

Teoria de Homotopia Abstrata

Edmundo B. de C. Martins

7 de março de 2024

Sumário

1	Categorias de modelos	5
1.1	Primeiras definições	5
1.2	Alguns exemplos e construções	8
1.3	Fatorações em categorias	10
1.3.1	Morfismos projetivos e injetivos	10
1.3.2	Sistemas de fatoração fracos	23
1.3.3	Fatorações funtoriais	29
1.4	Objetos fibrantes e cofibrantes	33
1.5	Teoria de Homotopia em categorias modelo	37
1.6	Localizações	53
1.7	A categoria homotópica	57
	Apêndices	61
A	Complementos categóricos	63
A.1	Categorias livres	63
	Bibliografia	79

Capítulo 1

Categorias de modelos

1.1 Primeiras definições

1.1.1 Definição. Seja \mathbf{M} uma categoria localmente pequena. Uma **estrutura de modelos** em \mathbf{M} consiste de três classes de morfismos $\mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F} \subseteq \text{Mor}(\mathbf{M})$ cujos elementos são chamados, respectivamente, **equivalências fracas**, **cofibrações** e **fibrações**, as quais devem satisfazer os seguintes axiomas:

- (M1) A categoria \mathbf{M} é bicompleta, ou seja, admite todos os limites e colimites indexados por categorias pequenas.
- (M2) (Propriedade 2-de-3) Dados morfismos $f : X \rightarrow Y$ e $g : Y \rightarrow Z$ em \mathbf{M} , se dois dos morfismos do conjunto $\{f, g, g \circ f\}$ estiverem em \mathcal{W} , então o terceiro também deve estar.
- (M3) (Propriedade de retração) Se um morfismo $f : A \rightarrow B$ é retração de um outro morfismo $g : X \rightarrow Y$, ou seja, se existe um diagrama comutativo como abaixo,

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \text{id}_A & & \\
 & \nearrow & & \searrow & \\
 A & \xrightarrow{s_1} & X & \xrightarrow{r_1} & A \\
 f \downarrow & & \downarrow g & & \downarrow f \\
 B & \xrightarrow{s_2} & Y & \xrightarrow{r_2} & B \\
 & \nwarrow & & \nearrow & \\
 & & \text{id}_B & &
 \end{array} \tag{1.1}$$

e g pertence a \mathcal{W} (ou a \mathcal{C} , ou a \mathcal{F}), então f também pertence a \mathcal{W} (ou a \mathcal{C} , ou a \mathcal{F} , respectivamente). Em suma, as classes \mathcal{W}, \mathcal{C} e \mathcal{F} são fechadas por retrações.

- (M4) (Propriedade de levantamento) Dado um diagrama comutativo como abaixo,

$$\begin{array}{ccc}
 A & \xrightarrow{\alpha} & X \\
 i \downarrow & & \downarrow p \\
 B & \xrightarrow{\beta} & Y
 \end{array} \tag{1.2}$$

onde i é uma cofibração, e p é uma fibração; se um dos dois morfismos i ou p é também uma equivalência fraca, então o diagrama admite um *levantamento*, ou seja, existe um morfismo

diagonal $f : B \rightarrow X$ que faz comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ i \downarrow & \nearrow f & \downarrow p \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array} \quad (1.3)$$

(M5) (Propriedade de fatoração) Qualquer morfismo $f : X \rightarrow Y$ em \mathbf{M} pode ser na forma mostrada abaixo,

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ & \searrow i & \nearrow p \\ & Z & \end{array} \quad (1.4)$$

onde i é uma cofibração, e p é simultaneamente uma fibração e uma equivalência fraca. Além disso, todo morfismo também pode ser fatorado na forma mostrada abaixo,

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ & \searrow j & \nearrow q \\ & Z & \end{array} \quad (1.5)$$

onde nesse caso j é simultaneamente uma cofibração e uma equivalência, e q é uma fibração.

Vamos introduzir um pouco de terminologia antes de fazermos alguns comentários sobre a definição acima. Os morfismos de \mathbf{M} que pertencem à classe $\mathcal{W} \cap \mathcal{C}$ são chamados de **cofibrações triviais** ou **cofibrações acíclicas**, enquanto os morfismos que pertencem à classe $\mathcal{W} \cap \mathcal{F}$ são chamados de **fibrações triviais** ou **fibrações acíclicas**. Usando essa terminologia o axioma de fatoração (M5) pode ser enunciado da seguinte forma: todo morfismo em uma categoria de modelos pode ser fatorado como uma cofibração seguido de uma fibração trivial e também como uma cofibração trivial seguida de uma fibração.

Um quadrado comutativo tendo uma cofibração na aresta esquerda e uma fibração na aresta direita - como no diagrama (1.2) - será chamado de um **problema de levantamento**. Caso um desses dois morfismos seja trivial, usaremos então o termo **problema de levantamento trivial**. Tendo em vista essa terminologia, o axioma de levantamento (M4) pode ser enunciado da seguinte forma: em uma categoria de modelos, todo problema de levantamento trivial admite uma solução.

1.1.2 Observação. Lembremos que, dados objetos X e Y de uma categoria \mathbf{C} qualquer, dizemos que X é um **retrato** de Y se existem morfismos $s : X \rightarrow Y$ e $r : Y \rightarrow X$ tais que $r \circ s = \text{id}_X$. Comumente nos referimos ao morfismo s por **seção** e ao morfismo r por **retração**. A condição $r \circ s = \text{id}_X$ garante que s seja um monomorfismo. De fato, se $f, g : W \rightarrow X$ são morfismos tais que $s \circ f = s \circ g$, então

$$f = \text{id}_X \circ f = r \circ s \circ f = r \circ s \circ g = \text{id}_X \circ g = g.$$

Isso nos permite encarar X como um subobjeto de Y , e o morfismo r então intuitivamente deforma Y para esse subobjeto, mas de forma a mantê-lo fixado. Note que a condição $r \circ s = \text{id}_X$ garante também que o morfismo r seja um epimorfismo.

A noção de retração que aparece no axioma (M3) de uma estrutura de modelos enunciado acima pode ser interpretada nesse sentido se introduzirmos uma categoria adequada para isso. Lembremos que toda categoria \mathbf{C} dá origem a uma categoria de setas $\text{Arr}(\mathbf{C})$. Os objetos dessa

categorias são precisamente morfismos $f : A \rightarrow B$ na categoria inicial \mathbf{C} , e dados dois tais objetos $f : A \rightarrow B$ e $g : X \rightarrow Y$, um morfismo do tipo $(f : A \rightarrow B) \rightarrow (g : X \rightarrow Y)$ na categoria de setas $\text{Arr}(\mathbf{C})$ é dado por um par de morfismos $(\alpha : A \rightarrow X, \beta : B \rightarrow Y)$ satisfazendo a igualdade $\beta \circ f = g \circ \alpha$. Podemos então visualizar esse morfismo em $\text{Arr}(\mathbf{C})$ na forma de um quadrado comutativo como mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ f \downarrow & & \downarrow g \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array}$$

A composição de morfismos é definida “colando” quadrados comutativos adjacentes. Mais precisamente, dados três objetos $f : X_1 \rightarrow Y_1$, $g : X_2 \rightarrow Y_2$ e $h : X_3 \rightarrow Y_3$ na categoria $\text{Arr}(\mathbf{C})$, e dados também dois morfismos componíveis

$$(\alpha_1 : X_1 \rightarrow X_2, \beta_1 : Y_1 \rightarrow Y_2) \quad (\alpha_2 : X_2 \rightarrow X_3, \beta_2 : Y_2 \rightarrow Y_3),$$

sua composição é o morfismo

$$(\alpha_2, \beta_2) \circ (\alpha_1, \beta_1) : (f : X_1 \rightarrow Y_1) \rightarrow (h : X_3 \rightarrow Y_3)$$

em $\text{Arr}(\mathbf{C})$ definido pelo par

$$(\alpha_2, \beta_2) \circ (\alpha_1, \beta_1) := (\alpha_2 \circ \alpha_1 : X_1 \rightarrow X_3, \beta_2 \circ \beta_1 : Y_1 \rightarrow Y_3).$$

