.3. Vamos determinar para quais valores de $c \in \mathbb{N}$ a equação $11X + 7Y = c$ tem soluções em \mathbb{N} .

O conjunto de lacunas de $S(11, 7)$ é o conjunto

$$\begin{aligned} L(11, 7) &= \{n11 - m7 \in \mathbb{N}, \quad n, m \in \mathbb{N}, \quad n < 7\} \\ &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 17, 19, 20, 23, 24, 26, 27, 30, \\ &\quad 31, 34, 37, 38, 41, 45, 48, 52, 59\}. \end{aligned}$$

Portanto, a equação $11X + 7Y = c$ admite solução se, e somente se, $c \notin L(11, 7)$.

Exemplo 6.1.4. Resolvamos a equação $11X + 7Y = 58$.

Como, de acordo com o Exemplo 6.1.3, $58 \notin L(11, 7)$, a equação possui soluções. Para determiná-las, considere o algoritmo euclidiano,

$$11 = 7 \cdot 1 + 4$$

$$7 = 4 \cdot 1 + 3$$

$$4 = 3 \cdot 1 + 1$$

Logo,

$$1 = 4 - 3 = 4 - (7 - 4) = 2 \cdot 4 - 7 = 2(11 - 7) - 7 = 2 \cdot 11 - 3 \cdot 7.$$

Portanto,

$$58 = (58 \cdot 2)11 - (58 \cdot 3)7 = (4 + 16 \cdot 4)11 - 174 \cdot 7 = 4 \cdot 11 + 2 \cdot 7.$$

Segue daí que $x_0 = 4$ e $y_0 = 2$ é a solução minimal da equação. Logo, as soluções são

$$x = 4 + t7, \quad y = 2 - t11,$$

que só têm sentido para $t = 0$, e, portanto, a equação só possui a solução $x_0 = 4, y_0 = 2$.

Para resolver equações como as acima, não é necessário usar toda a técnica que desenvolvemos, pois os números envolvidos são suficientemente pequenos para que seja viável achar as soluções por inspeção.

No exemplo acima, basta testar os valores $x = 1, 2, 3, 4$ e 5 para verificar que apenas $x = 4$ é possível.

Problemas

6.1.1 Resolva as equações:

- | | |
|----------------------|---------------------|
| a) $90X - 28Y = 22$ | b) $50X - 56Y = 74$ |
| c) $40X - 65Y = 135$ | d) $8X - 13Y = 23$ |

6.1.2 Para quais valores de c a equação $90X + 28Y = c$ não possui soluções?

6.1.3 Resolva as equações:

- | | |
|-----------------------|----------------------|
| a) $16X + 7Y = 601$ | b) $30X + 17Y = 201$ |
| c) $47X + 29Y = 1288$ | d) $8X + 13Y = 23$ |

6.1.4 Dispondo de 100 reais, quais são as quantias que se podem gastar comprando selos de 5 reais e de 7 reais?

6.1.5 Determine todos os múltiplos de 11 e de 9 cuja soma é igual a

- a) 79 b) 80 c) 270

6.1.6 Determine o menor inteiro positivo que tem restos 11 e 35 quando dividido, respectivamente, por 37 e 48.

6.1.7 Numa criação de coelhos e galinhas, contaram-se 400 pés. Quantas são as galinhas e quantos são os coelhos, sabendo que a diferença entre esses dois números é a menor possível?

6.1.8 Subindo uma escada de dois em dois degraus, sobra um degrau. Subindo a mesma escada de três em três degraus, sobram dois degraus. Determine quantos degraus possui a escada, sabendo que o seu número é múltiplo de 7 e está compreendido entre 40 e 100.

6.1.9(ENC 2002) Em certo país, as cédulas são de \$4 e \$7. Com elas, é possível pagar, sem troco, qualquer quantia inteira

- a) a partir de \$11, inclusive. b) a partir de \$18, inclusive.

- c) ímpar, a partir de \$7, inclusive. d) que seja \$1 maior do que um múltiplo de \$3.
e) que seja \$1 menor do que um múltiplo de \$5.

6.1.10 De quantas maneiras pode-se comprar selos de 3 reais e de 5 reais de modo que se gaste 50 reais?

6.2 Expressões Binômias

Nesta seção, mostraremos como calcular o mdc de pares de números da forma $a^n \pm 1$, mediante o uso do Algoritmo de Euclides.

O resultado a seguir nos permitirá calcular o mdc de elementos de seqüências de números naturais cujos elementos possuem propriedades aritméticas especiais.

Proposição 6.2.1. *Dada uma seqüência $(a_n)_n$ tal que $\forall m \geq n$, $(a_m, a_n) = (a_n, a_r)$, onde r é o resto da divisão de m por n , então tem-se que*

$$(a_m, a_n) = a_{(m,n)}.$$

DEMONSTRAÇÃO: Sejam $r_1, r_2, \dots, r_s, r_{s+1} = 0$ os restos parciais no Algoritmo de Euclides; logo, $r_s = (m, n)$. Portanto, pela propriedade de $(a_n)_n$,

$$(a_m, a_n) = (a_n, a_{r_1}) = \dots = (a_{r_s}, a_{r_{s+1}}) = (a_{r_s}, 0) = a_{(m,n)}.$$

□

O uso da Proposição acima nos permitirá provar o resultado a seguir.

Proposição 6.2.2. *Se $n, m, a \in \mathbb{N}^*$, com $a \geq 2$, então*

$$(a^m - 1, a^n - 1) = a^d - 1, \text{ onde } d = (m, n).$$

DEMONSTRAÇÃO: De fato, se $m \geq n$, pela divisão euclidiana podemos escrever $m = nq + r$, onde r é o resto da divisão de m por n . Como

$$a^m - 1 = a^{nq+r} - 1 = a^r(a^{nq} - 1) + a^r - 1,$$

e como $a^n - 1 | a^{nq} - 1$ (Proposição 3.1.7), segue-se, pelo Lema de Euclides, que

$$(a^m - 1, a^n - 1) = (a^r(a^{nq} - 1) + a^r - 1, a^n - 1) = (a^n - 1, a^r - 1).$$

O resultado segue-se, agora, da Proposição 6.2.1, pondo $a_n = a^n - 1$.

□

Para calcular $(a^m \pm 1, a^n \pm 1)$ nos outros casos, necessitaremos de alguns lemas.

Lema 6.2.1. *Sejam $a, m, n, q, r \in \mathbb{N}$, com $a \geq 2$, tais que $n = mq + r$; então*

$$(a^n + 1, a^m - 1) = (a^m - 1, a^r + 1)$$

DEMONSTRAÇÃO: Como $a^m - 1 | a^{mq} - 1$ (Proposição 3.1.7), e como

$$a^n + 1 = a^{mq+r} + 1 = a^r(a^{mq} - 1) + a^r + 1,$$

o resultado segue-se pelo Lema de Euclides.

□

Lema 6.2.2. *Sejam $a, m, n, q, r \in \mathbb{N}$, com $a \geq 2$, tais que $m = nq + r$, então*

$$(a^m - 1, a^n + 1) = \begin{cases} (a^n + 1, a^r - 1), & \text{se } q \text{ é par} \\ (a^n + 1, a^r + 1), & \text{se } q \text{ é ímpar} \end{cases}$$

DEMONSTRAÇÃO: Se q é par, $a^n + 1 | a^{nq} - 1$ (Proposição 3.1.9), e como

$$a^m - 1 = a^{nq+r} - 1 = a^r(a^{nq} - 1) + a^r - 1,$$

decorre do Lema de Euclides que

$$(a^n + 1, a^m + 1) = (a^n + 1, a^r - 1).$$

Se q é ímpar, temos que $a^n + 1 | a^{nq} + 1$ (Proposição 3.1.8), e como

$$a^m - 1 = a^{nq+r} - 1 = a^r(a^{nq} + 1) - a^r - 1,$$

segue-se da Observação 5.1.1 que

$$(a^n + 1, a^m + 1) = (a^n + 1, a^r + 1).$$

□

Lema 6.2.3. *Sejam $a \in \mathbb{N}^*$ e $m, n, q, r \in \mathbb{N}$, tais que $m = nq + r$, então*

$$(a^m + 1, a^n + 1) = \begin{cases} (a^n + 1, a^r + 1), & \text{se } q \text{ é par} \\ (a^n + 1, a^r - 1), & \text{se } q \text{ é ímpar} \end{cases}$$

DEMONSTRAÇÃO: Se q é par, $a^n + 1 | a^{nq} - 1$ (Proposição 3.1.9), e como

$$a^m + 1 = a^{nq+r} + 1 = a^r(a^{nq} - 1) + a^r + 1,$$

segue-se do Lema de Euclides que

$$(a^n + 1, a^m + 1) = (a^n + 1, a^r + 1).$$

Se q é ímpar, $a^n + 1 | a^{nq} + 1$ (Proposição 3.1.8), e como

$$a^m + 1 = a^{nq+r} + 1 = a^r(a^{nq} + 1) - a^r + 1,$$

decorre da Observação 5.1.1 que

$$(a^n + 1, a^m + 1) = (a^n + 1, a^r - 1).$$

□

Proposição 6.2.3. Sejam $n, m \in \mathbb{N}^*$, com $n|m$ e $\frac{m}{n}$ par. Se $a \in \mathbb{N}^*$, então,

$$(a^m + 1, a^n + 1) = \begin{cases} 1, & \text{se } a \text{ é par} \\ 2, & \text{se } a \text{ é ímpar} \end{cases}$$

DEMONSTRAÇÃO: De fato, basta aplicar o Lema 6.2.3 na situação em que $q (= \frac{m}{n})$ é par e $r = 0$.

□

Corolário. Se $n \neq m$, então, $(2^{2^n} + 1, 2^{2^m} + 1) = 1$.

Os resultados acima nos permitem deduzir o seguinte teorema:

Teorema 6.2.1. Se $a, n, m \in \mathbb{N}^*$, com $a \geq 2$, então, $(a^m - 1, a^n - 1) = a^{(m,n)} - 1$ e $(a^m \pm 1, a^n + 1)$ pode apenas assumir um dos seguintes valores: 1, 2 ou $a^{(m,n)} + 1$.

DEMONSTRAÇÃO: De fato, a primeira igualdade acima segue-se da Proposição 6.2.2. Por outro lado, segue-se dos lemas acima que $(a^m \pm 1, a^n + 1)$ só pode ser igual a um dos seguintes números: $(a^{(m,n)} + 1, a^0 + 1)$, $(a^{(m,n)} + 1, a^0 - 1)$, ou $(a^{(m,n)} - 1, a^0 + 1)$. Portanto, $(a^m \pm 1, a^n + 1)$ só pode assumir os valores: 1, 2 ou $a^{(m,n)} + 1$.

□

Exemplo 6.2.1. Note que $2^2 - 1 \mid 2^3 + 1$. Vamos mostrar que, dados $n, m \in \mathbb{N}^*$, com $m > 2$, então, $2^m - 1 \nmid 2^n + 1$.

Dado que $2^n + 1$ e $2^m - 1$ são ímpares, pelo Teorema 6.2.1 segue-se que $(2^n + 1, 2^m - 1)$ só pode assumir os valores 1 ou $2^{(n,m)} + 1$.

Se $2^m - 1 \mid 2^n + 1$, teríamos que $2^m - 1 = 1$ ou $2^m - 1 = 2^{(n,m)} + 1$. A primeira possibilidade só ocorreria se $m = 1$, o que é vedado pela hipótese. Se a segunda possibilidade ocorresse, teríamos $2^{m-1} = 2^{(n,m)-1} + 1$, o que implicaria que $(n, m) = 1$ e $m = 2$, também vedado por hipótese.

Os seguintes dois corolário dos Teorema 6.2.1 nos permitirão determinar os números $(a^m \pm 1, a^n \pm 1)$ em todos os casos

Corolário 1. *Tem-se que*

$$(a^m + 1, a^n + 1) = \begin{cases} a^{(n,m)} + 1, & \text{se } \frac{[m, n]}{(m, n)} \text{ é ímpar} \\ 2, & \text{se } \frac{[m, n]}{(m, n)} \text{ é par e } a \text{ é ímpar} \\ 1, & \text{se } \frac{[m, n]}{(m, n)} \text{ e } a \text{ são pares} \end{cases}$$

DEMONSTRAÇÃO: Note que o resultado é trivialmente verificado se $a = 0$ ou $a = 1$. Assumiremos, portanto, $a \geq 2$.

Pelo Teorema 6.2.1 temos que $(a^m + 1, a^n + 1)$ só pode assumir os valores 1, 2 e $a^{(m,n)} + 1$; e, portanto, $(a^m + 1, a^n + 1) = a^{(m,n)} + 1$, se, e somente se, $a^{(m,n)} + 1$ divide $a^m + 1$ e $a^n + 1$.

Escrevendo $m = (m, n) \frac{m}{(m, n)}$ e $n = (m, n) \frac{n}{(m, n)}$, temos, pela Proposição 3.1.8 e pelo Exemplo 5.1.2, que $a^{(m,n)} + 1$ divide $a^m + 1$ e $a^n + 1$ se, e somente se, $\frac{m}{(m, n)}$ e $\frac{n}{(m, n)}$ são ímpares, o que ocorre se, e somente se, o seu produto é ímpar; ou seja, se, e somente se, é ímpar o número

$$\frac{m}{(m, n)} \cdot \frac{n}{(m, n)} = \frac{[m, n]}{(m, n)}.$$

O resultado segue-se, pois o restante da prova é trivial.

□

Corolário 2. Se $a \in \mathbb{N}^*$, tem-se que

$$(a^m - 1, a^n + 1) = \begin{cases} a^{(m,n)} + 1, & \text{se } \frac{m}{(m,n)} \text{ é par e } \frac{n}{(m,n)} \text{ é ímpar} \\ 2, & \text{caso contrário e } a \text{ é ímpar} \\ 1, & \text{caso contrário e } a \text{ é par} \end{cases}$$

DEMONSTRAÇÃO: Note que o resultado é trivialmente verificado se $a = 1$. Assumiremos, portanto, $a \geq 2$.

Pelo Teorema 6.2.1 temos que $(a^m - 1, a^n + 1)$ só pode assumir os valores 1, 2 e $a^{(m,n)} + 1$; e, portanto, $(a^m - 1, a^n + 1) = a^{(m,n)} + 1$, se, e somente se, $a^{(m,n)} + 1$ divide $a^m - 1$ e $a^n + 1$.

Escrevendo $m = (m, n) \frac{m}{(m, n)}$ e $n = (m, n) \frac{n}{(m, n)}$, temos, pela Proposição 3.1.8 e pelo Exemplo 5.1.2 que $a^{(m,n)} + 1$ divide $a^n + 1$ se, e somente se, $\frac{n}{(m, n)}$ é ímpar. Por outro lado, pela Proposição 3.1.9 e pelo Exemplo 5.1.3, tem-se que $a^{(m,n)} + 1$ divide $a^m - 1$ se, e somente se, $\frac{m}{(m, n)}$ é par.

O resultado segue-se, pois o restante da prova é trivial.

□

Problemas

6.2.1 Sejam $a, m, n \in \mathbb{N}^*$. Mostre que $a^n - 1 | a^m - 1$ se, e somente se, $n|m$.

6.2.2 Sejam $n, m \in \mathbb{N}$ com $n|m$ e $\frac{m}{n}$ ímpar. Se $a \in \mathbb{N}^*$, mostre que

$$(a^m + 1, a^n + 1) = a^n + 1.$$

6.2.3 Sejam $a, m, n \in \mathbb{N}^*$, com $m > n$. Mostre que

$$(a^{2^m} - 1, a^{2^n} + 1) = a^{2^n} + 1.$$

6.2.4 Calcule

a) $(5^{202} + 1, 5^{74} + 1)$ b) $(36^{497} + 1, 36^{210} + 1)$ c) $(3^{144} - 1, 3^{78} + 1)$

6.2.5* Seja $(M_n)_n$ a seqüência definida por $M_n = 2^n - 1$. Mostre que $3|M_n$ se, e somente se, n é par.

6.3 Números de Fibonacci

Nesta seção, apresentaremos algumas propriedades dos números de Fibonacci, começando por calcular o mdc de um par qualquer desses números. Antes, porém, necessitaremos de dois lemas.

Lema 6.3.1. *Dois termos consecutivos da seqüência de Fibonacci são primos entre si.*

DEMONSTRAÇÃO: Mostraremos, por indução sobre n , que $(u_{n+1}, u_n) = 1$. De fato, para $n = 1$ temos que

$$(u_2, u_1) = (1, 1) = 1.$$

Suponhamos, agora, o resultado válido para n , isto é, $(u_{n+1}, u_n) = 1$. Temos, então, que

$$(u_{n+2}, u_{n+1}) = (u_{n+2} - u_{n+1}, u_{n+1}) = (u_n, u_{n+1}) = 1,$$

provando, assim, o resultado.

□

Lema 6.3.2. *Se $n, m \in \mathbb{N}^*$ são tais que $n|m$, então, $u_n|u_m$.*

DEMONSTRAÇÃO: Vamos escrever $m = nk$ e demonstrar o lema por indução sobre k .

Para $k = 1$, o resultado é trivialmente verificado. Suponha, agora, o resultado válido para algum valor de k ; isto é, $u_m|u_{mk}$.

Pela identidade do Problema 2.4.3, temos que

$$u_{m(k+1)} = u_{mk+m} = u_{mk-1}u_m + u_{mk}u_{m+1}.$$

Como $u_m|u_{mk-1}u_m$ e, por hipótese de indução, $u_m|u_{mk}u_{m+1}$, segue-se que u_m divide $u_{m(k+1)}$, provando, assim, o resultado.

□

Teorema 6.3.1. *Seja $(u_n)_n$ a seqüência de Fibonacci; então,*

$$(u_m, u_n) = u_{(m,n)}.$$

DEMONSTRAÇÃO: Suponha que $m \geq n$; logo, pela Divisão Euclidiana, $m = nq + r$; e, portanto, pela fórmula do Problema 2.4.3,

$$u_m = u_{nq+r} = u_{nq-1}u_r + u_{nq}u_{r+1}.$$

Logo, como pelo Lema 6.3.2, $u_n|u_{nq}$, segue-se, do Lema de Euclides, que

$$(u_n, u_m) = (u_{nq-1}u_r + u_{nq}u_{r+1}, u_n) = (u_{nq-1}u_r, u_n). \quad (6.2)$$

Como, pelo Lema 6.3.1, $(u_{nq-1}, u_{nq}) = 1$, segue-se que $(u_{nq-1}, u_n) = 1$ (veja Problema 5.2.2(b)); e, consequentemente, de (6.2) e do Problema 5.2.2(a), segue-se que

$$(u_m, u_n) = (u_n, u_r).$$

O resultado segue-se agora da Proposição 6.2.1.

□

Corolário. *Na seqüência de Fibonacci, temos que u_n divide u_m se, e somente se, n divide m .*

Exemplo 6.3.1. O resultado acima nos permite estabelecer alguns critérios de divisibilidade para os termos da seqüência de Fibonacci.

Assim, para acharmos, por exemplo, os termos u_m da seqüência de Fibonacci divisíveis por 3, basta notar que $u_4 = 3$ e que

$$3|u_m \iff u_{(4,m)} = (u_4, u_m) = (3, u_m) = 3 = u_4,$$

e, portanto, $3|u_m$ se, e somente se, $(4, m) = 4$, o que equivale a dizer que $4|m$.

Problemas

6.3.1 Mostre que, se na seqüência de Fibonacci existir um termo divisível por um número natural m , então existem infinitos tais termos. (No Capítulo 9, Exemplo 9.2.7, mostraremos que este é sempre o caso, qualquer que seja m .)

6.3.2 Na seqüência de Fibonacci, mostre que u_m é par se, e somente se, m é divisível por 3.

6.3.3 Na seqüência de Fibonacci, mostre que u_m é divisível por 5 se, e somente se, m é divisível por 5.

6.3.4 Na seqüência de Fibonacci, mostre que u_m é divisível por 7 se, e somente se, m é divisível por 8.

6.3.5 Na seqüência de Fibonacci, mostre que u_m é divisível por 4 se, e somente se, m é divisível por 6.

Problemas Suplementares

6.S.1 Ache a menor distância entre dois pontos (x_1, y_1) e (x_2, y_2) , no plano, que são soluções da equação diofantina $aX - bY = c$, onde $a, b, c \in \mathbb{N}$ e $(a, b) = 1$.

6.S.2 Sejam $a, b \in \mathbb{N}^*$, com $(a, b) = 1$.

a) Mostre que $S(a, b)$ é simétrico no seguinte sentido: para todos $x, y \in \mathbb{N}$, com $x + y = ab - a - b$, tem-se que

$$x \in S(a, b) \iff y \notin S(s, b).$$

b) Mostre que no intervalo $0 \leq x \leq ab - a - b$ existem tantos elementos pertencentes a $S(a, b)$, quanto elementos não pertencentes a $S(a, b)$.

6.S.3* Sejam $a, b \in \mathbb{N}$, com $a \geq 2$, $b \geq 2$ e $(a, b) = 1$. Considere o conjunto $S^*(a, b) = \{ax + by; x, y \in \mathbb{N}^*\}$.

a) Mostre que existe $c \in S^*$ tal que $c + \mathbb{N} \subset S^*$.

b) Mostre que existe um número natural p tal que, se $n, m \in \mathbb{N}$ são tais que $n + m = p$, então $n \in S^*(a, b)$ se, e somente se, $m \notin S^*(a, b)$.

7

Números Primos

Iniciaremos neste capítulo o estudo dos números primos, um dos conceitos mais importantes de toda a Matemática. Esses números desempenham papel fundamental e a eles estão associados muitos problemas famosos cujas soluções têm resistido aos esforços de várias gerações de matemáticos.

7.1 Teorema Fundamental da Aritmética

Um número natural maior do que 1 e que só é divisível por 1 e por si próprio é chamado de *número primo*.

Dados dois números primos p e q e um número natural a qualquer, decorrem da definição acima os seguintes fatos:

I) Se $p|q$, então $p = q$.

De fato, como $p|q$ e sendo q primo, temos que $p = 1$ ou $p = q$. Sendo p primo, tem-se que $p > 1$, o que acarreta $p = q$.

II) Se $p \nmid a$, então $(p, a) = 1$.

De fato, se $(p, a) = d$, temos que $d|p$ e $d|a$. Portanto, $d = p$ ou $d = 1$. Mas $d \neq p$, pois $p \nmid a$ e, consequentemente, $d = 1$.

Um número maior do que 1 e que não é primo será chamado *composto*. Portanto, se um número n é composto, existirá um divisor n_1 de n tal que $n_1 \neq 1$ e $n_1 \neq n$. Portanto, existirá um número natural n_2 tal que

$$n = n_1 n_2, \quad \text{com } 1 < n_1 < n \text{ e, } 1 < n_2 < n$$

Por exemplo, 2, 3, 5, 7, 11 e 13 são números primos, enquanto que 4, 6, 8, 9, 10 e 12 são compostos.

Do ponto de vista da estrutura multiplicativa dos naturais, os números primos são os mais simples e ao mesmo tempo são suficientes para gerar todos os números naturais, conforme veremos mais adiante no *Teorema Fundamental da Aritmética*.

A seguir, estabelecemos um resultado fundamental de Euclides (*Os Elementos*, Proposição 30, Livro VII).

Proposição 7.1.1. *Sejam $a, b, p \in \mathbb{N}^*$, com p primo. Se $p|ab$, então $p|a$ ou $p|b$.*

DEMONSTRAÇÃO: Basta provar que, se $p|ab$ e $p \nmid a$, então $p|b$. Mas, se $p \nmid a$, temos que $(p, a) = 1$, e o resultado segue-se do Teorema 5.2.2.

□

Na realidade, a propriedade dos números primos descrita na proposição acima, os caracteriza totalmente, como se pode verificar através do Problema 7.1.10.

Corolário. *Se p, p_1, \dots, p_n são números primos e, se $p|p_1 \cdots p_n$, então $p = p_i$ para algum $i = 1, \dots, n$.*

DEMONSTRAÇÃO: Use a Proposição 7.1.1, indução sobre n , e o fato de que, se $p|p_i$, então $p = p_i$.

□

Teorema 7.1.1 (Teorema Fundamental da Aritmética). *Todo número natural maior do que 1 ou é primo ou se escreve de modo único (a menos da ordem dos fatores) como um produto de números primos.*

DEMONSTRAÇÃO: Usaremos a segunda forma do Princípio de Indução. Se $n = 2$, o resultado é obviamente verificado.

Suponhamos o resultado válido para todo número natural menor do que n e vamos provar que vale para n . Se o número n é primo, nada temos a demonstrar. Suponhamos, então, que n seja composto. Logo, existem números naturais n_1 e n_2 tais que $n = n_1 n_2$, com $1 < n_1 < n$ e $1 < n_2 < n$. Pela hipótese de indução, temos que existem números primos p_1, \dots, p_r e q_1, \dots, q_s tais que $n_1 = p_1 \cdots p_r$ e $n_2 = q_1 \cdots q_s$. Portanto, $n = p_1 \cdots p_r q_1 \cdots q_s$.

Vamos, agora, provar a unicidade da escrita. Suponha, agora, que $n = p_1 \cdots p_r = q_1 \cdots q_s$, onde os p_i e os q_j são números primos. Como $p_1 | q_1 \cdots q_s$, pelo corolário acima, temos que $p_1 = q_j$ para algum j , que, após reordenamento de q_1, \dots, q_s , podemos supor que seja q_1 . Portanto,

$$p_2 \cdots p_r = q_2 \cdots q_s.$$

Como $p_2 \cdots p_r < n$, a hipótese de indução acarreta que $r = s$ e os p_i e q_j são iguais aos pares.

□

Este resultado, porém, não explicitamente enunciado em sua totalidade, está essencialmente contido nos *Elementos* de Euclides, pois ele é consequência quase que imediata de proposições que lá se encontram.

Agrupando, no Teorema 7.1.1, os fatores primos repetidos, se necessário, e ordenando os primos em ordem crescente, temos o seguinte enunciado:

Teorema 7.1.1'. *Dado um número natural $n > 1$, existem primos $p_1 < \dots < p_r$ e $\alpha_1, \dots, \alpha_r \in \mathbb{N}^*$, univocamente determinados, tais que*

$$n = p_1^{\alpha_1} \cdots p_r^{\alpha_r}.$$

Quando estivermos lidando com a decomposição em fatores primos de dois, ou mais, números naturais, usaremos o recurso de acrescentar fatores da forma $p^0 (= 1)$, onde p é um número primo qualquer. Assim, dados $n, m \in \mathbb{N}$ com $n > 1$ e $m > 1$ quaisquer, podemos escrever

$$n = p_1^{\alpha_1} \cdots p_r^{\alpha_r} \text{ e } m = p_1^{\beta_1} \cdots p_r^{\beta_r},$$

usando o mesmo conjunto de primos p_1, \dots, p_r , desde que permitamos que os expoentes $\alpha_1, \dots, \alpha_r, \beta_1, \dots, \beta_s$ variem em \mathbb{N} e não apenas em \mathbb{N}^* .

Por exemplo, os números $2^3 \cdot 3^2 \cdot 7 \cdot 11$ e $2 \cdot 5^2 \cdot 13$ podem ser escritos, respectivamente, $2^3 \cdot 3^2 \cdot 5^0 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 13^0$ e $2 \cdot 3^0 \cdot 5^2 \cdot 7^0 \cdot 11^0 \cdot 13$.

Observe que um número natural $n > 1$, escrito na forma $n = p_1^{\alpha_1} \cdots p_r^{\alpha_r}$, como no teorema acima, é um quadrado perfeito se, e somente se, cada expoente α_i é par.

Proposição 7.1.2. *Seja $n = p_1^{\alpha_1} \cdots p_r^{\alpha_r}$ um número natural escrito na forma acima. Se n' é um divisor de n , então*

$$n' = p_1^{\beta_1} \cdots p_r^{\beta_r},$$

onde $0 \leq \beta_i \leq \alpha_i$, para $i = 1, \dots, r$.

DEMONSTRAÇÃO: Seja n' um divisor de n e seja p^β a potência de um primo p que figura na decomposição de n' em fatores primos. Como $p^\beta | n$, segue que p^β divide algum $p_i^{\alpha_i}$ por ser primo com os demais $p_j^{\alpha_j}$, e, consequentemente, $p = p_i$ e $\beta \leq \alpha_i$.

□

Denotando por $d(n)$ o número de divisores do número natural n , segue, por uma contagem fácil, que se $n = p_1^{\alpha_1} \cdots p_r^{\alpha_r}$, onde p_1, \dots, p_r são números primos e $\alpha_1, \dots, \alpha_r \in \mathbb{N}$, então

$$d(n) = (\alpha_1 + 1)(\alpha_2 + 1) \cdots (\alpha_r + 1).$$

Exemplo 7.1.1. A fórmula acima nos mostra que um número $n = p_1^{\alpha_1} \cdots p_r^{\alpha_r}$ possui uma quantidade ímpar de divisores se, e somente se, cada α_i é par, ou seja, se, e somente se, n é um quadrado perfeito.

