

# **IC Grupos**

Iniciação Científica em Teoria de Grupos

Marco Vieira Busetti

Professor: Francismar Ferreira Lima

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Curitiba, Novembro de 2024

# Conteúdo

<b>1 Generalidades sobre Grupos</b>	<b>3</b>
1.1 Operações Binárias . . . . .	3
1.2 Grupos . . . . .	4
1.3 Subgrupos . . . . .	7
1.4 Teorema de Lagrange . . . . .	15
1.5 Grupos Quocientes . . . . .	19
1.6 Homomorfismos de Grupos . . . . .	29
1.7 Produto Direto de Grupos . . . . .	43
1.8 Produto Semidireto de Grupos . . . . .	47
<b>2 Grupo Simétrico</b>	<b>48</b>
2.1 Generalidades sobre o grupo simétrico . . . . .	48
2.2 Ciclos e transposições . . . . .	52

# Capítulo 1

## Generalidades sobre Grupos

### 1.1 Operações Binárias

#### Definição 1.1.1

Sejam  $G$  e  $E$  conjuntos não-vazios e  $\oplus$  uma função tal que:

$$\begin{aligned}\oplus : G \times G &\rightarrow E \\ (a, b) &\mapsto \oplus(a, b)\end{aligned}$$

Definimos a função acima como a **operação binária de dois elementos de  $G$  em  $E$**  e a escrevemos comumente como:  $a \oplus b$ .

#### Exemplo 1.1.1

A adição usual  $+$  é uma operação binária de dois elementos de  $\mathbb{I}$  em  $\mathbb{R}$ . Onde  $\mathbb{I}$  denota o conjunto dos números irracionais.

#### Exemplo 1.1.2

Sejam  $(a, b) \in \mathbb{R}^2$ , a função que define a distância cartesiana entre dois pontos  $a$  e  $b$ :

$$\text{dist}(a, b) : \begin{aligned}\mathbb{R} \times \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R}^+ \\ (a, b) &\mapsto \sqrt{a^2 + b^2}\end{aligned}$$

representa uma operação binária de dois elementos de  $\mathbb{R}$  em  $\mathbb{R}^+$ .

#### Definição 1.1.2

A partir das notações acima, definimos **lei de composição interna de  $G \times G \rightarrow G$  se  $E = G$** .

*Observação: caso não haja ambiguidade, denotaremos simplesmente **lei de composição interna em  $G$**  para representar a lei de composição interna de  $G \times G \rightarrow G$ .*

#### Exemplo 1.1.3

A operação usual  $+$  em  $\mathbb{N}$  é uma lei de composição interna em  $\mathbb{N}$ , ao contrário da operação usual  $-$  de  $\mathbb{N}$  em  $\mathbb{Z}$ .

## 1.2 Grupos

### Definição 1.2.1

Seja  $G$  um conjunto não-vazio. **Dizemos que  $(G, \cdot)$  é um grupo** se, e somente se,  $\cdot$  é uma lei de composição interna em  $G$  tal que:

1.  $\exists e \in G, \forall x \in G : x \cdot e = e \cdot x = x;$
2.  $\forall x \in G, \exists \hat{x} \in G : x \cdot \hat{x} = \hat{x} \cdot x = e;$
3.  $\forall x, y, z \in G : (x \cdot y) \cdot z = x \cdot (y \cdot z).$

*Observações:*

Levando em consideração as notações acima, temos:

1. Primeiramente, notamos que  $e$  e  $\hat{x}$  são únicos, uma vez que:

Supondo que existam  $e$  e  $e'$  pertencentes à  $G$  que satisfazem o item 1, temos:

$$x \cdot e = x = x \cdot e' \implies \hat{x} \cdot x \cdot e = \hat{x} \cdot x \cdot e' \implies e = e' \quad \square$$

Supondo agora que existam  $\hat{x}$  e  $\hat{x}'$  que satisfazem o item 2, temos:

$$\hat{x} \cdot x = e = \hat{x}' \cdot x \implies \hat{x} \cdot x \cdot \hat{x} = \hat{x}' \cdot x \cdot \hat{x} \implies \hat{x} \cdot e = \hat{x}' \cdot e \implies \hat{x} = \hat{x}' \quad \square$$

2. Notamos por convenção  $x^{-1}$  no lugar de  $\hat{x}$  no **item 2** (dada sua unicidade).
3. Caso  $\forall (x, y) \in G \times G : x \cdot y = y \cdot x$ , dizemos que  $G$  é um grupo abeliano (ou comutativo).
4. Caso  $G$  seja um grupo abeliano, então

$$(x \cdot y)^n = x^n \cdot y^n, \quad \forall n \in \mathbb{Z}.$$

### Exemplo 1.2.1

$(\mathbb{Z}, +)$ ,  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, +)$ ,  $(\mathbb{R}^*, \cdot)$ ,  $(\mathbb{R}, +)$ ,  $(\mathbb{C}, +)$ ,  $(\mathbb{C}^*, \cdot)$ ,  $(\mathbb{Q}^*, \cdot)$

são grupos abelianos (onde  $+$  e  $\cdot$  denotam as operações usuais de adição e produto em  $\mathbb{C}$ ).

### Exemplo 1.2.2

$(GL_n(\mathbb{K}), \times)$  define uma estrutura de grupo, onde  $\mathbb{K} = \mathbb{C}$  ou  $\mathbb{R}$  e  $GL_n(\mathbb{K})$  define o conjunto das matrizes  $n \times n$  invertíveis com entradas em  $\mathbb{K}$ .

### Exemplo 1.2.3

Seja  $A$  um conjunto não-vazio. Seja

$$\mathcal{P}(f) = \{f : A \rightarrow A \mid f \text{ bijetiva}\}$$

O conjunto das funções  $f$  bijetivas de  $A$  em  $A$ .

$(\mathcal{P}(f), \circ)$  define uma estrutura de grupo, onde  $\circ$  representa composição entre funções.

Caso  $A$  seja um conjunto finito e  $n \in \mathbb{N}$  tal que  $\text{Card}(A) = n$ ,  $\mathcal{P}(f)$  será representado por  $S_n$  e será chamado de **grupo simétrico ou grupo das permutações**.

#### Exemplo 1.2.4

Seja, neste exemplo, para fins de simplificação,  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{Z}_n$ , para  $n \in \mathbb{Z}$ .  
Seja a operação  $\odot$  em  $\mathbb{Z}_n$  definida da seguinte forma:

$$\odot : \begin{aligned} \mathbb{Z}_n \times \mathbb{Z}_n &\rightarrow \mathbb{Z}_n \\ (\bar{a}, \bar{b}) &\mapsto \bar{a} \odot \bar{b} = \overline{a \cdot b} \end{aligned}$$

onde  $\cdot$  é a operação usual de produto nos inteiros.

Temos que  $(\mathbb{Z}_p^*, \odot)$ , onde  $p$  é um número primo, é um grupo abeliano.

#### Demonstração:

Por construção, temos que  $\bar{a} \odot \bar{b} \in \mathbb{Z}_p^*$ .

Para mostrar a associatividade, sejam  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c} \in \mathbb{Z}_p^*$ .

Temos que:

$$\begin{aligned} \bar{a} \odot (\bar{b} \odot \bar{c}) &= \bar{a} \odot (\overline{b \cdot c}) = \\ &= \overline{a \cdot (b \cdot c)} = \overline{(a \cdot b) \cdot c} = (\bar{a} \odot \bar{b}) \odot \bar{c}. \end{aligned}$$

O elemento neutro é evidentemente o elemento  $\bar{1} \in \mathbb{Z}_p^*$ , pois:

$$\bar{a} \odot \bar{1} = \overline{a \cdot 1} = \bar{a}, \quad \forall \bar{a} \in \mathbb{Z}_p^*.$$

Também temos que para todo elemento de  $\mathbb{Z}_p^*$ , existe elemento inverso, pois, sabemos que:

$$\forall \bar{a} \in \mathbb{Z}_p^* \implies \text{mdc}(a, p) = 1.$$

Logo, pelo Teorema de Bézout, temos que existem  $x$  e  $y$  inteiros tais que:

$$ax - py = 1$$

Ora mas isso é a mesma coisa que afirmar que existe uma solução para a equação:

$$a \cdot x \equiv 1 \pmod{p} \iff \bar{a} \odot \bar{x} = \bar{1}.$$

Logo, deduzimos que  $\forall \bar{a} \in \mathbb{Z}_p^*$ ,  $\exists \bar{a}^{-1} \in \mathbb{Z}_p^*$ .

Além disso, é evidente que a operação  $\odot$  é comutativa.

Portanto, provamos que  $(\mathbb{Z}_p^*, \odot)$  é um grupo abeliano.

□

**Exemplo 1.2.5**

Seja  $G = ] -1, 1[, (G, \star)$  tal que

$$\forall x, y \in G : x \star y = \frac{x + y}{1 + xy}$$

define um grupo abeliano.

**Demonstração:**

Provemos primeiramente que  $\forall x, y \in G, x \star y \in G$ .

Fixando  $y \in G$  temos a seguinte função de  $x \in G$ :

$$f(x) = \frac{x + y}{1 + xy}$$

A função é derivável em  $G$ . Tomando sua derivada temos:

$$f'(x) = \frac{1 - y^2}{(1 + xy)^2}$$

Temos evidentemente  $\forall (x, y) \in G \times G, f'(x) > 0$ .

(De forma simétrica podemos mostrar o mesmo escrevendo  $f$  como uma função de  $y$ ).

Logo, deduzimos que a função  $f$  é estritamente crescente.

Portanto:

$$f(-1) < x \star y < f(1) \iff \frac{y - 1}{1 - y} < x \star y < \frac{1 + y}{1 + y} \iff -1 < x \star y < 1$$

Logo, provamos que  $x \star y \in G$ .

Provemos os outros axiomas:

*Existência do neutro:*

Tomando  $y = 0$  temos:

$$x \star 0 = \frac{x + 0}{1 + 0 \cdot x} = x$$

Portanto, deduzimos que o elemento neutro do grupo  $G$  é dado por  $e = 0$ .

*Existência do inverso:*

Tomando  $y = -x$  temos:

$$x \star -x = \frac{x - x}{1 - (-x)x} = 0$$

Portanto, deduzimos que o elemento inverso do grupo  $G$  existe e é dado por  $x^{-1} = -x$ .

*Associatividade:*

Sejam  $x, y, z \in G$ , mostremos que  $(x \star y) \star z = x \star (y \star z)$

Temos:

$$\begin{aligned}
(x \star y) \star z &= \frac{(x \star y) + z}{1 + (x \star y)z} = \frac{\frac{x+y}{1+xy} + z}{1 + z \frac{x+y}{1+xy}} = \frac{x + y + z + xyz}{1 + xy + xz + yz} = \\
&= \frac{x(1 + yz) + (y + z)}{(1 + yz) + x(y + z)} = \frac{x + \frac{y+z}{1+yz}}{1 + x \frac{y+z}{1+yz}} = x \star (y \star z)
\end{aligned}$$

Mostrando, assim, a associatividade.

Ainda, temos que o grupo é evidentemente abeliano.  $\square$

## 1.3 Subgrupos

### Definição 1.3.1

Seja  $(G, \cdot)$  um grupo. Um subconjunto  $H \subseteq G$  é chamado de subgrupo de  $G$  (denotamos  $H \leq G$ ) se, e somente se,  $(H, \cdot)$  é um grupo.

*Observação:* temos ainda que se  $H \subset G$ , temos então  $H$  é chamado de subgrupo próprio de  $G$  e denotamos como  $H < G$ .

### Proposição 1.3.1

Seja  $H \subseteq G$  tal que  $H \neq \emptyset$  e  $(G, \cdot)$  é um grupo.  $H \leq G$  é equivalente à satisfazer as seguintes condições:

1.  $h_1 \cdot h_2 \in H$ ,  $\forall (h_1, h_2) \in H \times H$ ;
2.  $h^{-1} \in H$ ,  $\forall h \in H$ .

### Demonstração:

É necessário mostrarmos as duas implicações da equivalência:

$$H \leq G \implies (1.) \text{ e } (2.) \tag{1.1}$$

$$(1.) \text{ e } (2.) \implies H \leq G \tag{1.2}$$

A implicação (1.1) é trivial. Ora, se  $H \leq G$ , então pela definição de subgrupo temos que  $h_1 \cdot h_2 \in H$  e  $h^{-1} \in H$ , isto é  $\exists h^{-1} \in H : h \cdot h^{-1} = h^{-1} \cdot h = h$ .

Para a implicação (1.2):

Sabemos que  $H \subseteq G$ , logo, se  $h_1 \cdot h_2 \in H \implies h_1 \cdot h_2 \in G$ . Ora, sabemos que  $(G, \cdot)$  é um grupo. Logo, a associatividade é satisfeita. Para demonstrar que  $e \in H$ , basta tomarmos  $h_2 = h^{-1}$  a partir de (2.). Logo, temos  $h \cdot h^{-1} = e \in H$ . Com isso mostramos todos os axiomas necessários e deduzimos que  $H \leq G$ .  $\square$

**Exemplo 1.3.1**

$(\mathbb{U}^*, \cdot)$ ,  $(\mathbb{R}^*, \cdot)$ ,  $(\mathbb{R}_+^*, \cdot)$ ,  $(\mathbb{Q}^*, \cdot)$ ,  $(\mathbb{Q}_+^*, \cdot)$  são subgrupos de  $(\mathbb{C}^*, \cdot)$ , onde  $\cdot$  denota a multiplicação usual em  $\mathbb{C}$ .

**Exemplo 1.3.2**

$G$  e  $\{e\}$  são subgrupos *triviais* de  $G$ .

**Exemplo 1.3.3**

Seja  $n \in \mathbb{N}^*$ ,

$$SL_n(\mathbb{K}) \stackrel{\text{def}}{=} \{A \in GL_n(\mathbb{K}), \det(A) = 1\}$$

Temos que  $(SL_n(\mathbb{K}), \cdot) \leq (GL_n(\mathbb{K}), \cdot)$ , onde  $\cdot$  denota o produto usual de matrizes.

Chamamos  $SL_n(\mathbb{K})$  de **grupo linear especial**.

**Demonstração:**

Mostremos que temos de fato  $SL_n(\mathbb{K}) \leq GL_n(\mathbb{K})$ .

Primeiramente, note que é evidente que  $SL_n(\mathbb{K})$  é não vazio, pois  $\text{Id}_n \in SL_n(\mathbb{K})$ .

Mostremos que  $\forall A, B \in SL_n(\mathbb{K})$ ,  $AB^{-1} \in SL_n(\mathbb{K})$ .

Sabemos que se  $A, B \in SL_n(\mathbb{K})$  então  $\det(A) = \det(B) = 1$ .

Ora, sabemos que:

$$\det(AB^{-1}) = \det(A)\det(B^{-1}) = \det(A)\det(B)^{-1} = 1 \cdot 1 = 1.$$

Logo, mostramos que  $SL_n(\mathbb{K}) \leq GL_n(\mathbb{K})$ . □

**Exemplo 1.3.4**

Seja  $n \in \mathbb{Z}$ ,  $(n\mathbb{Z}, +)$  são subgrupos de  $(\mathbb{Z}, +)$ , e, em particular, são os únicos.

**Demonstração:**

É evidente que  $(n\mathbb{Z}, +)$  são subgrupos de  $(\mathbb{Z}, +)$ . Mostremos que são os únicos!

Seja  $(H, +)$  um subgrupo qualquer de  $(\mathbb{Z}, +)$ . Se  $H = \{0\}$ , então  $H = 0\mathbb{Z}$ .

Suponhamos agora  $H \neq \{0\}$ . Seja  $n = \min\{a \in H, a > 0\}$ .

Logo, como  $n \in H$  e  $H \leq \mathbb{Z}$ , temos que  $n\mathbb{Z} \subseteq H$ .

De maneira inversa, seja  $h \in H$ . Logo, pelo Algoritmo de Euclides, existem  $q, r \in \mathbb{Z}$  tais que:

$$h = qn + r \quad (0 \leq r < n)$$

Porém, note que, como  $h \in H$ , temos:

$$r = h - qn \in H$$

Porém, sabemos que  $0 \leq r < n$ .

Ora, como  $n$  é o elemento mínimo de  $H$  estritamente maior que 0, deduzimos que apenas podemos ter  $r = 0$ .

Logo:

$$h = qn \implies h \in n\mathbb{Z} \implies H \subseteq n\mathbb{Z}.$$

Portanto deduzimos que  $H = n\mathbb{Z}$ .  $\square$

### Exemplo 1.3.5

Seja  $G$  um grupo e  $I$  um conjunto não-vazio de índices. Se  $\{H_i\}_{i \in I}$  é uma família de subgrupos de  $G$ , então  $\bigcap_{i \in I} H_i$  é um subgrupo de  $G$ .