Essa composição pode também ser visualizada como mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccccc} X_1 & \xrightarrow{\alpha_1} & X_2 & \xrightarrow{\alpha_2} & X_3 \\ f \downarrow & & \downarrow g & & \downarrow h \\ Y_1 & \xrightarrow{\beta_1} & Y_2 & \xrightarrow{\beta_2} & Y_3 \end{array} \implies \begin{array}{ccc} X_1 & \xrightarrow{\alpha_2 \circ \alpha_1} & X_3 \\ f \downarrow & & \downarrow h \\ Y_1 & \xrightarrow{\beta_2 \circ \beta_1} & Y_3 \end{array}$$

A associatividade dessa composição via colagem segue diretamente da associatividade da composição na categoria inicial \mathbf{C} . Por fim, dado um objeto $f : X \rightarrow Y$ qualquer, o morfismo idêntico associado a ele é dado pelo par $\text{id}_f := (\text{id}_X, \text{id}_Y)$, conforme mostrado no quadrado comutativo abaixo.

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{\text{id}_X} & X \\ f \downarrow & & \downarrow f \\ Y & \xrightarrow{\text{id}_Y} & Y \end{array}$$

Note agora que, se o objeto $f : A \rightarrow B$ é um retrato do objeto $g : X \rightarrow Y$ na categoria de setas $\text{Arr}(\mathbf{M})$, então por definição existem morfismos $s_1 : A \rightarrow X$, $s_2 : B \rightarrow Y$, $r_1 : X \rightarrow A$ e $r_2 : Y \rightarrow B$ tais que $(r_1, r_2) \circ (s_1, s_2) = \text{id}_f$, o que também pode ser expresso pelo diagrama comutativo abaixo.

$$\begin{array}{ccccc} & & \text{id}_A & & \\ & \nearrow & & \searrow & \\ A & \xrightarrow{s_1} & X & \xrightarrow{r_1} & A \\ f \downarrow & & \downarrow g & & \downarrow f \\ B & \xrightarrow{s_2} & Y & \xrightarrow{r_2} & B \\ & \nwarrow & & \nearrow & \\ & & \text{id}_B & & \end{array}$$

Esse é precisamente o diagrama que aparece no axioma de retração na definição de uma estrutura modelo. Podemos então reformular tal axioma dizendo que as classes de equivalências fracas, fibrações e cofibrações são todas fechadas por *retrações na categoria de setas* $\text{Arr}(\mathbf{C})$.

1.1.3 Observação. Quando trabalhamos com categorias de modelos, ao invés de dizermos explicitamente que um morfismo é uma equivalência fraca, uma cofibração, ou uma fibração; é comum indicarmos isso decorando de alguma forma a seta que representa tal morfismo. A convenção notacional que seguiremos nesse aspecto é a seguinte:

- uma equivalência fraca será denotada por $\xrightarrow{\sim}$;
- uma cofibração será denotada por \twoheadrightarrow ;
- uma fibração será denotada por \rightarrowtail .

Combinando os símbolos acima obtemos outros que utilizaremos para denotar cofibrações triviais ou fibrações triviais:

- uma cofibração trivial será denotada por $\xrightarrow{\sim}\twoheadrightarrow$;
- uma fibração trivial será denotada por $\rightarrowtail\xrightarrow{\sim}$.

1.2 Alguns exemplos e construções

O objetivo dessa seção é dar alguns exemplos de categorias de modelos e descrever também algumas construções possíveis com tais categorias. Infelizmente, a maioria dos exemplos que podemos dar no momento são ou muito simples, ou puramente teóricos, não sendo portanto muito úteis. Na maioria dos exemplos úteis e concretos, a verificação dos axiomas de uma estrutura de modelos costuma ser bastante trabalhosa e exige resultados adicionais que veremos mais adiante.

1.2.1 Exemplo. Seja \mathcal{M} uma categoria bicompleta qualquer, considere \mathcal{W} como sendo a classe dos isomorfismos em \mathcal{C} , e considere \mathcal{C} e \mathcal{F} como sendo a classe de todos os morfismos. Afirmamos que nesse caso a tupla $(\mathcal{M}, \mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F})$ define uma categoria modelo.

A validade do axioma (M1) segue da hipótese que fizemos sobre \mathcal{C} . Considere agora dois morfismos $f : X \rightarrow Y$ e $g : Y \rightarrow Z$ em \mathcal{C} . Se f e g pertencem a \mathcal{W} , ou seja, f e g são isomorfismos, então $g \circ f$ também pertence a \mathcal{W} , já que isomorfismos são preservados por composição. Agora, se f e $g \circ f$ pertencem a \mathcal{W} , a igualdade $g = (g \circ f) \circ f^{-1}$ expressa g como composição de dois isomorfismos, logo $g \in \mathcal{W}$. Por fim, se g e $g \circ f$ pertencem a \mathcal{W} , então $f = g^{-1} \circ (g \circ f)$ expressa f como composição de dois isomorfismos, portanto $f \in \mathcal{W}$. Isso mostra que \mathcal{W} satisfaz a propriedade 2-de-3.

A validade do axioma de retração é imediata para as classes \mathcal{C} e \mathcal{F} já que elas consistem de todos os morfismos. Suponha agora que $f : X \rightarrow Y$ seja uma retração do isomorfismo $g : A \rightarrow B$, de forma que tenhamos um diagrama comutativo como abaixo.

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \text{id}_X & & \\
 & \nearrow & & \searrow & \\
 X & \xrightarrow{s_1} & A & \xrightarrow{r_1} & X \\
 f \downarrow & & \downarrow g & & \downarrow f \\
 Y & \xrightarrow{s_2} & B & \xrightarrow{r_2} & Y \\
 & \nwarrow & & \nearrow & \\
 & & \text{id}_Y & &
 \end{array}$$

Afirmamos que, nesse caso, o morfismo $r_1 \circ g^{-1} \circ s_2$ é o inverso de f . De fato, por um lado temos

$$r_1 \circ g^{-1} \circ s_2 \circ f = r_1 \circ g^{-1} \circ g \circ s_1 = r_1 \circ \text{id}_A \circ s_1 = r_1 \circ s_1 = \text{id}_X,$$

enquanto por outro temos

$$f \circ r_1 \circ g^{-1} \circ s_2 = r_2 \circ g \circ g^{-1} \circ s_2 = r_2 \circ \text{id}_B \circ s_2 = r_2 \circ s_2 = \text{id}_Y.$$

Isso mostra que f é um isomorfismo também, portanto a classe \mathcal{W} é fechada por retrações.