Relacionado com esta propriedade, apresentamos a seguir uma brincadeira que costuma fazer sucesso em sala de aula.

No vestiário de uma escola com n alunos, numerados de 1 a n , há n armários enfileirados em um corredor, também numerados de 1 a n . Um dia, os alunos resolvem fazer a seguinte brincadeira:

O primeiro aluno abre todos os armários. Em seguida, o aluno número 2 fecha todos os armários de número par. O aluno número 3 inverte as posições das portas dos armários de número múltiplo de 3. O aluno número 4 inverte as posições das portas dos armários de número múltiplo de 4, e assim sucessivamente. Pergunta-se, qual será a situação de cada um dos armários após todos os alunos terem completado a brincadeira?

Para responder à pergunta, analisemos a situação do armário de número m . Com a passagem do primeiro aluno, a porta será aberta. Em seguida, a porta só será mexida pelo aluno cujo número for o divisor seguinte $d_2 (> d_1 = 1)$ de m e novamente só será mexida pelo aluno cujo número for o divisor seguinte $d_3 (> d_2)$ de m , e assim sucessivamente. Portanto, a situação da porta do m -ésimo armário será: aberto, fechado, aberto, fechado, ..., alternando-se a medida que forem passando em ordem crescente os divisores de m .

Quando o n -ésimo aluno terminar a sua tarefa, teremos passado por todos os divisores de m , pois se d é um divisor de m , então $d \leq m \leq n$. Portanto, a porta do m -ésimo armário estará aberta ou fechada dependendo se o número de divisores de m é ímpar ou par. Conseqüentemente, a porta do m -ésimo armário estará aberta se, e somente se, m for um quadrado perfeito.

A fatoração de números naturais em primos revela toda a estrutura multiplicativa desses números, permitindo, entre muitas outras coisas, determinar facilmente o mdc e o mmc de um conjunto qualquer de números.

Teorema 7.1.2. *Sejam $a = p_1^{\alpha_1} \cdots p_n^{\alpha_n}$ e $b = p_1^{\beta_1} \cdots p_n^{\beta_n}$. Pondo*

$$\gamma_i = \min\{\alpha_i, \beta_i\}, \quad \delta_i = \max\{\alpha_i, \beta_i\}, \quad i = 1, \dots, n,$$

tem-se que

$$(a, b) = p_1^{\gamma_1} \cdots p_n^{\gamma_n} \quad \text{e} \quad [a, b] = p_1^{\delta_1} \cdots p_n^{\delta_n}.$$

DEMONSTRAÇÃO: É claro, pela Proposição 7.1.2, que $p_1^{\gamma_1} \cdots p_r^{\gamma_r}$ é um divisor comum de a e b . Seja c um divisor comum de a e b ; logo, $c = p_1^{\varepsilon_1} \cdots p_r^{\varepsilon_r}$, onde $\varepsilon_i \leq \min\{\alpha_i, \beta_i\}$ e, portanto, $c|p_1^{\gamma_1} \cdots p_n^{\gamma_n}$. Do mesmo modo, prova-se a asserção sobre o mmc.

□

Exemplo 7.1.2. Dados $a, b \in \mathbb{N}^*$, vamos determinar para quais pares de números naturais a e b temos que $[a, b] = (a, b)^2$.

Vimos no Problema 5.3.6(b) que, se $a = b^2$ ou $b = a^2$, vale a igualdade acima. Vamos provar que a equação $[a, b] = (a, b)^2$ tem muitas outras soluções além dessas.

Sejam $a = p_1^{\alpha_1} \cdots p_n^{\alpha_n}$ e $b = p_1^{\beta_1} \cdots p_n^{\beta_n}$. A igualdade

$$[a, b] = (a, b)^2$$

nos diz que

$$\max\{\alpha_i, \beta_i\} = 2 \min\{\alpha_i, \beta_i\}, \quad i = 1, \dots, n.$$

Isto equivale a dizer que

$$\forall i = 1, \dots, n, \quad \alpha_i = 2\beta_i \text{ ou } \beta_i = 2\alpha_i.$$

Por exemplo, se $a = 2^2 5$ e $b = 2 \cdot 5^2$, então $[a, b] = 2^2 5^2$ e $(a, b) = 2 \cdot 5$, o que mostra que a e b formam uma solução da equação $[a, b] = (a, b)^2$.

Em geral, a equação $[a, b] = (a, b)^r$ tem por solução pares de números $a = p_1^{\alpha_1} \cdots p_n^{\alpha_n}$ e $b = p_1^{\beta_1} \cdots p_n^{\beta_n}$ tais que, para todo $i = 1, \dots, n$, tem-se que $\alpha_i = r\beta_i$ ou $\beta_i = r\alpha_i$.

Exemplo 7.1.3. Dados dois números naturais d e m , vamos resolver em X, Y , nos naturais, o sistema de equações:

$$(X, Y) = d, \quad [X, Y] = m.$$

É claro que uma condição necessária para que o sistema tenha solução é que $d|m$. Esta condição é também suficiente, pois $(m, d) = d$ e $[m, d] = m$.

Portanto, limitaremos a nossa análise para o caso em que $d|m$.

Escrevamos as decomposições de d e m em fatores primos:

$$d = p_1^{\gamma_1} \cdots p_r^{\gamma_r}, \quad m = p_1^{\delta_1} \cdots p_r^{\delta_r},$$

onde $\gamma_i \leq \delta_i$. Então, pelo Teorema 7.1.2, temos que $X = a$ e $Y = b$ é uma solução do sistema se, e somente se,

$$a = p_1^{\alpha_1} \cdots p_r^{\alpha_r} \quad b = p_1^{\beta_1} \cdots p_r^{\beta_r},$$

onde

$$\gamma_i = \min\{\alpha_i, \beta_i\} \quad \text{e} \quad \delta_i = \max\{\alpha_i, \beta_i\}, \quad i = 1, \dots, r.$$

Portanto, temos para a uma ou duas escolhas para α_i , segundo se $\gamma_i = \delta_i$, ou se $\gamma_i \neq \delta_i$. Conseqüentemente, temos 2^s escolhas para a , onde

$$s = \{i; \quad \gamma_i \neq \delta_i\}.$$

Como, para cada escolha de a , o número b é univocamente determinado, temos que o problema admite 2^s soluções. Se ainda quisermos identificar uma solução a, b com b, a , devemos dividir o número 2^s por 2, obtendo 2^{s-1} soluções.

Exemplo 7.1.4. Seja $n > 4$ um número natural composto; vamos provar que $n|(n - 2)!$

Provaremos inicialmente que $n|(n - 1)!$.

De fato, suponha que $n = n_1 n_2$ com $n_1 < n$ e $n_2 < n$. Se $n_1 \neq n_2$, podemos supor que $n_1 < n_2$, e portanto,

$$(n - 1)! = 1 \cdots n_1 \cdots n_2 \cdots (n - 1),$$

o que mostra que $n|(n - 1)!$, neste caso.

Suponhamos que $n_1 = n_2 > 2$. Logo,

$$(n - 1)! = 1 \cdots n_1 \cdots 2n_1 \cdots (n - 1),$$

o que implica também que $n (= n_1 n_1)$ divide $(n - 1)!$.

Agora, note que $(n, n - 1) = 1$ e que $n|(n - 2)!(n - 1)$; portanto, $n|(n - 2)!$.

A propriedade acima pode ser generalizada como segue:

Sejam $n > 4$ composto e p o menor número primo que divide n ; então, $n|(n - p)!$

De fato, temos que $(n - 1, n) = 1, \dots, (n - 2, n) = 1, \dots, (n - (p - 1), n) = 1$. Logo, segue que $((n - 1)(n - 2) \cdots (n - p + 1), n) = 1$, o que, em vista do fato de $n|(n - 1)!$, acarreta o resultado.

Problemas

7.1.1 Ache os possíveis valores de $n, m \in \mathbb{N}$ de modo que o número $9^m 10^n$ tenha:

- a) 27 divisores b) 243 divisores.

7.1.2 Qual é a forma geral dos números naturais que admitem:

- a) um só divisor além de 1 e dele próprio?
b) um número primo de divisores?

7.1.3 Sejam $a, b \in \mathbb{N}^*$, com $(a, b) = 1$. Mostre que, se ab é um quadrado, então a e b são quadrados.

7.1.4 (ENC-2002) Qual é o menor valor do número natural n que torna $n!$ divisível por 1000?

7.1.5 Com quantos zeros termina o número $1000!?$ Qual é a potência de 3 que aparece na decomposição de $1000!$ em fatores primos?

7.1.6 Mostre que existem infinitos valores de $n \in \mathbb{N}$ para os quais $8n^2 + 5$ é divisível por 77.

7.1.7 Mostre que a soma de todos os números naturais menores ou iguais a n divide o seu produto se, e somente se, $n + 1$ é composto.

7.1.8 Usando a caracterização de mdc e mmc de dois números a e b através da fatoração em primos desses números, prove que $(a, b)[a, b] = ab$.

7.1.9 Mostre que, se $a, b \in \mathbb{N}$ e $n \in \mathbb{N}^*$, então $(a^n, b^n) = (a, b)^n$ e que $[a^n, b^n] = [a, b]^n$.

7.1.10 Seja $p > 1$ um número natural com a seguinte propriedade: Se p divide o produto de dois inteiros quaisquer, então p divide um dos fatores. Mostre que p é necessariamente primo.

7.1.11 Mostre que, se n e m são dois números naturais não nulos tais que $(n, m) = 1$, então $d(n \cdot m) = d(n)d(m)$.

7.1.12* Mostre que, se n é composto, então o n -ésimo número de Fibonacci u_n é composto.

7.2 Sobre a Distribuição dos Números Primos

Quantos serão os números primos? Essa pergunta foi respondida por Euclides no Livro IX dos Elementos. Utilizaremos a mesma prova dada por Euclides, onde pela primeira vez se registra o uso de uma demonstração por redução ao absurdo em matemática. Essa prova é considerada uma das pérolas da matemática.

Teorema 7.2.1. *Existem infinitos números primos.*

DEMONSTRAÇÃO: Suponha que exista apenas um número finito de números primos p_1, \dots, p_r . Considere o número natural

$$n = p_1 p_2 \cdots p_r + 1.$$

Pelo Teorema 7.1.1, o número n possui um fator primo p que, portanto, deve ser um dos p_1, \dots, p_r e, consequentemente, divide o produto $p_1 p_2 \cdots p_r$. Mas isto implica que p divide 1, o que é absurdo.

□

Agora que sabemos que existem infinitos números primos, nos perguntamos, inicialmente, como podemos obter uma lista contendo os números primos até uma dada ordem. A seguir, apresentaremos um dos mais antigos métodos para elaborar tabelas de números primos, devido ao matemático grego Eratóstenes, que viveu por volta de 230 anos antes de Cristo. O método, chamado de Crivo de Eratóstenes, permite determinar todos os números primos até a ordem que se desejar, mas não é muito eficiente para ordens muito elevadas.

Por exemplo, vamos elaborar a tabela de todos os números primos inferiores a 120.

Escrevem-se todos os números naturais de 2 a 120. Riscam-se, de modo sistemático, todos os números compostos da tabela, seguindo o roteiro abaixo.

Risque todos os múltiplos de 2 acima de 2, já que nenhum deles é primo.

O segundo número não riscado é 3, que é primo. Risque todos os múltiplos de 3 maiores do que 3 pois esses não são primos.

O terceiro número não riscado que aparece é 5, que é primo. Risque todos os múltiplos de 5 maiores do que 5 pois esses não são primos.

O quarto número não riscado que ora aparece é 7, que é primo. Risque todos os múltiplos de 7 maiores do que 7 pois esses não são primos.

Será necessário prosseguir com este procedimento até chegar a 120? A resposta é não e se baseia no seguinte resultado devido ao próprio Eratóstenes.

Lema 7.2.1. *Se um número natural $n > 1$ não é divisível por nenhum número primo p tal que $p^2 \leq n$, então ele é primo.*

DEMONSTRAÇÃO: Suponhamos, por absurdo, que n não seja divisível por nenhum número primo p tal que $p^2 \leq n$ e que não seja primo. Seja q o menor número primo que divide n ; então, $n = qn_1$, com $q \leq n_1$. Segue daí que $q^2 \leq qn_1 = n$. Logo, n é divisível por um número primo q tal que $q^2 \leq n$, absurdo.

□

Portanto, na nossa tabela de números de 2 a 120, devemos ir até alcançarmos o primo 7, pois o próximo primo é 11, cujo quadrado supera 120.

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	1/4	1/5	1/6	17	1/8	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120

Note que o Lema 7.2.1 também nos fornece um teste de primalidade, pois, para verificar se um dado número n é primo, basta verificar que não é divisível por nenhum primo p que não supere \sqrt{n} .

Tanto o crivo de Eratóstenes para gerar números primos, quanto o teste de primalidade acima descrito, são extremamente lentos e trabalhosos. Muitos progressos têm sido feitos

nessa direção¹.

Uma questão importante que se coloca é de como os números primos se distribuem dentro dos números naturais. Em particular, qual pode ser a distância entre dois primos consecutivos? Qual é a sua freqüência?

Olhando para a tabela acima, nota-se que há vários pares de números primos que diferem de duas unidades. Esses são: (3,5), (5,7), (11,13), (17,19), (41,43), (59, 61), (71, 73), (101,103), (107, 109).

Pares de números primos com esta propriedade são chamados de *primos gêmeos*. Até o presente momento, ainda não se sabe se existem infinitos pares de números primos gêmeos.

Por outro lado, em contraste com esses pares de primos consecutivos muito próximos, existem primos consecutivos arbitrariamente afastados.

De fato, dado n , a seqüência

$$(n+1)! + 2, (n+1)! + 3, \dots, (n+1)! + n + 1$$

de números naturais é formada por n números consecutivos compostos.

Portanto, a resposta à primeira pergunta é que não há nenhum padrão que descreva o quanto dois primos consecutivos estão longe um do outro.

Quanto à segunda pergunta, é necessário formalizar o conceito de freqüência de primos, que é a mesma coisa que probabilidade. Denotemos, por $\pi(x)$, a quantidade de números primos menores ou iguais a x . Portanto, a probabilidade de que um elemento do conjunto $\{1, \dots, x\}$ seja primo é dada por

$$\frac{\pi(x)}{x}.$$

Como este quociente é uma função bastante complexa, o que se gostaria de fazer é achar uma função de comportamento bem conhecido que se aproxima do quociente acima para n suficientemente grande.

Legendre e Gauss, analisando tabelas, chegaram à conclusão de que este quociente tem a ver com $\frac{1}{\ln x}$. Por volta de 1900, J. Hadamard e Ch. de la Vallée-Poussin, independentemente, provaram o profundo resultado chamado de *Teorema dos Números Primos* e cujo enunciado simplesmente é

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\pi(x)}{x} \left(\frac{1}{\ln x} \right)^{-1} = 1.$$

¹Veja, por exemplo, o livro: Primalidade em Tempo Polinomial de S. C. Coutinho, Coleção Iniciação Científica, Sociedade Brasileira de Matemática

Em 1949, A. Selberg simplificou substancialmente a prova do Teorema dos Números Primos, merecendo por esse seu trabalho a Medalha Fields².

A distribuição dos números primos é algo ainda bastante misterioso e a ela estão associados muitos problemas em aberto. Por exemplo, o já citado problema de saber se existem infinitos números primos gêmeos. Listamos abaixo alguns problemas em aberto acerca da distribuição dos números primos:

- 1) Sempre existe um número primo entre n^2 e $(n + 1)^2$ para qualquer $n \in \mathbb{N}^*$?
- 2) Para $n = 0, 1, \dots, 40$, tem-se que $n^2 - n + 41$ é primo. Existem infinitos números primos dessa forma?
- 3) A seqüência de Fibonacci contém infinitos números primos?

Uma outra curiosidade matemática, ainda em aberto, é a famosa conjectura que Goldbach formulou a Euler em 1742 e que afirma que todo número natural par maior do que 3 pode ser escrito como soma de dois números primos. O matemático russo Ivan Vinogradov, em 1937, demonstrou o difícil teorema que garante que todo número natural ímpar, suficientemente grande, pode ser escrito como soma de, no máximo, três números primos.

Esse tipo de problema, que relaciona as estruturas aditiva e multiplicativa de \mathbb{N} , em geral é muito difícil.

Finalmente, não podemos deixar de mencionar o mais importante problema em aberto em Teoria dos Números: a Hipótese de Riemann. Trata-se de uma conjectura formulada por Riemann e que está muito além do material aqui exposto. Esta conjectura, ao contrário do Último Teorema de Fermat³, tem uma multíitude de consequências, cuja confirmação apenas depende da prova do resultado. Se provado o teorema, muitos dos mistérios dos números primos serão revelados, o que deixará o seu realizador num destacado lugar entre os imortais da matemática.

Problemas

7.2.1 Quais dos números abaixo são primos?

- a) 239 b) 241 c) 247 d) 253 e) 1789

7.2.2 (ENC-98) Uma das afirmativas abaixo sobre números naturais é **FALSA**. Qual é ela?

(A) Dado um número primo, existe sempre um número primo maior do que ele.

²Até recentemente, a Medalha Fields era a maior distinção dada a um indivíduo por sua contribuição à Matemática. Em 2003, foi outorgado, pela primeira vez, o Prêmio Abel para a Matemática, correspondente ao prêmio Nobel para as outras áreas, e que foi conferido ao matemático francês Jean Pierre Serre, que também foi vencedor da Medalha Fields em 1954. Serre realizou importantes trabalhos em Teoria dos Números.

³Veja a nota histórica no final do capítulo.

- (B) Se dois números não primos são primos entre si, um deles é ímpar.
 (C) Um número primo é sempre ímpar.
 (D) O produto de três números naturais consecutivos é múltiplo de 6.
 (E) A soma de três números naturais consecutivos é múltiplo de três.

7.3 Pequeno Teorema de Fermat

Desde, pelo menos, 500 anos antes de Cristo, os chineses sabiam que, se p é um número primo, então $p|2^p - 2$. Coube a Pierre de Fermat, no século XVII, generalizar este resultado, enunciando um pequeno mas notável teorema que se constitui no resultado central desta seção.

Para demonstrar o Teorema de Fermat, necessitaremos do lema a seguir.

Lema 7.3.1. *Seja p um número primo. Os números $\binom{p}{i}$, onde $0 < i < p$, são todos divisíveis por p .*

DEMONSTRAÇÃO: O resultado vale trivialmente para $i = 1$. Podemos, então, supor $1 < i < p$. Neste caso, $i!|p(p-1)\cdots(p-i+1)$. Como $(i!, p) = 1$, decorre que $i!|(p-1)\cdots(p-i+1)$, e o resultado se segue, pois

$$\binom{p}{i} = p \frac{(p-1)\cdots(p-i+1)}{i!}.$$

□

Teorema 7.3.1 (Pequeno Teorema de Fermat). *Dado um número primo p , tem-se que p divide o número $a^p - a$, para todo $a \in \mathbb{N}$.*

DEMONSTRAÇÃO: Vamos provar o resultado por indução sobre a . O resultado vale claramente para $a = 1$, pois $p|0$.

Supondo o resultado válido para a , iremos prová-lo para $a+1$. Pela fórmula do binômio de Newton,

$$(a+1)^p - (a+1) = a^p - a + \binom{p}{1}a^{p-1} + \cdots + \binom{p}{p-1}a.$$

Como, pelo Lema 7.3.1 e pela hipótese de indução, o segundo membro da igualdade acima é divisível por p , o resultado se segue.

□

Exemplo 7.3.1. Dado um número qualquer $n \in \mathbb{N}$, tem-se que $n^9 \equiv n$, quando escritos na base 10, têm o mesmo algarismo da unidade.

A afirmação acima é equivalente a $10|n^9 - n$. Como n^9 e n têm a mesma paridade, segue-se que $n^9 - n$ é par; i.e., $2|n^9 - n$.

Por outro lado,

$$n^9 - n = n(n^4 - 1)(n^4 + 1) = (n^5 - n)(n^4 + 1).$$

Logo, pelo Pequeno Teorema de Fermat, temos que $5|n^5 - n$ e, portanto, $5|n^9 - n$. Tem-se, então, que $10|n^9 - n$.

Corolário. *Se p é um número primo e se a é um número natural não divisível por p , então p divide $a^{p-1} - 1$.*

DEMONSTRAÇÃO: Como, pelo Pequeno Teorema de Fermat, $p|a(a^{p-1} - 1)$ e como $(a, p) = 1$, segue-se, imediatamente, que p divide $a^{p-1} - 1$.

□

O Corolário acima também será chamado de Pequeno Teorema de Fermat.

Note que o Pequeno Teorema de Fermat nos fornece um teste de não primalidade. De fato, dado $m \in \mathbb{N}$, com $m > 1$, se existir algum $a \in \mathbb{N}$, com $(a, m) = 1$, tal que $m \nmid a^{m-1} - 1$, então m não é primo.

Os chineses achavam também que se m era composto, então $m \nmid 2^m - 2$, uma recíproca do Teorema de Fermat, no caso $a = 2$. Muitos matemáticos acreditavam neste resultado, até que, em 1819, Sarrus mostrou que o número $341 (= 31 \times 11)$ divide $2^{341} - 2$.

Poder-se-ia perguntar se vale a recíproca mais restritiva do Pequeno Teorema de Fermat:

Dado um inteiro $m > 1$, a condição $m|a^{m-1} - 1$ para todo $a \in \mathbb{N}$ tal que $(a, m) = 1$, acarreta, necessariamente, que m é primo?

Veremos, no próximo exemplo, que isto também é falso.

Exemplo 7.3.2. Seja $a \in \mathbb{N}$ tal que $(a, 3) = (a, 11) = (a, 17) = 1$. Note que essa condição é equivalente a $(a, 561) = 1$, pois $3 \cdot 11 \cdot 17 = 561$.

Por outro lado,

$$(a^{280}, 3) = (a^{56}, 11) = (a^{35}, 17) = 1,$$

e, portanto, pelo Pequeno Teorema de Fermat, 3 divide $(a^{280})^2 - 1 = a^{560} - 1$, 11 divide $(a^{56})^{10} - 1 = a^{560} - 1$ e 17 divide $(a^{35})^{16} - 1 = a^{560} - 1$.

Segue-se daí que 561 divide $a^{560} - 1$, para todo a tal que $(a, 561) = 1$, sem que 561 seja primo.

Exemplo 7.3.3. O Pequeno Teorema de Fermat nos diz que

$$47 | 2^{46} - 1 .$$

Logo, temos que

$$47 \mid (2^{23} - 1)(2^{23} + 1),$$

e como

$$(2^{23} - 1, 2^{23} + 1) = (2^{23} - 1, 2) = 1,$$

segue-se que 47 divide um, e apenas um, dos números $2^{23} - 1$ ou $2^{23} + 1$.

Como decidir qual dessas duas opções, acima, é verificada?

Em geral, o Pequeno Teorema de Fermat nos diz que se $p > 2$ é um número primo e a um número natural tal que $p \nmid a$, então tem-se que

$$p \mid (a^{\frac{p-1}{2}} - 1)(a^{\frac{p-1}{2}} + 1).$$

Como p é primo, tem-se que $p \mid (a^{\frac{p-1}{2}} - 1)$ ou $p \mid (a^{\frac{p-1}{2}} + 1)$.

Decidir qual das duas condições de divisibilidade, acima, ocorre, é, em geral, um problema difícil. No Capítulo 11, veremos como esta questão se relaciona de modo inesperado com outra, envolvendo resíduos quadráticos (ou seja, certas equações diofantinas do segundo grau), através de um critério devido a Euler.

Problemas

7.3.1 Mostre que $42 \mid a^7 - a$ para todo número natural a .

7.3.2 Ache o resto da divisão de 12^{p-1} por p quando p é primo.

7.3.3 Mostre que, para todo $n \in \mathbb{N}$, é natural o número

$$\frac{3}{5}n^5 + \frac{2}{3}n^3 + \frac{11}{15}n.$$

7.3.4 Mostre que, para todo $n \in \mathbb{N}$, $15 \mid 3n^5 + 5n^3 + 7n$.

7.3.5 Seja $n \in \mathbb{N}^*$. Mostre que

a) Se $5 \nmid n$, $5 \nmid n - 1$, $5 \nmid n + 1$, então $5 \mid n^2 + 1$.

b) Se $7 \nmid n$, $7 \nmid n - 1$, $7 \nmid n^3 + 1$, então $7 \mid n^2 + n + 1$.

7.3.6 Sejam $a, k \in \mathbb{N}^*$. Mostre que $7 \mid a^{6k} - 1$, se $(a, 7) = 1$.

7.3.7 Mostre que $a^{13} - a$ é divisível por 2, 3, 5, 7, 13 e 273, para todo $a \in \mathbb{N}$.

7.3.8 Mostre que $a^{12} - b^{12}$ é divisível por 13, se a e b são primos com 13. Mostre também que é divisível por 91, se a e b são primos com 91.

Problemas Suplementares

- 7.S.1** Se p e q são números primos $p \geq q \geq 5$, então $24|p^2 - q^2$.
- 7.S.2** Todo primo da forma $3n + 1$ é também da forma $6m + 1$.
- 7.S.3** Mostre que o único número primo da forma $n^3 + 1$ é 7.
- 7.S.4** O único número primo n tal que $3n + 1$ é um quadrado é 5.
- 7.S.5** Seja $k \in \mathbb{N}$, $k > 2$. Mostre que
- Se k divide $a_1 - 1, a_2 - 1, \dots, a_r - 1$, então k divide $a_1 a_2 \cdots a_r - 1$.
 - Se $n > 0$, então existe um primo p tal que $k \nmid (p - 1)$ e $p|(nk - 1)$.
 - Existem infinitos primos p tais que $k \nmid (p - 1)$.
- 7.S.6** Mostre que existe uma correspondência biunívoca entre pares de primos gêmeos e números n tais que $n^2 - 1$ possui quatro divisores.
- 7.S.7** Mostre que o produto dos divisores de um inteiro positivo n é $n^{s/2}$, onde s é o número de divisores de n .
- 7.S.8** Prove que, se r é o número de fatores primos distintos de $n \in \mathbb{N}^*$, o número de modos em que n pode ser fatorado como produto de dois números relativamente primos é 2^{r-1} .
- 7.S.9** Seja $n > 2$. Mostre que entre n e $n!$ existe pelo menos um número primo.
- 7.S.10** Mostre que se $p, p + 2$ e $p + 4$ são primos, então $p = 3$.
- 7.S.11** a) Sejam $m, n \in \mathbb{N}$ de paridade distinta. Mostre que $3|a^m - a^n$.
 b) Seja $p > 3$ um número primo. Mostre que $a^p - a$ e $a^p b - b^p a$ são divisíveis por $6p$, para todos $a, b \in \mathbb{N}$, com $a > b$.
- 7.S.12** Sejam $a, b \in \mathbb{N}$, com $(a, b) = 1$, e $n \in \mathbb{N}$ tal que $n + 2 = p$ é um número primo. Mostre que o mdc de $a + b$ e $a^2 - nab + b^2$ deve ser 1 ou p .
- 7.S.13** Seja p um número primo ímpar. Mostre que pode-se escrever $p = y^2 - x^2$, com $x, y \in \mathbb{N}$, de modo único.
- 7.S.14** Sejam $a, b, n, m \in \mathbb{N}^*$ e suponha que $a^n + b^m$ seja um número primo. Mostre que $(n, m) = 1$, ou $(n, m) = 2^r$, para algum $r \in \mathbb{N}$.

7.4 O Renascimento da Aritmética

A Renascença, movimento ocorrido entre os séculos XIII e XV na Europa, cujas características principais foram a luta contra os preconceitos da época e a redescoberta e a leitura dos clássicos gregos, teve por consequência uma revolução nas artes, na ciência e nos costumes.

Este movimento atingiu a Matemática um pouco mais tarde. Em 1575, Regiomonto traduziu para o latim o tratado *Aritmética*, de Diofanto. Em 1621, Bachet de Méziriac publicou uma edição francesa que se tornaria protagonista de uma das mais ricas histórias de toda a Matemática.

Por esta época, ocorre o renascimento da aritmética, na acepção de Platão, essencialmente por obra do jurista francês Pierre de Fermat (1601-1665). Na época, era comum os matemáticos não divulgarem as demonstrações dos resultados que descobriam, lançando-os como desafio para outros. Os resultados de Fermat foram divulgados por meio de sua correspondência, principalmente com o padre Marin Mersenne, que desempenhava o papel de divulgador da Matemática. Numa de suas cartas de 1640, Fermat enunciou o seu Pequeno Teorema, dizendo que não escreveria a demonstração por ser longa demais.