#### Demonstração:

Como visto na **Proposição 1.3.1**, mostremos que:

1.  $\forall x_1, x_2 \in \bigcap_{i \in I} H_i \implies x_1 \cdot x_2 \in \bigcap_{i \in I} H_i;$
2.  $\forall x \in \bigcap_{i \in I} H_i \implies \exists x^{-1} \in \bigcap_{i \in I} H_i.$

Provemos o **item 1**:

Sejam,

$$x_1, x_2 \in \bigcap_{i \in I} H_i$$

Logo:

$$\forall i \in I, x_1, x_2 \in H_i$$

Sabemos também que:

$$\forall i \in I, H_i \leq G$$

Portanto, deduzimos que:

$$\forall i \in I, x_1 \cdot x_2 \in H_i$$

Mas isso é a mesma coisa que dizer:

$$\forall x_1, x_2 \in \bigcap_{i \in I} H_i \implies x_1 \cdot x_2 \in \bigcap_{i \in I} H_i$$

Provemos o **item 2**:

Analogamente ao **item 1**, sabemos que:

$$x_0 \in \bigcap_{i \in I} H_i \iff \forall i \in I, x_0 \in H_i$$

Porém, sabemos que:

$$\forall i \in I, H_i \leq G$$

Logo, deduzimos que:

$$\forall i \in I, x_0 \in H_i, \exists x_0^{-1} \in H_i$$

Mas isso é a mesma coisa que:

$$\forall x \in \bigcap_{i \in I} H_i \implies \exists x^{-1} \in \bigcap_{i \in I} H_i$$

Portanto, provamos que:

$$\bigcap_{i \in I} H_i \leq G$$

□

### Definição 1.3.2

Seja  $G$  um grupo. O subconjunto  $Z(G)$  tal que:

$$Z(G) = \{x \in G : xg = gx, \forall g \in G\}$$

define um subgrupo de  $G$  chamado *centro* de  $G$ .

#### Demonstração:

Como visto na **Proposição 1.3.1**, para mostrar que  $Z(G) \leq G$  é necessário mostrar que  $x \cdot x^{-1} \in Z(G), \forall x \in Z(G)$ .

Nota:  $Z(G)$  é claramente não vazio uma vez que o elemento neutro comuta com todos elementos de  $G$  e, portanto, está em  $Z(G)$ .

Temos que:

Se:

$$x \in Z(G) \Rightarrow x \cdot g = g \cdot x, \forall g \in G.$$

Logo, teremos:

$$xgx^{-1} = g \implies x^{-1}xgx^{-1} = x^{-1}g \implies gx^{-1} = x^{-1}g, \forall g \in G$$

Portanto:

$$x^{-1} \in Z(G)$$

Temos também que:

$$x_1 \in Z(G) \implies x_1g = gx_1, \forall g \in G \quad (\text{I})$$

$$x_2 \in Z(G) \implies x_2g = gx_2, \forall g \in G \quad (\text{II})$$

Deduzimos de (I):

$$x_1g = gx_1 \implies g = x_1^{-1}gx_1$$

Substituindo em (II):

$$x_2x_1^{-1}gx_1 = x_1^{-1}gx_1x_2 \implies x_2x_1^{-1}x_1g = x_1^{-1}gx_1x_2 \implies$$

$$\implies x_2g = x_1^{-1}gx_1x_2 \implies (x_1x_2)g = g(x_1x_2)$$

Logo, deduzimos que:

$$(x_1, x_2) \in Z(G) \times Z(G) \implies x_1 \cdot x_2 \in Z(G)$$

Portanto,  $Z(G) \leq G$ . □

*Observação:* O subgrupo centro serve o propósito de "medir a comutatividade" de um dado grupo. Por exemplo, observamos que  $Z(\mathbb{Z}) = \mathbb{Z}$ ,  $Z(GL_2(\mathbb{R})) = \{\lambda I : \lambda \in \mathbb{R}^*\}$  e  $Z(S_n) = \{e\}$ ,  $n \geq 3$ .

### Definição 1.3.3

Seja  $(G, \cdot)$  um grupo e  $X$  um conjunto não-vazio tal que  $X \subseteq G$ . Chamamos de **subgrupo gerado por um subconjunto** a interseção de todos os subgrupos de  $G$  que contém  $X$ . Denotamos-o como  $\langle X \rangle$ .

Matematicamente temos:

$$\langle X \rangle = \bigcap \{H : H \leq G \text{ e } X \subseteq H\}$$

### Proposição 1.3.2

A partir das notações da **Definição 1.3.3**, temos que  $\langle X \rangle$  é o menor subgrupo de  $G$  que contém  $X$ .

#### Demonstração:

Suponha que  $J \leq G$  seja o menor subgrupo de  $G$  tal que  $X \subseteq J$ .

Ora, como  $J \leq G$  e  $X \subseteq J$ , então:  $\langle X \rangle \subseteq J$ .

Entretanto, também sabemos que  $J$  é o menor subgrupo de  $G$  tal que  $X \subseteq J$ .

Portanto, deduzimos que  $J \subseteq H$ ,  $\forall H : H \leq G$  e  $X \subseteq H$ .

Porém, para todo  $H$  subgrupo de  $G$  temos que  $X \subseteq H$ , logo, deduzimos que  $J \subseteq \langle X \rangle$ .

Portanto,  $J = \langle X \rangle$ . □

### Proposição 1.3.3

A partir das notações da **Definição 1.3.3**, temos que:

$$\langle X \rangle = \{x_1 x_2 \dots x_n : x_i \in X \cup X^{-1}, n \geq 1\}$$

#### Demonstração:

Sejam:

$$\dot{X} \stackrel{\text{def}}{=} \bigcap \{H : H \leq G \text{ e } X \subseteq H\}$$

$$\bar{X} \stackrel{\text{def}}{=} \{x_1 x_2 \dots x_n : x_i \in X \cup X^{-1}, n \geq 1\}$$

Queremos mostrar que:  $\dot{X} = \bar{X}$ .

Realizemos, primeiramente, algumas convenções de notação:

$$\bar{x}_p \stackrel{\text{def}}{=} x_1 x_2 \dots x_p, p \in \mathbb{Z}_+^*$$

$$\bar{x}_p^{-1} \stackrel{\text{def}}{=} x_1^{-1}x_2^{-1}\dots x_p^{-1}, \quad p \in \mathbb{Z}_+^*$$

É evidente que  $\bar{x}_p, \bar{x}_p^{-1} \in \bar{X}$ . Assim como  $\bar{x}_p\bar{x}_p^{-1} \in \bar{X}$ , o que nos mostra que  $\bar{X} \leq G$ .

Mostremos que  $\dot{X} \subseteq \bar{X}$ :

Sabemos que:

$$\bar{X} = \{\bar{x}_p : x_i \in X \cup X^{-1}, p \in \mathbb{Z}_+^*, \text{ e } 1 \leq i \leq p\}$$

Evidentemente temos que:

$$\forall x \in X \implies x \in \bar{X}$$

Uma vez que  $\bar{X} \leq G$ , temos diretamente que  $\dot{X} \subseteq \bar{X}$ .

Isso se dá pelo fato de que  $\dot{X}$  é o menor subgrupo de  $G$  contendo  $X$ , e, como  $\bar{X}$  é um subgrupo de  $G$  contendo  $X$ , realizamos tal dedução.

Mostremos agora que  $\bar{X} \subseteq \dot{X}$ :

Seja  $H \leq G$  tal que:

$$H \leq G \text{ e } X \subseteq H.$$

Ora, temos evidentemente que:

$$\forall \bar{x}_p \in \bar{X} \implies \bar{x}_p \in H.$$

Logo:

$$\bar{x}_p \in H \implies \bar{x}_p \in \bigcap_{i \in I} H_i$$

Onde  $I$  é um conjunto não-vazio de índices.

Evidentemente temos então que  $\bar{x}_p \in \dot{X}$ .

Logo,  $\bar{X} \subseteq \dot{X}$ .

Portanto, mostramos que:  $\bar{X} = \dot{X}$ .

□

### Exemplo 1.3.6

Seja o grupo  $(\mathbb{R}^*, \cdot)$  e o subconjunto  $E \subset \mathbb{R}^*$  tal que  $E = \{2\}$ . O subgrupo gerado por  $E$  é, portanto,  $H = \{2^n, n \in \mathbb{Z}\}$ .

De forma genérica, para um grupo  $G$  e um elemento  $a \in G$ , temos:  $\langle a \rangle = \{a^n | n \in \mathbb{Z}\}$ .

De forma geral, dado um grupo  $G$ , para determinarmos um subgrupo  $H$  gerado por um subconjunto  $X$  devemos provar os seguintes pontos:

1.  $H$  é um subgrupo de  $G$
2.  $X \subset H$
3. Se  $H'$  é um outro subgrupo tal que  $X \subset H'$ , então  $H \subset H'$

**Definição 1.3.4**

Seja  $G$  um grupo.  $G$  é chamado de grupo cíclico quando ele pode ser gerado por um único elemento  $x \in G$ .

**Exemplo 1.3.7**

$$\mathbb{Z} = \langle 1 \rangle, \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} = \langle \bar{1} \rangle, \mathbb{U} = \langle e^{\frac{2\pi i}{n}} \rangle.$$

**Proposição 1.3.4**

Se  $G$  é um grupo cíclico, então  $G$  é um grupo abeliano.

**Demonstração:**

Seja  $a \in G$  tal que  $G = \langle a \rangle$ . Podemos representar  $G$  como:

$$G = \{ \dots, (a^{-1})^r, \dots, (a^{-1})^2, a^{-1}, e, a, a^2, \dots, a^r, \dots \}$$

Onde  $r \in \mathbb{Z}$ .

Sejam  $(x, y) \in G \times G$ , queremos mostrar que  $x \cdot y = y \cdot x$ .

Sabemos que:

$$x = a^{r_1}, r_1 \in \mathbb{Z}$$

$$y = a^{r_2}, r_2 \in \mathbb{Z}$$

Logo:

$$x \cdot y = a^{r_1} \cdot a^{r_2} = a^{r_1+r_2} \stackrel{(*)}{=} a^{r_2+r_1} = a^{r_2} \cdot a^{r_1} = y \cdot x$$

(\*) : deduz-se que  $r_1 + r_2 = r_2 + r_1$  pois estamos trabalhando dentro do grupo abeliano  $(\mathbb{Z}, +)$ .

Portanto,  $G$  é um grupo abeliano. □

**Definição 1.3.5**

Definimos  $G' \stackrel{\text{def}}{=} \langle \{xyx^{-1}y^{-1} | (x, y) \in G \times G\} \rangle$  como o subgrupo dos comutadores do grupo  $G$ .

Podemos também denotar  $G' \stackrel{\text{def}}{=} [G, G]$ , onde, para  $x, y \in G$ , temos:

$$[x, y] \stackrel{\text{def}}{=} xyx^{-1}y^{-1}.$$

*Observações:*

- Note que  $G'$  é de fato um subgrupo de  $G$ , uma vez que ele é, por definição, um subgrupo gerado;
- Note que, para um dado grupo  $G$  e  $x, y \in G$ , **não** necessariamente temos  $[x, y] = [y, x]$ .

**Definição 1.3.6**

Seja  $(G, \cdot)$  um grupo. **Definimos ordem do grupo**  $(G, \cdot)$  a quantidade de elementos no conjunto  $G$  e a denotamos por  $|G|$ .

Se  $\alpha \in G$ , a ordem de  $\alpha$  é a ordem do subgrupo gerado por  $\alpha$ , denotada por  $\mathcal{O}(\alpha)$ , isto é,  $\mathcal{O}(\alpha) = |\langle \alpha \rangle|$ .

**Exemplo 1.3.8**

$$|\mathbb{Z}| = \infty, |\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}| = n, |(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*| = p - 1, |S_n| = n!$$

**Proposição 1.3.5**

Seja  $G$  um grupo finito e  $\alpha$  um elemento de  $G$ .

Logo,  $\mathcal{O}(\alpha) < \infty$ .

**Demonstração:**

Provemos a **Proposição 1.3.5** via absurdo.

Suponha que  $\mathcal{O}(\alpha)$  seja não finito, logo podemos gerar  $n$  valores distintos a partir de potências de  $\alpha$ , onde  $n \in \mathbb{Z}$ .

Ora, a partir da geração de infinitos valores distintos de potências de  $\alpha$ , sabemos que, para dado valor inteiro  $k$ , teremos  $\alpha^k \notin G$ . Ora, mas  $\langle \alpha \rangle$  é um subgrupo de  $G$ . Absurdo.

Portanto, temos que  $\mathcal{O}(\alpha) < \infty$ .

□

**Proposição 1.3.6**

Seja  $G$  um grupo e  $\alpha$  um elemento de  $G$ . Então, as seguintes proposições são equivalentes:

- (i) A ordem  $\mathcal{O}(\alpha)$  é finita. Isto é,  $\mathcal{O}(\alpha) < \infty$ ;
- (ii)  $\exists t \in \mathbb{Z}_+^* : \alpha^t = e$ , onde  $t = \min \{k \in G : k > 0\}$ .

Note que, caso a proposição seja satisfeita, então temos  $\mathcal{O}(\alpha) = t$ .

**Demonstração:**

Queremos provar que: (i)  $\iff$  (ii).

Comecemos provando a implicação (i)  $\implies$  (ii) :

Temos, por definição, que  $\langle \alpha \rangle = \{\alpha^m \mid m \in \mathbb{Z}\}$ .

Como  $\mathcal{O}(\alpha) < \infty$ , temos que  $\exists p, q \in \mathbb{Z} : p > q$  e  $\alpha^p = \alpha^q$ .

Deduzimos diretamente que:  $\alpha^{p-q} = e$ . Como  $p-q \in \mathbb{Z}_+^*$ , mostramos (i)  $\implies$  (ii).

Note que a escolha do valor  $p-q$  ocorre sem perda de generalidade, uma vez que o conjunto  $\mathbb{Z}_+^*$  é enumerável e sempre podemos garantir a minimalidade de  $p-q$ .

Provemos (ii)  $\implies$  (i) :

Seja  $\alpha \in G$  tal que  $\langle \alpha \rangle = \{\alpha^n : n \in \mathbb{Z}\}$ , sabemos via o Algoritmo de Euclides que:

$$n = qt + r, \quad q, t \in \mathbb{Z} \text{ e } r \in \llbracket 0, t-1 \rrbracket$$

Temos, portanto:

$$\alpha^n = \alpha^{qt+r} = \alpha^{qt}\alpha^r = (\alpha^t)^q\alpha^r = e^q\alpha^r = \alpha^r$$

Portanto  $\alpha^n = \alpha^r$ ,  $\forall n \in \mathbb{Z}$  e  $r \in [0, t-1]$ .

Logo, deduzimos que:

$$\langle \alpha \rangle = \{\alpha^0, \dots, \alpha^{t-1}\} \implies \mathcal{O}(\alpha) < \infty$$

Para mostrar que de fato temos  $\mathcal{O}(\alpha) = t$ , mostremos que  $\alpha^{r_1} \neq \alpha^{r_2}$ ,  $\forall r_1, r_2 \in [0, t-1]$ .

Suponha, por absurdo, que  $\exists r_1, r_2 \in [0, t-1]$  tal que  $\alpha^{r_1} = \alpha^{r_2}$ .

Temos, portanto:

$$\alpha^{r_1} = \alpha^{r_2} \iff \alpha^{r_1-r_2} = e$$

Absurdo, pois  $r_1 - r_2 < t$ , porém  $t$  é minimal.

Logo, como todos elementos de  $\langle \alpha \rangle$  são distintos, deduzimos que  $\mathcal{O}(\alpha) = t$ . □

## 1.4 Teorema de Lagrange

### Definição 1.4.1

Seja  $G$  um grupo e  $H$  um subgrupo de  $G$ . Definimos classe lateral à esquerda de  $H$  em  $G$  que contém  $x$  o subconjunto  $xH$  de  $G$  tal que  $\forall x \in G$ :

$$xH = \{xh \mid h \in H\}$$

Analogamente definimos classe lateral à direita de  $H$  em  $G$  que contém  $x$  o subconjunto  $Hx$  de  $G$  tal que  $\forall x \in G$ :

$$Hx = \{hx \mid h \in H\}$$

*Observações:*

- As classes laterais de  $G$  não são necessariamente subgrupos de  $G$ ;
- Quando não houver confusão possível, podemos denominar as classes laterais à esquerda/direita de  $H$  em  $G$  que contém  $x$  como simplesmente: classe lateral à esquerda/direita de  $H$ .

### Definição 1.4.2

A cardinalidade do conjunto das classes laterais à esquerda ou à direita é definida como o índice de  $H$  em  $G$ , e será denotada por  $[G : H]$ .

*Observação:* note que o número de classes laterais à direita de  $H$  é igual ao número de classes laterais à esquerda de  $H$  (por mais que as classes laterais sejam diferentes).

Isto se dá pelo fato de que a função:

$$\begin{aligned} \phi : \{ \text{classes lat. à esquerda} \} &\rightarrow \{ \text{classes lat. à direita} \} \\ xH &\mapsto Hx^{-1} \end{aligned}$$

é claramente uma bijeção.