Vamos checar agora o axioma de levantamento. No problema de levantamento abaixo,

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ i \downarrow \wr & & \downarrow p \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array}$$

dizer que i é uma cofibração trivial significa apenas dizer que i é um isomorfismo. Veja então que o morfismo $h : B \rightarrow X$ dado por $h := \alpha \circ i^{-1}$ soluciona o problema em questão pois

$$h \circ i = \alpha \circ i^{-1} \circ i = \alpha \circ \text{id}_A = \alpha,$$

e também

$$p \circ h = p \circ \alpha \circ i^{-1} = \beta \circ i \circ i^{-1} = \beta \circ \text{id}_B = \beta.$$

Considere agora o problema de levantamento abaixo.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ i \downarrow \wr & & \downarrow p \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array}$$

Como no caso anterior, dizer que p é uma fibração trivial significa simplesmente dizer que p é um isomorfismo. Podemos então definir $h : B \rightarrow X$ pela composição $h := p^{-1} \circ \beta$, e afirmamos que com essa definição obtemos um levantamento. De fato, por um lado

$$p \circ h = p \circ p^{-1} \circ \beta = \text{id}_Y \circ \beta = \beta,$$

enquanto por outro

$$h \circ i = p^{-1} \circ \beta \circ i = p^{-1} \circ p \circ \alpha = \text{id}_X \circ \alpha = \alpha.$$

Resta agora mostrarmos a existência de fatorações, mas isso é bem simples pela forma como foram definidas as classes \mathcal{W} , \mathcal{C} e \mathcal{F} . Dado um morfismo $f : X \rightarrow Y$ qualquer, lembrando que as cofibrações triviais são os isomorfismos da categoria, e que as fibrações são todos os morfismos, a fatoração

$$f = f \circ \text{id}_X$$

exibe f como uma cofibração trivial seguida de uma fibração. Analogamente, como todo morfismo é uma cofibração, e todo isomorfismo é uma fibração trivial, a fatoração

$$f = \text{id}_Y \circ f$$

expressa f como uma cofibração seguida de uma fibração trivial.

1.2.2 Exemplo (Produto de categorias de modelos). Sejam \mathbf{M} e \mathbf{N} duas categorias de modelos. Lembre-se que podemos formar a categoria produto $\mathbf{M} \times \mathbf{N}$ cujos objetos são pares (X, Y) , onde X é um objeto de \mathbf{M} , e Y é um objeto de \mathbf{N} ; e um morfismo do tipo $(X, Y) \rightarrow (X', Y')$ é dado por um par (f, g) , onde f é um morfismo do tipo $X \rightarrow X'$ em \mathbf{M} , e g é um morfismo do tipo $Y \rightarrow Y'$ em \mathbf{N} . Em suma, definimos

$$\text{Hom}_{\mathbf{M} \times \mathbf{N}}((X, Y), (X', Y')) := \text{Hom}_{\mathbf{M}}(X, X') \times \text{Hom}_{\mathbf{N}}(Y, Y').$$

A composição em $\mathbf{M} \times \mathbf{N}$ é dada pelas composições em \mathbf{M} e \mathbf{N} nas respectivas coordenadas, ou seja, dados morfismos $(f_1, g_1) : (X_1, Y_1) \rightarrow (X_2, Y_2)$ e $(f_2, g_2) : (X_2, Y_2) \rightarrow (X_3, Y_3)$, definimos sua composição pela fórmula

$$(f_2, g_2) \circ (f_1, g_1) := (f_2 \circ f_1, g_2 \circ g_1) : (X_1, Y_1) \rightarrow (X_3, Y_3).$$

Afirmamos que o produto $\mathbf{M} \times \mathbf{N}$ também admite uma estrutura de modelos obtida pela combinação das estruturas existentes em \mathbf{M} e \mathbf{N} . As classes de morfismos em questão são definidas da seguinte maneira: um morfismo $(f, g) : (X, Y) \rightarrow (X', Y')$ em $\mathbf{M} \times \mathbf{N}$ é dito uma

- equivalência fraca se $f : X \rightarrow X'$ e $g : Y \rightarrow Y'$ são equivalências fracas em \mathbf{M} e \mathbf{N} , respectivamente;
- cofibração se $f : X \rightarrow X'$ e $g : Y \rightarrow Y'$ são cofibrações em \mathbf{M} e \mathbf{N} , respectivamente;
- fibração se $f : X \rightarrow X'$ e $g : Y \rightarrow Y'$ são fibrações em \mathbf{M} e \mathbf{N} , respectivamente.

Resta verificarmos a validade dos axiomas. A bicompletude de $\mathbf{M} \times \mathbf{N}$ é uma questão puramente categórica: o (co)limite de um funtor $F : \mathbf{J} \rightarrow \mathbf{M} \times \mathbf{N}$ pode ser calculado a partir dos (co)limites dos funtores componentes $\mathbf{J} \rightarrow \mathbf{M}$ e $\mathbf{J} \rightarrow \mathbf{N}$ obtidos a partir dos funtores de projeção $\mathbf{M} \times \mathbf{N} \rightarrow \mathbf{M}$ e $\mathbf{M} \times \mathbf{N} \rightarrow \mathbf{N}$.

Vejam a questão ad propriedade 2-de-3 em $\mathbf{M} \times \mathbf{N}$. Suponha que tenhamos dois morfismos $(f_1, g_1) : (X_1, Y_1) \rightarrow (X_2, Y_2)$ e $(f_2, g_2) : (X_2, Y_2) \rightarrow (X_3, Y_3)$ e suponha que (f_1, g_1) e a composição $(f_2, g_2) \circ (f_1, g_1) = (f_2 \circ f_1, g_2 \circ g_1)$ sejam equivalências fracas. Segue da definição de equivalência fraca em $\mathbf{M} \times \mathbf{N}$ que f_1 e $f_2 \circ f_1$ são equivalências fracas em \mathbf{M} , enquanto g_1 e $g_2 \circ g_1$ são equivalências fracas em \mathbf{N} . Aplicando então a propriedade 2-de-3 nas categorias \mathbf{M} e \mathbf{N} concluímos que f_2 é uma equivalência fraca em \mathbf{M} , e g_2 é uma equivalência fraca em \mathbf{N} ; portanto o par (f_2, g_2) define uma equivalência fraca em $\mathbf{M} \times \mathbf{N}$ como gostaríamos. Os outros dois casos possíveis da propriedade 2-de-3 seguem por um raciocínio completamente análogo.

1.3 Fatorações em categorias

1.3.1 Morfismos projetivos e injetivos

Uma parte essencial na definição de uma estrutura de modelos é a existência de fatorações de morfismos quaisquer em termos de cofibrações e fibrações satisfazendo condições de trivialidade, sendo que estas classes de morfismos se relacionam por propriedades de levantamento. Podemos reformular isso em um contexto categórico mais amplo que nos permitirá deduzir algumas das propriedades básicas de categorias de modelos de forma mais transparente. O conteúdo dessa seção é baseado principalmente em [nLa24].

Inicialmente, analisamos as propriedades gerais de morfismos definidos em termos de propriedades de levantamento.

1.3.1 Definição. Sejam \mathbf{C} uma categoria e $K \subseteq \text{Mor}(\mathbf{C})$ uma classe qualquer de morfismos. Dizemos que um morfismo $f : A \rightarrow B$ em \mathbf{C} **satisfaz a propriedade de levantamento à esquerda com relação a K** se todo quadrado comutativo como abaixo,

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ f \downarrow & & \downarrow p \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array}$$

onde $p : X \rightarrow Y$ pertence a K , admite um levantamento, ou seja, existe um morfismo diagonal $\varphi : B \rightarrow X$ que faz comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ f \downarrow & \nearrow h & \downarrow p \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array}$$

Dizemos também nesse caso que f é um morfismo K -**projetivo**.

1.3.2 Exemplo. Os principais exemplos de morfismos projetivos nos quais estaremos interessados vêm da teoria de categorias de modelos. Segue diretamente do axioma de levantamento (M4) na Definição 1.1.1 que toda cofibração em uma categoria de modelos é um morfismo projetivo com relação à classe de fibrações triviais. Veremos na próxima seção que isso na verdade caracteriza as cofibrações em uma estrutura de modelos. Analogamente, o axioma (M4) também diz que toda cofibração trivial é projetiva com relação à classe de fibrações, e também veremos logo mais que essa propriedade de projetividade caracteriza as cofibrações triviais.

1.3.3 Exemplo. Seja R um anel e considere a categoria $R\text{Mod}$ de R -módulos e homomorfismos de R -módulos. Considere também a classe $\text{Epi} \subseteq \text{Mor}(R\text{Mod})$ formada por todos os epimorfismos de R -módulos. Dado um R -módulo M qualquer, se $\mathbf{0}$ denota o R -módulo trivial, afirmamos que o morfismo trivial $0_M : \mathbf{0} \rightarrow M$ é projetivo com relação à classe Epi se, e somente se, M é um R -módulo projetivo.