Fermat descobriu vários teoremas em Teoria dos Números, mas a sua contribuição mais marcante foi a anotação que deixou na margem do Problema 8, Livro 2, de sua cópia de Bachet da *Aritmética* de Diofanto, onde se encontravam descritas as infinitas soluções da equação pitagórica $X^2 + Y^2 = Z^2$. Fermat escreveu: “*Por outro lado, é impossível separar um cubo em dois cubos, ou uma biquadrada em duas biquadradas, ou, em geral, uma potência qualquer, exceto um quadrado em duas potências semelhantes. Eu descobri uma demonstração verdadeiramente maravilhosa disto, que todavia esta margem não é suficientemente grande para cabê-la.*”

Esta afirmação de Fermat, apesar de não demonstrada por ele, acabou sendo chamada de Último Teorema de Fermat. Passaram-se mais de 350 anos e muita matemática foi desenvolvida para que, em 1995, o matemático inglês Andrew Wiles desse uma prova, encerrando este glorioso capítulo da história da Matemática.

Um outro problema cuja solução desde há muito era procurada pelos matemáticos é a determinação de fórmulas geradoras de números primos. Fermat morreu com a convicção de que a expressão $2^{2^n} + 1$ representava sempre um número primo, admitindo, no entanto, não ser capaz de prová-lo rigorosamente. Esta fórmula produz números primos para $n = 0, 1, 2, 3$ e 4 , mas a crença de Fermat revelou-se posteriormente falsa com a apresentação de uma fatoração de $2^{2^5} + 1$ por Leonhard Euler. Este foi o mais importante matemático do século 18 e que provou todos os resultados de Fermat, exceto, obviamente, o Último Teorema, do qual mostrou que $X^3 + Y^3 = Z^3$ e $X^4 + Y^4 = Z^4$ (este também provado por Fermat) não admitem soluções em inteiros positivos.

8

Números Especiais

Neste Capítulo, estudaremos algumas propriedades de certos números primos que possuem formas especiais e de certos números que possuem propriedades especiais.

8.1 Primos de Fermat e de Mersenne

Nesta seção, estudaremos alguns tipos de números primos especiais famosos. O primeiro resultado relaciona-se com os números conhecidos como números de Fermat em homenagem a Pierre de Fermat (1601-1665), jurista francês e matemático amador. Após Euclides e Eratóstenes, Fermat é considerado o primeiro matemático a contribuir para o desenvolvimento da Teoria dos Números do ponto de vista teórico. Muitos dos resultados e problemas deixados por Fermat motivaram o extraordinário avanço da Matemática.

Proposição 8.1.1. *Sejam a e n números naturais maiores do que 1. Se $a^n + 1$ é primo, então a é par e $n = 2^m$, com $m \in \mathbb{N}$.*

DEMONSTRAÇÃO: Suponhamos que $a^n + 1$ seja primo, onde $a > 1$ e $n > 1$. Logo, a tem que ser par, pois, caso contrário, $a^n + 1$ seria par e maior do que dois, o que contradiz o fato de ser primo.

Se n tivesse um divisor primo p diferente de 2, teríamos $n = n'p$ com $n' \in \mathbb{N}^*$. Portanto, pela Proposição 3.1.8, $a^{n'} + 1$ dividiria $(a^{n'})^p + 1 = a^n + 1$, contradizendo o fato desse último número ser primo. Isto implica que n é da forma 2^m .

□

Os *números de Fermat* são os números da forma

$$F_n = 2^{2^n} + 1.$$

Em 1640, Fermat escreveu em uma de suas cartas que achava que esses números eram todos primos, baseado na observação de que $F_1 = 5$, $F_2 = 17$, $F_3 = 257$, $F_4 = 65537$ são primos.

Em 1732, Leonhard Euler mostrou que

$$F_5 = 2^{2^5} + 1 = 4.294.967.297 = 641 \cdot 6700417,$$

portanto, composto (veja Exemplos 9.2.2 e 10.1.4), desmentindo assim a afirmação de Fermat.

Os números de Fermat primos são chamados de *primos de Fermat*. Até hoje, não se sabe se existem outros primos de Fermat além dos quatro primeiros. Conjeturou-se (Hardy e Wright) que os primos de Fermat são em número finito.

Um resultado que já provamos acerca desses números, Corolário da Proposição 6.2.3, é o seguinte:

$$(F_n, F_m) = 1, \quad \text{se } n \neq m.$$

Note que esse resultado nos fornece uma outra prova de que existem infinitos números primos, pois cada número de Fermat tem pelo menos um divisor primo (Teorema 7.1.1) e esses divisores primos são todos distintos.

O resultado que se segue relaciona-se com outros números primos também famosos.

Proposição 8.1.2. *Sejam a e n números naturais maiores do que 1. Se $a^n - 1$ é primo, então $a = 2$ e n é primo.*

DEMONSTRAÇÃO: Suponhamos que $a^n - 1$ seja primo, com $a > 1$ e $n > 1$.

Suponhamos, por absurdo, que $a > 2$. Logo, $a - 1 > 1$ e $a - 1 | a^n - 1$ (Proposição 3.1.7), e, portanto, $a^n - 1$ não é primo, contradição. Conseqüentemente, $a = 2$.

Por outro lado, suponha, por absurdo, que n não é primo. Temos que $n = rs$ com $r > 1$ e $s > 1$. Como $2^r - 1$ divide $(2^r)^s - 1 = 2^n - 1$ (novamente, Proposição 3.1.7), segue que $2^n - 1$ não é primo, contradição. Logo, n é primo.

□

Os *números de Mersenne* são os números da forma

$$M_p = 2^p - 1,$$

onde p é um número primo.

No intervalo $2 \leq p \leq 5000$ os números de Mersenne que são primos, chamados de *primos de Mersenne*, correspondem aos seguintes valores de p : 2, 3, 5, 7, 13, 19, 31, 61, 89, 107, 127, 521, 607, 1279, 2203, 2281, 3217, 4253 e 4423. Até dezembro de 2001, o maior primo de Mersenne conhecido era $M_{13466917}$, que possui no sistema decimal 4053946 dígitos, e é o trigésimo nono primo de Mersenne conhecido.

Enunciaremos a seguir, sem demonstração, um resultado profundo devido ao matemático alemão do século dezenove Lejeune Dirichlet:

Teorema (de Dirichlet). *Em uma PA de números naturais, com primeiro termo e razão primos entre si, existem infinitos números primos.*

A demonstração deste resultado é muito difícil e pertence à teoria analítica dos números. No entanto, demonstraremos alguns casos particulares de teorema. O primeiro caso particular é o seguinte:

Proposição 8.1.3. *Na progressão aritmética $3, 7, 11, 15, \dots, 3 + 4n, \dots$ existem infinitos números primos.*

DEMONSTRAÇÃO: Trata-se de mostrar que existem infinitos números primos da forma $4n + 3$.

Inicialmente, note que todo primo ímpar é da forma $4n + 1$ ou $4n + 3$.

Em seguida, observemos que o conjunto $\Lambda = \{4n + 1; n \in \mathbb{N}\}$ é fechado multiplicativamente. De fato,

$$(4n + 1)(4n' + 1) = 4(4nn' + n + n') + 1.$$

Suponhamos agora, por absurdo, que haja apenas um número finito de números primos $p_1 < \dots < p_k$ da forma $4n + 3$, com $n \geq 1$. O número $a = 4(p_1 \cdot p_2 \cdots p_k) + 3$ não é divisível por nenhum dos números primos $3, p_1, \dots, p_k$ e, portanto, sua decomposição em fatores primo só pode conter primos da forma $4n + 1$. Conseqüentemente, a é da forma $4n + 1$, o que é uma contradição, pois é da forma $4n + 3$.

□

Mostrar que existem infinitos primos da forma $4n + 1$ é um pouco mais sutil e será provado a seguir.

Antes, porém, provaremos um lema que será necessário para a prova do resultado.

Lema 8.1.1. *Seja $x \in \mathbb{N}^*$, com $x \geq 2$. Todo divisor ímpar de $x^2 + 1$ é da forma $4n + 1$.*

DEMONSTRAÇÃO: Inicialmente, provaremos que todo divisor primo $p \neq 2$ de $x^2 + 1$ é da forma $4n + 1$. O resultado, em geral, seguirá disso, pois o conjunto $\Lambda = \{4n + 1; n \in \mathbb{N}\}$ é fechado multiplicativamente (provamos isso no decorrer da demonstração da Proposição 8.1.3).

Suponhamos, então, que $p|x^2 + 1$, com p primo maior do que 2. Temos que $(p - 1)/2 \in \mathbb{N}$ e, para algum $\lambda \in \mathbb{N}$, que $x^2 + 1 = \lambda p$. Conseqüentemente,

$$x^2 = \lambda p - 1.$$

Elevando à potência $(p - 1)/2$ ambos os lados da igualdade acima, temos, para alguns $\mu, \mu' \in \mathbb{N}$, que (veja o Problema 2.1.6)

$$x^{p-1} = (x^2)^{\frac{p-1}{2}} = (\lambda p - 1)^{\frac{p-1}{2}} = \begin{cases} \mu p + 1, & \text{se } \frac{p-1}{2} \text{ é par} \\ \mu' p - 1, & \text{se } \frac{p-1}{2} \text{ é ímpar} \end{cases}$$

Se

$$x^{p-1} = \mu' p - 1,$$

subtraindo 1 de ambos os lado, teríamos que

$$x^{p-1} - 1 = \mu' p - 2. \quad (8.1)$$

Como $p|x^2 + 1$, segue que $p \nmid x$ (justifique!). Logo, pelo Pequeno Teorema de Fermat, temos que $p|x^{p-1} - 1$ e, consequentemente, por (8.1) $p|2$, o que é uma contradição.

Portanto, a única alternativa possível é que $\frac{p-1}{2}$ seja par, o que implica que p é da forma $4n + 1$.

□

Proposição 8.1.4. *Na progressão aritmética $1, 5, 9, 13, 17, \dots, 4n+1, \dots$ existem infinitos números primos.*

DEMONSTRAÇÃO: Suponha, por absurdo, que haja um número finito p_1, \dots, p_k de primos da forma $4n + 1$. Considere o número

$$a = 4p_1^2 \cdots p_k^2 + 1.$$

Como $p_i \nmid a$, para todo $i = 1, \dots, k$; logo, todo divisor primo de a é da forma $4n + 3$, o que é um absurdo, em vista do Lema 8.1.1.

□

No Corolário da Proposição 10.1.5, provaremos outro caso particular do teorema de Dirichlet, cuja prova requererá mais instrumentos do que dispomos no momento.

Problemas

8.1.1* Mostre que todo divisor de um número de Fermat F_n é da forma $4m + 1$.

8.1.2 Se p e q são dois números primos distintos, mostre que

$$(M_p, M_q) = 1.$$

8.1.3 Sejam dados $n, m \in \mathbb{N}$,

a) Mostre que, se $m < n$, então $F_m|F_n - 2$.

b) Dê uma outra prova para: $(F_n, F_m) = 1$, se $n \neq m$.

8.1.4 Mostre que existem infinitos números primos da forma $6n + 5$.

8.1.5 Mostre que existem infinitos números primos da forma $3n + 2$.

8.1.6* Seja p_n o n -ésimo número primo. Mostre que $p_n \leq 2^{2^{n-2}} + 1$.

8.1.7* Considere a seqüência de Fibonacci (u_n). Mostre que, se n é ímpar, então os divisores ímpares de u_n são da forma $4k + 1$.

8.2 Números Perfeitos

Seja n um número natural maior do que 1. Denotemos por $S(n)$ a soma de todos os seus divisores. Note que $S(0)$ não está definido e que $S(1) = 1$.

Se $n \geq 2$, o próximo resultado nos fornecerá uma fórmula para $S(n)$ em função da decomposição de n em fatores primos.

Proposição 8.2.1. *Seja $n = p_1^{\alpha_1} \cdots p_r^{\alpha_r}$, onde p_1, \dots, p_r são números primos e $\alpha_1, \dots, \alpha_r \in \mathbb{N}^*$. Então,*

$$S(n) = \frac{p_1^{\alpha_1+1} - 1}{p_1 - 1} \cdots \frac{p_r^{\alpha_r+1} - 1}{p_r - 1}.$$

DEMONSTRAÇÃO: Considere igualdade

$$(1 + p_1 + \cdots + p_1^{\alpha_1}) \cdots (1 + p_r + \cdots + p_r^{\alpha_r}) = \sum p_1^{\beta_1} \cdots p_r^{\beta_r},$$

onde o somatório do lado direito da igualdade é tomado sobre todas as r -uplas $(\beta_1, \dots, \beta_r)$ ao variar de cada β_i no intervalo $0 \leq \beta_i \leq \alpha_i$, para $i = 0, \dots, r$. Como tal somatório, pela Proposição 7.1.2, representa a soma de todos os divisores de n , a fórmula para $S(n)$ resulta aplicando a fórmula da soma de uma progressão geométrica a cada soma do lado esquerdo da igualdade acima.

□

Segue-se imediatamente do resultado acima, o seguinte corolário.

Corolário. *A função $S(n)$ é multiplicativa; isto é, se $(n, m) = 1$, então $S(n \cdot m) = S(n)S(m)$.*

Exemplo 8.2.1. $S(3) = \frac{2^2 - 1}{2 - 1} = 4$.

$S(6) = S(2 \cdot 3) = \frac{2^2 - 1}{2 - 1} \frac{3^2 - 1}{3 - 1} = 12$.

$S(18) = S(2 \cdot 3^2) = \frac{2^2 - 1}{2 - 1} \frac{3^3 - 1}{3 - 1} = 39$.

$S(28) = S(2^2 \cdot 7) = \frac{2^3 - 1}{2 - 1} \frac{7^2 - 1}{7 - 1} = 56$.

$S(45) = S(3^2 \cdot 5) = \frac{3^3 - 1}{3 - 1} \frac{5^2 - 1}{5 - 1} = 78$.

Note que $S(18) = 39 \neq 48 = S(3)S(6)$; e, portanto, a conclusão do corolário acima não vale se $(n, m) \neq 1$.

Os números como 6 e 28, com a propriedade de serem iguais à metade da soma de seus divisores, tiveram o poder de fascinar os gregos antigos, que os chamaram de números perfeitos.

Mais precisamente, um número n é chamado de *número perfeito* se $S(n) = 2n$. Ou ainda, se o número é igual à soma dos seus divisores distintos dele mesmo.

Até a Idade Média, conheciam-se apenas os seguintes números perfeitos: 6, 28, 496, 8128 e 33550336.

Atualmente, conhecem-se mais alguns números perfeitos. Um fato curioso é que todos os números perfeitos conhecidos são pares. Não se sabe nada sobre a existência ou não de números perfeitos ímpares. O teorema que enunciaremos abaixo, parte devida a Euclides e parte devida a Euler, caracterizará os números perfeitos pares, relacionando-os com os números de Mersenne definidos na seção anterior. Antes, porém, daremos um pequeno lema.

Lema 8.2.1. *Seja $n \in \mathbb{N}^*$. Tem-se que $S(n) = n + 1$ se, e somente se, n é um número primo.*

DEMONSTRAÇÃO: Se $S(n) = n + 1$, segue-se que $n > 1$ e que os únicos divisores de n são 1 e n ; logo, n é primo.

Reciprocamente, se n é primo, da Proposição 8.2.1, segue-se que $S(n) = \frac{n^2 - 1}{n - 1} = n + 1$.

□

Teorema 8.2.1 (Euclides-Euler). *Um número natural n é um número perfeito par se, e somente se, $n = 2^{p-1}(2^p - 1)$, onde $2^p - 1$ é um primo de Mersenne.*

DEMONSTRAÇÃO: Suponha que $n = 2^{p-1}(2^p - 1)$, onde $2^p - 1$ é um primo de Mersenne. Logo, $p > 1$, e, consequentemente, n é par.

Como $2^p - 1$ é ímpar, temos que $(2^{p-1}, 2^p - 1) = 1$. Logo, pela Proposição 8.2.1, o seu corolário e o Lema 8.2.1, segue-se que

$$S(n) = S(2^{p-1}(2^p - 1)) = S(2^{p-1})S(2^p - 1) = \frac{2^p - 1}{2 - 1} 2^p = 2n.$$

Portanto, n é perfeito.

Reciprocamente, suponha que n é perfeito e par. Seja 2^{p-1} a maior potência de 2 que divide n . Logo, $p > 1$ e $n = 2^{p-1}b$ com b ímpar. Temos, então, que $(2^{p-1}, b) = 1$ e, pela Proposição 8.2.1 e o seu corolário, segue-se que $S(n) = (2^p - 1)S(b)$. Como $S(n) = 2n$, segue-se que

$$(2^p - 1)S(b) = 2^p b. \quad (8.2)$$

Daí segue-se que $(2^p - 1)|b$ pois $(2^p, 2^p - 1) = 1$. Logo, existe $c \in \mathbb{N}$ com $c < b$ tal que

$$b = c(2^p - 1). \quad (8.3)$$

Substituindo (8.3) em (8.2), segue-se que

$$(2^p - 1)S(b) = 2^p(2^p - 1)c;$$

portanto,

$$S(b) = 2^p c. \quad (8.4)$$

De (8.3) temos que c e b são dois divisores distintos de b tais que $c + b = 2^p c$.

Nesta situação, $c = 1$. De fato, suponha, por absurdo, que $c \neq 1$. Temos, então, que $S(b) \geq 1 + c + b > c + b = 2^p c$. Disto e de (8.4) segue-se que

$$2^p c = c + b < S(b) = 2^p c,$$

contradição.

Portanto, de (8.3) e (8.4) segue-se que $S(b) = b + 1$. Logo, pelo Lema 8.2.1, b é primo. Temos, assim, que $n = 2^{p-1}(2^p - 1)$ com $2^p - 1$ primo.

□

A primeira parte da demonstração do teorema acima, sem dúvida a mais fácil, já se encontra nos *Elementos* de Euclides (Proposição 36, livro IX). A recíproca data do século 18 e é devida a Euler. O fato do número $2^p - 1$, no enunciado do teorema, ser um número primo de Mersenne, implica que p é primo. Note, ainda, que o teorema reduz a existência ou não de um número infinito de números perfeitos pares ao problema análogo para primos de Mersenne.

Problemas

8.2.1 Mostre que a soma dos inversos dos divisores de um número perfeito par é sempre igual a 2.

8.2.2 Seja $a_n = 2^{2n}(2^{2n+1} - 1)$. Mostre por indução sobre n que

$$a_{2n+1} = 256a_{2n-1} + 60(16^n),$$

$$a_{2n+2} = 256a_{2n} + 240(16^n).$$

8.3 Decomposição do Fatorial em Fatores Primos

Nesta Seção, iremos mostrar como achar a fatoração em números primos de $n!$, onde n é um número natural arbitrário.

Por conveniência, vamos designar pelo símbolo $\left[\frac{b}{a} \right]$ o quociente da divisão de b por a , na divisão euclidiana.

Note, para uso futuro, que, se $a > b$, então $\left[\frac{b}{a} \right] = 0$.

Temos a seguinte propriedade relacionada com os quocientes da divisão euclidiana:

Proposição 8.3.1. *Sejam $a \in \mathbb{N}$ e $b, c \in \mathbb{N}^*$. Temos que*

$$\left[\frac{\left[\frac{a}{b} \right]}{c} \right] = \left[\frac{a}{bc} \right].$$

DEMONSTRAÇÃO: Sejam

$$q_1 = \left[\frac{a}{b} \right] \quad \text{e} \quad q_2 = \left[\frac{\left[\frac{a}{b} \right]}{c} \right].$$

Logo,

$$a = bq_1 + r_1, \quad \text{com } r_1 \leq b - 1$$

e

$$\left[\frac{a}{b} \right] = q_1 = cq_2 + r_2, \quad \text{com } r_2 \leq c - 1.$$

Portanto,

$$a = bq_1 + r_1 = b(cq_2 + r_2) + r_1 = bcq_2 + br_2 + r_1.$$

Como

$$br_2 + r_1 \leq b(c - 1) + b - 1 = bc - 1,$$

segue-se que q_2 é o quociente da divisão de a por bc , ou seja,

$$q_2 = \left[\frac{a}{bc} \right].$$

□

O que acabamos de provar enuncia-se com palavras como: *O quociente da divisão por c do quociente da divisão de a por b é igual ao quociente da divisão de a por b vezes c .*

Dados um número primo p e um número natural m , vamos denotar por $E_p(m)$ o expoente da maior potência de p que divide m , ou seja, é o expoente da potência de p que aparece na fatoração de m em fatores primos.

Em particular, $E_p(n!)$ representará a potência de p que aparece na fatoração de $n!$ em fatores primos.

Teorema 8.3.1 (Legendre). *Sejam n um número natural e p um número primo. Então,*

$$E_p(n!) = \left[\frac{n}{p} \right] + \left[\frac{n}{p^2} \right] + \left[\frac{n}{p^3} \right] + \dots$$

DEMONSTRAÇÃO: Note, inicialmente, que a soma acima é finita, pois existe um número natural r tal que $p^i > n$ para todo $i \geq r$ (veja Lema 2.3.1); portanto, $\left[\frac{n}{p^i} \right] = 0$, se $i \geq r$.

Vamos demonstrar o resultado por indução sobre n . A fórmula vale trivialmente para $n = 0$. Suponha que o resultado vale para qualquer natural m com $m < n$. Sabemos que os múltiplos de p entre 1 e n são

$$p, 2p, \dots, \left[\frac{n}{p} \right] p.$$

Portanto,

$$E_p(n!) = \left[\frac{n}{p} \right] + E_p\left(\left[\frac{n}{p} \right]!\right).$$

Pela hipótese de indução, temos que

$$E_p\left(\left[\frac{n}{p} \right]!\right) = \left[\frac{\left[\frac{n}{p} \right]}{p} \right] + \left[\frac{\left[\frac{n}{p} \right]}{p^2} \right] + \dots$$

O resultado, agora, decorre da Proposição 8.3.1.

□

Na prática, é fácil calcular $E_p(n!)$. Isto se faz com o uso do seguinte algoritmo:

$$n = pq_1 + r_1$$

$$q_1 = pq_2 + r_2$$

...

$$q_{s-1} = pq_s + r_s.$$

Como $q_1 > q_2 > \dots$, segue-se que, para algum s , tem-se que $q_s < p$. Portanto, segue-se que

$$E_p(n!) = q_1 + q_2 + \dots + q_s.$$

Exemplo 8.3.1. Vamos determinar a decomposição de $10!$ em fatores primos e descobrir com quantos zeros termina a representação decimal desse número.

Para resolvemos o problema, deveremos achar $E_p(10!)$ para todo primo $p \leq 10$.

Sendo $E_2(10!) = 5 + 2 + 1 = 8$, $E_3(10!) = 3 + 1 = 4$, $E_5(10!) = 2$, $E_7(10!) = 1$, segue-se que

$$10! = 2^8 3^4 5^2 7.$$

Conseqüentemente, como há dois fatores iguais a 5 e oito fatores iguais a 2 na decomposição de $10!$ em fatores primos, vê-se, imediatamente, que $10!$ termina com dois zeros.

Para extraímos um corolário do teorema acima, necessitaremos do seguinte lema.

Lema 8.3.1. *Sejam a_1, \dots, a_m, b números naturais, com $b \neq 0$. Tem-se que*

$$\left[\frac{a_1 + \dots + a_m}{b} \right] \geq \left[\frac{a_1}{b} \right] + \dots + \left[\frac{a_m}{b} \right].$$

DEMONSTRAÇÃO: Sejam q_i e r_i respectivamente o quociente e o resto da divisão de a_i por b para $i = 1, \dots, m$. Somando, membro a membro, as igualdades $a_i = bq_i + r_i$, segue-se que

$$a_1 + \dots + a_m = (q_1 + \dots + q_m)b + r_1 + \dots + r_m.$$

Segue-se daí que o quociente da divisão de $a_1 + \dots + a_m$ por b é maior ou igual do que $q_1 + \dots + q_m$, pois $r_1 + \dots + r_m$ poderia superar $b - 1$. Isto é o que se queria provar.

□

Corolário. *Se a_1, \dots, a_m, b são números naturais com $b \neq 0$, então é natural o número*

$$\frac{(a_1 + \dots + a_m)!}{a_1! \cdots a_m!}.$$

DEMONSTRAÇÃO: De fato, pelo Lema 8.3.1, para todo número primo p e todo número natural i , temos que

$$\left[\frac{a_1 + \dots + a_m}{p^i} \right] \geq \left[\frac{a_1}{p^i} \right] + \dots + \left[\frac{a_m}{p^i} \right].$$

Somando, membro a membro, as desigualdades acima, obtemos que

$$E_p((a_1 + \dots + a_m)!) \geq E_p(a_1!) + \dots + E_p(a_m!),$$

o que prova o resultado.

□

O próximo resultado relacionará $E_p(n!)$ e a representação p -ádica de n (i.e., a representação relativa à base p).

Teorema 8.3.2. *Sejam $p, n \in \mathbb{N}^*$ com p primo. Suponha que*

$$n = n_r p^r + n_{r-1} p^{r-1} + \cdots + n_1 p + n_0$$

seja a representação p -ádica de n . Então

$$E_p(n!) = \frac{n - (n_0 + n_1 + \cdots + n_r)}{p - 1}.$$

DEMONSTRAÇÃO: Sendo $0 \leq n_i < p$, temos que

$$\begin{aligned} \left[\frac{n}{p} \right] &= n_r p^{r-1} + n_{r-1} p^{r-2} + \cdots + n_2 p + n_1 \\ \left[\frac{n}{p^2} \right] &= n_r p^{r-2} + n_{r-1} p^{r-3} + \cdots + n_2 \\ \cdots \\ \left[\frac{n}{p^r} \right] &= n_r \end{aligned}$$

Portanto,

$$\begin{aligned} E_p(n!) &= \left[\frac{n}{p} \right] + \left[\frac{n}{p^2} \right] + \cdots + \left[\frac{n}{p^r} \right] = \\ &n_r \frac{p^r - 1}{p - 1} + n_{r-1} \frac{p^{r-2} - 1}{p - 1} + \cdots + n_1 = \\ &\frac{n_r p^r + n_{r-1} p^{r-1} + \cdots + n_1 p + n_0 - (n_r + n_{r-1} + \cdots + n_1 + n_0)}{p - 1} = \\ &\frac{n - (n_0 + n_1 + \cdots + n_r)}{p - 1}. \end{aligned}$$

□

Problemas

8.3.1 Ache a decomposição em fatores primos de $100!$ e determine com quantos zeros termina a representação decimal desse número.

- 8.3.2** a) Ache as maiores potências de 2 e de 5 que dividem 10000!.
 b) Determine com quanto zeros termina a representação decimal de 10000!.
 c) Ache a maior potência de 104 que divide 10000!.

8.3.3 Ache o menor valor de n , de modo que a maior potência de 5 que divide $n!$ seja 5^{84} . Quais são os outros números que gozam dessa propriedade?

8.3.4 Mostre que não há nenhum número natural n tal que 3^7 seja a maior potência de 3 que divide $n!$.

8.3.5 Dados $a_1, \dots, a_m \in \mathbb{N}$ e $b \in \mathbb{N}^*$, mostre que

$$\left[\frac{a_1}{b} \right] + \cdots + \left[\frac{a_m}{b} \right] \leq \left[\frac{a_1 + \cdots + a_m}{b} \right] \leq \left[\frac{a_1}{b} \right] + \cdots + \left[\frac{a_m}{b} \right] + m.$$

8.3.6 Mostre que, se $m, n \in \mathbb{N}$ são tais que $(m, n) = 1$, então

$$\frac{(m+n-1)!}{m!n!} \in \mathbb{N}.$$

8.3.7 Sejam $m, n, b \in \mathbb{N}$ com $b \neq 0$. Mostre que

- a) $\left[\frac{2m}{b} \right] + \left[\frac{2n}{b} \right] \geq \left[\frac{m}{b} \right] + \left[\frac{n}{b} \right] + \left[\frac{m+n}{b} \right].$
 b) $\frac{(2m)!(2n)!}{m!n!(m+n)!}$ é um número natural.

8.3.8 Sejam $n, m \in \mathbb{N}$; mostre que $(n \cdot m)!$ é divisível por $[(n!)^m, (m!)^n]$.

8.3.9 Mostre que $(n!)^{(n-1)!}$ divide $(n!)!$.

8.3.10 Sejam $n, a_1, \dots, a_r \in \mathbb{N}$ e $d = (a_1, \dots, a_r)$. Mostre que é natural o número

$$\frac{d(n-1)!}{a_1! \cdots a_r!}.$$

8.4 Euler, um Gigante da Matemática

Leonhard Euler (1707-1783) foi, sem dúvida, um dos maiores e mais férteis matemáticos de todos os tempos.

Euler nasceu na Suíça, perto da cidade de Basileia, filho de um modesto pastor protestante que nutria a esperança de que seu filho seguisse a mesma carreira.