### Teorema 1.4.1

#### Teorema de Lagrange (Grupos)

Seja  $G$  um grupo finito e  $H$  um subgrupo de  $G$ .

Logo,  $|H|$  divide  $|G|$ .

#### Demonstração:

Seja  $x \in G \setminus H$ , consideremos o conjunto das classes laterais à esquerda de  $H$ :

$$xH = \{xh \mid h \in H\}$$

Mostremos que  $H \cap xH = \emptyset$ :

Supondo  $\alpha \in H \cap xH$ :

$$\alpha \in H \cap xH \iff \alpha = xh \in H.$$

Como  $\alpha = xh \in H$ , logo  $\exists h^{-1} \in H$  tal que  $hh^{-1} \in H$

Portanto:

$$\alpha h^{-1} = xhh^{-1} \in H \iff x \in H \implies \text{Absurdo, pois } x \in G \setminus H.$$

Logo,  $H \cap xH = \emptyset$ .

Agora mostremos que  $\text{Card}(xH) = |H|$ :

Seja  $\zeta$  a função definida abaixo:

$$\begin{aligned} \zeta : & H \rightarrow xH \\ & h \mapsto xh \end{aligned}$$

A função  $\zeta$  é claramente sobrejetiva por definição.

$\zeta$  também é injetiva pois se  $(xh_1, xh_2) \in (xH)^2$ :

$$xh_1 = xh_2 \implies x^{-1}xh_1 = x^{-1}xh_2 \implies h_1 = h_2.$$

Portanto, deduzimos que  $\text{Card}(xH) = |H|$ .

Consideremos agora o conjunto  $yH$  das classes laterais à esquerda de  $H$  em  $G$  que contém  $y$  tal que  $y \notin H \cup xH$ .

Já mostramos anteriormente que  $y \notin H$ .

Mostremos que  $yH \cap xH = \emptyset$

Supondo  $\beta \in yH \cap xH$ :

Então  $\beta$  pode ser escrito de duas formas:

$$\beta = yh_1$$

$$\beta = xh_2$$

Logo, temos:

$$yh_1 = xh_2 \implies y = xh_2h_1^{-1} \in xH \implies \text{Absurdo, pois } y \notin H \cup xH.$$

Analogamente ao passo anterior podemos provar que  $\text{Card}(yH) = \text{Card}(xH) = |H|$ .

Portanto, realizando os passos acima sucessivamente, criamos partições de  $G$ . Como  $G$  é finito, o processo terá finalizado após  $n$  etapas.

Portanto, temos:  $|G| = n|H|$ . □

*Observações:*

1. Segue como consequência direta do **Teorema de Lagrange** que caso  $G$  seja um grupo finito e  $\alpha \in G$ , então  $\mathcal{O}(\alpha)$  divide  $|G|$ .
2. Temos diretamente pela **Definição 1.4.2** que:  $|G| = |H|[G : H]$ .

### Corolário 1.4.1

Seja  $G$  um grupo não finito e  $H \leq G$ .

Então vale o **Teorema de Lagrange**.

#### Demonstração:

Demonstraremos novamente o **Teorema de Lagrange** de forma que o corolário acima possa ser justificado de forma clara.

Seja  $G$  um grupo e  $H \leq G$ .

Ora, sabemos que:

$$\text{Ou } xH = yH \text{ ou } xH \cap yH = \emptyset, \forall (x, y) \in G \times G.$$

Sabemos também que, sendo  $I$  um conjunto não vazio de índices tal que  $\text{Card}(I) = [G : H]$ :

$$\bigsqcup_{i \in I} x_iH = G.$$

Como  $|G|$  é não finito, então se  $|H|$  ou  $[G : H]$  são não finitos, vale que  $|G| = |H|[G : H]$ .

Suponhamos, agora, que  $|H| < \infty$  e  $[G : H] < \infty$ .

Como  $[G : H] < \infty$ , então  $|I| < \infty$ .

Logo, podemos escrever  $I$  como:

$$I = \{i_1, i_2, \dots, i_n, n \in \mathbb{N}\}.$$

Logo:

$$G = \bigsqcup_{i_1 \leq i \leq n} x_iH.$$

Portanto, podemos escrever:

$$|G| = \sum_{k=1}^n |x_{i_k}H|.$$

Ora, deduzimos na demonstração do **Teorema de Lagrange** que  $|xH| = |H|, \forall x \in G$ .

Portanto temos que:

$$|G| = n|H|.$$

Ora, mas  $|G|$  é não finito e  $|H| < \infty$ . Absurdo !

Portanto, deduzimos que  $|H|$  ou  $[G : H]$  são não finitos.

Assim, provamos que o **Teorema de Lagrange** vale também para  $|G|$  não finito.

Isto é:

$$|G| = |H|[G : H].$$

□

### Proposição 1.4.1

Seja  $G$  um grupo finito de ordem  $p \in \mathbb{N}^*$ .

Se  $p$  for primo, então  $G$  é um grupo cíclico.

#### Demonstração:

Pelo Teorema de Lagrange sabemos que se  $H$  é subgrupo de um grupo finito  $G$ , então  $|H|$  divide  $|G|$ .

Como  $|G| = p$  primo, então os únicos subgrupos possíveis de  $G$  são seus subgrupos triviais.

Seja  $x \in G$  tal que  $x \neq e$ , onde  $e$  é o elemento neutro de  $G$ .

Logo, o único subgrupo gerado por  $x$  é o próprio  $G$ ,  $\langle x \rangle = G$

*Observação: como visto na Proposição 1.3.2,  $G$  também é abeliano!*

### Teorema 1.4.2

#### Teorema de Euler (Grupos)

Seja  $(G, \cdot)$  um grupo finito tal que  $|G| = n$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ . Então:

$$\forall g \in G, g^n = 1.$$

#### Demonstração:

Seja  $g$  um elemento do grupo finito  $G$ . Sabemos que  $\langle g \rangle \leq G$ . Sabemos também, pelo **Teorema de Lagrange** que  $\mathcal{O}(g)$  divide a ordem de  $G$ .

Ora, podemos então escrever:

$$|G| = k\mathcal{O}(g), k \in \mathbb{Z}$$

Porém, pela **Proposição 1.3.6**, deduzimos:

$$g^n = g^{|G|} = g^{k\mathcal{O}(g)} = (g^{\mathcal{O}(g)})^k = e^k = e$$

Ora, demonstramos, com o argumento acima, sem perda de generalidade, tal fato para qualquer elemento de  $G$ .

□

### Teorema 1.4.3

#### Pequeno Teorema de Fermat

Seja  $p$  um número primo e  $a \in \mathbb{Z} \setminus p\mathbb{Z}$ , então:

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}.$$

#### Demonstração:

O **Pequeno Teorema de Fermat** é evidentemente o caso específico do **Teorema de Euler** em que  $(G, \cdot) = ((\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*, \odot)$ .

□

### Proposição 1.4.2

Seja  $G$  um grupo e sejam  $K < H < G$ .

Logo  $[G : K] = [G : H][H : K]$ .

#### Demonstração:

Basta aplicar sucessivamente o **Teorema de Lagrange**:

$$\begin{aligned} H < G &\Rightarrow |G| = |H| \cdot [G : H] \quad (\text{I}) \\ K < H &\Rightarrow |H| = |K| \cdot [H : K] \quad (\text{II}) \\ K < G &\Rightarrow |G| = |K| \cdot [G : K] \quad (\text{III}) \end{aligned}$$

Combinando as expressões (I) e (II), obtemos:

$$|G| = |K| \cdot [H : K] \cdot [G : H] = |K| \cdot [G : K]$$

Portanto:

$$[G : K] = [G : H] \cdot [H : K]$$

□

## 1.5 Grupos Quocientes

### Definição 1.5.1

Seja  $G$  um grupo e  $H \leq G$ .

Chamamos de **conjunto quociente** o conjunto  $G/H$  (ou  $\frac{G}{H}$ ) cujos elementos são as classes laterais à esquerda (ou à direita) de  $H$  em  $G$ .

*Observação: decorre da definição acima que  $|G/H| = [G : H]$ .*

### Definição 1.5.2

Seja  $G$  um grupo e  $H \leq G$ .

Definimos a seguinte operação entre as classes laterais à esquerda de  $H$  em  $G$ :

$$\bullet : \begin{aligned} G/H \times G/H &\rightarrow G/H \\ (xH, yH) &\mapsto xyH \end{aligned}$$

*Observações:*

- Note que, por convenção, estamos tratando das classes laterais à esquerda de  $H$  em  $G$ . Entretanto, a definição é válida para classes laterais à direita também.

- A operação definida é uma **lei de composição interna** por construção.

- Não mostramos ainda que a operação está de fato bem definida, isto é:

$$\begin{cases} (x_1H, y_1H) \in G/H \times G/H \\ (x_2H, y_2H) \in G/H \times G/H \end{cases}$$

Se  $(x_1H, y_1H) = (x_2H, y_2H) \implies x_1y_1H = x_2y_2H$ .

Tal fato será destacado na **Proposição 1.5.1**.

### Proposição 1.5.1

Seja  $G$  um grupo e  $H \leq G$ .

As afirmações a seguir são equivalentes:

- (i) A operação definida na **Definição 1.5.2** está bem definida;
- (ii)  $gHg^{-1} \subseteq H, \forall g \in G$ ;
- (iii)  $gHg^{-1} = H, \forall g \in G$ ;
- (iv)  $gH = Hg, \forall g \in G$ .

#### Demonstração:

Mostremos as equivalências:

$$(i) \iff (ii) \quad (\text{I})$$

$$(ii) \iff (iii) \quad (\text{II})$$

$$(iii) \iff (iv) \quad (\text{III})$$

Comecemos mostrando a equivalência (I):

Ora, perceba que para  $(x, y) \in G \times G$  e  $(h, h') \in H \times H$ , temos que:

$x$  e  $xh$  são representantes distintos para a mesma classe lateral  $xH$ .

$y$  e  $yh'$  são representantes distintos para a mesma classe lateral  $yH$ .

Portanto, podemos deduzir que a operação "•" definida na **Definição 1.5.2** só estará bem definida se, e somente se:

$$xyH = xhyh'H, \forall (x, y) \in G \times G \quad \text{e} \quad \forall (h, h') \in H \times H.$$

Logo:

$$xyH = xhyh'H \iff y^{-1}x^{-1}xyH = y^{-1}x^{-1}xhyh'H \iff H = y^{-1}hyh'H.$$

Ora, mas isso é equivalente à dizer que a operação só estará bem definida se, e somente se:

$$ghg^{-1} \in H, \forall g \in G, \forall h \in H.$$

Com isso mostramos a equivalência (I).

Mostremos a equivalência (II):

Para a implicação (ii)  $\implies$  (iii) mostremos que:

$$gHg^{-1} \subseteq H \implies H \subseteq gHg^{-1}, \forall g \in G.$$

Ora, temos diretamente da hipótese:

$$\begin{aligned} gHg^{-1} \subseteq H &\implies g^{-1}Hg \subseteq H \implies g(g^{-1}Hg)g^{-1} \subseteq gHg^{-1} \\ &\implies H \subseteq gHg^{-1} \end{aligned}$$

Logo, podemos concluir que:

$$gHg^{-1} \subseteq H \implies H = gHg^{-1}.$$

A implicação (iii)  $\implies$  (ii) é evidente.

Com isso mostramos a equivalência (II).

Mostremos a equivalência (III):

$$gHg^{-1} = H \iff gHg^{-1}g = Hg \iff gH = Hg.$$

Assim mostramos a equivalência (III).

Tendo mostrado as equivalências (I), (II) e (III), mostramos que todas as afirmações são duas a duas equivalentes.  $\square$

### Definição 1.5.3

Um subgrupo  $H$  é um **subgrupo normal** de  $G$  caso ele satisfaça as afirmações equivalentes da **Proposição 1.5.1**.

Neste caso, denotamos:

$$H \trianglelefteq G$$

*Observações:*

- Note que caso  $H \trianglelefteq G$  então as classes laterais à esquerda e à direita de  $H$  são iguais;
- Denotamos  $H \triangleleft G$  se  $H$  é um **subgrupo normal próprio de  $G$** .
- De forma geral quando queremos mostrar que um subgrupo  $H$  é subgrupo normal de um grupo  $G$ , mostramos que  $ghg^{-1} \in H$ .

### Exemplo 1.5.1

$G$  e  $\{e\}$  (subgrupos triviais de  $G$ ) são claramente subgrupos normais de  $G$ .

### Exemplo 1.5.2

Seja  $G$  um grupo e  $Z(G)$  o centro de  $G$ . Logo,  $Z(G) \trianglelefteq G$ .

#### Demonstração:

Já mostramos anteriormente que  $Z(G) \leq G$ .

Para mostrar que  $Z(G) \trianglelefteq G$  basta mostrar que:

$$\forall (g, z) \in G \times Z(G) \implies gzg^{-1} \in Z(G)$$

Ora, mas pela própria definição de centro (todos elementos de  $G$  que comutam entre si), sabemos que:

$$\text{Se } z \in Z(G) \implies zg = gz, \forall g \in G.$$

Logo:

$$gzg^{-1} = zgg^{-1} = z \in Z(G).$$

□

*Observações:*

- De forma geral, é evidente que se  $H \leq Z(G)$ , então  $H \trianglelefteq G$ ;
- Isso equivale ainda a dizer que se  $G$  é um grupo abeliano, então todos seus subgrupos são normais.

### Exemplo 1.5.3

Seja  $G$  um grupo e  $G'$  o subgrupo dos comutadores de  $G$ . Logo  $G' \trianglelefteq G$ .

#### Demonstração:

Sabemos, a partir da **Definição 1.3.5** que  $G' \leq G$ .

Seja  $g \in G$  e tomemos  $q = xyx^{-1}y^{-1} = [x, y]$ , para  $x, y \in G$ .

Temos, portanto:

$$gqg^{-1} = g(xyx^{-1}y^{-1})g^{-1} = (gxg^{-1})(gyg^{-1})(gx^{-1}g^{-1})(gy^{-1}g^{-1})$$

Tomando  $k = gxg^{-1}$  e  $l = gyg^{-1}$ , deduzimos que:

$$gqg^{-1} = klk^{-1}l^{-1} = [k, l] \in G'$$

Temos, portanto, recursivamente para um elemento genérico  $g' \in G'$ :

$$gg'g^{-1} = \underbrace{\prod_{i=1}^{n \in \mathbb{N}} \underbrace{(g[x_i, y_i]g^{-1})}_{\in G'}}_{\in G'}$$

Concluímos que  $gg'g^{-1} \in G'$ .

Logo,  $G' \trianglelefteq G$ .

□

### Exemplo 1.5.4

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

Temos que  $SL_n(\mathbb{K}) \leq GL_n(\mathbb{K})$

#### Demonstração:

Sabemos que  $SL_n(\mathbb{K}) \leq GL_n(\mathbb{K})$ , mostremos portanto que:

$$GSG^{-1} \in SL_n(\mathbb{K}), \forall (G, S) \in GL_n(\mathbb{K}) \times SL_n(\mathbb{K})$$

Ora, sabemos que  $\det(G) \neq 0$  e que  $\det(G^{-1}) = \det(G)^{-1}, \forall G \in GL_n(\mathbb{K})$ .

Portanto:

$$\begin{aligned}\det(GSG^{-1}) &= \det(G)\det(S)\det(G^{-1}) = \det(G)\det(S)\det(G)^{-1} = \\ &= \det(G)\det(G)^{-1}\det(S) = \det(S) = 1 \implies GSG^{-1} \in SL_n(\mathbb{K})\end{aligned}$$

Isto é,

$$SL_n(\mathbb{K}) \trianglelefteq GL_n(\mathbb{K})$$

□

#### Definição 1.5.4

Seja  $G$  um grupo não-trivial.

**Chamamos  $G$  de grupo simples caso seus únicos subgrupos normais sejam  $\{e\}$  e  $G$ .**

Isto é, caso seus únicos subgrupos normais sejam os subgrupos triviais.

#### Proposição 1.5.2

Seja  $G$  um grupo e  $H \leq G$ .

Se  $[G : H] = 2$ , então  $H \trianglelefteq G$ .

#### Demonstração:

Mostremos que  $gH = Hg, \forall g \in G$ .

Demonstremos por disjunção de casos:

Caso  $g \in H$ . Logo:

$$gH = H = Hg$$

Caso  $g \notin H$ . Logo:

Como  $[G : H] = 2$ , temos de imediato:

$$G/H = \{H, gH\}$$

Logo:

$$G = H \sqcup gH = H \sqcup Hg$$

Portanto, deduzimos de imediato que:

$$gH = Hg$$

Logo:  $H \trianglelefteq G$ .

□

#### Definição 1.5.5

Sejam  $G$  um grupo e  $A, B \leq G$ . **Definimos o conjunto  $AB$  da seguinte forma:**

$$AB = \{ab, a \in A, b \in B\}.$$

*Observação:*

Note que o conjunto  $AB$  não necessariamente é um grupo mesmo que  $A$  e  $B$  o sejam.