Suponha inicialmente que M seja um R -módulo projetivo, e considere o problema de levantamento indicado abaixo,

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{0} & \xrightarrow{0_A} & A \\ 0_M \downarrow & & \downarrow p \\ M & \xrightarrow{f} & B \end{array}$$

onde $p : A \rightarrow B$ é um epimorfismo de R -módulos. Graças à projetividade de M , o morfismo f pode ser levantado através do epimorfismo p , ou seja, existe um morfismo $F : M \rightarrow A$ tal que $p \circ F = f$. Ora, como também vale a igualdade $F \circ 0_M = 0_A$, temos o diagrama comutativo abaixo;

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{0} & \xrightarrow{0_A} & A \\ 0_M \downarrow & \nearrow F & \downarrow p \\ M & \xrightarrow{f} & B \end{array}$$

mostrando que o problema de levantamento em questão possui uma solução e que, portanto, o morfismo 0_M é projetivo.

Reciprocamente, suponha que o morfismo 0_M seja projetivo. A fim de mostrarmos que o R -módulo M é projetivo, sejam $p : A \rightarrow B$ um epimorfismo de R -módulos, e $f : M \rightarrow B$ um morfismo qualquer. Como as composições $p \circ 0_A$ e $f \circ 0_M$ são ambas iguais ao morfismo trivial $0_B : \mathbf{0} \rightarrow B$, temos o problema de levantamento indicado abaixo, o qual admite uma solução $F : M \rightarrow A$ graças à projetividade de 0_M .

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{0} & \xrightarrow{0_A} & A \\ 0_M \downarrow & \nearrow F & \downarrow p \\ M & \xrightarrow{f} & B \end{array}$$

Note então que pela comutatividade temos $p \circ F = f$, ou seja, F é o levantamento procurado para o morfismo f ; mostrando assim a projetividade de M .

O resultado abaixo reúne algumas das principais propriedades de morfismos K -projetivos.

1.3.4 Proposição. *Sejam \mathcal{C} uma categoria e $K \subseteq \text{Mor}(\mathcal{C})$ uma classe de morfismos qualquer.*

- (i) *Todo isomorfismo de \mathcal{C} é um morfismo K -projetivo.*
- (ii) *Se $f_1 : A \rightarrow B$ e $f_2 : B \rightarrow C$ são morfismos K -projetivos, então o morfismo composto $f_2 \circ f_1 : A \rightarrow C$ é também K -projetivo.*
- (iii) *Se $f_2 : A_2 \rightarrow B_2$ é um retrato de $f_1 : A_1 \rightarrow B_1$, e f_1 é um morfismo K -projetivo, então f_2 é também K -projetivo.*
- (iv) *Se o quadrado comutativo indicado abaixo é um pushout,*

$$\begin{array}{ccc} A_1 & \xrightarrow{\alpha} & A_2 \\ f_1 \downarrow & & \downarrow f_2 \\ B_1 & \xrightarrow{\beta} & B_2 \end{array}$$

e f_1 é K -projetivo, então f_2 também é K -projetivo.

- (v) *Se $f_1 : X_1 \rightarrow Y_1$ e $f_2 : X_2 \rightarrow Y_2$ são morfismos K -projetivos, e existem os coprodutos $X_1 \sqcup X_2$ e $Y_1 \sqcup Y_2$, então o morfismo $f_1 \sqcup f_2 : X_1 \sqcup X_2 \rightarrow Y_1 \sqcup Y_2$ é K -projetivo.*

Em suma, a classe $K\text{Proj} \subseteq \text{Mor}(\mathcal{C})$ formada por todos os morfismos K -projetivos contém todos os isomorfismos e é fechada por composições, retratos, pushouts, e coprodutos.

Demonstração. (i) Suponha que $f : A \rightarrow B$ seja um isomorfismo e considere o quadrado comutativo abaixo,

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ f \downarrow & & \downarrow p \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array}$$

onde p é um morfismo qualquer pertencente à classe K . Sendo f um isomorfismo, existe o morfismo inverso $f^{-1} : B \rightarrow A$. Afirmamos então que $\alpha \circ f^{-1} : B \rightarrow X$ faz comutar o diagrama mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ f \downarrow & \nearrow \alpha \circ f^{-1} & \downarrow p \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array}$$

A comutatividade do triângulo superior é imediata, e a comutatividade do quadrado inferior segue da sequência de igualdades:

$$\begin{aligned} p \circ \alpha \circ f^{-1} &= \beta \circ f \circ f^{-1} \\ &= \beta \circ \text{id}_B \\ &= \beta. \end{aligned}$$

(ii) Considere um problema de levantamento como mostrado abaixo,

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ f_2 \circ f_1 \downarrow & & \downarrow p \\ C & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array} \quad (1.6)$$

onde p é um morfismo qualquer pertence à classe K . Nosso objetivo é obter uma solução para esse problema de levantamento.

O problema acima dá origem ao problema de levantamento indicado abaixo,

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ f_1 \downarrow & & \downarrow p \\ B & \xrightarrow{\beta \circ f_2} & Y \end{array}$$

e a K -projetividade de f_1 nos permite obter um morfismo $\varphi : B \rightarrow X$ resolvendo esse problema conforme indicado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ f_1 \downarrow & \nearrow \varphi & \downarrow p \\ B & \xrightarrow{\beta \circ f_2} & Y \end{array} \quad (1.7)$$

A comutatividade do diagrama acima dá origem ao problema de levantamento abaixo,

$$\begin{array}{ccc} B & \xrightarrow{\varphi} & X \\ f_2 \downarrow & & \downarrow p \\ C & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array}$$

e a K -projetividade de f_2 nos permite obter agora um morfismo $\psi : C \rightarrow X$ fazendo comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccc} B & \xrightarrow{\varphi} & X \\ f_2 \downarrow & \nearrow \psi & \downarrow p \\ C & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array} \quad (1.8)$$

Afirmamos que ψ é a solução procurada para o problema de levantamento (1.6), ou seja, afirmamos que o diagrama indicado abaixo é comutativo.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ f_2 \circ f_1 \downarrow & \nearrow \psi & \downarrow p \\ C & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array}$$

Note que a comutatividade do triângulo inferior segue imediatamente da comutatividade do diagrama (1.8). Já a comutatividade do triângulo inferior segue da seguinte sequência de igualdades:

$$\begin{aligned} \psi \circ f_2 \circ f_1 &= \varphi \circ f_1 && \text{(por (1.8))} \\ &= \alpha. && \text{(por (1.7))} \end{aligned}$$

(iii) A hipótese de retração garante a existência de um diagrama comutativo como mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \text{id}_{A_2} & & \\
 & \nearrow & & \searrow & \\
 A_2 & \xrightarrow{s_1} & A_1 & \xrightarrow{r_1} & A_2 \\
 f_2 \downarrow & & \downarrow f_1 & & \downarrow f_2 \\
 B_2 & \xrightarrow{s_2} & B_1 & \xrightarrow{r_2} & B_2 \\
 & \nwarrow & & \nearrow & \\
 & & \text{id}_{B_2} & &
 \end{array} \tag{1.9}$$

Considere agora um problema de levantamento como mostrado abaixo,

$$\begin{array}{ccc}
 A_2 & \xrightarrow{\alpha} & X \\
 f_2 \downarrow & & \downarrow p \\
 B_2 & \xrightarrow{\beta} & Y
 \end{array}$$

onde p é um morfismo qualquer pertencente à classe K . Usando este problema e os morfismos do diagrama de retração obtemos um outro problema de levantamento indicado abaixo, o qual admite uma solução $\varphi : B_1 \rightarrow X$ graças à projetividade de f_1 .