Euler possuía uma grande facilidade para o aprendizado de línguas e uma prodigiosa memória, aliada a uma extraordinária habilidade para efetuar mentalmente contas complexas, habilidade esta que lhe seria muito útil no final de sua vida. Aos 14 anos, ingressou

na Universidade da Basileia, onde foi aluno de Johann Bernoulli, com quem teve a sua verdadeira iniciação à matemática. Aos 20 anos de idade, Euler recebeu menção honrosa da Academia de Ciências de Paris por um trabalho sobre a trajetória do mastro de um barco em movimento, ganhando reconhecimento internacional.

Em 1727, começa a sua carreira profissional, assumindo uma posição como físico na nova Academia de São Petersburgo, na Rússia. Foi nessa época que conheceu Christian Goldbach, que chamou a sua atenção para os problemas tratados por Fermat, fato esse responsável pela grande obra de Euler em Aritmética. Em 1733, Euler assumiu a cátedra de matemática na Academia de São Petersburgo.

Um de seus primeiros grandes sucessos em matemática foi calcular, em 1735, o valor exato da soma infinita

$$1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{9} + \frac{1}{16} + \frac{1}{25} + \dots$$

Cálculos numéricos indicavam que o valor aproximado desta soma era $8/5$, ficando em aberto, por cerca de um século, o problema de determinar o valor exato da soma. Euler surpreendeu os matemáticos provando que a soma da série é $\pi^2/6$.

Euler produziu freneticamente resultados matemáticos ao longo de sua longa vida científica, que só cessou com a sua morte. Em 1738, Euler perde a visão de seu olho direito, ficando totalmente cego em 1771, não diminuindo por isto a sua produtividade científica. Durante muito tempo, a metade de cada volume dos anais da Academia de São Petersburgo era dedicada a seus trabalhos e, durante 48 anos após a sua morte, ainda neles eram publicados artigos seus.

Euler escreveu sobre os mais variados assuntos, tais como, teoria das funções, cálculo diferencial e integral, números complexos, acústica, música, teoria dos números, teoria das partições e mecânica, entre muitos outros, ocupando, indiscutivelmente, um lugar entre os maiores matemáticos de todos os tempos.

9

Congruências

Neste Capítulo, apresentaremos uma das noções mais fecundas da aritmética, introduzida por Gauss no seu livro *Disquisitiones Arithmeticae*, de 1801. Trata-se da realização de uma aritmética com os restos da divisão euclidiana por um número fixado.

9.1 Aritmética dos Restos

Seja m um número natural diferente de zero. Diremos que dois números naturais a e b são *congruentes* módulo m se os restos de sua divisão euclidiana por m são iguais. Quando os inteiros a e b são congruentes módulo m , escreve-se

$$a \equiv b \pmod{m}$$

Por exemplo, $21 \equiv 13 \pmod{2}$, já que os restos da divisão de 21 e de 13 por 2 são iguais a 1.

Quando a relação $a \equiv b \pmod{m}$ for falsa, diremos que a e b não são congruentes, ou que são incongruentes, módulo m . Escreveremos, neste caso, $a \not\equiv b \pmod{m}$.

Como o resto da divisão de um número natural qualquer por 1 é sempre nulo, temos que $a \equiv b \pmod{1}$, quaisquer que sejam $a, b \in \mathbb{N}$. Isto torna desinteressante a aritmética dos restos módulo 1. Portanto, doravante, consideraremos sempre $m > 1$.

Decorre, imediatamente, da definição que a congruência, módulo um inteiro fixado m , é uma relação de equivalência. Vamos enunciar isto explicitamente abaixo.

Proposição 9.1.1. *Seja $m \in \mathbb{N}$, com $m > 1$. Para todos $a, b, c \in \mathbb{N}$, tem-se que*

- (i) $a \equiv a \pmod{m}$,
- (ii) se $a \equiv b \pmod{m}$, então $b \equiv a \pmod{m}$,
- (iii) se $a \equiv b \pmod{m}$ e $b \equiv c \pmod{m}$, então $a \equiv c \pmod{m}$.

Para verificar se dois números são congruentes módulo m , não é necessário efetuar a divisão euclidiana de ambos por m para depois comparar os seus restos. É suficiente aplicar o seguinte resultado:

Proposição 9.1.2. *Suponha que $a, b \in \mathbb{N}$ são tais que $b \geq a$. Tem-se que $a \equiv b \pmod{m}$ se, e somente se, $m|b - a$.*

DEMONSTRAÇÃO: Sejam $a = mq + r$, com $r < m$ e $b = mq' + r'$, com $r' < m$, as divisões euclidianas de a e b por m , respectivamente. Logo,

$$b - a = \begin{cases} m(q' - q) + (r' - r), & \text{se } r' \geq r \\ m(q' - q) - (r - r'), & \text{se } r \geq r' \end{cases}$$

onde $r' - r < m$, ou $r - r' < m$. Portanto, $a \equiv b \pmod{m}$ se, e somente se, $r = r'$, o que é equivalente a dizer que $m|b - a$.

□

Note que todo número natural é congruente módulo m ao seu resto pela divisão euclidiana por m e, portanto, é congruente módulo m a um dos números $0, 1, \dots, m - 1$. Além disso, dois desses números distintos não são congruentes módulo m .

Portanto, para achar o resto da divisão de um número a por m , basta achar o número natural r dentre os números $0, \dots, m - 1$ que seja congruente a a módulo m .

Chamaremos de *sistema completo de resíduos* módulo m a todo conjunto de números naturais cujos restos pela divisão por m são os números $0, 1, \dots, m - 1$, sem repetições e numa ordem qualquer.

Portanto, um sistema completo de resíduos módulo m possui m elementos.

É claro que, se a_1, \dots, a_m são m números naturais, dois a dois não congruentes módulo m , então eles formam um sistema completo de resíduos módulo m . De fato, os restos da divisão dos a_i por m são dois a dois distintos, o que implica que são os números $0, 1, \dots, m - 1$ em alguma ordem.

O que torna útil e poderosa a noção de congruência é o fato de ser uma relação de equivalência compatível com as operações de adição e multiplicação nos inteiros, conforme veremos na proposição a seguir.

Proposição 9.1.3. *Sejam $a, b, c, d, m \in \mathbb{N}$, com $m > 1$.*

- i) *Se $a \equiv b \pmod{m}$ e $c \equiv d \pmod{m}$, então $a + c \equiv b + d \pmod{m}$.*
- ii) *Se $a \equiv b \pmod{m}$ e $c \equiv d \pmod{m}$, então $ac \equiv bd \pmod{m}$.*

DEMONSTRAÇÃO: Suponhamos que $a \equiv b \pmod{m}$ e $c \equiv d \pmod{m}$. Podemos, sem perda de generalidade, supor que $b \geq a$ e $d \geq c$. Logo, temos que $m|b - a$ e $m|d - c$.

- (i) Basta observar que $m|(b-a)+(d-c)$ e, portanto, $m|(b+d)-(a+c)$, o que prova essa parte do resultado.
(ii) Basta notar que $bd-ac = d(b-a)+a(d-c)$ e concluir que $m|bd-ac$.

□

Corolário 1. Para todos $n \in \mathbb{N}^*$, $a, b \in \mathbb{N}$, se $a \equiv b \pmod{m}$, então $a^n \equiv b^n \pmod{m}$.

DEMONSTRAÇÃO: A demonstração faz-se por indução sobre n e não apresenta nenhuma dificuldade.

□

Corolário 2. Sejam $a, b, m \in \mathbb{N}^*$, com $m > 1$. Se $a+b \equiv 0 \pmod{m}$, então, para todo $n \in \mathbb{N}$, tem-se que

$$a^{2n} \equiv b^{2n} \pmod{m} \quad \text{e} \quad a^{2n+1} + b^{2n+1} \equiv 0 \pmod{m}.$$

DEMONSTRAÇÃO: O resultado é claramente válido para $n = 0$. Podemos ainda supor, sem perda de generalidade, que $a \geq b$.

Como $a+b \equiv 0 \pmod{m}$, segue-se que $m|a+b$ e, portanto, $m|(a+b)(a-b)$. Como $(a+b)(a-b) = a^2 - b^2$, segue-se que $a^2 \equiv b^2 \pmod{m}$. Aplicando o Corolário 1, temos que $a^{2n} \equiv b^{2n} \pmod{m}$ para todo $n \in \mathbb{N}^*$.

Por outro lado, como

$$a^{2n+1} + b^{2n+1} = (a+b)(a^{2n} - ba^{2n-1} + \dots - b^{2n-1}a + b^{2n}),$$

e $m|a+b$, segue-se que $m|a^{2n+1} + b^{2n+1}$ e, portanto, $a^{2n+1} + b^{2n+1} \equiv 0 \pmod{m}$.

□

Observação 9.1.1. O corolário acima será de grande utilidade no que se segue e substitui as seguintes relações:

$$a \equiv -b \pmod{m} \implies a^{2n} \equiv b^{2n} \quad \text{e} \quad a^{2n+1} \equiv -b^{2n+1} \pmod{m},$$

já que não trabalhamos com números negativos.

Com a notação de congruências, o Pequeno Teorema de Fermat se enuncia como se segue:

Se p é número primo e $a \in \mathbb{N}$, então

$$a^p \equiv a \pmod{p}.$$

Além disso, se $p \nmid a$, então

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}.$$

Exemplo 9.1.1. Sejam p um número primo e $a, b \in \mathbb{N}$. Vamos mostrar que

$$(a + b)^p \equiv a^p + b^p \pmod{p}.$$

O resultado decorre da formulação acima do Pequeno Teorema de Fermat, pois

$$(a + b)^p \equiv a + b \equiv a^p + b^p \pmod{p}.$$

Exemplo 9.1.2. Se $b \geq a$ e p é primo, então $(b - a)^p \equiv b^p - a^p \pmod{p}$.

Pelo Exemplo 9.1.1, temos que

$$b^p = (b - a + a)^p \equiv (b - a)^p + a^p \pmod{p},$$

o que implica o resultado, levando em conta o Problema 9.1.2 (b).

Exemplo 9.1.3. Sejam $a, b, p \in \mathbb{N}$, com p primo. Vamos mostrar que

$$a^p \equiv b^p \pmod{p} \implies a^p \equiv b^p \pmod{p^2}.$$

De fato, sem perda de generalidade, podemos supor que $b \geq a$. Sabemos, pelo Exemplo 9.1.2, que

$$b^p - a^p \equiv (b - a)^p \pmod{p},$$

e como, por hipótese, temos que p divide $b^p - a^p$, segue-se que $p|b - a$; ou seja, $a \equiv b \pmod{p}$. Isto implica que $a^i \equiv b^i \pmod{p}$ para todo $i \in \mathbb{N}$. Decorre daí que

$$b^{p-1} + ab^{p-2} + \cdots + a^{p-2}b + a^{p-1} \equiv pa^{p-1} \equiv 0 \pmod{p}.$$

Logo, o resultado decorre, pois

$$b^p - a^p = (b - a)(b^{p-1} + ab^{p-2} + \cdots + a^{p-2}b + a^{p-1}),$$

e ambos os fatores no lado direito são divisíveis por p .

Proposição 9.1.4. Sejam $a, b, c, m \in \mathbb{N}$, com $m > 1$. Tem-se que

$$a + c \equiv b + c \pmod{m} \iff a \equiv b \pmod{m}.$$

DEMONSTRAÇÃO: Se $a \equiv b \pmod{m}$, segue-se imediatamente da Proposição 9.1.3(i) que $a + c \equiv b + c \pmod{m}$, pois $c \equiv c \pmod{m}$.

Reciprocamente, suponhamos que $a + c \equiv b + c \pmod{m}$. Sem perda de generalidade, podemos supor $b + c \geq a + c$. Logo, $m|b + c - (a + c)$, o que implica que $m|b - a$ e, consequentemente, $a \equiv b \pmod{m}$.

□

A proposição acima nos diz que, para as congruências, vale o cancelamento com relação à adição. Entretanto, não vale, em geral, o cancelamento para a multiplicação, como pode-se verificar no exemplo que se segue.

Exemplo 9.1.4. Como $6 \cdot 9 - 6 \cdot 5 = 24$ e $8|24$, temos que $6 \cdot 9 \equiv 6 \cdot 5 \pmod{8}$, e, no entanto, $9 \not\equiv 5 \pmod{8}$.

Iremos, a seguir, dar um resultado relacionado com o cancelamento multiplicativo.

Proposição 9.1.5. Sejam $a, b, c, m \in \mathbb{N}$, com $c \neq 0$ e $m > 1$. Temos que

$$ac \equiv bc \pmod{m} \iff a \equiv b \pmod{\frac{m}{(c, m)}}.$$

DEMONSTRAÇÃO: Podemos supor, sem perda de generalidade, que $bc \geq ac$. Como $\frac{m}{(c, m)}$ e $\frac{c}{(c, m)}$ são coprimos, temos que

$$\begin{aligned} ac \equiv bc \pmod{m} &\iff m|(b-a)c \iff \frac{m}{(c, m)}|(b-a)\frac{c}{(c, m)} \\ &\iff \frac{m}{(c, m)}|b-a \iff a \equiv b \pmod{\frac{m}{(c, m)}}. \end{aligned}$$

□

Corolário. Sejam $a, b, c, m \in \mathbb{N}$, com $m > 1$ e $(c, m) = 1$. Temos que

$$ac \equiv bc \pmod{m} \iff a \equiv b \pmod{m}.$$

Proposição 9.1.6. Sejam $a, k, m \in \mathbb{N}$, com $m > 1$ e $(k, m) = 1$. Se a_1, \dots, a_m é um sistema completo de resíduos módulo m , então

$$a + ka_1, \dots, a + ka_m$$

também é um sistema completo de resíduos módulo m .

DEMONSTRAÇÃO: Como, do corolário acima, para $i, j = 0, \dots, m-1$, temos que

$$\begin{aligned} a + ka_i \equiv a + ka_j \pmod{m} &\iff ka_i \equiv ka_j \pmod{m} \\ &\iff a_i \equiv a_j \pmod{m} \iff i = j. \end{aligned}$$

Isto mostra que $a + ka_1, \dots, a + ka_m$ são, dois a dois, não congruentes módulo m e, portanto, formam um sistema completo de resíduos módulo m .

□

Daremos, a seguir, propriedades adicionais das congruências relacionadas com a multiplicação.

Proposição 9.1.7. *Sejam $a, b \in \mathbb{N}$, $m, n, m_1, \dots, m_r \in \mathbb{N} \setminus \{0, 1\}$. Temos que*

- i) se $a \equiv b \pmod{m}$ e $n|m$, então $a \equiv b \pmod{n}$;
- ii) $a \equiv b \pmod{m_i}$, $i = 1, \dots, r \iff a \equiv b \pmod{[m_1, \dots, m_r]}$;
- iii) se $a \equiv b \pmod{m}$, então $(a, m) = (b, m)$.

DEMONSTRAÇÃO: Suponhamos, sem perda de generalidade, que $b \geq a$.

- (i) Se $a \equiv b \pmod{m}$, então $m|b-a$. Como $n|m$, segue-se que $n|b-a$. Logo, $a \equiv b \pmod{n}$.
- (ii) Se $a \equiv b \pmod{m_i}$, $i = 1, \dots, r$, então $m_i|b-a$, para todo i . Sendo $b-a$ um múltiplo de cada m_i , segue-se que $[m_1, \dots, m_r]|b-a$, o que prova que $a \equiv b \pmod{[m_1, \dots, m_r]}$.

A recíproca decorre do ítem (i).

- (iii) Se $a \equiv b \pmod{m}$, então $m|b-a$ e, portanto, $b = a + tm$ com $t \in \mathbb{N}$. Logo, pelo Lema de Euclides, Capítulo 5, temos que

$$(a, m) = (a + tm, m) = (b, m).$$

□

Exemplo 9.1.5. Vamos achar o menor múltiplo de 7 que deixa resto 1 quando dividido por 2, 3, 4, 5 e 6.

Portanto, queremos achar a menor solução do seguinte sistema de congruências:

$$7X \equiv 1 \pmod{2}, \quad 7X \equiv 1 \pmod{3}, \quad 7X \equiv 1 \pmod{4}, \quad 7X \equiv 1 \pmod{5} \text{ e } 7X \equiv 1 \pmod{6}.$$

Pela Proposição 9.1.7(ii), temos que toda solução simultânea das congruências acima é solução da congruência

$$7X \equiv 1 \pmod{[2, 3, 4, 5, 6]},$$

e reciprocamente.

Portanto, devemos resolver a congruência $7X \equiv 1 \pmod{60}$. Isto se traduz como $60|7X - 1$, o que equivale a resolver a equação diofantina $7X - 60Y = 1$.

Pelo Algoritmo de Euclides, temos que

$$60 = 7 \cdot 8 + 4$$

$$7 = 4 \cdot 1 + 3$$

$$4 = 3 \cdot 1 + 1$$

Portanto,

$$1 = 4 - 3 \cdot 1 = 4 - (7 - 4) = 2 \cdot 4 - 7 = 2(60 - 7 \cdot 8) - 7 = 2 \cdot 60 - 17 \cdot 7.$$

Decorre daí que

$$1 = (\rho 60 - 17)7 - (\rho 7 - 2)60,$$

e, portanto, $x = \rho \cdot 60 - 17$ e $y = \rho \cdot 7 - 2$. Tomando $\rho = 1$, temos $x = 43$ e $y = 5$ é a solução minimal, pois $43 \cdot 7 - 5 \cdot 60$ é a única maneira de escrever $1 = a \cdot 7 - b \cdot 60$ com $a < 60$. Segue-se, então, que o número procurado é $7 \cdot 43 = 301$.

Exemplo 9.1.6. Vamos achar o resto da divisão de 237^{28} por 13.

Certamente, calcular a potência 237^{28} , para depois dividir o resultado por 13, não é o melhor caminho. Faremos isto de modo mais econômico.

Inicialmente, note que $237 \equiv 3 \pmod{13}$ (é só efetuar a divisão euclidiana e tomar o resto). Pelo Pequeno Teorema de Fermat, temos que $237^{12} \equiv 1 \pmod{13}$. Logo, pelo Corolário 1 da Proposição 9.1.3, temos que $(237^{12})^2 = 237^{24} \equiv 1 \pmod{13}$.

Analogamente, temos que $237^4 \equiv 3^4 \equiv 81 \equiv 3 \pmod{13}$. Usando a Proposição 9.1.3(ii), temos que $237^{28} \equiv 3 \pmod{13}$.

Portanto, o resto da divisão de 237^{28} por 13 é 3.

Exemplo 9.1.7. Vamos mostrar que $45|13^{3n} + 17^{3n}$, para todo número natural ímpar n .

Note que os resultados do Capítulo 3 não permitem mostrar diretamente a propriedade acima enunciada. Utilizando congruências, mostraremos como chegar à conclusão desejada.

De fato,

$$13^3 = 13^2 \cdot 13 \equiv 34 \cdot 13 = 442 \equiv 37 \pmod{45},$$

logo,

$$13^3 + 8 \equiv 0 \pmod{45}.$$

Portanto, como n é ímpar, pelo Corolário 2 da Proposição 9.1.3, temos que

$$13^{3n} + 8^n \equiv 0 \pmod{45}.$$

Por outro lado, como

$$17^3 = 17^2 \cdot 17 \equiv 19 \cdot 17 = 323 \equiv 8 \pmod{45},$$

segue-se que

$$17^{3n} \equiv 8^n \pmod{45}.$$

Agora, o resultado segue-se imediatamente.

Exemplo 9.1.8. Vamos determinar o algarismo das unidades do número 7^7 .

De fato, vamos determinar, mais geralmente, o algarismo das unidades de todo número da forma 7^{7^α} , onde α é um número natural ímpar.

Note, inicialmente, que $7 + 3 \equiv 0 \pmod{10}$ e, portanto, pelo Corolário 2 da Proposição 9.1.3, temos que

$$7^{7^\alpha} + 3^{7^\alpha} \equiv 0 \pmod{10}.$$

Por outro lado, de $3^2 + 1 \equiv 0 \pmod{10}$, do fato de $(7^\alpha - 1)/2$ é ímpar (veja Exemplo 3.2.5) e do Corolário 2 da Proposição 9.1.3, temos que

$$(3^2)^{\frac{7^\alpha-1}{2}} + 1 \equiv 0 \pmod{10}.$$

Logo,

$$3^{7^\alpha} + 3 = 3[(3^2)^{\frac{7^\alpha-1}{2}} + 1] \equiv 0 \pmod{10},$$

e, portanto,

$$7^{7^\alpha} \equiv 7^{7^\alpha} + 3^{7^\alpha} + 3 \equiv 3 \pmod{10}.$$

Conseqüentemente, o algarismo das unidades de 7^{7^α} é 3.

Problemas

9.1.1 Sejam $a, b, c, d, m, a_1, b_1, \dots, a_n, b_n \in \mathbb{N}$, com $m > 1$.

- a) Mostre que, se $a + b \equiv 0 \pmod{m}$ e $c + d \equiv 0 \pmod{m}$, então $ac \equiv bd \pmod{m}$.
- b) Mostre que, se $a \equiv b \pmod{m}$ e $c + d \equiv 0 \pmod{m}$, então $ac + bd \equiv 0 \pmod{m}$.
- c) Suponha que $a_i + b_i \equiv 0 \pmod{m}$, $i = 1, \dots, n$. Mostre que
se n é ímpar, então $a_1 \cdots a_n + b_1 \cdots b_n \equiv 0 \pmod{m}$; e,
se n é par, então $a_1 \cdots a_n \equiv b_1 \cdots b_n \pmod{m}$.
- d) Dê uma outra prova para o Corolário 2 da Proposição 9.1.3.

9.1.2 Sejam $a, b, c, m, x_0 \in \mathbb{N}$, com $m > 2$, $a \geq c$ e $0 \leq x_0 < m$.

- a) Mostre que, se $a \equiv b + c \pmod{m}$, então $a - c \equiv b \pmod{m}$.
- b) Mostre que $(m - x_0)^2 \equiv x_0^2 \pmod{m}$.

9.1.3 Sejam $a, p \in \mathbb{N}$, com p primo. Mostre que, se $a^2 \equiv 1 \pmod{p}$, então $a \equiv 1 \pmod{p}$ ou $a \equiv p - 1 \pmod{p}$.

9.1.4 Ache o resto da divisão

- | | |
|--|--------------------------------------|
| a) de 7^{10} por 51 | b) de 2^{100} por 11 |
| c) de 5^{21} por 127 | d) de 14^{256} por 17 |
| e) de $(116 + 17^{17})^{21}$ por 8 | f) de $13^{16} - 2^{25}5^{15}$ por 3 |
| g) de $1! + 2! + \cdots + (10^{10})!$ por 40 | |

9.1.5(ENC 98) O resto da divisão de 12^{12} por 5 é:

- (A) 0 (B) 1 (C) 2 (D) 3 (E) 4

9.1.6 Para todo $n \in \mathbb{N}$, mostre que

- a) $101^{6n} - 1$ é divisível por 70; b) $19^{8n} - 1$ é divisível por 17.

9.1.7 Determine o resto da divisão por 7 do número

- a) $10^{10} + 10^{10^2} + 10^{10^3} + \cdots + 10^{10^{100}}$ b) $1^7 + 2^7 + \cdots + 100^7$
 c) $1^6 + 2^6 + \cdots + 100^6$
 d) $2222^{5555} + 5555^{2222}$

9.1.8 Determine o resto da divisão por 4 do número

- a) $1 + 2 + 2^2 + \cdots + 2^{19}$ b) $1^5 + 2^5 + \cdots + 100^5$

9.1.9 Determine o algarismo das unidades do número 9^{9^9} .

9.1.10* Ache os algarismos das centenas e das unidades do número 7^{999999} .

9.1.11* Mostre, para todo $n \in \mathbb{N}$, que

- a) $10^{2n} \equiv 1 \pmod{11}$ b) $10^{2n+1} + 1 \equiv 0 \pmod{11}$

9.1.12(ENC 2000) Se $x^2 \equiv 1 \pmod{5}$, então,

- (A) $x \equiv 1 \pmod{5}$ (B) $x \equiv 2 \pmod{5}$ (C) $x \equiv 4 \pmod{5}$
 (D) $x \equiv 1 \pmod{5}$ ou $x \equiv 4 \pmod{5}$
 (E) $x \equiv 2 \pmod{5}$ ou $x \equiv 4 \pmod{5}$

9.1.13 Suponha que $m = p_1^{\alpha_1} \cdots p_r^{\alpha_r}$. Mostre que

$$a \equiv b \pmod{m} \iff a \equiv b \pmod{p_i^{\alpha_i}}, i = 1, \dots, r.$$

9.1.14* Ache o menor número natural que deixa restos 5, 4, 3 e 2 quando dividido, respectivamente, por 6, 5, 4 e 3.

9.1.15 a) Mostre que todo quadrado perfeito é congruente a 0, 1 ou 4, módulo 8.

b) Mostre que não há nenhum quadrado perfeito na seqüência: 2, 22, 222, 2222, 22222, ...

c) Mostre que não há nenhum quadrado perfeito na PA: 3, 11, 19,

9.1.16* Mostre que a soma dos quadrados de quatro números naturais consecutivos nunca pode ser um quadrado.

9.1.17* Mostre que nenhum número natural da forma $4n + 3$ pode ser escrito como a soma de dois quadrados.

9.1.18* Se $k > 2$, mostre, para a ímpar, que $a^{2^{k-2}} \equiv 1 \pmod{2^k}$.

9.2 Aplicações

A seguir, daremos algumas aplicações da noção de congruência.

Exemplo 9.2.1. Vamos mostrar que o número de Mersenne $M_{83} = 2^{83} - 1$ não é primo, apesar de 83 ser primo.

De fato, temos que

$$\begin{aligned} 2^8 &= 256 \equiv 89 \pmod{167} \\ 2^{16} &\equiv 7921 \equiv 72 \pmod{167} \\ 2^{32} &\equiv 5184 \equiv 7 \pmod{167} \\ 2^{64} &\equiv 49 \pmod{167} \end{aligned}$$

Daí, segue-se que

$$2^{83} = 2^{64}2^{16}2^3 \equiv 49 \cdot 72 \cdot 8 \equiv 1 \pmod{167},$$

o que implica que $2^{83} - 1$ é divisível por 167.

Exemplo 9.2.2. Vamos provar neste exemplo o resultado de Euler que afirma que o quinto número de Fermat $F_5 = 2^{2^5} + 1$ não é primo.

Note inicialmente que, da igualdade $641 = 5 \cdot 2^7 + 1$ e, do Corolário 2 da Proposição 9.1.3, segue-se que $5^4 2^{28} \equiv 1 \pmod{641}$. Disto e da igualdade $641 = 5^4 + 2^4$, temos que $5^4 \cdot 2^{28} + 2^{32} \equiv 0 \pmod{641}$, logo $1 + 2^{25} \equiv 0 \pmod{641}$, o que mostra que $641|F_5$.

Exemplo 9.2.3. Critérios de divisibilidade por 2, 5 e 10.

No Capítulo 4, discutimos critérios de divisibilidade por 2, 5, e 10. Revisaremos aqui estes critérios usando a noção de congruência.

Notando que $10 \equiv 0 \pmod{2}$, $10 \equiv 0 \pmod{5}$ e $10 \equiv 0 \pmod{10}$, temos que

$$n_i 10^i \equiv 0 \pmod{2}, \pmod{5}, \pmod{10}; \quad i \geq 1;$$

portanto, dado um número $n = n_r n_{r-1} \dots n_0$, na base 10, temos que

$$n \equiv n_0 \pmod{2}, \pmod{5}, \pmod{10},$$

o que nos diz que n é divisível por 2, 5 ou 10 se, e somente se, n_0 é divisível por 2, 5 ou 10. Daí decorrem os critérios que apresentamos na Proposição 4.1.1 e no Problema 4.1.3.

Exemplo 9.2.4. Critérios de divisibilidade por 3 e 9.

Vamos revisar estes critérios já apresentados no Capítulo 4.

Como $10 \equiv 1 \pmod{3}$, $10 \equiv 1 \pmod{9}$, segue-se que $n_i 10^i \equiv n_i \pmod{3}$, $\pmod{9}$. Isto mostra que, se n é representado na base 10 como $n_r n_{r-1} \dots n_0$, então

$$n \equiv n_r + n_{r-1} + \dots + n_0 \pmod{3}, \pmod{9},$$

o que prova que n é divisível por 3 ou 9 se, e somente se, $n_r + n_{r-1} + \dots + n_0$ é divisível, respectivamente, por 3 ou por 9.

Isto justifica a famosa regra dos “noves fora”, que se enuncia como se segue:

Para verificar se um dado número é divisível por 3 ou por 9, somam-se os seus algarismos, desprezando-se, ao efetuar a soma, cada parcela igual a nove. Se o resultado final for 0, então o número é divisível por 9. Se o resultado for um dos algarismos 0, 3 ou 6, então o número é divisível por 3.