Note, por exemplo, o caso do grupo  $S_3$ :

$$A, B \leq S_3, \quad A = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} \right\}, \quad B = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \right\}.$$

Note que  $A$  e  $B$  são de fato subgrupos de  $S_3$ , pois:

$$A = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} \right\}, \quad e = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}, \quad \sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}, \quad \sigma^2 = e,$$

$$e, \sigma, \sigma^{-1} = \sigma \in A \implies A \leq S_3.$$

$$B = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \right\}, \quad \tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}, \quad \tau^2 = e,$$

$$e, \tau, \tau^{-1} = \tau \in B \implies B \leq S_3.$$

Temos que o conjunto  $AB$  é dado por:

$$AB = \left\{ \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}}_e, \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} \right\}.$$

Ora, mas temos que:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \notin AB$$

### Proposição 1.5.3

Seja  $G$  um grupo e  $H, K \leq G$ . Logo:

$$HK \text{ é um subgrupo de } G \iff HK = KH.$$

#### Demonstração:

Mostremos a implicação ( $\implies$ ):

Seja  $HK$  um subgrupo de  $G$ .

Logo, temos que:

$$HK = (HK)^{-1} = K^{-1}H^{-1} = KH$$

Mostremos, agora, a implicação ( $\iff$ ):

Seja  $HK = KH$ , mostremos que  $HK \leq G$ .

Para mostrar que  $HK \leq G$  é suficiente mostrar que:

$$(HK)(HK) = HK$$

$$(HK)^{-1} = HK$$

Note que essa é uma forma diferente, porém equivalente, de enunciar a **Proposição 1.3.1**.

Ora, temos diretamente que:

$$(HK)(HK) = H(KH)K = H(HK)K = (HH)(KK) = HK$$

$$(HK)^{-1} = K^{-1}H^{-1} = KH = HK$$

Com isso mostramos a proposição.

□

### Proposição 1.5.4

Seja  $G$  um grupo e  $H, K \leq G$ . Se  $H \trianglelefteq G$  ou  $K \trianglelefteq G$ , então  $HK \leq G$ .

#### Demonstração:

Sejam  $H, K \leq G$ . Tomemos  $H$  como subgrupo normal de  $G$  e mostremos, sem perda de generalidade, que  $HK \leq G$ .

Para mostrarmos que  $HK \leq G$  é suficiente mostrar que a operação de  $HK$  é uma lei de composição interna em  $HK$  e que para todo elemento de  $HK$ , existe elemento inverso.

Note, primeiramente, que  $HK$  é não vazio, uma vez que  $H, K \leq G$ .

Sejam  $a, b \in HK$ , mostremos que  $ab \in HK$ .

Ora, se  $a, b \in HK$ , então:

$$a = hk, \quad h \in H, \quad k \in K$$

$$b = h'k', \quad h' \in H, \quad k' \in K$$

Portanto, temos que:

$$ab = hkh'k' = hkh'k^{-1}kk' = (h\underbrace{kh'k^{-1}}_{\in H})(kk') \in HK$$

Mostremos, agora, que para  $a \in HK$ ,  $\exists a^{-1} \in HK$ .

Ora, como  $a \in HK$ , então analogamente ao passo anterior temos que:

$$a = hk, \quad h \in H, \quad k \in K$$

Portanto:

$$a^{-1} = k^{-1}h^{-1} = k^{-1}h^{-1}kk^{-1} = (\underbrace{k^{-1}h^{-1}k}_{\in H})(k^{-1}) \in HK$$

Portanto, mostramos que  $HK \leq G$ .

□

**Proposição 1.5.5**

Seja  $G$  um grupo e  $H, K \trianglelefteq G$ . Então  $HK \trianglelefteq G$ .

**Demonstração:**

Sabemos a partir do **Proposição 1.5.4** que se  $H \trianglelefteq G$  ou  $K \trianglelefteq G$ , temos que  $HK \leq G$ .

Mostremos que se  $H \trianglelefteq G$  e  $K \trianglelefteq G$ , temos  $HK \trianglelefteq G$ .

Para isso, é suficiente mostrarmos que  $gHKg^{-1} \in HK$ .

Ora, como  $H, K \trianglelefteq G$ , temos:

$$gHKg^{-1} = gHg^{-1}gKg^{-1} = (\underbrace{gHg^{-1}}_{\in H})(\underbrace{gKg^{-1}}_{\in K}) \in HK$$

□

**Proposição 1.5.6**

Seja  $G$  um grupo finito e  $H, K \leq G$ . Então:

$$\text{Card}(HK) = \frac{|H||K|}{|H \cap K|}$$

**Demonstração:**

Note que  $H \cap K \leq H$  e  $H \cap K \leq K$ , então podemos escrever:

$$\begin{aligned} H &= \bigcup_{1 \leq i \leq r}^{\bullet} a_i(H \cap K), \quad \text{com } r = [H : H \cap K], \\ K &= \bigcup_{1 \leq j \leq s}^{\bullet} (H \cap K)b_j, \quad \text{com } s = [K : H \cap K]. \end{aligned}$$

Assim, o conjunto  $HK = \{hk \mid h \in H, k \in K\}$  pode ser escrito como:

$$HK = \bigcup_{i=1}^r \bigcup_{j=1}^s a_i(H \cap K)b_j.$$

Cada conjunto  $a_i(H \cap K)b_j$  possui  $|H \cap K|$  elementos. A união acima é disjunta: se

$$a_i(H \cap K)b_j = a_{i'}(H \cap K)b_{j'},$$

então, por multiplicações à esquerda e direita, deduz-se que  $i = i'$  e  $j = j'$ , dado que os  $a_i$  e  $b_j$  representam classes distintas.

Logo, temos  $rs$  conjuntos disjuntos de tamanho  $|H \cap K|$ , e portanto:

$$\text{Card}(HK) = rs \cdot |H \cap K| = [H : H \cap K][K : H \cap K] \cdot |H \cap K|.$$

Mas

$$|H| = [H : H \cap K] \cdot |H \cap K|, \quad |K| = [K : H \cap K] \cdot |H \cap K|,$$

e portanto:

$$\text{Card}(HK) = \frac{|H||K|}{|H \cap K|}.$$

□

**Proposição 1.5.7**

Seja  $G$  um grupo e  $H, K \leq G$  tal que  $HK \leq G$ . Então:

$$[HK : K] = [H : H \cap K]$$

**Demonstração:**

Note, primeiramente, que  $K \leq HK$ , uma vez que  $K \subseteq HK$ ,  $K \leq G$  e  $HK \leq G$ . Logo, pelo **Teorema de Lagrange**, temos:

$$|HK| = |K| \cdot [HK : K] \iff \frac{|HK|}{|K|} = [HK : K]$$

Sabemos também que  $H \cap K \leq H$ , logo, analogamente:

$$|H| = |H \cap K| \cdot [H : H \cap K] \iff \frac{|H|}{|H \cap K|} = [H : H \cap K]$$

Pela **Proposição 1.5.6**, temos diretamente:

$$|HK| = \frac{|H||K|}{|H \cap K|} \iff \frac{|HK|}{|K|} = \frac{|H|}{|H \cap K|}$$

Logo, deduzimos que:

$$[HK : K] = [H : H \cap K]$$

□

**Definição 1.5.6**

Seja  $G$  um grupo e  $H \trianglelefteq G$ .

**Então**  $(G/H, \bullet)$  é um grupo chamado de grupo quociente.

**Demonstração:**

Mostremos que  $(G/H, \bullet)$  é de fato um grupo.

Ora, pela **Definição 1.5.2** sabemos que a operação " $\bullet$ " é uma lei de composição interna por construção. Sabemos também, pela **Proposição 1.5.1** que caso  $H \trianglelefteq G$ , então " $\bullet$ " está bem definida.

Nos resta mostrar que  $(G/H, \bullet)$  satisfaz os axiomas de grupo.

De fato,  $G/H$  é associativo em relação à operação " $\bullet$ " pois:

Sejam  $xH, yH, zH \in G/H$ , temos:

$$(xH \bullet yH) \bullet zH = (xy)H \bullet zH = (xy)zH \stackrel{(*)}{=} x(yz)H = xH \bullet (yH \bullet zH).$$

Também temos evidentemente que o elemento neutro é dado por  $H \in G/H$ .

Ora, seja  $xH \in G/H$ , temos evidentemente:

$$xH \bullet H = xH = H \bullet xH.$$

Por fim, temos que para dado  $xH \in G/H$ , seu elemento inverso é dado por  $x^{-1}H \in G/H$ .

De fato:

$$xH \bullet x^{-1}H = xx^{-1}H = H = x^{-1}xH = x^{-1}H \bullet xH.$$

Portanto,  $(G/H, \bullet)$  é de fato um grupo. □

*Observação: muitas vezes iremos denotar  $\bar{x} \stackrel{\text{def}}{=} xH$  para elementos de  $G/H$  por uma questão de simplificação de escrita.*

### Exemplo 1.5.5

O grupo  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$  é um grupo quociente formado pelo quociente entre  $\mathbb{Z}$  e  $n\mathbb{Z} \trianglelefteq \mathbb{Z}$ .

### Proposição 1.5.8

Seja  $G$  um grupo e  $Z(G)$  seu centro.

Se o grupo  $G/Z(G)$  for cíclico, então  $G = Z(G)$ .

#### Demonstração:

Seja  $G/Z(G)$  um grupo cíclico.

Mostremos que  $G = Z(G)$ , isto é, que  $G$  é um grupo abeliano.

Como  $G/Z(G)$  é cíclico, então existe  $x \in G/Z(G)$  tal que  $\langle x \rangle = G$ .

Portanto, sabemos que, para determinado inteiro  $k \in \mathbb{Z}$ , temos:

$$gz' = x^k, \quad (g, z') \in G \times Z(G)$$

Podemos reescrever a expressão acima como:

$$g = x^k z, \quad (g, z) \in G \times Z(G)$$

Tomemos  $g_1, g_2 \in G$  tal que:

$$g_1 \stackrel{\text{def}}{=} x^{k_1} z_1, \quad (k_1, z_1) \in \mathbb{Z} \times Z(G)$$

$$g_2 \stackrel{\text{def}}{=} x^{k_2} z_2, \quad (k_2, z_2) \in \mathbb{Z} \times Z(G)$$

Portanto temos:

$$g_1 g_2 = x^{k_1} z_1 x^{k_2} z_2 = x^{k_1+k_2} z_1 z_2 = x^{k_2} x^{k_1} z_1 z_2 = x^{k_2} z_2 x^{k_1} z_1 = g_2 g_1.$$

Isso se dá pelo fato de qualquer elemento de  $z \in Z(G)$  comutar com elementos de  $G$  e, portanto, elementos de  $G/Z(G)$ .

Com isso, mostramos que  $G$  é um grupo abeliano e, portanto,  $G = Z(G)$ . □

### Proposição 1.5.9

Seja  $G$  um grupo e  $G'$  o seu subgrupo de comutadores.

O grupo quociente  $G/G'$  é abeliano.

Este grupo é denominado como *abelianização* de  $G$  e é denotado como  $G^{ab}$ .

Note que  $G'$  é o menor subgrupo normal de  $G$  com essa propriedade e  $G^{ab}$  representa o maior quociente abeliano de  $G$ .

### Demonstração:

Note, primeiramente, que  $G^{ab}$  é de fato um grupo, uma vez que  $G' \trianglelefteq G$ .

Sejam  $\bar{x} = xG'$ ,  $\bar{y} = yG'$  elementos de  $G^{ab}$ , com  $x, y \in G$ , sabemos que:

$$xyx^{-1}y^{-1} \in G' \iff xy(yx)^{-1} \in G' \iff xyG' = yxG' \iff \bar{x}\bar{y} = \bar{y}\bar{x}$$

Concluímos, portanto, que  $G^{ab}$  é um grupo abeliano.

Para mostrar que  $G'$  é o menor subgrupo normal de  $G$  tal que  $G/G'$  é abeliano, basta mostrar que para quaisquer  $H \trianglelefteq G$ , se  $G/H$  for abeliano, então  $G' \subseteq H$ .

Suponha, por absurdo, que  $G/H$  é um grupo abeliano e  $G' \not\subseteq H$ .

Ora, então temos, para  $x, y \in G$ :

$$xyH = yxH \iff xy(yx)^{-1} \in H \iff xyx^{-1}y^{-1} \in H$$

Sabemos que  $xyx^{-1}y^{-1} \in G'$ , mas  $G' \not\subseteq H$ , portanto induzimos um absurdo.

Concluímos que  $G' \subseteq H$ . □

## 1.6 Homomorfismos de Grupos

### Definição 1.6.1

Sejam  $(G, \cdot)$  e  $(\mathcal{G}, *)$  dois grupos. Uma função  $\varphi : G \rightarrow \mathcal{G}$  é chamada de **homomorfismo de grupos** se:

$$\varphi(a \cdot b) = \varphi(a) * \varphi(b), \quad \forall a, b \in G$$

*Observações:*

Note que, se  $\varphi : G \rightarrow \mathcal{G}$  for um homomorfismo de grupos, então:

1.  $\varphi(e_G) = e_{\mathcal{G}}$ ;
2.  $\varphi(x^{-1}) = \varphi(x)^{-1}$ .

De fato, note que, para o item 1., temos que:

$$\varphi(e_G) = \varphi(e_G \cdot e_G) = \varphi(e_G) * \varphi(e_G) \implies \varphi(e_G) = e_{\mathcal{G}}$$

E para o item 2., temos:

$$e_{\mathcal{G}} = \varphi(e_G) = \varphi(x \cdot x^{-1}) = \varphi(x) * \varphi(x^{-1}) \implies \varphi(x^{-1}) = \varphi(x)^{-1}$$

\* Note também que muitas vezes as operações de  $G$  e de  $\mathcal{G}$  serão confundidas para fins de simplificação, isto é:  $\varphi(ab) = \varphi(a)\varphi(b)$ .

### Definição 1.6.2

Sejam  $G$  e  $\mathcal{G}$  dois grupos. Definimos  $\text{Hom}(G, \mathcal{G})$  como o **conjunto de todos os homomorfismos de  $G$  em  $\mathcal{G}$** .

### Exemplo 1.6.1

$\text{Id} : (G, \cdot) \rightarrow (G, \cdot)$ ,  $\text{Id}(g) = g$  é um homomorfismo chamado *identidade*.

### Exemplo 1.6.2

$\theta : G \rightarrow \mathcal{G}$ ,  $\theta(g) = e_{\mathcal{G}}$ ,  $\forall g \in G$ , é um homomorfismo chamado *homomorfismo trivial*.

### Exemplo 1.6.3

A função:

$$\det : \begin{cases} GL_n(\mathbb{K}) \rightarrow \mathbb{K}^* \\ A \mapsto \det(A) \end{cases}$$

é um homomorfismo de grupos, pois sabemos que  $\forall A, B \in GL_n(\mathbb{K})$  temos:

$$\det(AB) = \det(A)\det(B).$$

### Exemplo 1.6.4

Seja  $G$  um grupo e  $N \trianglelefteq G$ , logo a função:

$$\pi : \begin{cases} G \rightarrow G/N \\ x \mapsto xN \end{cases}$$

é um homomorfismo chamado de *projeção canônica*.

### Demonstração:

Sejam  $x, y \in G$ , ora:

$$\pi(xy) = xyN = xN \bullet yN = \pi(x) \bullet \pi(y).$$

□

### Exemplo 1.6.5

Seja  $G = \mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R}$  munido da operação  $\heartsuit$  definida por:

$$(a, b) \heartsuit (a', b') = (aa', b + b'),$$

$$(a, b), (a', b') \in G$$

A função:

$$\spadesuit: \begin{cases} (G, \heartsuit) \rightarrow (\mathbb{C}^*, \cdot) \\ (r, \theta) \mapsto r e^{i\theta} \end{cases}$$

é um homomorfismo de grupos, onde  $e$  é o número de Euler,  $i^2 = -1$  e:

$$e^{i\theta} \stackrel{\text{def}}{=} \cos \theta + i \sin \theta, \forall \theta \in \mathbb{R}$$

### Demonstração:

Mostremos primeiramente que  $(G, \heartsuit)$  é de fato um grupo.

Por construção temos diretamente que  $\heartsuit$  é uma lei de composição interna em  $G$ .

Também sabemos que, pelo fato de  $\mathbb{R}_+^*$  ser um grupo com o produto usual e  $\mathbb{R}$  ser um grupo com a adição usual, temos diretamente que a dupla formada pela operação  $\heartsuit$  é um grupo.

Portanto, mostramos que  $(G, \heartsuit)$  é de fato um grupo.

Mostremos que  $\spadesuit$  é um homomorfismo de grupos.

Note, primeiramente, que  $\spadesuit$  é claramente uma função de  $G$  em  $\mathbb{C}^*$ .