$$\begin{array}{ccc}
 A_1 & \xrightarrow{\alpha \circ r_1} & X \\
 f_1 \downarrow & \nearrow \varphi & \downarrow p \\
 B_1 & \xrightarrow{\beta \circ r_2} & Y
 \end{array} \tag{1.10}$$

Afirmamos que o morfismo composto $\varphi \circ s_2 : B_2 \rightarrow X$ é a solução procurada para o problema de levantamento considerado inicialmente, ou seja, que ele faz comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccc}
 A_2 & \xrightarrow{\alpha} & X \\
 f_2 \downarrow & \nearrow \varphi \circ s_2 & \downarrow p \\
 B_2 & \xrightarrow{\beta} & Y
 \end{array}$$

De fato, por um lado temos a sequência de igualdades

$$\begin{aligned}
 \varphi \circ s_2 \circ f_2 &= \varphi \circ f_1 \circ s_1 && \text{(por (1.9))} \\
 &= \alpha \circ r_1 \circ s_1 && \text{(por (1.10))} \\
 &= \alpha \circ \text{id}_{A_2} && \text{(por (1.9))} \\
 &= \alpha;
 \end{aligned}$$

e por outro temos a sequência de igualdades

$$\begin{aligned}
 p \circ \varphi \circ s_2 &= \beta \circ r_2 \circ s_2 && \text{(por (1.10))} \\
 &= \beta \circ \text{id}_{B_2} && \text{(por (1.9))} \\
 &= \beta.
 \end{aligned}$$

(iv) Considere um problema de levantamento como abaixo,

$$\begin{array}{ccc}
 A_2 & \xrightarrow{\gamma} & X \\
 f_2 \downarrow & & \downarrow p \\
 B_2 & \xrightarrow{\delta} & Y
 \end{array} \tag{1.11}$$

onde p é um morfismo qualquer pertencente à classe K .

Usando a comutatividade do quadrado acima obtemos o problema de levantamento indicado abaixo, o qual admite uma solução $\varphi : B_1 \rightarrow X$ graças à K -projetividade do morfismo f_1 .

$$\begin{array}{ccc} A_1 & \xrightarrow{\gamma \circ \alpha} & X \\ f_1 \downarrow & \nearrow \varphi & \downarrow p \\ B_1 & \xrightarrow{\delta \circ \beta} & Y \end{array} \quad (1.12)$$

A comutatividade do triângulo superior no diagrama anterior diz precisamente que a “camada externa” do diagrama abaixo é comutativa, portanto a propriedade universal do pushout garante a existência de um único morfismo $\psi : B_2 \rightarrow X$ fazendo comutar o diagrama todo.

$$\begin{array}{ccc} A_1 & \xrightarrow{\alpha} & A_2 \\ f_1 \downarrow & & \downarrow f_2 \\ B_1 & \xrightarrow{\beta} & B_2 \end{array} \quad \begin{array}{c} \searrow \gamma \\ \nearrow \psi \\ \searrow \varphi \end{array} \quad X \quad (1.13)$$

Vamos mostrar que ψ é a solução procurada para o problema de levantamento (1.11) considerado inicialmente. Veja inicialmente que a igualdade

$$\psi \circ f_2 = \gamma$$

segue imediatamente da comutatividade de (1.13). A igualdade $p \circ \psi = \delta$ é um pouco mais sutil. Note primeiro que δ faz comutar o diagrama abaixo,

$$\begin{array}{ccc} A_1 & \xrightarrow{\alpha} & A_2 \\ f_1 \downarrow & & \downarrow f_2 \\ B_1 & \xrightarrow{\beta} & B_2 \end{array} \quad \begin{array}{c} \searrow p \circ \gamma \\ \nearrow \delta \\ \searrow \delta \circ \beta \end{array} \quad Y$$

portanto pela propriedade universal do pushout sabemos que δ é na verdade o *único* morfismo do tipo $B_2 \rightarrow Y$ que faz o diagrama acima comutar. Mas note que $p \circ \psi$ satisfaz as mesmas condições de comutatividade, já que por um lado

$$p \circ \psi \circ f_2 = g \circ \gamma$$

graças à comutatividade de (1.13), e por outro

$$\begin{aligned} p \circ \psi \circ \beta &= p \circ \varphi & (\text{por (1.13)}) \\ &= \delta \circ \beta; & (\text{por (1.12)}) \end{aligned}$$

e a igualdade desejada $p \circ \psi = \delta$ segue então da unicidade mencionada acima.

(v) Considere o problema de levantamento indicado abaixo,

$$\begin{array}{ccc} A_1 \sqcup A_2 & \xrightarrow{\alpha} & X \\ f_1 \sqcup f_2 \downarrow & & \downarrow p \\ B_1 \sqcup B_2 & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array} \quad (1.14)$$

onde p é um morfismo qualquer pertencente à classe K . Considere também as injeções canônicas $i_1 : A_1 \rightarrow A_1 \sqcup A_2$, $i_2 : A_2 \rightarrow A_1 \sqcup A_2$, $j_1 : B_1 \rightarrow B_1 \sqcup B_2$ e $j_2 : B_2 \rightarrow B_1 \sqcup B_2$ nos respectivos coprodutos.

A comutatividade do quadrado acima nos permite obter o problema de levantamento indicado abaixo, o qual admite uma solução $\varphi : B_1 \rightarrow X$ graças à projetividade do morfismo f_1 .

$$\begin{array}{ccc} A_1 & \xrightarrow{\alpha \circ i_1} & X \\ f_1 \downarrow & \nearrow \varphi & \downarrow p \\ B_1 & \xrightarrow{\beta \circ j_1} & Y \end{array} \quad (1.15)$$

Analogamente, temos também o outro problema de levantamento indicado abaixo, o qual admite uma solução $\psi : B_2 \rightarrow X$ graças à projetividade de f_2 .

$$\begin{array}{ccc} A_2 & \xrightarrow{\alpha \circ i_2} & X \\ f_2 \downarrow & \nearrow \psi & \downarrow p \\ B_2 & \xrightarrow{\beta \circ j_2} & Y \end{array} \quad (1.16)$$

A propriedade universal do coproduto dá origem ao morfismo $\langle \varphi, \psi \rangle : B_1 \sqcup B_2 \rightarrow X$ caracterizado unicamente por satisfazer as igualdades

$$\langle \varphi, \psi \rangle \circ j_1 = \varphi \quad \text{e} \quad \langle \varphi, \psi \rangle \circ j_2 = \psi.$$

Afirmamos que este morfismo é a solução para o problema de levantamento (1.14) considerado inicialmente, ou seja, que ele faz comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccc} A_1 \sqcup A_2 & \xrightarrow{\alpha} & X \\ f_1 \sqcup f_2 \downarrow & \nearrow \langle \varphi, \psi \rangle & \downarrow p \\ B_1 \sqcup B_2 & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array}$$

Graças à propriedade universal do coproduto, a comutatividade do triângulo superior é equivalente às duas igualdades abaixo

$$\begin{cases} \langle \varphi, \psi \rangle \circ f_1 \sqcup f_2 \circ i_1 = \alpha \circ i_1, \\ \langle \varphi, \psi \rangle \circ f_1 \sqcup f_2 \circ i_2 = \alpha \circ i_2. \end{cases}$$

No primeiro caso temos

$$\begin{aligned} \langle \varphi, \psi \rangle \circ f_1 \sqcup f_2 \circ i_1 &= \langle \varphi, \psi \rangle \circ j_1 \circ f_1 \\ &= \varphi \circ f_1 \\ &= \alpha \circ i_1, \end{aligned} \quad (\text{por (1.15)})$$

e no segundo temos

$$\begin{aligned} \langle \varphi, \psi \rangle \circ f_1 \sqcup f_2 \circ i_2 &= \langle \varphi, \psi \rangle \circ j_2 \circ f_2 \\ &= \psi \circ f_2 \\ &= \alpha \circ i_2. \end{aligned} \quad (\text{por (1.16)})$$

Já a comutatividade do triângulo inferior é equivalente às igualdades

$$\begin{cases} p \circ \langle \varphi, \psi \rangle \circ j_1 = \beta \circ j_1, \\ p \circ \langle \varphi, \psi \rangle \circ j_2 = \beta \circ j_2. \end{cases}$$

A primeira dessas igualdades é válida pois

$$\begin{aligned} p \circ \langle \varphi, \psi \rangle \circ j_1 &= p \circ \varphi \\ &= \beta \circ j_1, \end{aligned} \quad (\text{por (1.15)})$$

e a segunda igualdade também é válida pois

$$\begin{aligned} p \circ \langle \varphi, \psi \rangle \circ j_2 &= p \circ \psi \\ &= \beta \circ j_2. \end{aligned} \quad (\text{por (1.16)})$$

■

Agora dualizamos a discussão anterior lidando com morfismos satisfazendo uma propriedade de levantamento à direita.