Exemplo 9.2.5. Critério de divisibilidade por 11

Como $10 + 1 \equiv 0 \pmod{11}$, pelo Corolário 2 da Proposição 9.1.3, temos que $10^{2n} \equiv 1 \pmod{11}$ e $10^{2n+1} + 1 \equiv 0 \pmod{11}$.

Seja $n = n_r \dots n_5 n_4 n_3 n_2 n_1 n_0$ um número escrito na base 10. Temos, então, que

$$\begin{aligned} n_0 &\equiv n_0 \pmod{11} \\ n_1 10 + n_1 &\equiv 0 \pmod{11} \\ n_2 10^2 + n_2 &\equiv n_2 \pmod{11} \\ n_3 10^3 + n_3 &\equiv 0 \pmod{11} \\ &\dots \end{aligned}$$

Somando, membro a membro, as congruências acima, temos que

$$n + n_1 + n_3 + \dots \equiv n_0 + n_2 + \dots \pmod{11}$$

Portanto, n é divisível por 11 se, e somente se, $n \equiv 0 \pmod{11}$, o que equivale a

$$n_1 + n_3 + \dots \equiv n_0 + n_2 + \dots \pmod{11}.$$

Assim, acabamos de provar que um número natural é divisível por 11 se, e somente se, a soma dos seus algarismos de ordem par for congruente, módulo 11, à soma dos seus algarismos de ordem ímpar.

Exemplo 9.2.6. Prova dos nove.

A *prova dos nove* é um teste que se realiza nas quatro operações para detectar erros de contas. Como exemplo, suponhamos que efetuamos a multiplicação $a \cdot b$, obtendo o resultado c , cuja exatidão queremos verificar.

Suponha que na base 10 tenhamos

$$a = a_n a_{n-1} \dots a_1 a_0, \quad b = b_m b_{m-1} \dots b_1 b_0, \quad c = c_r c_{r-1} \dots c_1 c_0.$$

Após ter posto os noveis fora em $a_0 + a_1 + \dots + a_n$, obtém-se o algarismo a' . Fazendo o mesmo para b e c , obtemos os algarismos b' e c' . Efetua-se a multiplicação $a' \cdot b'$ e põem-se os noveis fora, obtendo c'' . Se $c' \neq c''$, então, certamente, foi cometido um erro na operação. A justificativa é a seguinte:

$$c' \equiv c \equiv a \cdot b \equiv a' \cdot b' \equiv c'' \pmod{9},$$

com $c < 9$ e $c' < 9$.

Caso $c' = c''$, nada podemos afirmar quanto à exatidão da operação efetuada, mas podemos garantir que a nossa conta tornou-se mais confiável por ter passado por um teste.

Exemplo 9.2.7. Todo número da forma $a_n = 2^{2n}(2^{2n+1} - 1)$, onde $n \geq 1$, na sua representação decimal, ou termina em 28 ou termina em $a6$, onde a é um algarismo ímpar. Em particular, todo número perfeito par termina de um desses modos.

De fato, recorde que, pelo Problema 6.4.2, temos que

$$a_{2k+2} = 256a_{2k} + 240 \cdot 16^k \text{ e } a_{2k+1} = 256a_{2k-1} + 60 \cdot 16^k.$$

Faremos agora a análise dos últimos dois algarismos de 16^n ao variar de n em \mathbb{N} .

Temos que

$$\begin{aligned} 16 &\equiv 16 \pmod{100} \\ 16^2 &\equiv 56 \pmod{100} \\ 16^3 &\equiv 96 \pmod{100} \\ 16^4 &\equiv 36 \pmod{100} \\ 16^5 &\equiv 76 \pmod{100} \\ 16^6 &\equiv 16 \pmod{100}, \end{aligned}$$

e, daí para a frente, esses números se repetem ciclicamente.

Portanto, para todo $n \in \mathbb{N}$, os dois últimos algarismos de 16^n são da forma $b6$, onde b é ímpar.

Observe agora que $a_2 = 96$, logo, da forma $a6$, onde a é ímpar. Vamos provar, por indução sobre n , que o mesmo ocorre para todos os números da forma a_{2n} . Suponha que a_{2n} termina em $a6$, onde a é um algarismo ímpar; logo,

$$\begin{aligned} a_{2(n+1)} &= 256a_{2n} + 240 \cdot 16^n \equiv 56 \cdot a6 + 40 \cdot 16^n \equiv \\ &(50+6)(10a+6) + 40(10b+6) \equiv 10(6a+3+4) + 6 \equiv \\ &10c + 6 \pmod{100}, \end{aligned}$$

onde c é um algarismo. O resultado, portanto, segue-se neste caso, pois o número $6a+3+4$ é ímpar.

Observe agora que $a_1 = 28$; logo, termina em 28. Vamos provar por indução sobre n que o mesmo ocorre para todos os números da forma a_{2n+1} . Suponha que a_{2n-1} termina em 28. Logo,

$$\begin{aligned} a_{2n+1} &= 256a_{2n-1} + 60 \cdot 16^n \equiv 56 \cdot 28 + 60 \cdot 16^n \equiv \\ &56 \cdot 28 + 60(10b+6) \equiv 68 + 60 \equiv 28 \pmod{100}, \end{aligned}$$

Exemplo 9.2.8. Vamos mostrar que, dado um número natural $m \in \mathbb{N}^*$, existe um número de Fibonacci u_n tal que $m|u_n$.

De fato, sejam r_1, r_2, \dots , respectivamente, os restos da divisão de u_1, u_2, \dots , por m . Como, para todo i , tem-se que $0 \leq r_i < m$, segue-se que existem, no máximo, m^2 pares r_i, r_{i+1} distintos. Portanto, dentre os pares $r_1, r_2; r_2, r_3; \dots; r_{m^2+1}, r_{m^2+2}$ existe pelo menos um par que se repete. Seja k o menor índice para o qual r_k, r_{k+1} se repete. Vamos mostrar que $k = 1$.

Suponha, por absurdo, que $k > 1$. Seja r_l, r_{l+1} o par que repete r_k, r_{k+1} . Como

$$r_{k-1} \equiv u_{k-1} = u_{k+1} - u_k \equiv r_{k+1} - r_k = r_{l+1} - r_l \equiv$$

$$u_{l+1} - u_l = u_{l-1} \equiv r_{l-1} \pmod{m},$$

segue-se que o par r_{k-1}, r_k é igual ao par r_{l-1}, r_l , o que contradiz a minimalidade de k .

Decorre daí e do Problema 6.3.1 que existem infinitos números de Fibonacci divisíveis por m . Deduz-se, ainda, que, dado um número primo p qualquer, existe um número de Fibonacci divisível por p ; ou seja, na decomposição dos números de Fibonacci em fatores primos aparecem todos os números primos.

Problemas

9.2.1 a) Usando o fato de que 100 é divisível por 4, 25 e 100, ache critérios de divisibilidade por 4, 25 e 100.

b) Considerando que 1000 é divisível por 8, 125 e 1000, ache critérios de divisibilidade por 8, 125 e 1000.

9.2.2 Mostre que um número na base 10 é divisível por 6 se, e somente se, a soma do algarismo da unidade com o quádruplo de cada um dos outros algarismos é divisível por 6.

9.2.3 Usando o fato de que

$$10^3 + 1 \equiv 0 \pmod{7}, \quad \pmod{11}, \quad \pmod{13},$$

prove o seguinte critério de divisibilidade por 7, 11 e 13:

Um número $n = n_r \dots n_2 n_1 n_0$, escrito na base 10, é divisível por 7, 11 ou 13, se, e somente se,

$$n_5 n_4 n_3 + n_{11} n_{10} n_9 + \dots \equiv n_2 n_1 n_0 + n_8 n_7 n_6 + \dots \pmod{7}, \quad \pmod{11}, \quad \pmod{13}.$$

9.3 Congruências e Números Binomiais

Nesta seção, daremos vários resultados envolvendo divisibilidade por potências de números primos e congruências de números binomiais.

Lema 9.3.1. *Sejam $p, m \in \mathbb{N}$ com p primo.*

- (i) *Tem-se que $(pm)! = p^m M m!$, onde $M \in \mathbb{N}$ e $M \equiv [(p-1)!]^m \pmod{p}$.*
- (ii) *$E_p((mp)!) = m + E_p(m!)$.*

DEMONSTRAÇÃO: O resultado decorre facilmente da igualdade:

$$(pm)! = p \cdot 2p \cdots mp [1 \cdot 2 \cdots (p-1)] [(p+1) \cdots (p+p-1)] \cdots \\ [(m-1)p+1] \cdots ((m-1)p+p-1)].$$

□

Lema 9.3.2. *Sejam $a, p, r \in \mathbb{N}$, com $a \neq 0$, p primo e $0 \leq r < p$. Então*

- (i) $E_p((pa+r)!) = E_p((pa)!)$;
- (ii) $E_p((pa-r)!) = E_p((pa)!) - 1$;
- (iii) $(pa+r)! \equiv r! \pmod{p}$.

DEMONSTRAÇÃO: (i) e (iii) decorrem imediatamente da igualdade

$$(pa+r)! = (pa)!(pa+1) \cdots (pa+r),$$

observando que $p \nmid (pa+i)$, para todo $i = 1, \dots, r$, e que $pa+i \equiv i \pmod{p}$.

(ii) Isto, por sua vez, decorre da igualdade:

$$(pa-r)!(pa-r+1) \cdots (pa-r+r) = (pa)!,$$

observando que a maior potência de p que divide $(pa-r+1) \cdots (pa-r+r)$ é p .

□

Lema 9.3.3. *Sejam $m, p, \alpha, \beta \in \mathbb{N}$, com p primo e $0 \leq \alpha, \beta < p$. Tem-se que*

- (i) $\binom{mp}{np} \equiv \binom{m}{n} \pmod{p}$.
- (ii) $\binom{mp+\alpha}{np+\beta} \equiv \binom{m}{n} \binom{\alpha}{\beta} \pmod{p}$.

DEMONSTRAÇÃO: (i) Usando Lema 9.3.1, temos que

$$NM' \binom{mp}{np} = M \binom{m}{n},$$

onde $N, M, M' \in \mathbb{N}$ são tais que $N \equiv [(p-1)!]^n \pmod{p}$, $M \equiv [(p-1)!]^m \pmod{p}$ e $M' \equiv [(p-1)!]^{m-n} \pmod{p}$. O resultado segue-se do fato de $NM' \equiv M \equiv [(p-1)!]^m \pmod{p}$ e que p e $[(p-1)!]^m$ são primos entre si (veja o Corolário da Proposição 9.1.5).

(ii) Note que, se $m < n$, então $mp + \alpha < np + \beta$, implicando no anulamento dos dois membros da congruência em (ii).

Suponhamos agora que $m \geq n$. Temos, pelo Problema 2.2.3, que

$$\sum_{i=0}^{\alpha} \binom{mp}{np + \beta - i} \binom{\alpha}{i} = \binom{mp + \alpha}{np + \beta}.$$

Se $i < \beta$, então, pelo Lema 9.3.2, temos que

$$\begin{aligned} E_p((mp)!) - E_p((np + \beta - i)!) - E_p((p(m - n) - (\beta - i))!) = \\ E_p((mp)!) - E_p((np)!) - E_p((p(m - n))!) + 1 > 1, \end{aligned}$$

o que mostra que $\binom{mp}{np + \beta - i} \equiv 0 \pmod{p}$.

Se $\beta < i < p$, novamente pelo Lema 9.3.2, temos que

$$\begin{aligned} E_p((mp)!) - E_p((np - (i - \beta))!) - E_p((p(m - n) + (i - \beta))!) = \\ E_p((mp)!) - E_p((np)!) + 1 - E_p((p(m - n))!) > 1, \end{aligned}$$

o que mostra que $\binom{mp}{np + \beta - i} \equiv 0 \pmod{p}$.

Portanto, usando o ítem (i), temos que

$$\binom{m}{n} \binom{\alpha}{\beta} \equiv \binom{mp}{np} \binom{\alpha}{\beta} \equiv \binom{mp + \alpha}{np + \beta} \pmod{p}.$$

□

Teorema 9.3.1 (Lucas).¹ Seja p um número primo e sejam $m = m_0 + m_1p + \cdots + m_rp^r$ e $n = n_0 + n_1p + \cdots + n_sp^s$ dois inteiros representados relativamente à base p . Tem-se que

$$\binom{m}{n} \equiv \binom{m_0}{n_0} \binom{m_1}{n_1} \cdots \pmod{p}.$$

¹Este resultado pode ser provado de modo mais simples usando identidades polinomiais sobre um corpo com p elementos (veja Curso de Álgebra Volume 2, do autor).

DEMONSTRAÇÃO: Isto faz-se por indução, usando o Lema 9.3.3.

□

Lema 9.3.4. *Sejam p um número primo e $\alpha, \beta \in \mathbb{N}$, com $\alpha \geq \beta$. Então $p^{\alpha-\beta}$ é a maior potência de p que divide $\binom{p^\alpha}{p^\beta}$.*

DEMONSTRAÇÃO: Usando o Teorema 8.3.2, vê-se facilmente que

$$E_p((p^\alpha)!) = \frac{p^\alpha - 1}{p - 1}, \quad E_p((p^\beta)!) = \frac{p^\beta - 1}{p - 1}, \quad E_p((p^\alpha - p^\beta)!) = \frac{p^\alpha - p^\beta - (\alpha - \beta)(p - 1)}{p - 1},$$

o que prova o resultado.

□

Vamos agora provar a recíproca do Lema 7.3.1, dando mais um teste pouco eficiente de primalidade.

Teorema 9.3.2. *Seja $n \in \mathbb{N}$ tal que $\binom{n}{i} \equiv 0 \pmod{n}$, para todo i tal que $0 < i < n$, então n é primo.*

DEMONSTRAÇÃO: Seja p um número primo que divide n e seja $n = n_1p + \cdots + n_r p^r$ a representação de n relativamente à base p , com $n_r \neq 0$. Se essa representação possui mais de um termo não nulo, digamos $n_s p^s$, além de $n_r p^r$, então, pelo Teorema de Lucas,

$$\binom{n}{n_s p^s} \equiv \binom{n_s}{n_s} \not\equiv 0 \pmod{p},$$

o que é uma contradição.

Portanto, $n = n_r p^r$. Se $n_r > 1$, então, novamente pelo Teorema de Lucas,

$$\binom{n_r p^r}{(n_r - 1)p^r} \equiv \binom{n_r}{(n_r - 1)} \not\equiv 0 \pmod{p},$$

o que também é uma contradição.

Portanto, $n = p^r$. Se $r > 1$, então

$$\binom{p^r}{p} \not\equiv 0 \pmod{p^r},$$

pois, pelo Lema 9.3.4, p^{r-1} é a maior potência de p que divide $\binom{p^r}{p}$. Novamente uma contradição. Só resta, portanto, a possibilidade $n = p$.

□

Problemas

9.3.1 Mostre que 2^n divide $(2n)!$. Mais geralmente, mostre que o produto de $2n$ números naturais consecutivos é divisível por 2^n .

9.3.2 Mostre que $n!2^n3^n$ divide $(3n)!$.

9.3.3*(Kummer) Seja p um número primo e suponha que $m = m_r \dots m_1 m_0$ e $n = n_r \dots n_1 n_0$ sejam dois números naturais representados na base p (para alcançar toda a generalidade, m_r ou n_r pode ser nulo). Mostre que

$$\#\{k; n_k + m_k \geq p\} = r \implies p^r \mid \binom{n+m}{n}$$

9.3.4 Se $1 \leq r \leq p^n$ com $E_p(r) = k$, mostre que $\binom{p^n}{r}$ é divisível por p^{n-k} , mas não por p^{n-k+1} .

9.4 Gauss, um Príncipe da Matemática

Carl Friederich Gauss (1777-1855) foi um dos maiores matemáticos de todos os tempos.

Gauss nasceu em Brunswick, Alemanha, filho de uma modesta família e manifestou o seu gênio na mais tenra idade, aprendendo a ler sozinho e demonstrando uma habilidade ímpar em realizar complicados cálculos mentais.

Bem jovem ainda, Gauss resolveu o chamado *Paradoxo do Binômio*. Desde Newton, conhecia-se o desenvolvimento

$$(1+X)^n = 1 + nX + \frac{n(n-1)}{2}X^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{6}X^3 + \dots$$

onde n é um número real, não necessariamente natural, quando, nesse caso, a soma da direita pode ser infinita. Tratar somas infinitas com a aritmética usual apresenta muitas armadilhas; por exemplo, tomando $n = -1$ e $X = -2$, obtém-se

$$-1 = 1 + 2 + 2^2 + 2^3 + \dots,$$

o que, claramente, é um absurdo.

Gauss, então, de modo revolucionário para a época, reconhece a necessidade de introduzir a noção de convergência para séries infinitas e mostra que vale a igualdade do binômio, no sentido de que o lado esquerdo representa a soma infinita do lado direito, quando esta última converge, dando também os valores de X para os quais a série é convergente para n ,

número real positivo dado. Não contente, Gauss, em 1812, realiza o estudo da convergência da série hipergeométrica,

$$1 + \frac{ab}{c}X + \frac{a(a+1)b(b+1)}{c(c+1)}\frac{X^2}{2!} + \frac{a(a+1)(a+2)b(b+1)(b+2)}{c(c+1)(c+2)}\frac{X^3}{3!} + \dots,$$

que engloba, para valores particulares de a, b e c , as funções logarítmica, trigonométricas e várias outras funções que aparecem em Física e Astronomia. Este trabalho é uma obra prima de rigor matemático, ultrapassando, nesta matéria, os gênios de Newton, Euler e Lagrange, e iniciando, assim, a importante área da Análise Matemática, que seria, ulteriormente, desenvolvida pelos talentos de Abel, Cauchy, Weierstrass e Dedekind.

Aos dezessete anos, Gauss decide incursionar na Aritmética, com o projeto de esclarecer, completar e desenvolver o que os seus predecessores haviam realizado. Em 1798, aos 21 anos, Gauss produz uma das obras primas de toda matemática, o livro *Disquisitiones Arithmeticae*, que seria publicado somente em 1801. No livro, Gauss introduz a noção de congruência; desenvolve a teoria dos resíduos quadráticos, demonstrando a profunda *Lei da Reciprocidade Quadrática*; estuda as formas quadráticas binárias, deduzindo, dentro de um quadro bem mais geral, o teorema de Fermat, que assegura que todo número primo da forma $4n + 1$ se escreve como soma de quadrados de dois números naturais; e, na última seção, deduz o belo e famoso teorema que diz que um polígono regular com um número primo n de lados, inscrito no círculo, é construtível com régua e compasso se, e somente se, n é um número primo de Fermat.

Em 1799, em sua tese de doutorado na Universidade de Helmstedt, Gauss demonstra, pela primeira vez, o Teorema Fundamental da Álgebra, que havia sido enunciado por vários antecessores, mas jamais provado corretamente. Foi, também, um dos primeiros a tratar os números complexos como entidade matemática, dando-lhes a representação geométrica como pontos do plano cartesiano.

A partir de 1807, Gauss foi diretor do observatório de Göttingen, dando contribuições fundamentais à Matemática aplicada, à Astronomia e à Física. Uma das maiores contribuições de Gauss à Astronomia foi determinar, com grande precisão, a órbita do planeta Ceres, que havia, recentemente, sido descoberto em uma posição incômoda para a observação. Os cálculos de Gauss permitiram que os astrônomos o reencontrassem numa outra posição prevista por ele. Em Física, foi um dos criadores da teoria do eletromagnetismo; inventou, como subproduto dos seus estudos, o telégrafo elétrico, contribuiu para o estudo da capilaridade e para a óptica.

Em Matemática pura - sem a menor sombra de dúvida, a sua maior paixão -, deu contribuições à teoria das probabilidades e foi um dos criadores das geometrias não-euclidianas, da geometria diferencial, das funções de variável complexa, da topologia e da teoria algébrica dos números.

Gauss teve o poder de mudar os rumos da matemática a partir dos seus trabalhos revolucionários, apresentados com extremo rigor e grande concisão e elegância. Por isso, foi

considerado, pelos seus contemporâneos e pelas gerações que se sucederam, um príncipe da rainha das ciências.

10

Os Teoremas de Euler e Wilson

Neste capítulo, estudaremos dois importantes teoremas em Teoria dos Números: o *Teorema de Euler*, uma generalização do Pequeno Teorema de Fermat, e um teorema de Lagrange, conhecido pelo nome de *Teorema de Wilson*.

10.1 Teorema de Euler

Será muito útil, no que se segue, decidir se a congruência $aX \equiv 1 \pmod{m}$ possui alguma solução em X . A este propósito, temos o seguinte resultado:

Proposição 10.1.1. *Sejam $a, m \in \mathbb{N}$, com $m > 1$. A congruência $aX \equiv 1 \pmod{m}$ possui uma solução x_0 se, e somente se, $(a, m) = 1$. Além disso, x é uma solução da congruência se, e somente se, $x \equiv x_0 \pmod{m}$.*

DEMONSTRAÇÃO: A congruência acima tem uma solução x_0 se, e somente se, $m | ax_0 - 1$, o que equivale a dizer que a equação diofantina $aX - mY = 1$ possui solução em números naturais. Em virtude da Proposição 5.2.1, isto ocorre se, e somente se, $(a, m) = 1$.

Por outro lado, observe que, se x_0 e x são soluções da congruência $aX \equiv 1 \pmod{m}$, então $ax \equiv ax_0 \pmod{m}$, o que implica, em virtude do Corolário da Proposição 9.1.5, que $x \equiv x_0 \pmod{m}$.

Observe, ainda, que se x_0 é solução da congruência $aX \equiv 1 \pmod{m}$, e $x \equiv x_0 \pmod{m}$, então x é também solução da mesma congruência, pois

$$ax \equiv ax_0 \equiv 1 \pmod{m}.$$

□

Uma solução da congruência $aX \equiv 1 \pmod{m}$ determina e é determinada por qualquer outra solução. Se considerarmos que duas soluções congruentes módulo m são, essencialmente, a mesma, temos a unicidade da solução da congruência $aX \equiv 1 \pmod{m}$.

Um sistema reduzido de resíduos módulo m é um conjunto de números naturais r_1, \dots, r_s tais que

- $(r_i, m) = 1$, para todo $i = 1, \dots, s$;
- $r_i \not\equiv r_j \pmod{m}$, se $i \neq j$;
- Para cada $n \in \mathbb{N}$ tal que $(n, m) = 1$, existe i tal que $n \equiv r_i \pmod{m}$.

Pode-se obter um sistema reduzido de resíduos r_1, \dots, r_s , módulo m , a partir de um sistema completo qualquer de resíduos a_1, \dots, a_m , módulo m , eliminando os elementos a_i que não são primos com m .

De fato, as propriedades (i) e (ii) da definição são claramente verificadas para r_1, \dots, r_s . Por outro lado, dado um número natural n , existe j tal que $n \equiv a_j \pmod{m}$. Se $(n, m) = 1$, então, pela Proposição 9.1.7(iii), $(a_j, m) = 1$ e, portanto, para algum j , temos que $a_j = r_i$ e, consequentemente, $n \equiv r_i \pmod{m}$.

Vamos agora verificar que dois sistemas reduzidos de resíduos módulo m têm o mesmo número de elementos.

Sejam r_1, \dots, r_s e r'_1, \dots, r'_t dois sistemas reduzidos de resíduos módulo m . Vamos estabelecer uma bijeção entre esses dois conjuntos. Dado r'_i , temos que $(r'_i, m) = 1$. Como r_1, \dots, r_s formam um sistema reduzido de resíduos módulo m , então existe um único j tal que $r'_i \equiv r_j \pmod{m}$. Isso define uma função f entre os dois sistemas. Reciprocamente, do mesmo modo, está bem definida uma função g de $\{r'_1, \dots, r'_t\}$ em $\{r_1, \dots, r_s\}$. Suponha que $g(r'_i) = r_k$, então $r'_i \equiv r_k \pmod{m}$. Como também $r'_i \equiv r_j \pmod{m}$, segue que $r_j \equiv r_k \pmod{m}$ e, consequentemente, $r_j \equiv r_k \pmod{m}$, mostrando que g é a função inversa de f .

Designaremos por $\varphi(m)$ o número de elementos de um sistema reduzido de resíduos módulo m , que corresponde à quantidade de números naturais entre 0 e $m - 1$ que são primos com m . Isto define uma importante função

$$\varphi : \mathbb{N}^* \longrightarrow \mathbb{N},$$

chamada *função fi de Euler*.

Pela definição, temos que

$$\varphi(m) \leq m - 1.$$

Além disso, $\varphi(m) = m - 1$ se, e somente se, m é um número primo.

De fato, m é primo se, e somente se, $1, 2, \dots, m - 1$ formam um sistema reduzido de resíduos módulo m , o que equivale a dizer que $\varphi(m) = m - 1$.

Mais adiante, mostraremos como calcular $\varphi(m)$ em geral.

A função φ é de grande utilidade em Teoria dos Números. Uma das primeiras aplicações pode ser apreciada no seguinte exemplo.

Exemplo 10.1.1. Se $n = kd$, com $k, d \in \mathbb{N}$, então a quantidade de números naturais m tais que $1 \leq m \leq n$ e $(n, m) = d$ é $\varphi(k)$.

De fato, temos que

$$1 \leq m \leq n \text{ e } (m, kd) = d \iff m = \lambda d, \text{ com } 1 \leq \lambda \leq k \text{ e } (\lambda, k) = 1.$$

Portanto, a quantidade de números naturais m , como acima, é igual à quantidade dos $\lambda \in \mathbb{N}$ tais que $1 \leq \lambda \leq k$ e $(\lambda, k) = 1$; ou seja, $\varphi(k)$.

Exemplo 10.1.2. (Gauss)¹ Tem se que

$$\sum_{d|n} \varphi(d) = n.$$

De fato, seja $I = \{1, 2, \dots, n\}$ e seja $d \in \mathbb{N}$ tal que $d|n$. Defina

$$I_d = \{m \in I; (m, n) = d\}.$$

Note que, se $d \neq d'$, então

$$I_d \cap I_{d'} = \emptyset, \quad \text{e} \quad \bigsqcup_{d|n} I_d = I.$$

Portanto,

$$n = \#I = \sum_{d|n} \#I_d.$$

Por outro lado, os elementos de I_d são os múltiplos de d da forma md , com $(m, n) = 1$ e $m \leq \frac{n}{d}$. Portanto,

$$\#I_d = \varphi\left(\frac{n}{d}\right).$$

Note que, quando d percorre todos os divisores de n , os números $\frac{n}{d}$ também percorrem todos os divisores de n , logo,

$$n = \sum_{d|n} \#I_d = \sum_{d|n} \varphi\left(\frac{n}{d}\right) = \sum_{d|n} \varphi(d).$$

Por exemplo, temos que

$$\varphi(1) + \varphi(2) + \varphi(3) + \varphi(4) + \varphi(6) + \varphi(9) + \varphi(12) + \varphi(18) + \varphi(36) = 36.$$

¹Este resultado encontra-se no art. 39 do livro *Disquisitiones Arithmeticae* de Gauss

Proposição 10.1.2. Seja $r_1, \dots, r_{\varphi(m)}$ um sistema reduzido de resíduos módulo m e seja $a \in \mathbb{N}$ tal que $(a, m) = 1$. Então, $ar_1, \dots, ar_{\varphi(m)}$ é um sistema reduzido de resíduos módulo m .

DEMONSTRAÇÃO: Seja a_1, \dots, a_m um sistema completo de resíduos módulo m do qual foi retirado o sistema reduzido de resíduos $r_1, \dots, r_{\varphi(m)}$. Do fato de que $(a_i, m) = 1$ se, e somente se, $(aa_i, m) = 1$, o resultado se segue.

□

Teorema 10.1.1 (Euler). Sejam $m, a \in \mathbb{N}$ com $m > 1$ e $(a, m) = 1$. Então,

$$a^{\varphi(m)} \equiv 1 \pmod{m}.$$

DEMONSTRAÇÃO: Seja $r_1, \dots, r_{\varphi(m)}$ um sistema reduzido de resíduos módulo m . Logo, pela Proposição 10.1.2, $ar_1, \dots, ar_{\varphi(m)}$ formam um sistema reduzido de resíduos módulo m . Portanto,

$$a^{\varphi(m)}r_1 \cdot r_2 \cdots r_{\varphi(m)} = ar_1 \cdot ar_2 \cdots ar_{\varphi(m)} \equiv r_1 \cdot r_2 \cdots r_{\varphi(m)} \pmod{m}.$$

Como $(r_1 \cdot r_2 \cdots r_{\varphi(m)}, m) = 1$, segue-se pelo Corolário da Proposição 9.1.5 que

$$a^{\varphi(m)} \equiv 1 \pmod{m}.$$

□

Corolário. (Pequeno Teorema de Fermat) Sejam $a, p \in \mathbb{N}$, onde p é um número primo e $(a, p) = 1$. Tem-se que

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}.$$

DEMONSTRAÇÃO: Basta notar que, sendo p primo, $\varphi(p) = p - 1$.