Sejam  $(r, \theta), (r', \theta') \in G$ , temos que:

$$\spadesuit((r, \theta) \heartsuit (r', \theta')) = \spadesuit(rr', \theta + \theta') = rr' e^{i(\theta+\theta')} = \spadesuit(r, \theta) \cdot \spadesuit(r', \theta')$$

Logo,  $\spadesuit$  é de fato um homomorfismo de grupos. □

### Definição 1.6.3

Definimos o **núcleo de um homomorfismo**  $\varphi$  o **subconjunto**  $\ker \varphi \subseteq G$ , tal que:

$$\ker \varphi \stackrel{\text{def}}{=} \{x \in G, \varphi(x) = e_G\}.$$

### Proposição 1.6.1

O núcleo de um homomorfismo  $\varphi$  é um subgrupo normal de  $G$ .

### Demonstração:

Note, primeiramente, que  $\ker \varphi$  é não-vazio, uma vez que sempre teremos  $\varphi(e_G) = e_G$ .

Mostremos, portanto, que  $\ker \varphi \leq G$ .

Para isso, mostremos que  $x, y \in \ker \varphi \implies xy^{-1} \in \ker \varphi$ .

Sejam  $x, y \in \ker \varphi$ , temos:

$$\varphi(x \cdot y^{-1}) = \varphi(x) * \varphi(y^{-1}) = \varphi(x) * \varphi(y)^{-1} = e_G * e_G = e_G;$$

Deduzimos que  $\ker \varphi \leq G$ , mostremos, por fim, que  $\ker \varphi \trianglelefteq G$ :

Sejam  $g, x \in G \times \ker \varphi$ , mostremos que  $gxg^{-1} \in \ker \varphi$ .

$$\varphi(gxg^{-1}) = \varphi(g) * \varphi(x) * \varphi(g^{-1}) = \varphi(g) * e_G * \varphi(g^{-1}) = \varphi(g) * \varphi(g^{-1}) = \varphi(g) * \varphi(g)^{-1} = e_G.$$

Portanto, deduzimos que:

$$\ker \varphi \trianglelefteq G$$

□

### Exemplo 1.6.6

Seja  $n \in \mathbb{N}^*$ . O núcleo do homomorfismo

$$\det : GL_n(\mathbb{K}) \rightarrow \mathbb{K}^*, \quad A \mapsto \det(A)$$

é dado por

$$\ker(\det) = \{A \in GL_n(\mathbb{K}), \det(A) = 1\} = SL_n(\mathbb{K}).$$

### Definição 1.6.4

Definimos a **imagem de um homomorfismo**  $\varphi$  o **subconjunto**  $\text{Im } \varphi \subseteq \mathcal{G}$  tal que:

$$\text{Im } \varphi \stackrel{\text{def}}{=} \{y \in \mathcal{G} \mid \exists x \in G, y = \varphi(x)\}$$

### Proposição 1.6.2

A imagem de um homomorfismo  $\varphi$  é um subgrupo de  $\mathcal{G}$ .

#### Demonstração:

Note, primeiramente, que  $\text{Im } \varphi$  é não vazio uma vez que  $e_{\mathcal{G}} \in \text{Im } \varphi$ .

Mostremos agora que  $\forall x, y \in \text{Im } \varphi, xy^{-1} \in \text{Im } \varphi$ :

Temos que:

$$x, y \in \text{Im } \varphi \implies \exists a, b \in G, x = \varphi(a) \text{ e } y = \varphi(b)$$

Ora, mas então temos:

$$\exists b^{-1} \in G \implies y^{-1} = \varphi(b^{-1}) = \varphi(b)^{-1}$$

Também temos que:

$$ab^{-1} \in G, \text{ logo, } \varphi(ab^{-1}) = \varphi(a)\varphi(b)^{-1} = xy^{-1}$$

Portanto, via a definição de imagem de um homomorfismo de grupos deduzimos que:

$$xy^{-1} \in \text{Im } \varphi$$

Logo, mostramos que  $\text{Im } \varphi \leq \mathcal{G}$ .

□

### Proposição 1.6.3

Sejam  $G$  e  $\mathcal{G}$  grupos tais que a função  $\varphi : G \rightarrow \mathcal{G}$  define um homomorfismo de grupos. Logo:

$$\ker \varphi = \{e_G\} \iff \varphi \text{ injetiva.}$$

**Demonstração:**

Mostremos a implicação ( $\Rightarrow$ ):

Para mostrar que  $\varphi$  é injetiva, é necessário mostrar a seguinte implicação:

$$\varphi(x) = \varphi(y) \implies x = y, \forall x, y \in G$$

Suponhamos que  $\varphi(x) = \varphi(y)$ , logo:

$$\varphi(x) = \varphi(y) \implies \varphi(x)\varphi(y)^{-1} = e_{\mathcal{G}} \implies \varphi(x)\varphi(y^{-1}) = e_{\mathcal{G}} \implies \varphi(xy^{-1}) = e_{\mathcal{G}}$$

Deduzimos, portanto, que  $xy^{-1} \in \ker \varphi$ .

Ora, por hipótese, temos que  $\ker \varphi = \{e_{\mathcal{G}}\}$ , logo deduzimos que:

$$x = y$$

Portanto, concluímos que  $\varphi$  é injetiva.

Mostremos a implicação ( $\Leftarrow$ ):

Agora, supondo que  $\varphi$  é injetiva, mostremos que  $\ker \varphi = \{e_{\mathcal{G}}\}$ .

Para mostrar que  $\ker \varphi = \{e_{\mathcal{G}}\}$  é necessário mostrar:

$$\text{Se } \varphi(x) = e_{\mathcal{G}} \implies x = e_{\mathcal{G}}, \forall x \in G$$

Sabemos que  $\varphi(e_{\mathcal{G}}) = e_{\mathcal{G}}$ .

Suponha que  $\varphi(x) = e_{\mathcal{G}}$ , para  $x \in G$ .

Porém, sabemos que  $\varphi$  é injetiva, logo:

$$\varphi(x) = \varphi(e_{\mathcal{G}}) \implies x = e_{\mathcal{G}}$$

Logo, concluímos que:

$$\ker \varphi = \{e_{\mathcal{G}}\}$$

□

**Proposição 1.6.4**

Sejam  $\varphi : G \rightarrow \mathcal{G}$  e  $\xi : \mathcal{G} \rightarrow \mathfrak{G}$  homomorfismos de grupos.

Logo,  $(\xi \circ \varphi) : G \rightarrow \mathfrak{G}$  é um homomorfismo de grupos.

**Demonstração:**

Sejam  $a, b \in G$ .

Queremos mostrar que:

$$(\xi \circ \varphi)(ab) = (\xi \circ \varphi)(a)(\xi \circ \varphi)(b)$$

Sabemos que  $\varphi$  e  $\xi$  são homomorfismos de grupos, portanto:

$$(\xi \circ \varphi)(ab) = \xi(\varphi(ab)) = \xi(\varphi(a)\varphi(b)) = \xi(\varphi(a))\xi(\varphi(b)) = (\xi \circ \varphi)(a)(\xi \circ \varphi)(b)$$

Portanto, mostramos que  $(\xi \circ \varphi)$  é de fato um homomorfismo de grupos.

□

### Definição 1.6.5

Sejam  $G$  e  $\mathcal{G}$  grupos. Um homomorfismo  $\varphi : G \rightarrow \mathcal{G}$  é chamado de **isomorfismo de grupos se  $\varphi$  é bijetivo**.

Caso  $\varphi$  seja um isomorfismo, dizemos que  $G$  e  $\mathcal{G}$  são **isomorfos** e denotamos-os como:

$$G \cong \mathcal{G}$$

*Observação: note que para que dois grupos sejam isomorfos basta mostrar que existe um isomorfismo entre eles.*

### Exemplo 1.6.7

$(\mathbb{R}_+^*, \cdot) \cong (\mathbb{R}, +)$ , onde  $+$  e  $\cdot$  denotam as operações usuais de soma e produto, respectivamente, no conjunto  $\mathbb{R}$ .

#### Demonstração:

Seja  $\varphi : \mathbb{R}_+^* \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $x \mapsto \log(x)$ .

Mostremos que  $\varphi$  é um homomorfismo de grupos bijetivo.

Primeiramente, note que  $(\mathbb{R}_+^*, \cdot)$  e  $(\mathbb{R}, +)$  são de fato grupos.

Sabemos também que a função:

$$\varphi(x) = \log(x), \quad x \in ]0, \infty[ = \mathbb{R}_+^*$$

é uma bijeção com imagem igual à  $\mathbb{R}$ .

Mostremos que  $\varphi$  é um homomorfismo de grupos.

Sejam  $x, y \in \mathbb{R}_+^*$

$$\varphi(xy) = \log(xy) = \log(x) + \log(y) = \varphi(x) + \varphi(y)$$

Logo, deduzimos que  $\varphi$  é um isomorfismo de grupos e, portanto, temos:

$$(\mathbb{R}_+^*, \cdot) \cong (\mathbb{R}, +)$$

□

### Proposição 1.6.5

Seja  $G$  um grupo finito e  $g \in G$  tal que  $O(g) = k \in \mathbb{Z}_+$ . Então  $\mathbb{Z}/k\mathbb{Z} \cong \langle g \rangle$ .

#### Demonstração:

Nesta demonstração, a notação aditiva será utilizada para denotar a operação de soma usual em  $\mathbb{Z}/k\mathbb{Z}$  e a operação do grupo  $G$ . Também serão considerados como elementos de  $\mathbb{Z}/k\mathbb{Z}$ , sem perda de generalidade, apenas os representantes de cada classe lateral do conjunto.

Seja a função  $\varphi$  definida a seguir:

$$\begin{aligned} \varphi : \mathbb{Z}/k\mathbb{Z} &\rightarrow \langle g \rangle \\ &x \mapsto xg \end{aligned}$$

Note que  $\varphi$  é de fato uma função e é injetiva. Sejam  $x, y \in \mathbb{Z}/k\mathbb{Z}$ .

$$\varphi(x) = \varphi(y) \iff xg = yg \iff xg - yg = 0 \iff g(x - y) = 0$$

Como  $x, y \in \mathbb{Z}/k\mathbb{Z}$ , então  $x, y \in [0, k-1]$ . Temos também que  $\mathcal{O}(g) = k$ . Portanto, temos:

$$g(x - y) = 0 \iff x - y = 0 \iff x = y$$

Logo,  $\varphi$  é de fato função e é injetora.

Note também que  $\varphi$  é trivialmente sobrejetora, uma vez que  $\varphi$  é injetora e  $|\mathbb{Z}/k\mathbb{Z}| = \mathcal{O}(g) = k$ .

Mostremos, por fim, que  $\varphi$  é um homomorfismo de grupos. Sejam  $x, y \in \mathbb{Z}/k\mathbb{Z}$ .

$$\varphi(x + y) = (x + y)g = xg + yg = \varphi(x) + \varphi(y)$$

Concluímos que  $\varphi$  é de fato um isomorfismo de grupos e portanto:

$$\mathbb{Z}/k\mathbb{Z} \cong \langle g \rangle$$

□

### Proposição 1.6.6

Sejam  $G$  e  $\mathcal{G}$  grupos tal que  $\varphi : G \rightarrow \mathcal{G}$  é um isomorfismo de grupos.

Logo,  $\varphi^{-1} : \mathcal{G} \rightarrow G$  é um isomorfismo de grupos.

#### Demonstração:

Seja  $\varphi : G \rightarrow \mathcal{G}$  um isomorfismo de grupos.

Logo:

$$\forall y \in \mathcal{G}, \exists! x \in G : \varphi(x) = y$$

Portanto, temos que:

$$\varphi^{-1}(\varphi(x)) = \varphi^{-1}(y) \iff x = \varphi^{-1}(y)$$

Dada a bijetividade de  $\varphi$  temos diretamente que  $\varphi^{-1}$  é também uma função bijetiva.

Mostremos que  $\varphi^{-1}$  é de fato um homomorfismo de grupos.

Sejam  $x, y \in \mathcal{G}$ , mostremos que:

$$\varphi^{-1}(x)\varphi^{-1}(y) = \varphi^{-1}(xy)$$

Dada a bijetividade de  $\varphi$ , sabemos que existem  $a, b \in G$  tais que  $\varphi(a) = x$  e  $\varphi(b) = y$ .

Logo:

$$\varphi^{-1}(xy) = \varphi^{-1}(\varphi(a)\varphi(b)) = \varphi^{-1}(\varphi(ab)) = ab = \varphi^{-1}(x)\varphi^{-1}(y)$$

Portanto,  $\varphi^{-1} : \mathcal{G} \rightarrow G$  é isomorfismo de grupos.

□

**Teorema 1.6.1****Primeiro Teorema dos Isomorfismos**

Sejam  $G$  e  $\mathcal{G}$  grupos tais que  $\varphi : G \rightarrow \mathcal{G}$  é um homomorfismo de grupos. Então, a função  $\psi$  tal que:

$$\begin{aligned}\psi : \quad & G / \ker \varphi \rightarrow \text{Im } \varphi \\ & g \ker \varphi \mapsto \varphi(g)\end{aligned}$$

é um isomorfismo de grupos.

Isto é:

$$\frac{G}{\ker \varphi} \cong \text{Im } \varphi$$

**Demonstração:**

Mostremos que  $\psi$  é uma função bem definida e que se trata de uma função injetiva:

Sejam  $\bar{x}, \bar{y} \in G / \ker \varphi$ , temos:

$$\begin{aligned}\bar{x} = \bar{y} &\iff xy^{-1} \in \ker \varphi \iff \varphi(xy^{-1}) = e_{\mathcal{G}} \iff \\ &\iff \varphi(x)\varphi(y)^{-1} = e_{\mathcal{G}} \iff \varphi(x) = \varphi(y) \iff \psi(\bar{x}) = \psi(\bar{y})\end{aligned}$$

Logo, a função  $\psi$  está de fato bem definida e é injetiva.

Mostremos que  $\psi$  é uma função sobrejetora.

Seja  $y \in \text{Im } \varphi$ , então:

$$\exists x \in G; \varphi(x) = y$$

Temos, portanto:

$$\psi(\bar{x}) = \varphi(x) = y$$

Logo,  $\psi$  é sobrejetora.

Mostremos que  $\psi$  é um homomorfismo de grupos.

Primeiramente, note que  $G / \ker \varphi$  e  $\text{Im } \varphi$  são de fato grupos (já demonstrado).

Sejam  $\bar{x}, \bar{y} \in G / \ker \varphi$ , logo:

$$\psi(\bar{x}\bar{y}) = \psi(\bar{x}\bar{y}) = \varphi(xy) = \varphi(x)\varphi(y) = \psi(\bar{x})\psi(\bar{y})$$

Com isso, mostramos que  $\psi$  se trata de um isomorfismo de grupos e deduzimos que:

$$\frac{G}{\ker \varphi} \cong \text{Im } \varphi$$

□

**Teorema 1.6.2****Segundo Teorema dos Isomorfismos**

Seja  $G$  um grupo,  $H \trianglelefteq G$  e  $K \leq G$ . Temos:

$$H \trianglelefteq HK$$

e,

$$\frac{K}{H \cap K} \cong \frac{HK}{H}$$

### Demonstração:

Note que  $HK$  é de fato um grupo, pois  $H \trianglelefteq G$  e  $K \leq G$ .

Tal fato foi mostrado na **Proposição 1.5.4**.

Mostremos, primeiramente, que  $H \trianglelefteq HK$ :

Seja  $x \in HK$ , logo, é suficiente mostrar que  $xHx^{-1} \subseteq H$ .

Como  $H \trianglelefteq G$ , temos que:

$$gH = Hg, \quad \forall g \in G$$

Portanto:

$$xHx^{-1} = Hxx^{-1} = H$$

Logo, deduzimos que  $H \trianglelefteq HK$ .

Seja  $\varphi$  o homomorfismo de grupos definido a seguir:

$$\begin{aligned} \varphi : \quad & K \rightarrow \frac{HK}{H} \\ & x \mapsto xH \end{aligned}$$

Note que  $\frac{HK}{H}$  é de fato um grupo, uma vez que  $H \trianglelefteq HK$ .

Note também que  $\varphi$  se trata mesmo de um homomorfismo (restrição da projeção canônica).

Mostremos que  $\varphi$  é um homomorfismo sobrejetivo.

Tome  $x \in \frac{HK}{H}$ , logo:

$$x = \underbrace{hk}_{\in HK} H = Hhk = Hk = kH = \varphi(k), \quad k \in K$$

Logo, mostramos que  $\varphi$  é sobrejetiva, isto é:

$$\text{Im}(\varphi) = \frac{HK}{H}$$

Mostremos agora que  $\ker \varphi = H \cap K$ .

Sabemos que, por definição:

$$\ker \varphi = \{k \in K : \varphi(k) = H\}$$

Deduzimos portanto que  $k \in \ker \varphi \iff k \in H \cap K$ .