1.3.5 Definição. Sejam \mathcal{C} uma categoria e $K \subseteq \text{Mor}(\mathcal{C})$ uma classe qualquer de morfismos. Dizemos que um morfismo $g : X \rightarrow Y$ **satisfaz a propriedade de levantamento à direita com relação a K** se todo quadrado comutativo como abaixo,

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ i \downarrow & & \downarrow g \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array}$$

onde $i : A \rightarrow B$ é um morfismo qualquer pertencente a K , admite um levantamento, ou seja, existe um morfismo diagonal $\varphi : B \rightarrow X$ que faz comutar o diagrama mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ i \downarrow & \nearrow \varphi & \downarrow g \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array}$$

Dizemos também nesse caso que g é um morfismo **K -injetivo**.

1.3.6 Exemplo. Vale uma versão dual do Exemplo 1.3.2. O axioma de levantamento (M4) diz que em uma categoria de modelos as fibrações são morfismos injetivos com relação à classe das cofibrações triviais, enquanto as fibrações triviais são morfismos injetivos com relação à classe das cofibrações. Veremos mais tarde que, na verdade, as fibrações e as fibrações triviais são, na verdade, completamente caracterizadas por tais propriedades de injetividade.

1.3.7 Exemplo. O Exemplo 1.3.3 também possui uma versão dual válida para módulos injetivos, ou seja, se consideramos na categoria $R\text{Mod}$ a classe de morfismos $\text{Mono} \subset \text{Mor}(R\text{Mod})$ formada por todos os monomorfismos, vale que o morfismo zero $0_M : M \rightarrow \mathbf{0}$ é injetivo com relação a essa classe se, e somente se, o módulo M é injetivo.

Suponha inicialmente que M seja um R -módulo injetivo, e considere o problema de levantamento abaixo,

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & M \\ i \downarrow & & \downarrow 0_M \\ B & \xrightarrow{0_B} & \mathbf{0} \end{array}$$

onde i é um monomorfismo. Sendo M projetivo, podemos estender α ao longo deste monomorfismo, ou seja, existe um morfismo $\varphi : B \rightarrow M$ satisfazendo a igualdade $\varphi \circ i = \alpha$. Ora, trivialmente também vale a igualdade $0_M \circ \varphi = 0_B$, portanto vale a comutatividade do diagrama abaixo;

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & M \\ i \downarrow & \nearrow \varphi & \downarrow 0_M \\ B & \xrightarrow{0_B} & \mathbf{0} \end{array}$$

mostrando assim a injetividade do morfismo 0_M com relação à classe dos monomorfismos.

Reciprocamente, suponha que 0_M seja um morfismo injetivo. Dado um monomorfismo de R -módulos $i : A \rightarrow B$, e um morfismo $\alpha : A \rightarrow M$, como valem as igualdades

$$0_M \circ \alpha = 0_A = 0_B \circ i,$$

temos o problema de levantamento indicado abaixo, o qual admite uma solução $\varphi : B \rightarrow M$ graças à injetividade de 0_M .

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & M \\ i \downarrow & \nearrow \varphi & \downarrow 0_M \\ B & \xrightarrow{0_B} & \mathbf{0} \end{array}$$

A comutatividade do diagrama implica a igualdade $\varphi \circ i = \alpha$, ou seja, φ estende α ao longo do monomorfismo i ; portanto M é um R -módulo injetivo.

A Proposição 1.3.4 possui sua versão dual para morfismos injetivos a qual apresentamos abaixo. A demonstração é completamente dual à apresentada anteriormente, mas decidimos incluí-la aqui ainda assim por motivos de completude. É claro que o leitor - o qual esperamos não estar sendo obrigado a ler estas notas sob a mira constante de uma arma - pode pular essa demonstração sem nenhum problema.

1.3.8 Proposição. *Sejam \mathcal{C} uma categoria e $K \subseteq \text{Mor}(\mathcal{C})$ uma classe de morfismos qualquer.*

- (i) *Todo isomorfismo de \mathcal{C} é K -injetivo.*
- (ii) *Se $g_1 : X \rightarrow Y$ e $g_2 : Y \rightarrow Z$ são morfismos K -injetivos, então o morfismo composto $g_2 \circ g_1 : X \rightarrow Z$ é também K -injetivo.*
- (iii) *Se $g_2 : X_2 \rightarrow Y_2$ é um retrato de $g_1 : X_1 \rightarrow Y_1$, e g_1 é K -injetivo, então g_2 também é K -injetivo.*
- (iv) *Se o quadrado comutativo indicado abaixo é um pullback,*

$$\begin{array}{ccc} X_2 & \xrightarrow{\alpha} & X_1 \\ g_2 \downarrow & & \downarrow g_1 \\ Y_2 & \xrightarrow{\beta} & Y_1 \end{array}$$

e g_1 é K -injetivo, então g_2 é também K -injetivo.

- (v) *Se $g_1 : X_1 \rightarrow Y_1$ e $g_2 : X_2 \rightarrow Y_2$ são morfismos K -injetivos, então o morfismo produto $g_1 \times g_2 : X_1 \times X_2 \rightarrow Y_1 \times Y_2$ é também K -injetivo.*

Em suma, a classe $K\text{Inj} \subseteq \text{Mor}(\mathcal{C})$ formada por todos os morfismos K -injetivos contém todos os isomorfismos e é fechada por composições, retrações, pullbacks e produtos.

Demonstração. (i) Suponha que $g : X \rightarrow Y$ seja um isomorfismo e considere o problema de levantamento abaixo,

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ i \downarrow & & \downarrow g \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array}$$

onde i é um morfismo qualquer pertencente à classe K . Sendo g um isomorfismo, existe o morfismo inverso $g^{-1} : Y \rightarrow X$. Afirmamos então que o morfismo composto $g^{-1} \circ \beta : B \rightarrow X$ é a solução procurada para o problema acima, ou seja, que ele faz comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ i \downarrow & \nearrow g^{-1} \circ \beta & \downarrow g \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array}$$

A comutatividade do triângulo inferior é imediata, enquanto a comutatividade do superior segue das igualdades

$$\begin{aligned} g^{-1} \circ \beta \circ i &= g^{-1} \circ g \circ \alpha \\ &= \text{id}_X \circ \alpha \\ &= \alpha. \end{aligned}$$

(ii) Considere o problema de levantamento abaixo,

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ i \downarrow & & \downarrow g_2 \circ g_1 \\ B & \xrightarrow{\beta} & Z \end{array}$$

onde i é um morfismo qualquer pertence à classe K . A comutatividade acima nos permite obter o outro problema de levantamento abaixo, o qual admite uma solução $\varphi : B \rightarrow Y$ graças à injetividade do morfismo g_2 .