□

O cálculo de $\varphi(m)$, em geral, seguirá do seguinte resultado.

Proposição 10.1.3. Sejam $m, m' \in \mathbb{N}$, com $m > 1$, $m' > 1$ e $(m, m') = 1$. Então

$$\varphi(m \cdot m') = \varphi(m)\varphi(m').$$

DEMONSTRAÇÃO: Considere a seguinte tabela formada pelos números naturais de 1 a $m \cdot m'$:

1	2	...	k	...	m'
$m' + 1$	$m' + 2$...	$m' + k$...	$2m'$
\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
$(m - 1)m' + 1$	$(m - 1)m' + 2$...	$(m - 1)m' + k$...	$m \cdot m'$

Como se tem que $(t, m \cdot m') = 1$ se, e somente se, $(t, m') = (t, m) = 1$, para calcular $\varphi(m \cdot m')$, devemos determinar os inteiros na tabela acima que são simultaneamente primos com m e m' .

Se o primeiro elemento de uma coluna não for primo com m' , então todos os elementos da coluna não são primos com m' . Portanto, os elementos primos com m' estão necessariamente nas colunas restantes que são em número $\varphi(m')$, cujos elementos são primos com m' , como é fácil verificar. Vejamos agora quais são os elementos primos com m em cada uma dessas colunas.

Como $(m, m') = 1$, a seqüência

$$k, m' + k, \dots, (m - 1)m' + k$$

forma um sistema completo de resíduos módulo m (veja Proposição 9.1.6) e, portanto, $\varphi(m)$ desses elementos são primos com m . Logo, o número de elementos simultaneamente primos com m' e m é $\varphi(m) \cdot \varphi(m')$.

□

Lema 10.1.1. Se p é um número primo e r , um número natural, então tem-se que

$$\varphi(p^r) = p^r - p^{r-1} = p^r \left(1 - \frac{1}{p}\right).$$

DEMONSTRAÇÃO: De 1 até p^r , temos p^r números naturais. Temos que excluir desses os números que não são primos com p^r , ou seja, todos os múltiplos de p , que são precisamente $p, 2p, \dots, p^{n-1}p$, cujo número é p^{n-1} . Portanto, $\varphi(p^r) = p^r - p^{r-1}$, provando o resultado.

□

Finalmente, podemos obter a expressão de $\varphi(m)$ para qualquer $m \in \mathbb{N}^*$.

Teorema 10.1.2. Se $m = p_1^{\alpha_1} \cdots p_n^{\alpha_n}$ é a decomposição de m em fatores primos, então

$$\varphi(m) = p_1^{\alpha_1} \cdots p_n^{\alpha_n} \left(1 - \frac{1}{p_1}\right) \cdots \left(1 - \frac{1}{p_n}\right).$$

DEMONSTRAÇÃO: O resultado decorre do Lema 10.1.1 e do Corolário acima.

□

A fórmula do Teorema acima pode ser reescrita como se segue:

$$\varphi(p_1^{\alpha_1} \cdots p_n^{\alpha_n}) = p_1^{\alpha_1-1} \cdots p_n^{\alpha_n-1} (p_1 - 1) \cdots (p_n - 1).$$

Para calcular o resto da divisão de uma potência a^n por um número natural $m > 1$, é conveniente achar um expoente h de modo que a potência $a^h \equiv 1 \pmod{m}$, pois, se $n = hq + r$ é a divisão euclidiana de n por h , teremos $a^n \equiv a^{hq}a^r \equiv a^r \pmod{m}$. Portanto, é clara a utilidade do Teorema de Euler para a resolução desse tipo de questão, como se pode ver no próximo exemplo.

Exemplo 10.1.3. Vamos achar o resto da divisão de 3^{100} por 34.

Note que

$$\varphi(34) = \varphi(2 \cdot 17) = 2^0 17^0 (2 - 1)(17 - 1) = 16.$$

Pelo Teorema de Euler, temos que $3^{16} \equiv 1 \pmod{34}$, logo,

$$3^{100} = 3^{16 \cdot 6 + 4} \equiv 3^4 \equiv 13 \pmod{34}.$$

Portanto, 13 é o resto da divisão de 3^{100} por 34.

Em geral, nem sempre é possível achar um número h tal que $a^h \equiv 1 \pmod{m}$. Vejamos quando isto ocorre.

Proposição 10.1.4. Dado $a \in \mathbb{N}^*$, existe $h \in \mathbb{N}^*$ tal que $a^h \equiv 1 \pmod{m}$ se, e somente se, $(a, m) = 1$.

DEMONSTRAÇÃO: Se $(a, m) = 1$, temos, pelo Teorema de Euler, que $a^{\varphi(m)} \equiv 1 \pmod{m}$, mostrando a existência do expoente desejado. Por outro lado, se $(a, m) \neq 1$, então a equação $aX - mY = 1$ não possui solução e, portanto, $aX \equiv 1 \pmod{m}$ não possui solução. Conseqüentemente, não pode existir $h > 1$ tal que $a^h \equiv 1 \pmod{m}$.

□

Suponha que $a, m \in \mathbb{N}^*$, com $m > 1$ e $(a, m) = 1$; vamos definir a *ordem* de a com respeito a m como sendo o número natural

$$\text{ord}_m(a) = \min\{i \in \mathbb{N}^*; a^i \equiv 1 \pmod{m}\}.$$

Lema 10.1.2. Temos que $a^n \equiv 1 \pmod{m}$ se, e somente se, $\text{ord}_m(a)|n$.

DEMONSTRAÇÃO: Suponha que $\text{ord}_m(a)|n$. Logo, $n = r \cdot \text{ord}_m(a)$ e, portanto,

$$a^n = a^{r \cdot \text{ord}_m(a)} = \left(a^{\text{ord}_m(a)}\right)^r \equiv 1^r = 1 \pmod{m}.$$

Reciprocamente, suponha que $a^n \equiv 1 \pmod{m}$. Queremos provar que $\text{ord}_m(a)|n$. Pela divisão euclidiana, podemos escrever $n = \text{ord}_m(a)q + r$, onde $r < \text{ord}_m(a)$. Suponha, por absurdo, que $r \neq 0$. Então,

$$1 \equiv a^n \equiv a^{\text{ord}_m(a)q+r} \equiv \left(a^{\text{ord}_m(a)}\right)^q a^r \equiv a^r,$$

o que é um absurdo, pois $0 < r < \text{ord}_m(a)$ e $\text{ord}_m(a)$ é o menor expoente não nulo i tal que $a^i \equiv 1 \pmod{m}$.

□

Corolário. Sejam $a, m \in \mathbb{N}$, com $(a, m) = 1$. Temos que $\text{ord}_m(a)|\varphi(m)$.

O próximo resultado nos dará informações sobre os divisores dos números de Fermat.

Proposição 10.1.5. Todo divisor de F_n é da forma $2^{n+1}k + 1$.

DEMONSTRAÇÃO: Inicialmente, note que o produto de números da forma $2^{n+1}k + 1$ é também um número dessa forma. Portanto, basta provar a proposição para os divisores primos de F_n .

Seja p um divisor primo de $F_n = 2^{2^n} + 1$. Logo, p é ímpar e

$$2^{2^n} + 1 \equiv 0 \pmod{p}.$$

Daí segue-se que $\text{ord}_p(2) \nmid 2^n$, pois, caso contrário, teríamos $2 \equiv 0 \pmod{p}$, o que é falso pois p é ímpar.

Elevando ao quadrado ambos os membros da congruência acima, temos

$$0 \equiv (2^{2^n} + 1)^2 = 2^{2^{n+1}} + 2 \cdot 2^{2^n} + 1 = 2^{2^{n+1}} - 1 + 2(2^{2^n} + 1) \equiv 2^{2^{n+1}} - 1 \pmod{p},$$

e, portanto,

$$2^{2^{n+1}} \equiv 1 \pmod{p}.$$

Do lema, segue-se que $\text{ord}_p(2)|2^{n+1}$, e como $\text{ord}_p(2) \nmid 2^n$, segue-se que $\text{ord}_p(2) = 2^{n+1}$.

Por outro lado, pelo Pequeno Teorema de Fermat, temos que $2^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$ e, consequentemente, pelo Lema, temos que $\text{ord}_p(2)|p - 1$. Daí segue-se que $2^{n+1}|p - 1$ e, portanto, $p = 2^{n+1}k + 1$.

□

Exemplo 10.1.4. Neste exemplo, vamos dar uma prova mais conceitual, do que a do Exemplo 9.2.2, do fato de que o quinto número de Fermat $F_5 = 2^{2^5} + 1$ não é primo.

Pela Proposição 10.1.5, temos que os possíveis divisores primos de F_5 são os números primos da forma $2^6k + 1$.

Fazendo k variar de 1 a 10, obtemos os números: 65, 129, 193, 257, 321, 385, 449, 513, 577, 641, dos quais apenas 193, 257, 449, 577 e 641 são primos.

Vamos testar esses valores. Para $p = 193$, temos que

$$2^8 = 256 \equiv 63 \pmod{193},$$

logo,

$$2^{32} \equiv 63^4 \equiv 109^2 \equiv 108 \pmod{193},$$

e, consequentemente,

$$2^{32} + 1 \equiv 109 \not\equiv 0 \pmod{193}.$$

Deixaremos para o leitor, como exercício, verificar que $2^{32} + 1 \not\equiv 0 \pmod{257}$, $2^{32} + 1 \not\equiv 0 \pmod{449}$ e $2^{32} + 1 \not\equiv 0 \pmod{577}$.

Vamos, agora, mostrar que 641 divide F_5 .

De fato,

$$2^{16} = (256)^2 = 65536 \equiv 154 \pmod{641}.$$

Logo,

$$2^{32} \equiv 154^2 \equiv 23716 \equiv 640 \pmod{641}.$$

Daí, temos que

$$2^{32} + 1 \equiv 641 \equiv 0 \pmod{641},$$

o que implica que $641|F_5$.

Corolário. Na progressão aritmética de primeiro termo 1 e razão 2^r , para $r \in \mathbb{N}$ fixo, existem infinitos números primos.

DEMONSTRAÇÃO: Seja F_n o n -ésimo número de Fermat. Como todo número natural maior do que 1 possui pelo menos um divisor primo, segue-se que cada número de Fermat tem, pelo menos, um divisor primo e, como $(F_n, F_m) = 1$, se $n \neq m$, esses divisores são dois a dois distintos. O resultado segue-se agora da Proposição 10.1.5.

□

Para finalizar este Capítulo, mostraremos como o Teorema de Euler conduz a um teste de primalidade devido a E. Lucas, publicado em 1878, que é uma recíproca parcial do Pequeno Teorema de Fermat.

Teorema 10.1.3 (Lucas). Sejam a e m dois números naturais tais que $(a, m) = 1$. Suponha que

$$a^{m-1} \equiv 1 \pmod{m},$$

e que

$$a^k \not\equiv 1 \pmod{m}, \quad \forall k, \quad k < m-1;$$

então, m é primo.

DEMONSTRAÇÃO: Pelo Teorema de Euler, temos que $a^{\varphi(m)} \equiv 1 \pmod{m}$; logo, pela hipótese, temos que $\varphi(m) \geq m-1$; e, como $\varphi(m) \leq m-1$, segue-se que $\varphi(m) = m-1$, o que implica que m é primo.

□

Problemas

10.1.1 Ache o resto da divisão de

- a) 5^{60} por 26 b) 3^{100} por 10.

10.1.2 Mostre que, se $m > 2$, então $\varphi(m)$ é par.

10.1.3* a) Mostre que

$$\sum_{\substack{(i, m) = 1 \\ i < m}} i = \frac{1}{2} m \varphi(m).$$

b) Mostre que, se $m_1, \dots, m_{\varphi(m)}$ é um sistema reduzido de resíduos módulo m , então m divide $m_1 + \dots + m_{\varphi(m)}$.

10.1.4 Resolva em $m \in \mathbb{N}$ as equações

- a) $\varphi(m) = 12$ b) $\varphi(m) = 8$
 c) $\varphi(m) = 16$ d) $\varphi(m) = 24$

10.1.5 Supondo que $(a, m) = (a-1, m) = 1$, mostre que

$$1 + a + a^2 + \dots + a^{\varphi(m)-1} \equiv 0 \pmod{m}.$$

10.1.6* Mostre que, se $\varphi(m) = 2^r$, para algum $r \in \mathbb{N}$, então m é um produto de uma potência de 2 e de primos de Fermat distintos².

²Essa equação aparece na resolução dada por Gauss do problema clássico da construtibilidade com régua e compasso dos polígonos regulares inscritos numa circunferência.

10.1.7 Supondo que $(m, n) = 1$, mostre que

$$m^{\varphi(n)} + n^{\varphi(m)} \equiv 0 \pmod{nm}.$$

10.1.8 Sejam $a, m \in \mathbb{N}^*$, com $m > 1$, tais que $(a, m) = 1$. Mostre que, se $n_1 \equiv n_2 \pmod{\varphi(m)}$, então $a^{n_1} \equiv a^{n_2} \pmod{m}$.

10.1.9* Mostre que $2730|n^{13} - n$, para todo $n \in \mathbb{N}$.

10.1.10 Sejam $a \in \mathbb{N}$ e $n, r \in \mathbb{N}^*$, com $(r, n) = 1$. Mostre que na PA

$$a, a+r, \dots, a+(n-1)r,$$

há exatamente $\varphi(n)$ números primos com n .

10.2 Teorema de Wilson

Nesta seção, vamos provar um teorema atribuído a Wilson(1741-1793), mas que, na realidade, foi provado, pela primeira vez, por J.L. Lagrange (1736-1813).

Teorema 10.2.1 (Wilson). p é um número primo se, e somente se, $(p-1)! \equiv p-1 \pmod{p}$.

DEMONSTRAÇÃO: Suponhamos p primo. Para todo $i \in \{1, \dots, p-1\}$, pela Proposição 10.1.1, a congruência $iX \equiv 1 \pmod{p}$ possui uma única solução, módulo p ; ou seja, dado $i \in \{1, \dots, p-1\}$ existe $j \in \{1, \dots, p-1\}$ tal que $ij \equiv 1 \pmod{p}$. Por outro lado, se $i \in \{1, \dots, p-1\}$ é tal que $i^2 \equiv 1 \pmod{p}$, então $p|i^2 - 1$, o que equivale a $p|i-1$ ou $p|i+1$, o que só pode ocorrer se $i=1$ ou $i=p-1$.

Logo,

$$2 \cdots (p-2) \equiv 1 \pmod{p},$$

e, portanto,

$$1 \cdot 2 \cdots (p-2)(p-1) \equiv p-1 \pmod{p},$$

Reciprocamente, se p não é primo, temos, pelo Exemplo 7.1.4, que $p|(p-1)!$ e, portanto, p não divide $[(p-1)! - (p-1)]$, o que mostra que $(p-1)! \not\equiv p-1 \pmod{p}$.

□

O teorema de Wilson pode ser lido como se segue: p é primo se, e somente se,

$$(p-1)! + 1 \equiv 0 \pmod{p}.$$

Note que o Teorema de Wilson é um critério de primalidade. Para verificar se um número n é primo, basta calcular $(n-1)! + 1$ e verificar se este número é divisível por n .

Infelizmente, este método não é nada eficiente. Imagine que, para verificar que 83 é primo, se deva calcular $(83 - 1)! + 1$ e verificar se este número é divisível por 83.

Exemplo 10.2.1. Se p é um número primo ímpar, então $p|2^{p-1} + (p - 1)!$.

De fato, sendo p um número primo ímpar, pelo Pequeno Teorema de Fermat, temos que $p|2^{p-1} - 1$. Por outro lado, pelo Teorema de Wilson, $p|(p - 1)! + 1$. Logo, $p|[2^{p-1} - 1] + [(p - 1)! + 1]$.

Exemplo 10.2.2. Seja $p = 2q + 1$ um número primo, onde q é ímpar. Vamos mostrar que $q! \equiv 1 \pmod{p}$ ou $q! + 1 \equiv 0 \pmod{p}$.

De fato, considere as congruências:

$$\begin{aligned} q &+ (q + 1) \equiv 0 \pmod{p} \\ (q - 1) &+ (q + 2) \equiv 0 \pmod{p} \\ &\vdots \\ 1 &+ 2q \equiv 0 \pmod{p}. \end{aligned}$$

Do Problema 9.1.1, pelo fato de q ser ímpar, segue-se que

$$q(q - 1) \cdots 1 + (q + 1)(q + 2) \cdots 2q \equiv 0 \pmod{p}.$$

Multiplicando ambos os membros da congruência acima por $q!$ e somando 1, temos que

$$(q!)^2 + (2q)! + 1 \equiv 1 \pmod{p}.$$

Portanto, pelo Teorema de Wilson, temos que

$$(q!)^2 \equiv 1 \pmod{p},$$

o que prova o resultado, levando em conta o Problema 9.1.2.

Problemas

10.2.1 Mostre que o número primo p é o menor inteiro maior do que 1 que divide o número $(p - 1)! + 1$.

10.2.2 Mostre que, se $p > 2$ é um número primo, então

- a) $p|(p - 2)! - 1$ b) $p|(p - 3)! - (p - 1)/2$

10.2.3 Seja $p > 3$ um número primo.

a) Mostre que $p!$ e $(p - 1)! - 1$ são primos entre si.

b) Prove que, se $n \in \mathbb{N}^*$ e $n \equiv (p - 1)! - 1 \pmod{p!}$, então os $p - 2$ inteiros que precedem n e os p inteiros que sucedem n são compostos.

10.2.4 Seja p um número primo e $a \in \mathbb{N}$. Mostre que

a) $a^p + (p-1)!a \equiv 0 \pmod{p}$ b) $(p-1)!a^p + a \equiv 0 \pmod{p}$

10.2.5* Seja p um número primo tal que $p \equiv 1 \pmod{4}$. Mostre que

$$\left[\left(\frac{p-1}{2} \right)! \right]^2 + 1 \equiv 0 \pmod{p}.$$

10.2.6 Seja p um número primo tal que $p \equiv 3 \pmod{4}$. Mostre que

$$\left[\left(\frac{p-1}{2} \right)! \right]^2 \equiv 1 \pmod{p}.$$

10.2.7* Seja p um número primo ímpar e seja $N = 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (p-2)$. Mostre que $N \equiv 1 \pmod{p}$ ou $N+1 \equiv 0 \pmod{p}$.

10.2.8 Seja p um número primo ímpar. Mostre que

- a) $1^2 3^2 \cdots (p-2)^2 \equiv 2^2 4^2 \cdots (p-1)^2 \pmod{p}$
- b) Se $p \equiv 1 \pmod{4}$, então $2^2 4^2 \cdots (p-1)^2 + 1 \equiv 0 \pmod{p}$.
- c) Se $p \equiv 3 \pmod{4}$, então $2^2 4^2 \cdots (p-1)^2 \equiv 1 \pmod{p}$.

Problemas Suplementares

10.S.1 Se $n \in \mathbb{N}^*$, então $\varphi(n)|n$ se, e somente se, n é da forma $1, 2^2, 2^a 3^b$, onde $a, b \in \mathbb{N}^*$.

10.S.2 Sejam $m, n \in \mathbb{N}^*$ e $d = (m, n)$. Mostre que

$$\varphi(mn) = \frac{d\varphi(m)\varphi(n)}{\varphi(d)}.$$

10.S.3 Mostre que $\varphi(m^2) = m\varphi(m)$ para todo $m \in \mathbb{N}$.

10.S.4 Mostre que, se $d|n$, então $\varphi(d)|\varphi(n)$.

10.S.5* Mostre que, se r_1, \dots, r_s e r'_1, \dots, r'_t são sistemas reduzidos de resíduos respectivamente módulo m e módulo m' , então os números $r_i m' + r'_j m$, onde $1 \leq i \leq s$ e $1 \leq j \leq t$, formam um sistema reduzido de resíduos módulo mm' .

10.S.6* Utilize o problema anterior para dar uma outra prova da Proposição 10.1.3.

11

Resolução de Congruências

Neste Capítulo, mostraremos como resolver congruências e sistemas de congruências lineares, além de discutirmos a resolvibilidade ou não de congruências quadráticas.

11.1 Resolução de Congruências Lineares

Esta seção será devotada à resolução de congruências dos seguintes tipos:

$$aX \equiv c \pmod{m}, \quad aX + c \equiv 0 \pmod{m};$$

ou seja, ao problema de determinar, se existirem, os números naturais x tais que $ax \equiv c \pmod{m}$ ou $ax + c \equiv 0 \pmod{m}$.

Vamos, inicialmente, dar um critério para decidir se tais congruências admitem solução.

Proposição 11.1.1. *Dados $a, c, m \in \mathbb{N}^*$, com $m > 1$, as congruências $aX \equiv c \pmod{m}$ e $aX + c \equiv 0 \pmod{m}$ possuem solução se, e somente se, $(a, m)|c$.*

DEMONSTRAÇÃO: Suponhamos que a congruência $aX \equiv c \pmod{m}$ tenha uma solução x ; logo, temos que $m|c - ax$ ou $m|ax - c$, o que equivale à existência de y tal que $c - ax = my$ ou $ax - c = my$. Portanto, pelo menos uma das seguintes equações $mY + aX = c$ ou $aX - mY = c$ admite solução. Isto, em vista do que foi visto na Seção 6.1, implica que $(a, m)|c$.

Reciprocamente, suponha que $(a, m)|c$. Logo, em virtude da Proposição 6.1.1, a equação $aX - mY = c$ admite uma solução x, y . Portanto, $ax = c + my$ e, consequentemente, x é solução da congruência pois, $ax \equiv c \pmod{m}$.

A outra congruência é inteiramente análoga.

□

Note que, se x_0 é solução da congruência $aX \equiv c \pmod{m}$ (respectivamente, $aX + c \equiv 0 \pmod{m}$), então todo x tal que $x \equiv x_0 \pmod{m}$ é também solução da congruência pois,

$$ax \equiv ax_0 \equiv c \pmod{m} \quad (\text{respectivamente, } ax + c \equiv ax_0 + c \equiv 0 \pmod{m}).$$

Portanto, toda solução particular determina, automaticamente, uma infinidade de soluções da congruência. Essas soluções serão identificadas (módulo m), já que são congruentes entre si, e portanto, se determinam mutuamente.

Estaremos, portanto, interessados em determinar uma coleção completa de soluções duas a duas incongruentes módulo m , as quais serão chamadas de *sistema completo de soluções incongruentes* da congruência.

Teorema 11.1.1. *Sejam $a, c, m \in \mathbb{N}^*$, com $m > 1$ e $(a, m) | c$. Se x_0 é a solução minimal (i.e., a menor solução) da congruência $aX \equiv c \pmod{m}$ (respectivamente, $aX + c \equiv 0 \pmod{m}$), então*

$$x_0, x_0 + \frac{m}{d}, x_0 + 2\frac{m}{d}, \dots, x_0 + (d-1)\frac{m}{d},$$

onde $d = (a, m)$ formam um sistema completo de soluções incongruentes da congruência.

DEMONSTRAÇÃO: Vamos provar o resultado somente para a congruência $aX \equiv c \pmod{m}$, pois a outra é totalmente análoga. Pela Proposição 11.1.1, sabemos que a congruência admite solução.

Vamos mostrar que os números $x_0 + i\frac{m}{d}$, com $i \in \mathbb{N}$, são soluções. De fato,

$$a \left(x_0 + i\frac{m}{d} \right) = ax_0 + i\frac{a}{d}m \equiv ax_0 \equiv c \pmod{m}.$$

Além disso, esses números são dois a dois incongruentes módulo m . De fato, se, para $i, j < d$,

$$x_0 + i\frac{m}{d} \equiv x_0 + j\frac{m}{d} \pmod{m},$$

então

$$i\frac{m}{d} \equiv j\frac{m}{d} \pmod{m}.$$

Pela Proposição 9.1.5, e pelo fato de

$$\frac{m}{(\frac{m}{d}, m)} = d,$$

segue-se que $i \equiv j \pmod{d}$, implicando que $i = j$.

Finalmente, mostraremos que toda solução x da congruência $aX \equiv c \pmod{m}$ é congruente, módulo m , a $x_0 + i\frac{m}{d}$ para algum $i < d$. De fato, seja x uma solução qualquer da congruência; logo,

$$ax \equiv ax_0 \pmod{m},$$

e, portanto, pela Proposição 9.1.5,

$$x \equiv x_0 \pmod{\frac{m}{d}}.$$

Logo, $x - x_0 = km/d$. Pela divisão euclidiana, existe $i < d$ tal que $k = qd + i$ e, portanto,

$$x = x_0 + qm + i\frac{m}{d} \equiv x_0 + i\frac{m}{d} \pmod{m}.$$

□

Exemplo 11.1.1. Resolvamos a congruência $8X \equiv 4 \pmod{12}$.

Como $d = (8, 12) = 4$ divide 4, temos que a congruência tem $d = 4$ soluções módulo 12.

Por tentativa e erro, obtemos a solução minimal $x_0 = 2$. Portanto, as soluções módulo 12 são

$$2, 2+3, 2+6, 2+9.$$

Corolário 1. Se $(a, m) = 1$, então as congruências $aX \equiv c \pmod{m}$ e $aX + c \equiv 0 \pmod{m}$ possuem uma única solução módulo m .

Corolário 2. Sejam $m > 1$ e R' um conjunto reduzido de resíduos módulo m . Seja $a \in \mathbb{N}^*$, com $(a, m) = 1$. Então, para todo $r \in R'$, a congruência $rX \equiv a \pmod{m}$ possui uma única solução em R' .

A congruência $aX \equiv 1 \pmod{m}$, com $(a, m) = 1$, admite uma única solução módulo m . Esta solução será chamada de *inverso multiplicativo módulo m* .

Observação 11.1.1. Note que, se uma congruência

$$aX \equiv b \pmod{m}$$

possui solução, então $d = (a, m)$ divide b . Pondo

$$a' = \frac{a}{d}, \quad b' = \frac{b}{d}, \quad n = \frac{m}{d},$$

temos que a congruência acima é equivalente a

$$a'X \equiv b' \pmod{n},$$

que, por sua vez, é equivalente à congruência

$$X \equiv c \pmod{n},$$

onde $c = b'a''$, sendo a'' o inverso multiplicativo de a módulo m .

Exemplo 11.1.2. Resolvamos a congruência $13X \equiv 4 \pmod{42}$.

Como $(13, 42) = 1$, temos que a congruência tem apenas uma solução módulo 42. Além disso, como $42 = 2 \times 3 \times 7$, e $[2, 3, 7] = 42$, temos, pela Proposição 9.1.7 (ii), que x_0 é solução da congruência acima se, e somente se, x_0 é solução simultânea das congruências:

$$13X \equiv 4 \pmod{2}, \quad \pmod{3}, \quad \pmod{7}.$$

É fácil verificar que $x_0 = 10$ é solução simultânea das congruências acima.

Problemas

11.1.1 Pode o dobro de um número natural deixar resto igual a 9 quando dividido por 26? E quando dividido por 25?

11.1.2 Resolva, quando possível, as congruências:

- a) $3X \equiv 5 \pmod{7}$
- b) $6X \equiv 21 \pmod{18}$
- c) $12X \equiv 36 \pmod{28}$
- d) $12X + 36 \equiv 0 \pmod{28}$

11.1.3 Seja p um número primo e seja a um número natural tal que $p \nmid a$. Mostre que a única solução módulo p da congruência $aX \equiv b \pmod{p}$ é $x = a^{p-2}b$.

11.2 Teorema Chinês dos Restos

No primeiro século da nossa era, o matemático chinês Sun-Tsu propôs o seguinte problema:

Qual é o número que deixa restos 2, 3 e 2 quando dividido, respectivamente, por 3, 5 e 7?

A resposta dada por Sun-Tsu para este problema foi 23.

Traduzido em linguagem matemática, o problema de Sun-Tsu equivale a procurar as soluções do seguinte sistema de congruências:

$$\begin{aligned} X &\equiv 2 \pmod{3} \\ X &\equiv 3 \pmod{5} \\ X &\equiv 2 \pmod{7}. \end{aligned}$$

Mais geralmente, estudaremos sistemas de congruências da forma:

$$\begin{aligned} a_1 X &\equiv b_1 \pmod{m_1} \\ a_2 X &\equiv b_2 \pmod{m_2} \\ &\dots \\ a_r X &\equiv b_r \pmod{m_r} \end{aligned}$$

Para que tal sistema possua solução, é necessário que $(a_i, m_i) | b_i$, para todo $i = 1, \dots, r$. Neste caso, pela Observação 11.1.1, o sistema acima é equivalente a um da forma

$$\begin{aligned} X &\equiv c_1 \pmod{n_1} \\ X &\equiv c_2 \pmod{n_2} \\ &\dots \\ X &\equiv c_r \pmod{n_r} \end{aligned} \tag{11.1}$$

Teorema 11.2.1 (Teorema Chinês dos Restos). *O sistema (11.1), onde $(n_i, n_j) = 1$, para todo par n_i, n_j com $i \neq j$, possui uma única solução módulo $N = n_1 n_2 \cdots n_r$. Tal solução pode ser obtida como se segue:*

$$x = N_1 y_1 c_1 + \cdots + N_r y_r c_r,$$

onde $N_i = N/n_i$ e y_i é solução de $N_i Y \equiv 1 \pmod{n_i}$, $i = 1, \dots, r$.