Logo, deduzimos que  $\ker \varphi = H \cap K$ .

Aplicando o **Primeiro Teorema do Isomorfismo** deduzimos diretamente que:

$$\frac{K}{H \cap K} \cong \frac{HK}{H}$$

□

**Teorema 1.6.3****Terceiro Teorema dos Isomorfismos**

Seja  $G$  um grupo e  $H, K \trianglelefteq G$  tal que  $K \subseteq H$ .

Logo,

$$\frac{H}{K} \trianglelefteq \frac{G}{K}$$

e,

$$\frac{G/K}{H/K} \cong \frac{G}{H}$$

**Demonstração:**

Mostremos, primeiramente, que  $H/K \trianglelefteq G/K$ :

Seja  $gK \in G/K$  e  $hK \in H/K$ , mostremos que  $(gK)(hK)(gK)^{-1} \subseteq H/K$ :

$$(gK)(hK)(gK)^{-1} = gKhKKg^{-1} = gKhKg^{-1} = ghKKg^{-1} =$$

$$= ghKg^{-1} = \underbrace{ghg^{-1}}_{\in H} K \in H/K$$

Logo, concluímos que:

$$\frac{H}{K} \trianglelefteq \frac{G}{K}$$

Seja a função  $\varphi$  definida a seguir:

$$\begin{aligned} \varphi : \quad & \frac{G}{K} \rightarrow \frac{G}{H} \\ & gK \mapsto gH \end{aligned}$$

Note que, como  $K \subseteq H$ , todo elemento de  $G/K$  é evidentemente elemento de  $G/H$  e a função é bem definida, sobrejetora e um homomorfismo de grupos.

Logo, deduzimos que:

$$\text{Im } \varphi = \frac{G}{H}$$

Mostremos que  $\ker \varphi = H/K$ :

Por definição, sabemos que:

$$\ker \varphi = \{gK \in G/K : \varphi(gK) = H\}$$

Logo:

$$gK \in \ker \varphi \iff \varphi(gK) = H \iff gH = H \iff g \in H \iff gK \subseteq H/K$$

Concluímos que  $\ker \varphi = H/K$ .

Portanto, aplicando o **Primeiro Teorema dos Isomorfismos** deduzimos diretamente que:

$$\frac{G/K}{H/K} \cong \frac{G}{H}$$

□

**Definição 1.6.6**

Sejam  $G$  e  $\mathcal{G}$  grupos.

**Um epimorfismo de  $G$  em  $\mathcal{G}$  é um homomorfismo  $\varphi$  tal que  $\varphi$  é sobrejetivo.**

Denotamos o conjunto de todos os epimorfismos de  $G$  em  $\mathcal{G}$  por  $\text{Epi}(G, \mathcal{G})$ .

**Definição 1.6.7**

Sejam  $G$  e  $\mathcal{G}$  grupos.

**Um monomorfismo de  $G$  em  $\mathcal{G}$  é um homomorfismo  $\varphi$  tal que  $\varphi$  é injetivo.**

Denotamos o conjunto de todos os monomorfismos de  $G$  em  $\mathcal{G}$  por  $\text{Mon}(G, \mathcal{G})$ .

**Definição 1.6.8**

Seja  $G$  um grupo.

**Um automorfismo de  $G$  é um isomorfismo  $\varphi$  tal que:**

$$\varphi : G \rightarrow G$$

Denotamos o conjunto de todos os automorfismos de  $G$  por  $\text{Aut}(G)$ .

**Proposição 1.6.7**

Seja  $G$  um grupo, então  $(\text{Aut}(G), \circ)$  é um grupo, onde  $\circ$  denota a composição usual de funções.

**Demonstração:**

Note que  $\text{Aut}(G)$  não é vazio, uma vez que o isomorfismo  $\text{id} : G \rightarrow G$ ,  $\text{id}(g) = g$  está em  $\text{Aut}(G)$ .

Evidentemente a função  $\text{id}$  é o elemento neutro de  $\text{Aut}(G)$ .

Também sabemos que a operação  $\circ$  é associativa via associatividade de composição usual de funções.

Pela **Proposição 1.6.6**, sabemos que o homomorfismo inverso,  $\varphi^{-1}$ , existe e é um isomorfismo. Logo, concluímos que  $\varphi^{-1} \in \text{Aut}(G)$ .

Por fim, sabemos que a composição de funções bijetivas resulta em uma função bijetiva e pela **Proposição 1.6.4** sabemos que a composição de homomorfismo de  $G$  em  $G$  é um homomorfismo de  $G$  em  $G$ .

Portanto, concluímos que  $\circ$  é uma lei de composição interna em  $\text{Aut}(G)$ .

Logo, deduzimos que  $(\text{Aut}(G), \circ)$  é um grupo.

□

**Exemplo 1.6.8**

A função:

$$\mathcal{I}_g : \begin{matrix} G \rightarrow G \\ x \mapsto gxg^{-1} \end{matrix}$$

é um automorfismo de  $G$  denominado **automorfismo interno de  $G$  associado a  $g \in G$** .

O automorfismo  $\mathcal{I}_g$  é também chamado de **conjugação por  $g$** .

**Demonstração:**

Mostremos que  $\mathcal{I}_g$  é de fato um automorfismo de  $G$ , dado  $g \in G$ .

Mostremos, primeiramente, que  $\mathcal{I}_g$  é um homomorfismo de grupos.

Sabemos, trivialmente, que  $\mathcal{I}_g$  é de fato uma função.

Sejam  $x, y \in G$ , temos, por definição:

$$\mathcal{I}_g(xy) = gxyg^{-1} = gx(g^{-1}g)yg^{-1} = (gxg^{-1})(gyg^{-1}) = \mathcal{I}_g(x)\mathcal{I}_g(y)$$

Portanto, concluímos que  $\mathcal{I}_g$  é um homomorfismo de grupos.

Mostremos que  $\mathcal{I}_g$  é uma função bijetiva.

Sejam  $x, y \in G$ :

$$\mathcal{I}_g(x) = \mathcal{I}_g(y) \Rightarrow gxg^{-1} = gyg^{-1} \Rightarrow g^{-1}gxg^{-1}g = g^{-1}gyg^{-1}g \Rightarrow x = y$$

Logo,  $\mathcal{I}_g$  é injetiva.

Tomemos, ainda,  $y \in G$  e  $x = g^{-1}yg$ . Temos, portanto:

$$\mathcal{I}_g(x) = g(g^{-1}yg)g^{-1} = y$$

Logo,  $\mathcal{I}_g$  é sobrejetiva.

Concluímos, portanto, que  $\mathcal{I}_g$  é um automorfismo de  $G$ .

□

**Definição 1.6.9**

Seja  $G$  um grupo, definimos:

$$\text{Inn}(G) = \{\mathcal{I}_g \in \text{Aut}(G) : g \in G\}$$

**o conjunto de todos os automorfismos internos de  $G$  associados à  $g \in G$ .**

**Proposição 1.6.8**

Seja  $G$  um grupo, temos:

$$\text{Inn}(G) \trianglelefteq \text{Aut}(G).$$

**Demonstração:**

Sabemos que  $\text{Inn}(G) \subseteq \text{Aut}(G)$ , por construção.

Mostremos primeiramente que para  $\varphi_1, \varphi_2 \in \text{Inn}(G)$ ,  $\varphi_1 \circ \varphi_2^{-1} \in \text{Inn}(G)$ , onde  $\circ$  é a composição usual de funções.

Como o domínio e contradomínio das funções em  $\text{Inn}(G)$  são iguais para as funções em  $\text{Aut}(G)$ , mostremos apenas a igualdade de suas leis de correspondência.

Ora, como  $\varphi_1, \varphi_2 \in \text{Inn}(G)$ , podemos escrevê-los, sem perda de generalidade, para um dado  $x \in G$ , como:

$$\varphi_1(x) = g_1 x g_1^{-1}, \quad g_1 \in G$$

$$\varphi_2(x) = g_2 x g_2^{-1}, \quad g_2 \in G$$

Temos:

$$\varphi_1 \circ \varphi_2^{-1}(x) = \varphi_1(\varphi_2^{-1}(x)) = g_1(g_2^{-1} x g_2)g_1^{-1} = (g_1 g_2^{-1})x(g_2 g_1^{-1}) =$$

$$= (g_1 g_2^{-1})x(g_1 g_2^{-1})^{-1} \in \text{Inn}(G)$$

Logo, concluímos que  $\text{Inn}(G) \leq \text{Aut}(G)$ .

Provemos agora que para  $(\varphi, \phi) \in \text{Inn}(G) \times \text{Aut}(G)$ ,  $\phi \circ \varphi \circ \phi^{-1} \in \text{Inn}(G)$ . Seja  $x \in G$  tal que:

$$\varphi(x) = g x g^{-1}, \quad g \in G$$

Temos:

$$(\phi \circ \varphi \circ \phi^{-1})(x) = \phi(\varphi(\phi^{-1}(x))) = \phi(g\phi^{-1}(x)g^{-1}) = \phi(g)x\phi(g)^{-1} \in \text{Inn}(G)$$

Logo, concluímos que:

$$\text{Inn}(G) \trianglelefteq \text{Aut}(G)$$

□

### Definição 1.6.10

Seja  $G$  um grupo e  $\varphi : G \rightarrow G$  um homomorfismo de grupos.

Dizemos que  $X \subseteq G$  é **invariante por**  $\varphi$  se  $\varphi(X) \subseteq X$ .

Ou ainda, se  $\forall x \in X \implies \varphi(x) \in X$ .

### Definição 1.6.11

Sejam  $G$  um grupo e  $H \leq G$ .

$H$  é dito **subgrupo característico de**  $G$  se  $H$  é invariante para todo  $\varphi \in \text{Aut}(G)$  e o denotamos como:

$$H \trianglelefteq \triangleleft G$$

*Observações:*

- A partir da definição acima temos que, se  $H < G$  e  $H$  é subgrupo característico de  $G$ , denotamos  $H \triangleleft G$ ;

- A definição de subgrupo característico é considerada mais forte que a definição de subgrupo normal, uma vez que enquanto um subgrupo normal é invariante apenas para automorfismos internos, um subgrupo característico é invariante para todo automorfismo de  $G$ :

$$\begin{array}{ccc}
 H \leq G & \text{operação bem definida} \\
 \uparrow & & \\
 H \trianglelefteq G & \text{invariante por conjugação} \\
 \uparrow & & \\
 H \triangleleft G & \text{invariante por automorfismos}
 \end{array}$$

- Temos, portanto, diretamente que  $H \triangleleft G \implies H \trianglelefteq G$ .

#### Exemplo 1.6.9

Os subgrupos triviais de  $G$  são subgrupos característicos de  $G$ .

#### Exemplo 1.6.10

Seja  $G$  um grupo e  $Z(G)$  seu centro, logo:

$$Z(G) \triangleleft G$$

#### Demonstração:

Seja  $z \in Z(G)$ , temos por definição que:

$$zg = gz, \forall g \in G$$

Seja  $\varphi \in \text{Aut}(G)$ , temos:

$$\varphi(zg) = \varphi(gz) \iff \varphi(z)\varphi(g) = \varphi(g)\varphi(z)$$

Como  $\varphi$  é um automorfismo, então sabemos que se trata de uma função bijetora. Logo,  $\varphi(G) = G$  e podemos escrever  $\varphi(g) = h$ ,  $h \in G$ .

Temos, portanto:

$$\varphi(z)h = h\varphi(z), \forall h \in G$$

Concluímos que  $\varphi(z) \in Z(G)$ .

Logo:

$$Z(G) \triangleleft G$$

□

**Proposição 1.6.9**

Seja  $K \trianglelefteq H \trianglelefteq G$ , então  $K \trianglelefteq G$ .

**Demonstração:**

Seja  $\varphi \in \text{Aut}(H)$  tal que:

$$\varphi(K) \stackrel{\text{def}}{=} gKg^{-1}$$

Note que a função acima é bem definida uma vez que  $K \subseteq H$  e  $gHg^{-1} \in H$ .

Como  $K \trianglelefteq H$ , então  $\varphi(K) \subseteq K$ .

Concluímos que:

$$gKg^{-1} \in K \implies K \trianglelefteq G.$$

□

*Observações: note que  $K \trianglelefteq H \trianglelefteq G \not\Rightarrow K \trianglelefteq G$ .*

*Tomemos como contraexemplo a seguinte cadeia de normalidade:*

$$\underbrace{\{e, s\}}_{\stackrel{\text{def}}{=} K} \trianglelefteq \underbrace{\{e, r^2, s, r^2s\}}_{\stackrel{\text{def}}{=} H} \trianglelefteq \underbrace{D_4}_{\stackrel{\text{def}}{=} G}.$$

Onde  $D_4$  é o Grupo Diedral  $D_4$ ,  $s$  representa uma reflexão/espelhamento,  $r$  representa uma rotação de  $90^\circ$  no sentido antihorário e  $e$  representa o elemento neutro.

Note que de fato a cadeia de normalidade é verificada, uma vez que:

1. Temos que  $K \leq H \leq G$ ;
2.  $K$  é evidentemente abeliano e portanto  $K \trianglelefteq H$ ;
3.  $\frac{|G|}{|H|} = 2$  e, pela **Proposição 1.5.2** temos diretamente que  $H \trianglelefteq G$ .

Mostremos que o item 1. é de fato verdadeiro, validando os itens 2. e 3..

Note que  $H \subseteq D_4$  e é evidentemente não vazio. Além disso, cada elemento de  $H$  é seu próprio elemento inverso.

Temos também para os resultados não triviais gerados a partir das operações entre os elementos de  $H$ :

$$r^2r^2s = r^4s = s, \quad sr^2 = r^2s, \quad sr^2s = r^2, \quad r^2sr^2 = s, \quad r^2s^2 = r^2$$

Note que todos os resultados pertencem ao conjunto  $H$ .

Portanto,  $H \leq G$ . Note que  $K \leq H$ , trivialmente.

Concluímos que  $K \leq H \leq G$  e, pelos itens 2. e 3.,  $K \trianglelefteq H \trianglelefteq G$ .

Note, porém, que  $K$  não é normal a  $G$ , uma vez que:

$$\underbrace{r}_{\in G} \cdot \underbrace{s}_{\in K} \cdot \underbrace{r^{-1}}_{\in G} = r^2s \notin K$$

Concluímos, portanto, via contraexemplo, que a normalidade não é transitiva.

## 1.7 Produto Direto de Grupos

Nesta seção inteira a variável  $n$  representa um número inteiro positivo.

### Definição 1.7.1

Seja  $\mathfrak{G} = \{G_1, \dots, G_n\}$  uma família de grupos.

Definimos **produto direto externo** de  $\mathfrak{G}$  como sendo o conjunto  $G_1 \times \dots \times G_n$  munido da operação:

$$(x_1, \dots, x_n) \cdot (y_1, \dots, y_n) \stackrel{\text{def}}{=} (x_1 y_1, \dots, x_n y_n).$$

Denotamos, comumente:

$$\prod_{i=1}^n G_i \stackrel{\text{def}}{=} G_1 \times \dots \times G_n.$$

*Observação: por uma questão de convenção, a operação “.” será omitida.*

### Proposição 1.7.1

A partir da **Definição 1.7.1**, temos que o produto direto externo de  $\mathfrak{G}$  é um grupo.

#### Demonstração:

Via a **Definição 1.7.1** temos que a operação “.” é uma lei de composição interna por construção.

Temos também, de forma evidente, que o elemento neutro e o elemento inverso de  $x \stackrel{\text{def}}{=} (x_1, \dots, x_n) \in \prod_{i=1}^n G_i$  são dados por, respectivamente:

$$e \stackrel{\text{def}}{=} (e_1, \dots, e_n) \in \prod_{i=1}^n G_i$$

Onde  $e_n$  representa o elemento neutro do  $n$ -ésimo grupo do produto direto externo.

$$x^{-1} \stackrel{\text{def}}{=} (x_1^{-1}, \dots, x_n^{-1}) \in \prod_{i=1}^n G_i$$

Onde  $x_n^{-1}$  representa o elemento inverso para  $x_n$  no  $n$ -ésimo grupo do produto direto externo.

Temos também que o produto direto externo de  $\mathfrak{G}$  é evidentemente associativo, uma vez que  $G_1, \dots, G_n$  são grupos.

Concluímos, portanto, que  $(\prod_{i=1}^n G_i, \cdot)$  é um grupo. □

### Definição 1.7.2

Sejam  $G$  um grupo e  $H_1, \dots, H_n \leq G$ .

Dizemos que  $G$  é um **produto direto interno** de  $H_1, \dots, H_n$  se, e somente se, as seguintes condições são satisfeitas:

- $G = H_1 \dots H_n$ ;
- $H_i \trianglelefteq G$ ,  $\forall i \in [\![1, n]\!]$ ;

- $H_i \cap H_1 \dots H_{i-1} H_{i+1} \dots H_n = \{e\}$ ,  $\forall i \in \llbracket 2, n-1 \rrbracket$ .