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{g_1 \circ \alpha} & Y \\ i \downarrow & \nearrow \varphi & \downarrow g_2 \\ B & \xrightarrow{\beta} & Z \end{array} \quad (1.17)$$

A comutatividade do triângulo superior em (1.17) nos permite montar o problema de levantamento abaixo, o qual admite uma solução $\psi : B \rightarrow X$ graças à injetividade do morfismo g_1 .

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ i \downarrow & \nearrow \psi & \downarrow g_1 \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y \end{array} \quad (1.18)$$

Afirmamos que ψ é a solução procurada para o problema de levantamento considerado inicialmente, ou seja, que ele faz comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X \\ i \downarrow & \nearrow \psi & \downarrow g_2 \circ g_1 \\ B & \xrightarrow{\beta} & Z \end{array}$$

A comutatividade do triângulo superior segue diretamente de (1.18), enquanto a comutatividade do diagrama inferior segue da sequência de igualdades

$$\begin{aligned} g_2 \circ g_1 \circ \psi &= g_2 \circ \varphi && \text{(por (1.18))} \\ &= \beta. && \text{(por (1.17))} \end{aligned}$$

(iii) Sendo g_2 um retrato de g_1 , existe um diagrama comutativo como mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccccc} & & \text{id}_{X_2} & & \\ & \curvearrowright & & \curvearrowleft & \\ X_2 & \xrightarrow{s_1} & X_1 & \xrightarrow{r_1} & X_2 \\ g_2 \downarrow & & \downarrow g_1 & & \downarrow g_2 \\ Y_2 & \xrightarrow{s_2} & Y_1 & \xrightarrow{r_2} & Y_2 \\ & \curvearrowleft & & \curvearrowright & \\ & & \text{id}_{Y_2} & & \end{array} \quad (1.19)$$

Considere então o problema de levantamento abaixo,

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X_2 \\ i \downarrow & & \downarrow g_2 \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y_2 \end{array}$$

onde i é um morfismo qualquer pertence à classe K . Usando a comutatividade do quadrado acima e de (1.19) montamos o problema de levantamento abaixo, o qual admite uma solução $\varphi : B \rightarrow X_1$ graças à injetividade de g_1 .

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{s_1 \circ \alpha} & X_1 \\ i \downarrow & \nearrow \varphi & \downarrow g_1 \\ B & \xrightarrow{s_2 \circ \beta} & Y_1 \end{array} \quad (1.20)$$

Afirmamos então que o morfismo $r_1 \circ \varphi : B \rightarrow X_2$ é a solução procurada para o problema de levantamento considerado inicialmente, ou seja, que o diagrama mostrado abaixo é comutativo.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X_2 \\ i \downarrow & \nearrow r_1 \circ \varphi & \downarrow g_2 \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y_2 \end{array}$$

De fato, no caso do triângulo superior temos as igualdades

$$\begin{aligned} r_1 \circ \varphi \circ i &= r_1 \circ s_1 \circ \alpha && \text{(por (1.20))} \\ &= \text{id}_{X_2} \circ \alpha && \text{(por (1.19))} \\ &= \alpha; \end{aligned}$$

enquanto no caso do triângulo inferior temos as igualdades

$$\begin{aligned} g_2 \circ r_1 \circ \varphi &= r_2 \circ g_1 \circ \varphi && \text{(por (1.19))} \\ &= r_2 \circ s_2 \circ \beta && \text{(por (1.20))} \\ &= \text{id}_{Y_2} \circ \beta && \text{(por (1.19))} \\ &= \beta. \end{aligned}$$

(iv) Considere o problema de levantamento abaixo,

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\gamma} & X_2 \\ i \downarrow & & \downarrow g_2 \\ B & \xrightarrow{\delta} & Y_2 \end{array}$$

onde i é um morfismo qualquer pertence à classe K . A estratégia é usarmos a propriedade universal do pullback para obtermos um morfismo do tipo $B \rightarrow X_2$ que resolva o problema de levantamento acima, mas para isso precisamos antes de morfismos dos tipos $B \rightarrow X_1$ e $B \rightarrow Y_2$ satisfazendo certas condições de comutatividade. No segundo caso podemos utilizar o morfismo $\delta : B \rightarrow Y_2$, mas para o primeiro caso precisamos utilizar a injetividade de g_1 . Montamos então o problema de levantamento indicado abaixo, o qual admite uma solução $\varphi : B \rightarrow X_1$ graças à injetividade de g_1 mencionada.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha \circ \gamma} & X_1 \\ i \downarrow & \nearrow \varphi & \downarrow g_1 \\ B & \xrightarrow{\beta \circ \delta} & Y_1 \end{array} \quad (1.21)$$

A comutatividade do triângulo inferior em (1.21) diz precisamente que a “camada externa” do diagrama abaixo é comutativa, portanto a propriedade universal do pullback nos fornece um único morfismo $\psi : B \rightarrow X_2$ fazendo comutar o diagrama todo.

$$\begin{array}{ccccc} B & & \varphi & & \\ & \searrow \psi & & \searrow & \\ & X_2 & \xrightarrow{\alpha} & X_1 & \\ \delta \searrow & \downarrow g_2 & & \downarrow g_1 & \\ & Y_2 & \xrightarrow{\beta} & Y_1 & \end{array} \quad (1.22)$$

Vamos mostrar que ψ é a solução procurada para o problema de levantamento inicial, ou seja, que o diagrama mostrado abaixo é comutativo.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\gamma} & X_2 \\ i \downarrow & \nearrow \psi & \downarrow g_2 \\ B & \xrightarrow{\delta} & Y_2 \end{array}$$

A comutatividade do triângulo inferior segue diretamente de (1.22). Já a comutatividade do triângulo superior é um pouco mais sutil. Note primeiramente que, graças à propriedade universal do pullback, γ é o único morfismo do tipo $A \rightarrow X_2$ que faz comutar o diagrama mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccccc} A & & \alpha \circ \gamma & & \\ & \searrow \gamma & & \searrow & \\ & X_2 & \xrightarrow{\alpha} & X_1 & \\ g_2 \circ \gamma \searrow & \downarrow g_2 & & \downarrow g_1 & \\ & Y_2 & \xrightarrow{\beta} & Y_1 & \end{array}$$

Veja, entretanto, que o morfismo composto $\psi \circ i : A \rightarrow X_2$ também satisfaz tais condições de comutatividade, já que por um lado

$$\begin{aligned}\alpha \circ \psi \circ i &= \varphi \circ i && \text{(por (1.22))} \\ &= \alpha \circ \gamma; && \text{(por (1.21))}\end{aligned}$$

enquanto por outro

$$\begin{aligned}g_2 \circ \psi \circ i &= \delta \circ i && \text{(por (1.22))} \\ &= g_2 \circ \gamma,\end{aligned}$$

onde a última igualdade segue da comutatividade do próprio diagrama que representa o problema de levantamento considerado inicialmente. Ora, segue então da unicidade na propriedade universal do pullback que devemos ter a igualdade $\psi \circ i = \gamma$, como queríamos mostrar.

(v) Considere as projeções canônicas $p_1 : X_1 \times X_2 \rightarrow X_1$, $p_2 : X_1 \times X_2 \rightarrow X_2$, $q_1 : Y_1 \times Y_2 \rightarrow Y_1$ e $q_2 : Y_1 \times Y_2 \rightarrow Y_2$ aos respectivos produtos. Dado um problema de levantamento como abaixo,

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X_1 \times X_2 \\ i \downarrow & & \downarrow g_1 \times g_2 \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y_1 \times Y_2 \end{array}$$

onde i é um morfismo pertencente à classe K , obtemos primeiramente o problema de levantamento abaixo, o qual admite uma solução graças à injetividade de g_1 ;

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{p_1 \circ \alpha} & X_1 \\ i \downarrow & \nearrow \varphi & \downarrow g_1 \\ B & \xrightarrow{q_1 \circ \beta} & Y_1 \end{array} \quad (1.23)$$

e também o problema de levantamento abaixo, o qual por sua vez admite uma solução graças à injetividade de g_2 .