DEMONSTRAÇÃO: Vamos, inicialmente, provar que x é uma solução simultânea do sistema (11.1). De fato, como $n_i | N_j$, se $i \neq j$, e $N_i y_i \equiv 1 \pmod{n_i}$, segue-se que

$$x = N_1 y_1 c_1 + \cdots + N_r y_r c_r \equiv N_i y_i c_i \equiv c_i \pmod{n_i}.$$

Por outro lado, se x' é outra solução do sistema (11.1), então

$$x \equiv x' \pmod{n_i}, \quad \forall i, \quad i = 1, \dots, r.$$

Como $(n_i, n_j) = 1$, para $i \neq j$, segue-se que $[n_1, \dots, n_r] = n_1 \cdots n_r = N$ e, consequentemente, pela Proposição 9.1.7 (ii), temos que $x \equiv x' \pmod{N}$. □

Exemplo 11.2.1. Vamos determinar a solução do problema de Sun-Tsu.

Neste caso, temos que $N = 3 \times 5 \times 7 = 105$, $N_1 = 35$, $N_2 = 21$ e $N_3 = 15$. Por outro lado, $y_1 = 2$, $y_2 = 21$ e $y_3 = 1$ são soluções, respectivamente, das congruências $35Y \equiv 1 \pmod{3}$, $21Y \equiv 1 \pmod{5}$ e $15Y \equiv 1 \pmod{7}$. Portanto, uma solução módulo $N = 105$ é dada por

$$x = N_1 y_1 c_1 + N_2 y_2 c_2 + N_3 y_3 c_3 = 233.$$

Como $233 \equiv 23 \pmod{105}$, segue-se que 23 é a solução minimal única, módulo 105, do Problema de Sun-Tsu e qualquer outra solução é da forma $23 + \lambda 105$, com $\lambda \in \mathbb{N}$.

Exemplo 11.2.2. Seja M um número natural e sejam r_7 , r_{11} e r_{13} os seus restos pela divisão por 7, 11 e 13, respectivamente. Tem-se então que

$$M \equiv 715r_7 + 364r_{11} + 924r_{13} \pmod{1001}.$$

De fato, temos $N = 7 \times 11 \times 13 = 1001$, $N_1 = 143$, $N_2 = 91$ e $N_3 = 77$. Por outro lado, $y_1 = 5$, $y_2 = 4$ e $y_3 = 12$ são soluções de $143Y \equiv 1 \pmod{7}$, $91Y \equiv 1 \pmod{11}$ e $77Y \equiv 1 \pmod{13}$, respectivamente. Logo, o sistema

$$X \equiv r_7 \pmod{7}$$

$$X \equiv r_{11} \pmod{11}$$

$$X \equiv r_{13} \pmod{13}$$

tem por solução $715r_7 + 364r_{11} + 924r_{13} \pmod{1001}$.

O exemplo acima presta-se à seguinte brincadeira em sala de aula: *O professor pede a um aluno que escolha um número menor do que 1001 e que diga os restos r_7 , r_{11} e r_{13} desse número quando dividido por 7, 11 e 13, respectivamente. Sem nenhuma outra informação, o professor é capaz de adivinhar o número escolhido pelo aluno.*

De fato, o número que o aluno escolheu é o resto da divisão de $715r_7 + 364r_{11} + 924r_{13}$ por 1001.

Problemas

11.2.1 Ache todos os números naturais que deixam restos 2, 3 e 4 quando divididos por 3, 4 e 5, respectivamente.

11.2.2 Ache o menor número natural que deixa restos 1, 3 e 5 quando dividido por 5, 7 e 9, respectivamente.

11.2.3 Resolva o sistema:

$$X \equiv 2 \pmod{11}$$

$$X \equiv 4 \pmod{12}$$

$$X \equiv 5 \pmod{13}$$

11.2.4 Resolva o sistema:

$$3X \equiv 1 \pmod{7}$$

$$5X \equiv 2 \pmod{11}$$

$$4X \equiv 3 \pmod{13}$$

11.2.5 Levando em consideração que $2275 = 25 \times 13 \times 7$, resolva a congruência $3X \equiv 11 \pmod{2275}$.

11.2.6* Resolva o sistema:

$$X \equiv 2 \pmod{3}$$

$$X \equiv 3 \pmod{4}$$

$$X \equiv 4 \pmod{5}$$

$$X \equiv 5 \pmod{6}$$

11.2.7 Resolva o sistema:

$$X \equiv 2 \pmod{3}$$

$$X \equiv 3 \pmod{4}$$

$$X \equiv 4 \pmod{5}$$

$$X \equiv 2 \pmod{6}$$

11.2.8 Mostre que, se $(n_i, n_j) = 1$, para todos os $i, j = 1, \dots, r$ com $i \neq j$, então o sistema

$$X + c_1 \equiv 0 \pmod{n_1}$$

$$X + c_2 \equiv 0 \pmod{n_2}$$

...

$$X + c_r \equiv 0 \pmod{n_r}$$

admite solução. Descreva todas as soluções do sistema.

11.2.9* Sejam F_1, \dots, F_n os n primeiros números de Fermat. Mostre que existe um número natural N tal que F_i divide $N + i - 1$ para $i = 1, \dots, n$.

11.2.10 Sejam $a, b, n, m \in \mathbb{N}$, com $n, m > 1$. Mostre que o sistema

$$\begin{cases} X \equiv a \pmod{n} \\ X \equiv b \pmod{m} \end{cases}$$

possui solução se, e somente se, $a \equiv b \pmod{(n, m)}$. Além disso, se $(m, n) = 1$, então a solução é única módulo mn .

11.3 Congruências Quadráticas

Uma congruência do tipo

$$X^2 \equiv a \pmod{m},$$

onde $a, m \in \mathbb{N}$ com $m > 1$, nem sempre tem solução.

Por exemplo, é fácil verificar que a congruência $X^2 \equiv 2 \pmod{3}$, não possui nenhuma solução.

Quando a congruência $X^2 \equiv a \pmod{m}$ possui alguma solução, diz-se que a é *resíduo quadrático, módulo m*; caso contrário, diz-se que a é *não resíduo quadrático, módulo m*.

Por exemplo, 2 é não resíduo quadrático módulo 3. Por outro lado, todo número natural a é resíduo quadrático módulo 2. Um outro exemplo é dado pelo Problema 10.2.5, onde se

mostra que, se p é um número primo da forma $4n + 1$, então $p - 1$ é resíduo quadrático módulo p .

Gauss dedicou uma boa parte do seu livro *Disquisitiones Arithmeticae* ao estudo dos resíduos quadráticos. Lá se encontra o belo Teorema chamado de Lei da Reciprocidade Quadrática, que demonstraremos na Seção 11.4.

Nesta seção, apresentaremos um critério devido a Euler, relacionando o fato de um número ser resíduo quadrático, módulo um número primo ímpar, com o Pequeno Teorema de Fermat.

O lema a seguir nos dirá que, se p é um número primo ímpar e a congruência $X^2 \equiv a \pmod{p}$ possui uma solução, então ela possuirá uma outra solução, de modo que essas duas sejam as únicas soluções incongruentes entre si, módulo p .

Lema 11.3.1. *Sejam $p, a \in \mathbb{N}$, com $p > 2$ primo e $(p, a) = 1$. Se a congruência $X^2 \equiv a \pmod{p}$ possui uma solução $x_0 \in I = \{0, 1, \dots, p-1\}$, então $(x_0, p) = 1$ e $p - x_0$ também é solução e estas são as únicas soluções em I .*

DEMONSTRAÇÃO: Se $x_0^2 \equiv a \pmod{p}$, então $1 = (a, p) = (x_0^2, p)$, o que implica que $(x_0, p) = 1$.

Por outro lado, pelo Problema 9.1.2 (b),

$$(p - x_0)^2 \equiv x_0^2 \equiv a \pmod{p}.$$

Seja $x_1 \in I$, com $x_1 > x_0$, tal que $x_1^2 \equiv a \pmod{p}$. Logo, $x_0^2 \equiv x_1^2 \pmod{p}$ e, portanto, $p|x_1^2 - x_0^2$, o que implica que $p|x_1 - x_0$ ou $p|x_1 + x_0$. Isto, por sua vez, implica que $x_1 = x_0$ ou $x_1 = p - x_0$.

□

O critério que estamos buscando será consequência do seguinte resultado.

Proposição 11.3.1. *Sejam $a, p \in \mathbb{N}$, onde p é um número primo ímpar e $(a, p) = 1$.*

- i) *Se $X^2 \equiv a \pmod{p}$ não tem solução, então $(p-1)! \equiv a^{\frac{p-1}{2}} \pmod{p}$.*
- ii) *Se $X^2 \equiv a \pmod{p}$ tem solução, então $(p-1)! + a^{\frac{p-1}{2}} \equiv 0 \pmod{p}$.*

DEMONSTRAÇÃO: Ponhamos $R' = \{1, \dots, p-1\}$.

(i) Seja dado um elemento $r \in R'$. Como a congruência $X^2 \equiv a \pmod{p}$ não tem solução, pelo Corolário 2 do Teorema 11.1.1, existe um único $r' \in R'$, com $r' \neq r$, tal que $rr' \equiv a \pmod{p}$. Portanto, agrupando os elementos de R' , aos pares, temos que

$$(p-1)! \equiv a^{\frac{p-1}{2}} \pmod{p}.$$

(ii) Supondo que a congruência $X^2 \equiv a \pmod{p}$ tem solução, pelo Lema 11.3.1, ela possui duas soluções r e r' . Como $r' = (p - r)$, e $r^2 \equiv a \pmod{p}$, segue-se que $rr' + a \equiv 0 \pmod{p}$, consequentemente,

$$rr'a^{\frac{p-3}{2}} + a^{\frac{p-1}{2}} \equiv 0 \pmod{p}.$$

Por outro lado, os outros elementos de R' se agrupam aos pares de elementos distintos s e s' , tais que $ss' \equiv a \pmod{p}$. Portanto,

$$(p-1)! + a^{\frac{p-1}{2}} \equiv rr'a^{\frac{p-3}{2}} + a^{\frac{p-1}{2}} \equiv 0 \pmod{p}.$$

□

Vamos agora ao resultado.

Teorema 11.3.1 (Critério de Euler). Seja p um número primo ímpar e seja $a \in \mathbb{N}$ tal que $(a, n) = 1$. Tem-se que

- i) $p|a^{\frac{p-1}{2}} - 1$ se, e somente se, a é resíduo quadrático módulo p .
- ii) $p|a^{\frac{p-1}{2}} + 1$ se, e somente se, a não é resíduo quadrático módulo p

DEMONSTRAÇÃO: O resultado segue-se da Proposição 11.3.1 e do Teorema de Wilson.

□

Exemplo 11.3.1. Voltando à questão colocada no Exemplo 7.3.3, temos que $47|2^{46} - 1$, pois $X^2 \equiv 2 \pmod{47}$ tem a solução 7.

Apesar de não ser fácil, em geral, reconhecer no conjunto $\{1, \dots, p-1\}$ quais são todos os resíduos quadráticos módulo p , é bem fácil determinar quantos são esses resíduos. Isso é uma consequência imediata do próximo resultado.

Proposição 11.3.2. Seja p um número primo ímpar. Os números $1^2, 2^2, \dots, (\frac{p-1}{2})^2$ são dois a dois incongruentes e representam todos os resíduos quadráticos módulo p .

DEMONSTRAÇÃO: É claro que todo número que é resíduo quadrático módulo p é congruente, módulo p , a um dos números: $1^2, 2^2, \dots, (p-1)^2$. Nesse conjunto de elementos há repetições pois, $a^2 \equiv (p-a)^2 \pmod{p}$, para todo $a = 1, \dots, p-1$. Portanto, os números $1^2, 2^2, \dots, (\frac{p-1}{2})^2$ representam todos os resíduos quadráticos módulo p . Só falta mostrar que são dois a dois incongruentes.

De fato, suponha que $a, b \in \{1, \dots, \frac{p-1}{2}\}$, com $a < b$, e que $a^2 \equiv b^2 \pmod{p}$. Logo, $p|b^2 - a^2$ e, portanto, $p|b-a$ ou $p|b+a$, o que é impossível.

□

Corolário. No conjunto $\{1, \dots, p-1\}$ há tantos resíduos quadráticos quanto não resíduos quadráticos, módulo p .

Exemplo 11.3.2. Se $p = 5$, então 1 e 2 são os elementos de $\{1, 2, 3, 4\}$ que são resíduos quadráticos módulo 5. Se $p = 7$, então 1, 2 e 4 são os elementos de $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ que são resíduos quadráticos módulo 7.

Problemas

11.3.1 Ache todos os resíduos quadráticos módulo 11 e módulo 13.

11.3.2 a) Determine no conjunto $\{1, 2, \dots, 46\}$ os resíduos quadráticos módulo 47.

b) Determine todos os números a , com $(a, 47) = 1$, tais que $47|a^{\frac{p-1}{2}} - 1$.

c) Determine todos os números a , com $(a, 47) = 1$, tais que $47|a^{\frac{p-1}{2}} + 1$.

11.3.3 Seja $Q \subset \{1, \dots, p-1\}$ o subconjunto dos elementos que são resíduos quadráticos módulo p . Denotemos por P o produto dos elementos de Q . Mostre que

a) se p é da forma $4n + 3$, então $P \equiv 1 \pmod{p}$.

b) se p é da forma $4n + 1$, então $P + 1 \equiv 0 \pmod{p}$.

c) se p é da forma $4n + 1$, então a congruência $X^2 + 1 \equiv 0 \pmod{p}$ admite solução.

11.3.4 Seja p um número primo maior do que 3. Seja Q como no problema anterior e denotemos por S a soma dos seus elementos. Mostre que p divide S .

11.4 Lei da Reciprocidade Quadrática

Gauss demonstrou, em 1796, aos dezoito anos, o belo Teorema da Reciprocidade Quadrática, anteriormente descoberto, sem demonstração completa, por Euler e Legendre. Esse será o resultado central desta seção.

Como não lidamos neste livro com números negativos, introduzimos o símbolo -1 , que será sujeito às seguintes regras operatórias:

$$(-1) \cdot 1 = -1, \quad -(-1) = 1, \quad a + (-1) = a - 1, \quad a - (-1) = a + 1; \quad \text{e}$$

$$(-1)^n = \begin{cases} 1 & \text{se } n \text{ é par} \\ -1 & \text{se } n \text{ é ímpar} \end{cases}$$

Se p é um número primo ímpar, define-se o símbolo de Legendre como sendo

$$\left(\frac{a}{p}\right) = \begin{cases} 1 & \text{se } a \text{ é resíduo quadrático módulo } p \\ -1 & \text{se } a \text{ é não resíduo quadrático módulo } p \end{cases}$$

É claro que $\left(\frac{a^2}{p}\right) = 1$, pois a é solução de $X^2 \equiv a^2 \pmod{p}$. Em particular, $\left(\frac{1}{p}\right) = 1$.

Por outro lado, se a é ímpar, a congruência $X^2 \equiv a \pmod{1}$ tem por solução todo número ímpar; logo, $\left(\frac{a}{2}\right) = 1$.

O símbolo de Legendre, que desempenha papel importante na formulação da Lei de Reciprocidade Quadrática, possui as seguintes propriedades:

Proposição 11.4.1. *Sejam $a, b, p \in \mathbb{N}$, com p primo ímpar e $(a, p) = (b, p) = 1$. Tem-se que*

$$\text{i)} \quad \text{Se } a \equiv b \pmod{p}, \text{ então } \left(\frac{a}{p}\right) = \left(\frac{b}{p}\right).$$

$$\text{ii)} \quad a^{\frac{p-1}{2}} - \left(\frac{a}{p}\right) \equiv 0 \pmod{p}.$$

$$\text{iii)} \quad \left(\frac{a \cdot b}{p}\right) = \left(\frac{a}{p}\right) \left(\frac{b}{p}\right).$$

DEMONSTRAÇÃO: (i) Como $a \equiv b \pmod{p}$, segue-se imediatamente que a congruência $X^2 \equiv a \pmod{p}$ tem solução se, e somente se, $X^2 \equiv b \pmod{p}$ tem solução.

(ii) A congruência decorre imediatamente do Critério de Euler (Proposição 11.3.1).

(iii) Pelo item (ii) e pelo Problema 9.1.1 (c), temos que

$$(ab)^{\frac{p-1}{2}} - \left(\frac{a}{p}\right) \left(\frac{b}{p}\right) \equiv 0 \pmod{p}.$$

O resultado segue-se agora do Critério de Euler.

□

Corolário. *Sejam p um número primo ímpar e a e b dois números naturais primos com p .*

(i) *Se a e b são, simultaneamente, resíduos ou não resíduos quadráticos módulo p , então ab é resíduo quadrático módulo p .*

(ii) *Se a é resíduo quadrático módulo p e b é não resíduo quadrático módulo p , então ab é não resíduo quadrático módulo p .*

Em particular, decorre da Proposição 11.4.1, para todos $a, k \in \mathbb{N}$ tais que $(a, p) = (k, p) = 1$, que

$$\left(\frac{k^2 a}{p}\right) = \left(\frac{k^2}{p}\right) \left(\frac{a}{p}\right) = \left(\frac{a}{p}\right).$$

Dado $a \in \mathbb{N}$, com $(a, p) = 1$, qualquer, podemos escrever a na forma $a = k^2 p_1 \cdots p_r$, onde $k \in \mathbb{N}$ e p_1, \dots, p_r são números primos distintos, com $(k, p) = (p_1, p) = \cdots = (p_r, p) = 1$. Portanto,

$$\left(\frac{a}{p}\right) = \left(\frac{p_1}{p}\right) \cdots \left(\frac{p_r}{p}\right).$$

Isto mostra que, para determinar o símbolo de Legendre de um número natural qualquer, basta saber calcular $\left(\frac{q}{p}\right)$, onde p e q são números primos distintos.

A seguir, determinaremos $\left(\frac{a}{p}\right)$ em vários casos particulares.

Proposição 11.4.2. *Seja p um número primo ímpar. Temos que*

$$\left(\frac{p-1}{p}\right) = \begin{cases} 1, & \text{se } p = 4n+1 \\ -1, & \text{se } p = 4n+3 \end{cases}$$

DEMONSTRAÇÃO: Se p é da forma $4n+1$, então $(p-1)/2$ é par; logo, pelo Problema 2.1.6, deduz-se que $(p-1)^{(p-1)/2} = mp+1$, para algum $m \in \mathbb{N}$. Portanto,

$$p|(p-1)^{\frac{p-1}{2}} - 1,$$

onde o resultado se segue, em vista do Critério de Euler.

Suponhamos, agora, que p seja da forma $4n+3$. Logo, $(p-1)/2$ é ímpar e pelo Problema 2.1.6, deduz-se que $(p-1)^{(p-1)/2} = mp-1$, para algum $m \in \mathbb{N}$. Portanto,

$$p|(p-1)^{\frac{p-1}{2}} + 1,$$

onde o resultado se segue, novamente, em vista do Critério de Euler.

□

O próximo resultado, conhecido como *Lema de Gauss*, nos dará um método para determinar $\left(\frac{a}{p}\right)$ para todo primo ímpar p e todo número natural a , tal que $(a, p) = 1$.

Proposição 11.4.3 (Lema de Gauss). *Sejam p e a dois números, com p primo ímpar e $(p, a) = 1$. Sejam $r_1, \dots, r_{\frac{p-1}{2}}$ os restos da divisão por p dos números $a, 2a, \dots, \frac{p-1}{2}a$, respectivamente. Se k é o número dos r_i que são maiores do que $\frac{p-1}{2}$, então*

$$\left(\frac{a}{p}\right) = (-1)^k.$$

DEMONSTRAÇÃO: Como $(a, p) = 1$, os números $a, 2a, \dots, \frac{p-1}{2}a$ são dois a dois incongruentes módulo p , pois, se $na \equiv ma \pmod{p}$, com $n, m \leq (p-1)/2$ e $n \neq m$, então $n \equiv m \pmod{p}$, o que é absurdo. Portanto, $r_1, \dots, r_{\frac{p-1}{2}} \in \{1, 2, \dots, p-1\}$ e são distintos. Dividamos o conjunto $\{r_1, r_2, \dots, r_{\frac{p-1}{2}}\}$ em duas partes: $\{b_1, \dots, b_k\}$, dos elementos maiores do que $(p-1)/2$; e $\{c_1, \dots, c_l\}$, dos elementos menores do que ou iguais a $(p-1)/2$. Note que $k+l = (p-1)/2$.

Observe, agora, que os números $p - b_1, \dots, p - b_k$ são menores do que $(p - 1)/2$ e que são distintos entre si. Além disso, esses números são distintos dos números c_1, \dots, c_l , pois, se $p - b_i = c_j$, teríamos $b_i \equiv c_j \pmod{p}$, o que não é o caso.

Portanto, como $k + l = (p - 1)/2$, segue-se que

$$\{p - b_1, \dots, p - b_k\} \cup \{c_1, \dots, c_l\} = \{1, 2, \dots, \frac{p-1}{2}\}.$$

Temos, então, que

$$c_1 \cdots c_l (p - b_1) \cdots (p - b_k) = \left(\frac{p-1}{2}\right)!.$$

Por outro lado, pela definição dos r_i , temos que

$$b_1 \cdots b_k c_1 \cdots c_l \equiv a^{\frac{p-1}{2}} \left(\frac{p-1}{2}\right)! \pmod{p};$$

e, portanto,

$$b_1 \cdots b_k c_1 \cdots c_l \equiv a^{\frac{p-1}{2}} (p - b_1) \cdots (p - b_k) c_1 \cdots c_l \pmod{p},$$

onde

$$b_1 \cdots b_k \equiv a^{\frac{p-1}{2}} (p - b_1) \cdots (p - b_k) \pmod{p}.$$

Como $(p, p - b_i) = 1$, para todo i , existe d_i tal que $d_i(p - b_i) \equiv 1 \pmod{p}$ (Proposição 11.1.1); logo,

$$d_1 \cdots d_k b_1 \cdots b_k \equiv a^{\frac{p-1}{2}} \pmod{p}. \quad (11.2)$$

Note que $d_i b_i + 1 \equiv 0 \pmod{p}$, logo, pelo Problema 9.1.1, $d_1 \cdots d_k b_1 \cdots b_k \equiv 1 \pmod{p}$, se k é par, e $d_1 \cdots d_k b_1 \cdots b_k + 1 \equiv 0 \pmod{p}$, se k é ímpar. Portanto, de (11.2), obtemos que

$$a^{\frac{p-1}{2}} - (-1)^k \equiv 0 \pmod{p},$$

e o resultado segue-se da Proposição 11.4.1 (ii).

□

O próximo resultado nos dará uma fórmula para calcular o símbolo de Legendre.

Proposição 11.4.4. *Sejam p e a dois números naturais ímpares, com p primo e $(a, p) = 1$.*

Pondo $p' = (p - 1)/2$ e $\kappa = \left[\frac{a}{p} \right] + \left[\frac{2a}{p} \right] + \cdots + \left[\frac{p'a}{p} \right]$, temos que

$$\left(\frac{a}{p} \right) = (-1)^\kappa.$$

DEMONSTRAÇÃO: Sejam $r_1, \dots, r_{p'}$, respectivamente, os restos da divisão por p dos números $a, 2a, \dots, p'a$. Temos que

$$\begin{aligned} a &= p \left[\frac{a}{p} \right] + r_1 \\ 2a &= p \left[2 \frac{a}{p} \right] + r_2 \\ &\dots \\ p'a &= p \left[p' \frac{a}{p} \right] + r_{p'} \end{aligned}$$

Somando, membro a membro, as igualdades acima; e após somarmos os termos da PA: $1, 2, \dots, p'$, temos que

$$\frac{p^2 - 1}{8}a = (1 + \dots + p')a = p\kappa + r_1 + \dots + r_{p'}.$$

Mas, usando as notações da demonstração do Lema de Gauss e pondo $B = b_1 + \dots + b_k$ e $C = c_1 + \dots + c_l$, temos que $r_1 + \dots + r_{p'} = B + C$; e, portanto,

$$\frac{p^2 - 1}{8}a = p\kappa + B + C. \quad (11.3)$$

Como

$$\{c_1, \dots, c_l, p - b_1, \dots, p - b_k\} = \{1, \dots, p'\},$$

segue-se que

$$\frac{p^2 - 1}{8} = 1 + \dots + p' = pk - B + C. \quad (11.4)$$

Subtraindo (11.4) de (11.3), temos, para $\kappa \geq k$, que

$$\frac{p^2 - 1}{8}(a - 1) = p(\kappa - k) + 2B; \quad (11.5)$$

e, para $k > \kappa$, que

$$\frac{p^2 - 1}{8}(a - 1) + p(k - \kappa) = 2B. \quad (11.6)$$

Sendo $a - 1$ par e p ímpar, decorre das igualdades acima que κ e k têm a mesma paridade, seguindo-se o resultado do Lema de Gauss.

□

Exemplo 11.4.1. Vamos mostrar que a equação diofantina $X^2 - 13Y = 5$ não possui soluções em números naturais.

De fato, se ela tivesse alguma solução, 5 seria resíduo quadrático módulo 13. Vamos mostrar que esse não é o caso.

Temos que

$$\kappa = \left[\frac{5}{13} \right] + \left[\frac{10}{13} \right] + \left[\frac{15}{13} \right] + \left[\frac{20}{13} \right] + \left[\frac{25}{13} \right] + \left[\frac{30}{13} \right] = 5.$$

Portanto,

$$\left(\frac{5}{13} \right) = (-1)^\kappa = (-1)^5 = -1,$$

decorrendo daí que 5 é não resíduo quadrático módulo 13.

Corolário. Seja p um número primo ímpar. Tem-se que

$$\left(\frac{2}{p} \right) = \begin{cases} 1, & \text{se } p \equiv 1 \text{ ou } p \equiv 7 \pmod{8} \\ -1, & \text{se } p \equiv 3 \text{ ou } p \equiv 5 \pmod{8} \end{cases}$$

DEMONSTRAÇÃO: Temos que

$$\left[\frac{2}{p} \right] = \left[\frac{2}{2} \frac{2}{p} \right] = \dots = \left[\frac{p-1}{2} \frac{2}{p} \right] = 0;$$

e, portanto,

$$\kappa = \left[\frac{2}{p} \right] + \left[\frac{2}{2} \frac{2}{p} \right] + \dots + \left[\frac{p-1}{2} \frac{2}{p} \right] = 0.$$

Note que as conclusões a que chegamos na demonstração da Proposição 11.4.4 são válidas até (11.6), inclusive, independentemente da paridade de a . Logo, sendo $a = 2$ e $\kappa = 0$,

$$\frac{p^2 - 1}{8} + pk = 2B,$$

onde k tem o mesmo significado que no Lema de Gauss.

Portanto, k e $(p^2 - 1)/8$ têm a mesma paridade, e o resultado segue-se do Lema de Gauss, após analisar a paridade de $(p^2 - 1)/8$.

□

A Proposição 11.4.4 nos fornece uma fórmula para calcular o símbolo de Legendre relativamente a um número primo ímpar qualquer. No entanto, isso pode ser muito trabalhoso para números grandes. Veremos, em seguida, como a Lei da Reciprocidade Quadrática de Gauss nos permitirá fazer esse cálculo de modo muito mais eficiente.

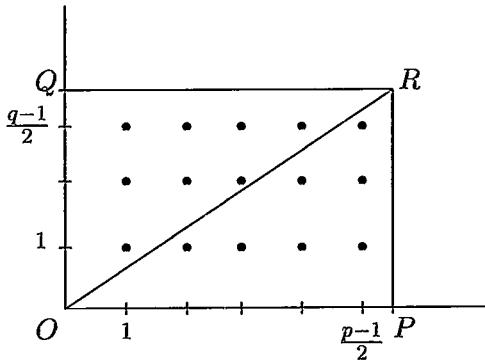
Para deduzir a Lei da Reciprocidade Quadrática, necessitaremos do lema chave a seguir, que possui várias demonstrações na literatura. A demonstração que apresentaremos é devida ao matemático alemão Ferdinand Gotthold Max Eisenstein (1823-1852), contemporâneo de Gauss.