Caso  $G$  e  $H_1, \dots, H_n$  satisfaçam as condições acima, denotamos:

$$G \stackrel{\text{def}}{=} \bigodot_{i=1}^n H_i$$

### Proposição 1.7.2

Sejam  $G$  um grupo e  $H_1, \dots, H_n \leq G$ .

Se  $G$  for um produto direto interno de  $H_1, \dots, H_n$ , então quaisquer elementos de  $H_1, \dots, H_n$  distintos comutam entre si.

#### Demonstração:

Sejam  $(h_i, h_j) \in H_i \times H_j$ , onde  $i, j \in \llbracket 1, n \rrbracket$  e  $i \neq j$ .

Tomemos o elemento  $g \stackrel{\text{def}}{=} [h_i, h_j] = h_i h_j h_i^{-1} h_j^{-1} \in G$ .

Note que:

$$h_i h_j h_i^{-1} h_j^{-1} = (h_i h_j h_i^{-1}) h_j^{-1} \in H_j, \text{ pois } H_j \trianglelefteq G$$

$$h_i h_j h_i^{-1} h_j^{-1} = h_i (h_j h_i^{-1} h_j^{-1}) \in H_i, \text{ pois } H_i \trianglelefteq G$$

Temos, portanto, que  $[h_i, h_j] \in H_i \cap H_j = \{e\}$ .

Logo:

$$h_i h_j h_i^{-1} h_j^{-1} = e \iff h_i h_j = h_j h_i$$

Logo, quaisquer fatores de  $H_1, \dots, H_n$  distintos comutam entre si. □

### Teorema 1.7.1

Sejam  $G$  um grupo e  $H_1, \dots, H_n \leq G$ .

Temos, a partir das notações nas definições 1.7.1 e 1.7.2, que:

$$G = \bigodot_{i=1}^n H_i \implies G \cong \prod_{i=1}^n H_i$$

#### Demonstração:

Suponha que  $G = \bigodot_{i=1}^n H_i$ .

Tomemos a função  $\mu$  tal que:

$$\begin{aligned} \mu : \quad G &\rightarrow \prod_{i=1}^n H_i \\ h_1 \dots h_n &\mapsto (h_1, \dots, h_n) \end{aligned}$$

Note que a função está de fato bem definida e é trivialmente bijetiva por construção (a representação dos elementos  $h_1 \dots h_n$  é considerada por definição única).

Mostremos, por fim, que  $\mu$  é um homomorfismo de grupos.

Sejam  $g \stackrel{\text{def}}{=} h_1 \dots h_n$  e  $g' \stackrel{\text{def}}{=} h'_1 \dots h'_n$ .

Temos:

$$\begin{aligned}\mu(gg') &= \mu((h_1 \dots h_n)(h'_1 \dots h'_n)) \\ &= \mu(h_1 h'_1 \dots h_n h'_n) \quad (\text{Proposição 1.7.2}) \\ &= (h_1 h'_1, \dots, h_n h'_n) \\ &= (h_1, \dots, h_n)(h'_1, \dots, h'_n) \\ &= \mu(g)\mu(g')\end{aligned}$$

Logo,  $\mu$  é um isomorfismo de grupos e temos que:

$$G \cong \prod_{i=1}^n H_i$$

□

*Observação: note que pela Proposição 1.6.4 temos também diretamente que:*

$$G \cong \bigodot_{i=1}^n H_i \implies G \cong \prod_{i=1}^n H_i$$

### Teorema 1.7.2

#### Teorema Chinês do Resto

Seja  $M \stackrel{\text{def}}{=} m_1 \dots m_n \in \mathbb{Z}_+^*$  tal que  $\text{mdc}(m_i, m_j) = 1$ ,  $\forall i, j \in \llbracket 1, n \rrbracket$  e  $i \neq j$ .

Então:

$$\mathbb{Z}/M\mathbb{Z} \cong \prod_{i=1}^n \mathbb{Z}/m_i\mathbb{Z}$$

#### Demonstração:

Seja  $M_i \stackrel{\text{def}}{=} \frac{M}{m_i}$ ,  $\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ . Note que  $\overline{M_i} \in \mathbb{Z}/M\mathbb{Z}$ , uma vez que  $M_i \in \llbracket 1, M-1 \rrbracket$ .

Note também que, evidentemente, temos  $\mathcal{O}(M_i) = m_i$ , uma vez que  $m_i M_i = M$ .

A partir da Proposição 1.6.5 temos portanto  $\mathbb{Z}/m_i\mathbb{Z} \cong \langle M_i \rangle \cong \langle \overline{M_i} \rangle$ .

Mostremos que  $\mathbb{Z}/M\mathbb{Z} = \bigodot_{i=1}^n \langle \overline{M_i} \rangle$ .

É evidente que  $\langle \overline{M_i} \rangle \leq \mathbb{Z}/M\mathbb{Z}$ , uma vez que, por definição, ele é um subgrupo gerado. Além disso, por estar munido da soma usual dos inteiros, também é um grupo abeliano. Temos diretamente que  $\langle \overline{M_i} \rangle \trianglelefteq \mathbb{Z}/M\mathbb{Z}$ .

Portanto, devido a operação de soma usual de inteiros, denotemos:

$$\langle \overline{M_1} \rangle \dots \langle \overline{M_n} \rangle \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=1}^n \langle \overline{M_i} \rangle$$

Mostremos que:

$$\mathfrak{M} \stackrel{\text{def}}{=} \langle \overline{M_i} \rangle \cap \sum_{\substack{j \neq i \\ j \in \llbracket 1, n \rrbracket}} \langle \overline{M_j} \rangle = \{0\}, \quad \forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket$$

Tomemos  $\bar{x} \in \mathfrak{M}$ .

Seja  $\bar{x} \in \langle \overline{M_i} \rangle \setminus \{0\}$ , temos por definição (e pela coprimalidade entre  $m_1, \dots, m_n$ ) que  $m_i \nmid x$ , onde  $x$  é qualquer representante da classe lateral  $\bar{x}$ .

Seja  $\bar{x} \in \langle \overline{M_i} \rangle \cup \mathfrak{M}$ , logo  $x$  é expresso como combinação linear de elementos de  $\langle \overline{M_1} \rangle, \dots, \langle \overline{M_{i-1}} \rangle, \langle \overline{M_{i+1}} \rangle, \dots, \langle \overline{M_n} \rangle$ . Perceba que, por definição, todos os representantes de classe dos elementos de tais conjuntos são divisíveis por  $m_i$ , portanto  $m_i \mid x$ .

Como para  $\bar{x} \in \mathfrak{M}$  temos  $m_i \mid x$  e  $m_i \nmid x$ , concluímos que  $\bar{x} = \bar{0}$ .

Mostremos, por fim, que:

$$\sum_{i=1}^n \langle \overline{M_i} \rangle = \mathbb{Z}/M\mathbb{Z}$$

Note que pela **Proposição 1.5.6** temos que:

$$\left| \sum_{i=1}^n \langle \overline{M_i} \rangle \right| = \left| \langle \overline{M_1} \rangle + \sum_{i=2}^n \langle \overline{M_i} \rangle \right| = \frac{|\langle \overline{M_1} \rangle| \left| \sum_{i=2}^n \langle \overline{M_i} \rangle \right|}{\underbrace{\left| \langle \overline{M_1} \rangle \cap \sum_{i=2}^n \langle \overline{M_i} \rangle \right|}_{=1}} = m_1 \left| \sum_{i=2}^n \langle \overline{M_i} \rangle \right|$$

Aplicando a fórmula indutivamente em  $i$ , temos que:

$$\left| \sum_{i=1}^n \langle \overline{M_i} \rangle \right| = m_1 \left| \sum_{i=2}^n \langle \overline{M_i} \rangle \right| = \dots = m_1 \dots m_n = M$$

Como  $\sum_{i=1}^n \langle \overline{M_i} \rangle \subseteq \mathbb{Z}/M\mathbb{Z}$ , deduzimos diretamente que:

$$\sum_{i=1}^n \langle \overline{M_i} \rangle = \mathbb{Z}/M\mathbb{Z}$$

Concluímos, finalmente, que:

$$\mathbb{Z}/M\mathbb{Z} = \bigoplus_{i=1}^n \langle \overline{M_i} \rangle \implies \mathbb{Z}/M\mathbb{Z} \cong \prod_{i=1}^n \mathbb{Z}/m_i\mathbb{Z}$$

□

### Exemplo 1.7.1

Seja  $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z} = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{5}\}$ . Como  $6 = 3 \cdot 2$  e  $\text{mdc}(2, 3) = 1$ , temos que:

$$\mathbb{Z}/6\mathbb{Z} \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$$

Onde  $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z} = \{\bar{0}, \bar{1}\}$ ,  $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z} = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}\}$  e:

$$\mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/3\mathbb{Z} = \{(\bar{a}, \bar{b}); \bar{a} \in \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}, \bar{b} \in \mathbb{Z}/3\mathbb{Z}\}.$$

## 1.8 Produto Semidireto de Grupos

## Capítulo 2

# Grupo Simétrico

### 2.1 Generalidades sobre o grupo simétrico

Retomemos com mais detalhes a construção do *grupo simétrico*, introduzido de forma breve no **Exemplo 1.2.3**.

#### Definição 2.1.1

Seja  $X$  um conjunto finito e não vazio. A função bijetiva  $\sigma : X \rightarrow X$  é chamada de **permutação de  $X$** .

Denotamos o conjunto de todas as permutações de  $X$  como  $\mathfrak{S}_X$ . Se  $X = \{1, \dots, n\}$  então também podemos denotar  $\mathfrak{S}_X$  como  $\mathfrak{S}_n$ , onde  $n \in \mathbb{Z}_+^*$ .

*Observação:* por convenção o símbolo para composição usual de funções será omitido, isto é, para  $\sigma, \tau \in \mathfrak{S}_X$ :

$$\sigma\tau \stackrel{\text{def}}{=} \sigma \circ \tau$$

#### Definição 2.1.2

O conjunto  $\mathfrak{S}_X$  munido da operação usual de composição de funções é chamado de **grupo de permutações de  $X$** , ou **grupo simétrico de  $X$** .

*Observações:*

- Note que o conjunto  $\mathfrak{S}_X$  com a composição usual de funções forma de fato um grupo, uma vez que a composição de funções bijetivas retorna de fato uma função bijetiva, a composição é associativa, toda função bijetiva admite uma função inversa e o elemento neutro é a função identidade, qual denotaremos  $e \stackrel{\text{def}}{=} id_X$ .
- Seja  $X = \{1, \dots, n\}$  e  $\sigma \in \mathfrak{S}_n$ , utilizamos comumente a notação a seguir para descrever a permutação  $\sigma$ :

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ \sigma(1) & \sigma(2) & \dots & \sigma(n) \end{pmatrix}$$

**Exemplo 2.1.1**

Sejam  $\sigma, \tau \in \mathfrak{S}_3$ , tal que:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}, \quad \tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}$$

Temos:

$$\sigma\tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\tau\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Note que  $\sigma\tau \neq \tau\sigma$ , logo  $\mathfrak{S}_3$  não é grupo abeliano.

Evidentemente,  $\mathfrak{S}_X$  não é abeliano para  $\text{Card}(X) \geq 3$ .

**Proposição 2.1.1**

Seja  $X$  um conjunto não vazio tal que  $\text{Card}(X) = n \in \mathbb{Z}_+^*$ .

Então  $|\mathfrak{S}_X| = n!$ .

**Demonstração:**

Seja  $\sigma \in \mathfrak{S}_X$  e  $X \stackrel{\text{def}}{=} \{a_1, \dots, a_n\}$ .

Como  $\sigma$  é uma função bijetiva, então para um elemento  $a_i \in X$  é possível realizar  $n$  escolhas de imagem de  $a_i$  para  $a_j \in X$ , com  $i, j \in \llbracket 1, n \rrbracket$ .

Uma vez tomada essa relação entre os dois elementos de  $X$  tomamos novamente um  $a_k \in X \setminus \{a_i\}$  e escolhemos uma imagem no conjunto  $X \setminus \{a_j\}$ . Como  $X \setminus \{a_j\}$  possui  $\text{Card}(X) - 1$  elementos, possuímos  $n - 1$  escolhas de bijeção.

Realizamos esse passo a passo recursivamente até bijetarmos todo os elementos do domínio  $X$ .

Como todos as escolhas de bijeção em cada passo formam escolhas independentes, podemos utilizar o princípio multiplicativo para mostrar diretamente que existem no total  $n \cdot (n - 1) \cdot \dots \cdot 1 = n!$  possibilidades de funções bijetoras em  $\mathfrak{S}_X$ .

Portanto,  $|\mathfrak{S}_X| = n!$ .

□

**Teorema 2.1.1****Teorema de Cayley**

Sejam  $G$  um grupo finito tal que  $|G| = n \in \mathbb{Z}_+^*$  e  $G_0$  seu conjunto subjacente (isto é, o conjunto  $G$  sem a estrutura de grupo).

A função  $\Upsilon$ :

$$\begin{aligned} \Upsilon : G &\longrightarrow \mathfrak{S}_{G_0} \\ g &\longmapsto \Upsilon_g : G_0 &\longrightarrow G_0 \\ &&x &\longmapsto gx \end{aligned}$$

é um homomorfismo injetivo.

**Demonstração:**

Mostremos que  $\Upsilon$  é de fato função e é injetiva.

Sejam  $g_1, g_2 \in G$  tais que  $g_1 = g_2$ , temos que:

$$g_1 = g_2 \iff g_1x = g_2x \iff \Upsilon_{g_1} = \Upsilon_{g_2} \iff \Upsilon(g_1) = \Upsilon(g_2)$$

Portanto,  $\Upsilon$  é função injetiva.

Mostremos que  $\Upsilon$  é um homomorfismo de grupos.

Sejam  $g_1, g_2 \in G$ , temos que:

$$\Upsilon(g_1g_2) = \Upsilon_{g_1g_2}(x) = g_1g_2x = g_1(g_2x) = \Upsilon_{g_1}\Upsilon_{g_2} = \Upsilon(g_1)\Upsilon(g_2)$$

Portanto,  $\Upsilon$  é um homomorfismo injetivo. □

*Observações:*

- Note que  $G$  não é isomorfo a  $\mathfrak{S}_{G_0}$ , uma vez que  $|G| = n \neq |\mathfrak{S}_{G_0}| = n!$ , como mostrado na **Proposição 2.1.1**;
- Como mostramos que se trata de um homomorfismo de grupos injetivo, então a estrutura de grupo é preservada e é possível mapear cada elemento de  $G$  para algum elemento de  $\mathfrak{S}_{G_0}$ , em outras palavras:  
 ”**Todo grupo finito é isomorfo a um subgrupo de um grupo simétrico**”.

### Exemplo 2.1.2

Colocar algum exemplo do Teorema de Cayley...

### Definição 2.1.3

Seja  $X$  um conjunto finito e não vazio. Chamamos de **suporte de uma permutação  $\sigma$  de  $X$**  o conjunto de elementos em  $X$  cuja imagem é diferente do elemento no domínio. Isto é:

$$\text{supp}(\sigma) \stackrel{\text{def}}{=} \{x \in X, \sigma(x) \neq x\}.$$

### Exemplo 2.1.3

Seja  $\sigma \in \mathfrak{S}_5$  tal que:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 3 & 1 & 4 & 5 \end{pmatrix}$$

Temos que  $\text{supp}(\sigma) = \{1, 2, 3\}$ .

### Proposição 2.1.2

Sejam  $X$  um conjunto finito não vazio e  $\sigma \in \mathfrak{S}_X$ .

Se  $x \in \text{supp}(\sigma)$ , então  $\sigma^n(x) \in \text{supp}(\sigma)$ ,  $\forall n \in \mathbb{Z}$ .

**Demonstração:**

Suponha que  $x \in \text{supp}(\sigma)$ , por definição temos que  $\sigma(x) \neq x$ .

Pela bijetividade, temos que  $\sigma(\sigma(x)) = \sigma^2(x) \neq \sigma(x)$  e, portanto,  $\sigma(x) \in \text{supp}(\sigma)$ .

Realizando recursivamente este procedimento temos evidentemente que  $\sigma^n(x) \in \text{supp}(\sigma)$ ,  $\forall n \in \mathbb{Z}_+$ .

Como  $X$  é um conjunto finito, observamos que quaisquer potências negativas de  $\sigma$  equivalem à potências positivas, pois a ordem de  $\sigma$  é finita. Portanto, o resultado vale para qualquer  $n \in \mathbb{Z}$ . □

*Observação:* deduzimos, portanto, que o suporte de uma permutação  $\sigma$  de  $X$  é invariante sob  $\sigma$ .

### Proposição 2.1.3

Sejam  $X$  um conjunto finito e não vazio tal que  $\text{Card}(X) = n \in \mathbb{Z}_+^*$  e  $\tau_1, \dots, \tau_k \in \mathfrak{S}_X$  de suporte dois a dois disjuntos, onde  $k \in [\![1, n]\!]$ .

Seja  $\sigma \in \mathfrak{S}_X$  tal que  $\sigma = \tau_1 \dots \tau_k$ , então para  $x \in X$  temos:

$$\sigma(x) = \begin{cases} \tau_i(x) & \text{se } x \in \text{supp}(\tau_i) \text{ para } i \in [\![1, k]\!], \\ x & \text{se } x \notin \text{supp}(\tau_i) \text{ para } i \in [\![1, k]\!]. \end{cases}$$

Temos também que os elementos  $\tau_1, \dots, \tau_k$  comutam entre si e:

$$\text{supp}(\sigma) = \bigsqcup_{i=1}^k \text{supp}(\tau_i).$$

#### Demonstração:

Seja  $x \in \text{supp}(\tau_i)$ , para algum  $i \in [\![1, k]\!]$ . Pela **Proposição 2.1.2** temos que  $\tau_i(x) \in \text{supp}(\tau_i)$ .

Como  $\forall j \in [\![1, k]\!]$  tal que  $i \neq j$  temos que  $\text{supp}(\tau_j) \cap \text{supp}(\tau_i) = \emptyset$ , então  $\sigma(x) = \tau_i(x)$ .

Caso  $x \notin \text{supp}(\tau_i)$ , para algum  $i \in [\![1, k]\!]$ , temos evidentemente que  $\sigma(x) = x$ , uma vez que  $\sigma = \tau_1 \dots \tau_k$ .

Note que a composição entre os elementos  $\tau_1, \dots, \tau_k$  também comuta.

Sejam  $i, j \in [\![1, k]\!]$  tais que  $i \neq j$ . Suponha que  $x \in \text{supp}(\tau_i)$ . Como  $\text{supp}(\tau_i) \cap \text{supp}(\tau_j) = \emptyset$ , temos que:

$$\tau_i(\tau_j(x)) = \underbrace{\tau_i(x)}_{\in \text{supp}(\tau_i)} = \tau_j(\tau_i(x))$$

Simetricamente o mesmo é válido para  $x \in \text{supp}(\tau_j)$ . Suponha, agora, que  $x \notin \text{supp}(\tau_i) \sqcup \text{supp}(\tau_j)$ , temos trivialmente que:

$$\tau_i(\tau_j(x)) = \tau_i(x) = x = \tau_j(\tau_i(x)) = \tau_j(x)$$

Portanto temos que  $\tau_i \tau_j = \tau_j \tau_i$ ,  $\forall i, j \in [\![1, k]\!]$  tais que  $i \neq j$ .

A partir das observações feitas acima temos diretamente que:

$$\text{supp}(\sigma) = \bigsqcup_{i=1}^k \text{supp}(\tau_i).$$

□

## 2.2 Ciclos e transposições

### Definição 2.2.1

Seja  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  tal que  $\text{Card}(X) \geq 2$ . Uma permutação  $\sigma \in \mathfrak{S}_X$  é chamada de  **$k$ -ciclo** (onde  $k \in \llbracket 2, n \rrbracket$ ) se:

$$\begin{aligned}\sigma(x_1) &= x_2 \\ \sigma(x_2) &= x_3 \\ &\dots \\ \sigma(x_{k-1}) &= x_k \\ \sigma(x_k) &= x_1 \\ \sigma(y) &= y, y \in X \setminus \{x_1, \dots, x_k\}\end{aligned}$$

Denotamos tal  $k$ -ciclo como:

$$\sigma \stackrel{\text{def}}{=} (x_1 \dots x_k).$$

*Observações:*

- A notação  $x_1, \dots, x_k$  utilizada não implica que o ciclo deve atuar necessariamente nos primeiros  $k$  elementos indexados do conjunto  $X$ . De maneira rigorosa, um  $k$ -ciclo é determinado por uma escolha ordenada de  $k$  elementos distintos  $a_1, \dots, a_k \in X$ . A definição aplica-se fazendo a correspondência  $\sigma(a_i) = a_{i+1}$  (com  $a_{k+1} = a_1$  e fixando todos os elementos em  $X \setminus \{a_1, \dots, a_k\}$ );
- Note que, por definição, se  $\sigma = (x_1 x_2 \dots x_k)$ , então  $\text{supp}(\sigma) = \{x_1 x_2 \dots x_k\}$ ;
- Perceba que a escolha de  $x_1$  como ponto de partida para o  $k$ -ciclo  $\sigma$  é arbitrária, é possível começar com qualquer outro  $x_i \in \text{supp}(\sigma)$ :

$$(x_1 x_2 \dots x_k) = (x_i x_{i+1} \dots x_k x_1 \dots x_{i-1});$$

- Chamamos também um  $k$ -ciclo de **ciclo de largura  $k$** ;
- Caso  $\sigma, \tau$  sejam ciclos com suportes dois a dois disjuntos, temos diretamente via a **Proposição 2.1.3** que  $\sigma\tau = \tau\sigma$ ;
- Note que nem toda permutação é um ciclo. Tomemos  $\sigma \in \mathfrak{S}_4$  tal que:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 1 & 4 & 3 \end{pmatrix} = (1 \ 2)(3 \ 4)$$

Evidentemente  $\sigma$  não é um ciclo, porém  $\sigma$  pode ser escrito como produto de 2 ciclos de suportes disjuntos.

### Definição 2.2.2

Uma **transposição** é um 2-ciclo.

**Proposição 2.2.1**

Sejam  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  para  $n \geq 2$ . Logo, todo  $k$ -ciclo de  $\mathfrak{S}_X$  é igual a um produto de  $k - 1$  transposições.

**Demonstração:**

Seja  $\sigma \in \mathfrak{S}_X$  tal que  $\sigma = \underbrace{(x_1 \ x_k)(x_1 \ x_{k-1}) \dots (x_1 \ x_2)}_{k-1 \text{ transposições}}$ .

Sabemos também que se  $x \notin \{x_1, \dots, x_k\}$  então  $\sigma(x) = x$ .

Perceba pela definição de  $\sigma$  que  $\sigma(x_1) = x_2, \sigma(x_2) = x_3, \dots, \sigma(x_k) = x_1$ .

Logo temos diretamente que  $\sigma = (x_1 \dots x_k)$ . □

**Exemplo 2.2.1**

Tomemos alguns exemplos de permutações em  $\mathfrak{S}_3$ :

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} = (1 \ 2) = (2 \ 1)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} = (2 \ 3) = (3 \ 2)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} = (1 \ 2 \ 3) = (2 \ 3 \ 1) = (3 \ 1 \ 2) = (1 \ 2)(2 \ 3).$$

**Proposição 2.2.2**

Sejam  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  para  $n \geq 2$  e  $\sigma \in \mathfrak{S}_X$  um  $k$ -ciclo, onde  $k \in \llbracket 2, n \rrbracket$ . Então  $\mathcal{O}(\sigma) = k$ .

**Demonstração:**

Note primeiramente que  $\mathcal{O}(\sigma) \geq k$ , pois  $\forall i \in \llbracket 1, k-1 \rrbracket$  temos  $\sigma^i(x_1) \neq x_1$ .

Perceba que  $\sigma^{k-1}(x_1) = x_k \implies \sigma^k(x_1) = x_1$ .

Analogamente, realizamos o mesmo procedimento  $\forall i \in \llbracket 2, k \rrbracket$ .

Deduzimos que  $\sigma^k = \text{id}_X \implies \mathcal{O}(\sigma) = k$ . □

**Proposição 2.2.3**

Seja  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  para  $n \geq 2$ . Tomemos  $\sigma \in \mathfrak{S}_X$  tal que:

$$\sigma = \gamma_1 \dots \gamma_t, t \in \llbracket 1, n \rrbracket$$

Onde  $\gamma_i$  é um  $k_i$ -ciclo,  $\forall i \in \llbracket 1, t \rrbracket$  e  $\gamma_i, \gamma_j$  tem suportes disjuntos  $\forall i, j \in \llbracket 1, t \rrbracket, i \neq j$ .

Então,  $\mathcal{O}(\sigma) = \text{mmc}(k_1, \dots, k_t)$ .

**Demonstração:**

Seja  $h \in \mathbb{Z}_+^*$  tal que  $\sigma^h = \text{id}_X$ .

Note que, como  $\gamma_i \gamma_j = \gamma_j \gamma_i$ ,  $\forall i, j \in \llbracket 1, t \rrbracket$  tal que  $i \neq j$ , pela **Proposição 2.1.3** temos:

$$\sigma^h = (\gamma_1 \dots \gamma_t)^h = \gamma_1^h \dots \gamma_t^h = \text{id}_X$$

Como os suportes de cada fator  $\gamma$  de  $\sigma$  são dois a dois disjuntos, é necessário que  $h$  seja um múltiplo de cada ordem  $k_i$  para cada  $\gamma_i$ ,  $\forall i \in \llbracket 1, t \rrbracket$  simultaneamente.

Por definição, temos que  $\min(h) = \text{mmc}(k_1, \dots, k_t)$ .

Como  $\mathcal{O}(\sigma) = \min(h)$ , deduzimos que  $\mathcal{O}(\sigma) = \text{mmc}(k_1, \dots, k_t)$ . □

### Teorema 2.2.1

Seja  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  para  $n \geq 2$ . Então toda permutação  $\sigma \in \mathfrak{S}_X \setminus \{\text{id}_X\}$  pode ser decomposta em um produto de ciclos de suportes dois a dois disjuntos. Tal decomposição é única, exceto pela ordem em que os ciclos são escritos.

#### Demonstração:

Seja  $\sigma \in \mathfrak{S}_X \setminus \{\text{id}_X\}$ .

Tomemos de forma arbitrária um elemento  $x_j$ , com  $j \in \llbracket 1, n \rrbracket$  tal que  $\sigma(x_j) \neq x_j$ . Note que é garantido que tal elemento exista, uma vez que  $\sigma \neq \text{id}_X$ .

Definimos o seguinte conjunto:

$$\mathfrak{O}(x) \stackrel{\text{def}}{=} \{\sigma^k(x) ; k \in \mathbb{Z}\}$$

Note que a restrição  $\sigma|_{\mathfrak{O}(x)}$  forma um  $k$ -ciclo e  $\text{supp}(\sigma|_{\mathfrak{O}(x)}) = \mathfrak{O}(x)$ , pela **Proposição 2.1.2**.

Realizamos o mesmo procedimento para todo  $x \in X \setminus \mathfrak{O}(x_j)$  tal que  $\sigma(x) \neq x$  e assim sucessivamente. Como  $X$  é um conjunto finito, realizamos tal procedimento em um número finito de passos.

Pela **Proposição 2.1.3** temos que a família  $\{\mathfrak{O}(x)\}_{x \in X}$  forma uma partição de  $X \setminus I$ , onde  $I \stackrel{\text{def}}{=} \{x \in X ; \sigma(x) = x\}$ .

Sendo  $\mathfrak{R}$  o conjunto dos representantes de cada  $k_x$ -ciclo  $\sigma|_{\mathfrak{O}(x)}$ ,  $\forall x \in X \setminus I$ , temos:

$$\text{supp}(\sigma) = \bigsqcup_{r \in \mathfrak{R}} \text{supp}(\sigma|_{\mathfrak{O}(r)})$$

deduzimos que  $\sigma$  é igual a composição de todo  $k_x$ -ciclo  $\sigma|_{\mathfrak{O}(r)}$ , onde  $r \in \mathfrak{R}$ .

Mostremos que tal decomposição é única.

Sejam  $\sigma_1 = \rho_1 \dots \rho_h$  e  $\sigma_2 = \eta_1 \dots \eta_m$  duas decomposições em ciclos de suportes dois a dois disjuntos de  $\sigma$ , onde  $h, m \in \llbracket 1, \lfloor \frac{n}{2} \rfloor \rrbracket$ .

Perceba que, como os suportes de cada ciclo são dois a dois disjuntos, necessariamente  $\rho_i(x) = \eta_j(x)$ , para todo  $x \in X$  e  $i, j \in \llbracket 1, \lfloor \frac{n}{2} \rfloor \rrbracket$ .

Utilizando a mesma lógica de forma induutiva em todos os elementos de  $X$ , concluímos que para todo  $x \in X$  iremos obter as mesmas partições  $\mathfrak{O}(x)$  nas quais podemos escrever  $\text{supp}(\sigma)$ .

Como o produto entre quaisquer ciclos de  $\sigma$  é comutativo, deduzimos diretamente que  $\sigma_1 = \sigma_2$ . □

*Observação:* note que para calcular a ordem de uma permutação  $\sigma \in \mathfrak{S}_X$  basta decompor  $\sigma$  em ciclos de suportes dois a dois disjuntos e calcular sua ordem via a regra vista na **Proposição 2.2.3**.

### Exemplo 2.2.2

*Exercício 5.41 da referência [GL22].*

(a) Seja  $\sigma_{(a)} \in \mathfrak{S}_9$  tal que:

$$\sigma_{(a)} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 1 & 6 & 7 & 9 & 8 \end{pmatrix} = \underbrace{(1\ 2\ 3\ 4\ 5)}_{\text{ordem }=5} \underbrace{(8\ 9)}_{\text{ordem }=2}$$

$$\implies \mathcal{O}(\sigma_{(a)}) = \text{mmc}(5, 2) = 10$$

(b) Seja  $\sigma_{(b)} \in \mathfrak{S}_7$  tal que:

$$\sigma_{(b)} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 6 & 5 & 4 & 3 & 1 & 2 & 7 \end{pmatrix} = \underbrace{(1\ 6\ 2\ 5)}_{\text{ordem }=4} \underbrace{(3\ 4)}_{\text{ordem }=2}$$

$$\implies \mathcal{O}(\sigma_{(b)}) = \text{mmc}(4, 2) = 4$$

(c) Seja  $\sigma_{(c)} \in \mathfrak{S}_9$  tal que:

$$\sigma_{(c)} = (1\ 2\ 3)(4\ 5)(1\ 6\ 8\ 7\ 9)(1\ 5) = (1\ 4\ 5\ 6\ 8\ 7\ 9\ 2\ 3)$$

$$\implies \mathcal{O}(\sigma_{(c)}) = 9$$

(d) Seja  $\sigma_{(d)} \in \mathfrak{S}_3$  tal que:

$$\sigma_{(d)} = (1\ 2)(1\ 2\ 3)(1\ 2) = (1\ 3\ 2)$$

$$\implies \mathcal{O}(\sigma_{(d)}) = 3.$$

### Corolário 2.2.1

Seja  $X$  um conjunto finito e não vazio tal que  $\text{Card}(X) = n \in \mathbb{Z}_{\geq 2}$ .

Então, todo elemento de  $\mathfrak{S}_X$  é igual a um produto de no máximo  $n - 1$  transposições.

#### Demonstração:

Seja  $\sigma \in \mathfrak{S}_X$  uma permutação tal que:

$$\sigma = \gamma_1 \dots \gamma_m, \quad m \in [\![1, \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor]\!]$$

Definimos  $\mathcal{O}(\gamma_i) = k_i$ ,  $\forall i \in [\![1, m]\!]$  (de tal forma que  $\gamma_i$  é um  $k_i$ -ciclo).

Sabemos a partir da **Proposição 2.2.1** que cada  $k$ -ciclo pode ser escrito como  $k - 1$  transposições (de suportes não necessariamente disjuntos).

Como possuímos  $m$  ciclos dois a dois disjuntos, temos:

$$\sum_{i=1}^m k_i - 1 = \sum_{i=1}^m k_i - \sum_{i=1}^m 1 = \sum_{i=1}^m k_i - m$$

Como  $\sum_{i=1}^m k_i \leq n$  e  $m \in \llbracket 1, \lfloor \frac{n}{2} \rfloor \rrbracket$ ,  $\sigma$  pode se fatorar em no máximo  $n - 1$  transposições (de suportes não necessariamente disjuntos).

□

### Exemplo 2.2.3

Seja  $\sigma \in \mathfrak{S}_8$  tal que:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 7 & 5 & 6 & 4 & 3 & 2 & 8 & 1 \end{pmatrix} = (1\ 7\ 8)(2\ 5\ 3\ 6)$$

Note que, seguindo a mesma estratégia de prova da **Proposição 2.2.1**, podemos ainda reescrever  $\sigma$  como:

$$\sigma = (1\ 7\ 8)(2\ 5\ 3\ 6) = (1\ 8)(1\ 7)(2\ 6)(2\ 3)(2\ 5)$$

### Definição 2.2.3

Seja  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ .

Uma **transposição elementar** é uma transposição  $\tau \in \mathfrak{S}_X$  da forma:

$$\tau = (x_i\ x_{i+1}), \quad i \in \{1, \dots, n-1\}$$

Isto é, uma transposição cujas imagens são elementos consecutivos de  $X$ .

### Proposição 2.2.4

# Bibliografia

- [GL22] Arnaldo Garcia and Yves Lequin. *Elementos de Álgebra*. Projeto Euclides.  
IMPA, Rio de Janeiro, 7 edition, 2022.