Lema 11.4.1. *Sejam p e q dois números primos ímpares distintos. Tem-se que*

$$\left[\frac{q}{p} \right] + \left[2 \frac{q}{p} \right] + \cdots + \left[\frac{p-1}{2} \frac{q}{p} \right] + \left[\frac{p}{q} \right] + \left[2 \frac{p}{q} \right] + \cdots + \left[\frac{q-1}{2} \frac{p}{q} \right] = \frac{p-1}{2} \frac{q-1}{2}.$$

DEMONSTRAÇÃO: A demonstração será melhor compreendida se a visualizarmos geometricamente.

Num sistema retangular de coordenadas, marquemos sobre o eixo das abscissas os pontos distantes $1, 2, \dots, (p-1)/2$ unidades da origem O ; e sobre o eixo das ordenadas, os pontos distantes $1, 2, \dots, (q-1)/2$ unidades de O . Além disso, marquemos os pontos $P = (p/2, 0)$, $Q = (0, q/2)$, $R = (p/2, q/2)$ e os pontos com ambas as coordenadas naturais no interior do retângulo $OPRQ$.



A reta que passa por O e R tem por equação $py = qx$ e a reta $x = k$ a corta no ponto de coordenadas $(k, kq/p)$. Como $kq/p \notin \mathbb{N}$, se $k \in \mathbb{N}$ e $1 \leq k \leq p-1$, segue-se que os pontos de coordenadas naturais sobre a reta $x = k$, acima do segmento OP e abaixo da reta OR , são em número $\left[\frac{kq}{p} \right]$. Portanto, o número de pontos de coordenadas naturais no interior do triângulo OPR é

$$\kappa = \left[\frac{q}{p} \right] + \left[2 \frac{q}{p} \right] + \cdots + \left[\frac{p-1}{2} \frac{q}{p} \right].$$

Analogamente, tomando as retas $y = l$, $l = 1, 2, \dots, (q-1)/2$, tem-se que o número

de pontos de coordenadas naturais no interior do triângulo ORQ é

$$\kappa' = \left[\frac{p}{q} \right] + \left[2 \frac{p}{q} \right] + \cdots + \left[\frac{q-1}{2} \frac{p}{q} \right].$$

Portanto, $\kappa + \kappa'$ é igual ao número total $((p-1)/2)((q-1)/2)$ de pontos no interior do retângulo $OPRQ$, seguindo-se daí o resultado.

□

Finalmente, podemos provar o resultado.

Teorema 11.4.1 (Lei da Reciprocidade Quadrática de Gauss). *Sejam p e q dois números primos ímpares distintos. Tem-se que*

$$\left(\frac{p}{q} \right) \left(\frac{q}{p} \right) = (-1)^{\frac{p-1}{2} \frac{q-1}{2}}.$$

DEMONSTRAÇÃO: Isto é uma consequência imediata da Proposição 11.4.4 e do Lema 11.4.1.

□

Isto pode ser reenunciado através dos dois seguintes corolários:

Corolário 1. *Se p e q são dois números primos distintos, tais que $p \equiv q \equiv 3 \pmod{4}$, então q é resíduo quadrático módulo p , se, e somente se, p é não resíduo quadrático módulo q .*

Corolário 2. *Se p e q são dois números primos distintos, tais que $p \equiv 1 \pmod{4}$, ou $q \equiv 1 \pmod{4}$, então q é resíduo quadrático módulo p , se, e somente se, p é resíduo quadrático módulo q .*

A Lei de Reciprocidade Quadrática, juntamente com as propriedades do símbolo de Legendre contidas nas Proposições 11.4.1, 11.4.2 e no Corolário da Proposição 11.4.4, funciona como um algoritmo para determinar se um número é ou não é resíduo quadrático módulo um número primo ímpar p .

Exemplo 11.4.2. Vamos calcular $\left(\frac{2561}{241} \right)$.

Note inicialmente que 241 é um número primo e que $2561 \equiv 151 \pmod{241}$. Logo, pela Proposição 11.4.1 (i), temos que

$$\left(\frac{2561}{241} \right) = \left(\frac{151}{241} \right).$$

Pela Lei da Reciprocidade Quadrática, temos que

$$\left(\frac{151}{241}\right) \left(\frac{241}{151}\right) = (-1)^{75 \cdot 120} = 1;$$

e, portanto,

$$\begin{aligned} \left(\frac{151}{241}\right) &= \left(\frac{241}{151}\right) = \left(\frac{90}{151}\right) = \left(\frac{3^2}{151}\right) \left(\frac{2}{151}\right) \left(\frac{5}{151}\right) = \\ &\quad \left(\frac{2}{151}\right) \left(\frac{5}{151}\right) = \left(\frac{5}{151}\right) = \left(\frac{151}{5}\right) = \left(\frac{1}{5}\right) = 1. \end{aligned}$$

Com isto, provamos que 2561 é resíduo quadrático módulo 241. Como consequência imediata, temos que a equação diofantina

$$X^2 - 241Y = 2561$$

possui soluções naturais.

Exemplo 11.4.3. Vamos calcular $\left(\frac{3}{p}\right)$, onde p é um número primo maior do que 3.

Pela Lei da Reciprocidade Quadrática, temos que

$$\left(\frac{3}{p}\right) = \left(\frac{p}{3}\right) (-1)^{\frac{p-1}{2}}.$$

Pela Proposição 11.4.1 (i), temos que

$$\left(\frac{p}{3}\right) = \begin{cases} \left(\frac{1}{3}\right) = 1, & \text{se } p \equiv 1 \pmod{3} \\ \left(\frac{2}{3}\right) = -1, & \text{se } p \equiv 2 \pmod{3} \end{cases}$$

Por outro lado,

$$(-1)^{\frac{p-1}{2}} = \begin{cases} 1, & \text{se } p \equiv 1 \pmod{4} \\ -1, & \text{se } p \equiv 2 \pmod{4} \end{cases}$$

Juntando as informações acima, temos que

$$\left(\frac{3}{p}\right) = \begin{cases} 1, & \text{se } p \equiv 1 \text{ ou } p \equiv 11 \pmod{12} \\ -1, & \text{se } p \equiv 5 \text{ ou } p \equiv 7 \pmod{12} \end{cases}$$

Exemplo 11.4.4. Vamos calcular $\left(\frac{5}{p}\right)$, onde p é um número primo maior do que 5.

Pela Lei da Reciprocidade Quadrática, temos que

$$\left(\frac{5}{p}\right) = \left(\frac{p}{5}\right) (-1)^{\frac{p-1}{2}} = \left(\frac{p}{5}\right).$$

Pela Proposição 11.4.1 (i), temos que

$$\left(\frac{p}{5}\right) = \begin{cases} \left(\frac{1}{5}\right) = 1, & \text{se } p \equiv 1 \pmod{5} \\ \left(\frac{2}{5}\right) = -1, & \text{se } p \equiv 2 \pmod{5} \\ \left(\frac{3}{5}\right) = -1, & \text{se } p \equiv 3 \pmod{5} \\ \left(\frac{4}{5}\right) = 1, & \text{se } p \equiv 4 \pmod{5} \end{cases}$$

A seguir, como aplicação da Lei de Reciprocidade Quadrática, generalizaremos o Lema 8.1.1. Em seguida, utilizaremos esse resultado para provar mais um caso do Teorema de Dirichlet sobre a existência de primos em progressões aritméticas.

Proposição 11.4.5. *Sejam x e y dois números coprimos. Se p é um divisor primo ímpar de $x^2 + y^2$, então $p \equiv 1 \pmod{4}$.*

DEMONSTRAÇÃO: Seja p um divisor primo ímpar de $x^2 + y^2$. Tem-se, necessariamente, que $p \nmid x$ e $p \nmid y$, pois se p dividisse x ou y , então p dividiria ambos, o que é uma contradição.

Sejam $r, s \in \{1, \dots, p-1\}$, respectivamente, os restos da divisão de x^2 e y^2 por p ; logo, $r+s \equiv 0 \pmod{p}$. Se s' é o inverso multiplicativo de s módulo p (que existe, pois $(s, p) = 1$), tem-se que

$$rs' + 1 \equiv 0 \pmod{p},$$

o que implica que

$$rs' \equiv p-1 \pmod{p}. \quad (11.7)$$

Sendo s resíduo quadrático módulo p e $ss' \equiv 1 \pmod{p}$, segue-se, do Corolário da Proposição 11.4.1, que s' também é resíduo quadrático módulo p . Conseqüentemente, rs' é resíduo quadrático. Por (11.7), segue-se que $p-1$ é resíduo quadrático e, portanto, pela Proposição 11.4.2, p é da forma $4n+1$.

□

Corolário. *Todo divisor de um número da forma $x^2 + y^2$, com $(x, y) = 1$, é da forma $2^l(4n+1)$, onde $l = 0, 1$.*

DEMONSTRAÇÃO: Se m é um divisor de $x^2 + y^2$, podemos escrevê-lo na forma $m = 2^l \rho$, onde ρ é ímpar. Se um dos números x ou y é par e o outro é ímpar, tem-se que $l = 0$. Se x e

y são ímpares, então $l = 1$. Seja agora $p_1^{\alpha_1} \cdots p_r^{\alpha_r}$ a decomposição de ρ em fatores primos. Logo, cada p_i é da forma $4k + 1$. Como produtos de números desta forma continuam dessa forma, o resultado segue-se.

□

Exemplo 11.4.5. Existem infinitos primos da forma $8n + 5$.

De fato, todo número primo desta PA é ímpar e, portanto, de uma das seguintes formas:

$$8k + 1, \quad 8k + 3, \quad 8k + 5, \quad 8k + 7.$$

Note que o quadrado de um número ímpar é da forma $8k + 1$ (verifique!).

Suponhamos, por absurdo, que os números primos da forma $8k + 5$ que ocorrem nessa PA sejam em número finito; e seja p o maior deles.

Considere o número

$$a = (3 \cdot 5 \cdot 7 \cdots p)^2 + 4.$$

Sendo $(3 \cdot 5 \cdot 7 \cdots p)^2$ o quadrado de um número ímpar, logo, da forma $8k + 1$, segue-se que a é da forma $8k + 5$.

Sendo a ímpar e soma dos quadrados de dois números coprimos, segue-se da Proposição 11.4.5 que todo divisor de a é da forma $4k + 1$; portanto, da forma $8k + 1$ ou $8k + 5$. Como o produto de números da forma $8k + 1$ é da mesma forma, a deve ter um fator primo q da forma $8k + 5$, que não pode ser nenhum dos primos $3, 5, 7, \dots, p$, pois estes não dividem a . Portanto, $q > p$, o que é um absurdo.

Problemas

11.4.1 Mostre que

$$\left(\frac{7}{p}\right) = \begin{cases} 1, & \text{se } p \equiv i \pmod{28}, \quad i = 1, 3, 9, 19, 25, 27 \\ -1, & \text{se } p \equiv i \pmod{28}, \quad i = 5, 11, 13, 15, 17, 23 \end{cases}$$

11.4.2 Para quais primos p é o seguinte número resíduo quadrático?

- a) 6 b) 10 c) 14 d) 15 e) 21 f) 35.

11.4.3 Ache os números primos p para os quais $\left(\frac{p}{11}\right) = 1$.

11.4.4 Mostre que $p - 3$ é resíduo quadrático para todo número primo da forma $6n + 1$ e não resíduo quadrático para todo número primo da forma $6n - 1$

11.4.5 Mostre que a congruência $X^2 \equiv 93 \pmod{137}$ possui solução.

11.4.6* Seja $p > 2$ um número primo. Considere a congruência $aX^2 + bX + c \equiv 0 \pmod{p}$, onde $p \nmid a$, e seja m um número natural tal que $mp + b^2 - 4ac \geq 0$. Mostre que a congruência possui solução se, e somente se, $mp + b^2 - 4ac$ é resíduo quadrático módulo p .

Sugestões aos Problemas

Nesta parte do livro, apresentamos sugestões e, algumas vezes, a solução para os problemas assinalados com asterisco ao longo do livro.

Capítulo 2

2.1.2 Utilize a fórmula para a soma $1 + \dots + n$, bem como a fórmula do Problema 1.3.1(a).

2.2.1 Por indução sobre n .

Alternativamente, pode-se proceder como se segue:

Considere a identidade de polinômios

$$(1+X)^i + (1+X)^{i+1} + \dots + (1+X)^n = \frac{(1+X)^{n+1} - (1+X)^i}{X},$$

que pode ser obtida com uma fórmula análoga à da soma dos termos de uma PG, e, em seguida, iguale os coeficientes de X^i de ambos os lados.

2.2.3 (a) Use a identidade $(1+X)^{n+m} = (1+X)^n(1+X)^m$ e efetue o produto no segundo membro.

2.2.5 Sugestão para (a): Por indução sobre n . Quando o conjunto tem $n+1$ elementos, fixe um elemento a e separe os seus subconjuntos em duas classes: os subconjuntos que contêm a e os que não contêm a . Use, então, a hipótese de indução.

2.3.1 Suponha, por absurdo, que exista um número m tal que $0 < m < 1$. Considere $A = \{m^i; i \in \mathbb{N}\}$. Sendo o conjunto A não vazio, pela propriedade da Boa Ordem, ele possui um menor elemento m^r . Mostre que $0 < m^{r+1} < m^r < 1$, o que é uma contradição, pois $m^{r+1} \in A$.

2.3.2 Suponha, por absurdo, que não exista tal n . Considere $A = \{ia; i \in \mathbb{N}\}$. Mostre que A é limitado superiormente; logo, pelo Corolário do Teorema 2.3.1, A possui um maior elemento ra . Mostre que $(r+1)a > ra$, o que é uma contradição, pois $(r+1)a \in A$.

2.3.3 Seja S um subconjunto de \mathbb{N} tal que $0 \in S$ e S é fechado com respeito à operação "somar 1" a seus elementos. Queremos provar que $S = \mathbb{N}$.

De fato, se $A = \mathbb{N} \setminus S \neq \emptyset$, então A possui um menor elemento a . Como $a \in A$, segue-se que $a \neq 0$, já que $0 \in S$. Portanto, $a - 1 \notin A$ e, consequentemente, $a - 1 \in S$. Como S é fechado com respeito à operação "somar 1", segue-se que $a \in S$, o que contradiz o fato de $a \notin S$.

Como o Axioma da Indução implica o Princípio de Indução Matemática (Teorema 1.3.1), temos que a Propriedade da Boa Ordem implica também o Princípio de Indução Matemática.

2.4.2 (d) Use a identidade $u_k u_{k+1} - u_{k-1} u_k = u_k^2$.

2.4.3 Fixe n e demonstre a validade da identidade usando a segunda forma do Princípio de Indução sobre m .

2.4.4 Use a fórmula do Problema 2.4.3. Você conseguiria deduzir essas fórmulas de outra forma?

2.S.2 Usando o mesmo argumento utilizado para provar a fórmula de Binet, mostra-se que

$$a_n = \frac{(1 + \sqrt{2})^n}{2} + \frac{(1 - \sqrt{2})^n}{2}.$$

2.S.3 Sendo $a_n - a_{n-1} = n$, somando, temos que

$$\sum_{i=1}^n (a_i - a_{i-1}) = \sum_{i=1}^n i.$$

Como a soma do lado esquerdo dá $a_n - a_0$, segue-se que

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

2.S.4 Seja R_n o número máximo de regiões em que se consegue dividir o plano com n retas.

É imediato verificar que $R_0 = 1$ e $R_1 = 2$.

O que se pode dizer de R_2 ? Bem, $R_2 = 4$, pois são três as regiões determinadas por duas retas paralelas e quatro as regiões determinadas por duas retas concorrentes.

Determinemos agora R_3 . Se as retas são paralelas, então o número de regiões é quatro. Se duas retas são paralelas e a terceira é concorrente com as outras duas, ou se as três retas são concorrentes, o número de regiões é seis. Se as três retas se cortam duas a duas em pontos distintos, então o número de regiões será sete. Portanto, $R_3 = 7$.

Note que, se considerarmos a situação anterior de duas retas se cortando e a terceira reta cortando-as fora do ponto de interseção, teremos as quatro regiões determinadas pelas duas retas, acrescidas de três novas regiões. Portanto, $R_3 = R_2 + 3 = 7$.

Vejamos agora o valor de R_4 . Se considerarmos a situação anterior que gerou $R_3 = 7$, e cortarmos as três retas por uma quarta, o número máximo de regiões será $R_4 = R_3 + 4 = 11$.

Em geral, obtém-se o número máximo R_n de regiões com n retas, através da configuração das $n - 1$ retas que gera R_{n-1} , cortando-a com uma reta que não é paralela a nenhuma das outras retas e que não passa por nenhum ponto de interseção de outras duas, obtendo n novas regiões além das R_{n-1} regiões pré existentes.

Assim,

$$R_n = R_{n-1} + n.$$

Utilizando agora a fórmula obtida no Problema 2.S.3, temos que

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

2.S.6 Por indução.

2.S.7 Use a fórmula de Binet.

Capítulo 3

3.1.4 Utilize o Lema 2.2.2.

3.1.9 Escreva $a^3 + 4 = (a^3 - 8) + 12$, $a^3 - 3 = (a^3 + 27) - 30$, $a^4 + 2 = (a^4 - 16) + 18$.

3.1.11 Desenvolva $(n + 1)^n$ pelo binômio de Newton.

3.1.12 Sugestão para (c) e (d): Por indução sobre a .

3.S.3 $11\dots111 = 11\dots108 + 3 = 4k + 3$.

3.S.6 Observe que, de quatro números naturais consecutivos, um deles é divisível por 4.

Capítulo 5

5.2.5 Mostre que 6 divide $n^5 - n$ e use o Problema 3.1.12 (c).

5.2.8 Imitie o Exemplo 5.1.1 e use os Problemas 5.2.3(c) e 5.2.2(a).

Capítulo 6

6.2.5 Note que $M_2 = 3$ e use a Proposição 6.2.2.

6.S.3 Relacione o conjunto $S^*(a, b)$ com o conjunto $S(a, b)$ da Seção 6.1. Por exemplo, ache o seu menor elemento.

Capítulo 7

7.1.12 Use o Lema 6.3.2.

Capítulo 8

8.1.1 Use o Lema 8.1.1.

8.1.6 Use os seguintes fatos: $(F_i, F_j) = 1$, se $i \neq j$, 2 | F_i e F_5 é composto.

8.1.7 Use a fórmula do Problema 2.S.2 para mostrar que $u_n^2 - u_{n-1}u_n = u_{n-1}^2 + 1$. Conclua que todo divisor de u_n é divisor de $u_{n-1}^2 + 1$ e use o Lema 8.1.1.

Capítulo 9

9.1.10 Note que $7^4 = 2401 \equiv 1 \pmod{100}$.

9.1.11 Use o Corolário 2 da Proposição 9.1.3.

9.1.14 Note, inicialmente, que $X \equiv m - 1 \pmod{m}$ se, e somente se, $X + 1 \equiv 0 \pmod{m}$ e, posteriormente, faça $m = 6, 5, 4, 3$.

9.1.16 Suponha que este seja o caso. Então, existem $a, x \in \mathbb{N}$ tais que $a^2 + (a+1)^2 + (a+2)^2 + (a+3)^2 = x^2$. Logo, $4a^2 + 12a + 14 = x^2$. Portanto, $x^2 \equiv 2 \pmod{4}$. Mas é fácil verificar que essa congruência é impossível.

9.1.17 Suponha que $4n + 3 = x^2 + y^2$. Logo, $x^2 + y^2 \equiv 3 \pmod{4}$, e isto é impossível.

9.1.18 Por indução sobre k .

9.3.3 Dado um conjunto finito A , a notação $\#A$ representa a cardinalidade de A , ou seja o seu número de elementos.

Use a fórmula do Teorema 8.3.2 e a observação abaixo.

Seja $(n+m)_{r+1} \dots (n+m)_1(n+m)_0$ a representação na base p de $n+m$. Se $n_k + m_k \geq p$, então

$$n_k + m_k + \delta = (n+m)_k + p,$$

onde $\delta = 0, 1$ é o que foi transportado do passo anterior.

Daí segue-se que

$$\frac{n_k + m_k - (n+m)_k}{p-1} = \frac{p-\delta}{p-1} \geq 1.$$

Capítulo 10

10.1.3 Note que a igualdade é trivialmente verificada se $m = 2$. Portanto, podemos supor $m > 2$. Neste caso, $\varphi(m)$ é par. O resultado segue-se notando que $(a, m) = 1 \Leftrightarrow (m - a, m) = 1$.

10.1.6 Seja $m = p_0^{\alpha_0} \cdots p_k^{\alpha_k}$ a decomposição de m em fatores primos, onde

$$2 = p_0 < p_1 < \cdots < p_k.$$

Temos então, pelo Teorema 10.1.3, que

$$\varphi(m) = p_0^{\alpha_0-1} p_1^{\alpha_1-1} \cdots p_k^{\alpha_k-1} (p_0 - 1) \cdots (p_k - 1) = 2^r.$$

Como p_1, \dots, p_k são diferentes de 2, devemos ter $\alpha_1 = \cdots = \alpha_k = 1$. Além disso, $p_i - 1 = 2^{\beta_i}$, para $i = 1, \dots, k$, logo, $p_i = 2^{\beta_i} + 1$. Como p_i é primo, segue-se da Proposição 8.1.1 que $\beta_i = 2^{n_i}$ para algum $n_i \in \mathbb{N}$. Logo

$$m = 2^{\alpha_0} (2^{2^{n_1}} + 1) \cdots (2^{2^{n_k}} + 1),$$

onde $2^{2^{n_1}} + 1, \dots, 2^{2^{n_k}} + 1$ são primos de Fermat distintos.

10.1.9 Note que $2730 = 13 \times 7 \times 5 \times 2$, e que $13|n^{13} - n$ e $2|n^{13} - n$. Para provar que 7 e 5 dividem $n^{13} - n$, use o Problema 10.1.7.

10.2.5 Mostre que $\left[\left(\frac{p-1}{2} \right)! \right]^2 \equiv (p-1)! \pmod{p}$.

10.2.7 Suponha que $p = 2n + 1$ e note que $(p-1)! = 2^n n! 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2n-1)$. Use os Problemas 10.2.5, 10.2.6 para calcular $n!$ e o fato de que $2^{2n} \equiv 1 \pmod{p}$.

10.S.5 Sejam a_1, \dots, a_m e $a'_1, \dots, a'_{m'}$ dois sistemas completos de resíduos módulo m e m' , respectivamente. Inicialmente, vamos provar que os números $a_l m' + a'_k m$, ao variar de $l = 1, \dots, m$ e $k = 1, \dots, m'$, formam um sistema completo de resíduos módulo mm' . De fato, esses são mm' números, dois a dois incongruentes módulo mm' , pois suponha que

$$a_l m' + a'_k m \equiv a_\lambda m' + a'_\mu m \pmod{mm'},$$

onde $a_l m' + a'_k m \geq a_\lambda m' + a'_\mu m$, logo,

$$mm' | (a_l - a_\lambda)m' + (a'_k - a'_\mu)m.$$

Como $(m, m') = 1$, segue-se que $m|a_l - a_\lambda$ e $m'|a'_k - a'_\mu$, o que implica que $a_l \equiv a_\lambda \pmod{m}$ e $a'_k \equiv a'_\mu \pmod{m'}$, acarretando $a_l = a_\lambda$ e $a'_k = a'_\mu$.

Agora, pelo Problema 5.2.2(b), note que

$$(a_l m' + a'_k m, mm') = 1 \Leftrightarrow (a_l m' + a'_k m, m) = (a_l m' + a'_k m, m') = 1.$$

Logo, pelo Lema de Euclides e pelo fato de $(m, m') = 1$, temos que

$$(a_l m' + a'_k m, m) = (a_l m', m) = (a_l, m),$$

e

$$(a_l m' + a'_k m, m') = (a'_k m, m') = (a'_k, m').$$

Juntando as duas igualdades acima com a observação imediatamente acima delas, temos que

$$(a_l m' + a'_k m, mm') = 1 \iff (a_l, m) = (a'_k, m') = 1,$$

o que mostra que $a_l = r_i$ e $a'_k = r'_j$ para alguma escolha de i e j .

10.S.6 É só observar que, no problema anterior, temos que $s = \varphi(m)$ e $t = \varphi(m')$ e que um sistema reduzido de resíduos, módulo mm' , tem rt elementos.

Capítulo 11

11.2.6 Resolva, inicialmente, o sistema formado pelas três primeiras congruências.

11.2.9 Use o fato de que $(F_i, F_j) = 1$, se $i \neq j$, e, em seguida, o Problema 11.2.8.

11.4.6 Siga os mesmos passos da dedução da fórmula para as raízes de uma equação do segundo grau, completando quadrados.

Índice Analítico

A

adição 1
algoritmo de Euclides 56
Andrew Wiles 96
anti-simétrica 5
associatividade 2
axioma de indução 7

B

Bachet de Méziriac 96
Bertrand Russel 10
binômio de Newton 19
C
cancelativa 4
Carl Friederich Gauss 11
classe 44
comutatividade 2
congruentes 110
conjectura de Goldbach 91
conjunto de lacunas 71, 72
coprimos 60
cota superior 21
critérios de divisibilidade 46, 119, 120
Crivo de Eratóstenes 88

D

definição por recorrência 14
Diofanto de Alexandria 66, 96
Disquisitiones Arithmeticae 110, 131, 148
distributividade 2
divisão euclidiana 30, 35
divisor 30
divisor comum 53

E

Edouard Lucas 25
elemento neutro 2
equações diofantinas lineares 66
Euclides 30
expansão b -ária 45
expansão decimal 45
expressões binômias 74

F

fator 30
fatorial 15, 104
Fibonacci 28, 43
fórmula de Binet 27
Francesco Maurolycus 10
função ϕ de Euler 130

G

Gauss 131
Giuseppe Peano 1

H

Hipótese de Riemann 91

I

identidade de Euler 19
identidade de Lagrange 19
ímpar 37
incongruentes 110, 142
indução empírica 9
indução Matemática 9
integridade 2
inverso multiplicativo módulo m 143
Ivan Vinogradov 91

J

Jacob Steiner 29

- Jean Pierre Serre 91
jogo de Nim 50
L
Lagrange 138
Lei da Reciprocidade Quadrática 148, 150
Lejeune Dirichlet 98
Lema de Gauss 152
Lema de Euclides 54
Leonardo de Pisa 26, 28
Leonhard Euler 96
Liber Abacci 28, 43
limitado superiormente 21
livre de quadrados 40
Lucas, E. 27
M
maior do que 3
maior elemento 21
Marin Mersenne 96
máximo divisor comum 53
mdc 53
mínimo múltiplo comum 63
mmc 63
multiplicação 1
múltiplo 30
múltiplo comum 63
N
não resíduo quadrático 147
nove misterioso 47
número binomial 17, 123
número composto 82
número primo 82
números complexos 2
números de Fermat 97
números de Fibonacci 27, 79, 121
números de Mersenne 98
números ímpares 37
números incongruentes 110
números inteiros relativos 2
números naturais 1
- números naturais congruentes 110
números pares 37
números perfeitos 102, 121
números racionais 2
números reais 2
O
ordem 44
ordem de um número 134
Os Elementos de Euclides 35, 41, 53, 83
P
par 37
paridade 37
Pequeno Teorema de Fermat 92, 112, 132
Pierre de Fermat 96
Pitágoras 37
pizza de Steiner 29
Platão 96
potências 15
Prêmio Abel 91
primos de Fermat 98
primos de Mersenne 98
primos entre si 60
primos gêmeos 90
Princípio de Indução Matemática 8
Princípio de Indução Matemática, 2^a Forma
22
potências 16
problema da moeda falsa 26, 49
progressão aritmética 12
progressão aritmético-geométrica 12
progressão geométrica 12
Propriedade Arquimediana 22, 37
Propriedade da Boa Ordem 20
prova dos nove 120
Q
quociente 30, 36
R
razão 12
recorrência 27

- reflexiva 5
Regiomonto 96
regra dos noves fora 120
relação de ordem 5
relação de Stifel 17
relação transitiva 5
representação p -ádica 107
resíduo quadrático 147
resto 36
- S**
- sentença aberta 8
seqüência 11
seqüência de Fibonacci 27, 79, 121
símbolo de Legendre 150
sistema binário 439
sistema completo de resíduos 126
sistema decimal 43
sistema completo de resíduos 111
sistema completo de soluções incongruentes 142
sistema posicional 43
sistema reduzido de resíduos 130
sistema sexagesimal 43
sistemas de numeração 43
solução minimal 67
soma dos divisores 101
somatório 15
subtração 6
Sun-Tsu 144
- T**
- Teorema Chinês dos Restos 144
Teorema de Dirichlet 99
Teorema de Euler 132
Teorema de Legendre 105
Teorema de Wilson 138
Teorema dos Números Primos 90
Teorema Fundamental da Aritmética 82
teste de primalidade de Lucas 136
torre de Hanói 23
- tricotomia 2
U
Último Teorema de Fermat 96
Z
zero 43