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{p_2 \circ \alpha} & X_2 \\ i \downarrow & \nearrow \psi & \downarrow g_2 \\ B & \xrightarrow{q_2 \circ \beta} & Y_2 \end{array} \quad (1.24)$$

Afirmamos que o morfismo induzido $(\varphi, \psi) : B \rightarrow X_1 \times X_2$ é a solução procurada para o problema de levantamento, ou seja, que o diagrama mostrado abaixo é comutativo.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & X_1 \times X_2 \\ i \downarrow & \nearrow (\varphi, \psi) & \downarrow g_1 \times g_2 \\ B & \xrightarrow{\beta} & Y_1 \times Y_2 \end{array}$$

Note que pela unicidade na propriedade universal do produto, a comutatividade do triângulo superior é equivalente à validade das igualdades

$$\begin{cases} p_1 \circ (\varphi, \psi) \circ i = p_1 \circ \alpha, \\ p_2 \circ (\varphi, \psi) \circ i = p_2 \circ \alpha. \end{cases}$$

No primeiro caso temos a sequência de igualdades

$$\begin{aligned} p_1 \circ (\varphi, \psi) \circ i &= \varphi \circ i \\ &= p_1 \circ . \end{aligned} \quad (\text{por (1.24)})$$

A validade da segunda igualdade segue de um raciocínio completamente análogo. Já no caso do triângulo inferior, a propriedade universal do produto mais uma vez garante que sua comutatividade é equivalente à validade das duas igualdades

$$\begin{cases} q_1 \circ g_1 \times g_2 \circ (\varphi, \psi) = q_1 \circ \beta, \\ q_2 \circ g_1 \times g_2 \circ (\varphi, \psi) = q_2 \circ \beta. \end{cases}$$

No caso da primeira igualdade temos

$$\begin{aligned} q_1 \circ g_1 \times g_2 \circ (\varphi, \psi) &= g_1 \circ p_1 \circ (\varphi, \psi) \\ &= g_1 \circ \varphi \\ &= q_1 \circ \beta. \end{aligned} \quad (\text{por (1.23)})$$

A validade da segunda igualdade segue também por um raciocínio análogo. ■

1.3.2 Sistemas de fatoração fracos

Usaremos agora os morfismos projetivos e injetivos introduzidos na seção anterior para definirmos a noção de um sistema de fatoração fraco. As propriedades estudadas anteriormente nos fornecem imediatamente as principais propriedades dos sistemas de fatoração fracos. Por fim, veremos a relação de tais sistemas com estruturas de modelos, o que nos permitirá deduzir algumas propriedades de preservação de cofibrações e fibrações que serão usadas constantemente ao longo do texto.

1.3.9 Definição. Um **sistema de fatoração fraco** em uma categoria \mathbf{C} consiste de um par (L, R) , onde $L, R \subseteq \text{Mor}(\mathbf{C})$ são duas classes de morfismos, satisfazendo as seguintes condições:

- (i) Todo morfismo $f \in \text{Mor}(\mathbf{C})$ pode ser escrito na forma $f = f_L \circ f_R$ com $f_L \in L$ e $f_R \in R$;

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{f_L \in L} & Y & \xrightarrow{f_R \in R} & Z \\ & \searrow & & \nearrow & \\ & & f & & \end{array} \quad (1.25)$$

- (ii) L consiste precisamente dos morfismos R -projetivos de \mathbf{C} , ou seja, aqueles que satisfazem a propriedade de levantamento à esquerda com relação a R ;
- (iii) R consiste precisamente dos morfismos L -injetivos de \mathbf{C} , ou seja, aqueles que satisfazem a propriedade de levantamento à direita com relação a L .

O resultado abaixo coleta as principais propriedades que os sistemas de fatoração fracos satisfazem, sendo na verdade uma consequência das propriedades satisfeitas por morfismos projetivos e injetivos.

1.3.10 Proposição. *Sejam \mathbf{C} uma categoria e (L, R) um sistema de fatoração fraco em \mathbf{C} . Valem as seguintes propriedades:*

1. Ambas as classes contêm todos os isomorfismos de \mathbf{C} e são fechadas por composições e retratos.

2. A classe L é fechada por pushouts e coprodutos.

3. A classe R é fechada por pullbacks e produtos.

Demonstração. As afirmações a respeito de L seguem do fato de L ser a classe dos morfismos R -projetivos de \mathbf{C} e das propriedades demonstradas na Proposição 1.3.4, enquanto as propriedades de R seguem do fato de R ser a classe dos morfismos L -injetivos de \mathbf{C} e das propriedades demonstradas na Proposição 1.3.8. ■

Veremos agora como sistemas de fatoração fracos aparecem relacionados a estruturas de modelos. São estes os sistemas nos quais estaremos realmente interessados. Antes de enunciarmos o resultado em si, é um bom momento para introduzirmos um lema simples e puramente categórico, porém bastante útil no estudo de categorias de modelos e de sistemas de fatoração fracos em geral.

1.3.11 Lema (Argumento do retrato). *Suponha que um morfismo $f : X \rightarrow Y$ em uma categoria qualquer \mathbf{C} possa ser fatorado na forma mostrada abaixo.*

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ & \searrow i & \nearrow p \\ & Z & \end{array}$$

1. Se f satisfaz a propriedade de levantamento à esquerda com relação a p , então f é um retrato de i .
2. Se f satisfaz a propriedade de levantamento à direita com relação a i , então f é um retrato de p .

Demonstração. 1. Veja que é suficiente construirmos um morfismo $\varphi : Y \rightarrow Z$ que faça comutar o diagrama mostrado abaixo,

$$\begin{array}{ccccc} & & \text{id}_X & & \\ & \nearrow & & \searrow & \\ X & \xrightarrow{\text{id}_X} & X & \xrightarrow{\text{id}_X} & X \\ f \downarrow & & \downarrow i & & \downarrow f \\ Y & \xrightarrow{\varphi} & Z & \xrightarrow{p} & Y \\ & \searrow & & \nearrow & \\ & & \text{id}_Y & & \end{array}$$

ou seja, φ deve satisfazer as igualdades $\varphi \circ f = \text{id}_X$ e $p \circ \varphi = \text{id}_Y$. Ora, basta então tomarmos φ como sendo uma solução qualquer para o problema de levantamento mostrado abaixo,

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{i} & Z \\ f \downarrow & \nearrow \varphi & \downarrow p \\ Y & \xrightarrow{\text{id}_Y} & Y \end{array}$$

a qual certamente existe pois f por hipótese satisfaz a condição de levantamento à esquerda com relação a p .

2. O leitor já deve imaginar que essa demonstração é dual à anterior. Note que neste caso basta construirmos um morfismo $\psi : Z \rightarrow X$ que faça comutar o diagrama mostrado abaixo,

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \text{id}_X & & \\
 & \curvearrowright & & \curvearrowleft & \\
 X & \xrightarrow{i} & Z & \dashrightarrow & X \\
 f \downarrow & & \downarrow p & & \downarrow f \\
 Y & \xrightarrow{\text{id}_Y} & Y & \xrightarrow{\text{id}_Y} & Y \\
 & \curvearrowleft & & \curvearrowright & \\
 & & \text{id}_Y & &
 \end{array}$$

ou seja, ψ deve satisfazer as igualdades $\psi \circ i = \text{id}_X$ e $f \circ \psi = p$. Tomamos ψ como sendo então uma solução qualquer para o problema de levantamento abaixo,

$$\begin{array}{ccc}
 X & \xrightarrow{\text{id}_X} & X \\
 i \downarrow & \nearrow \psi & \downarrow f \\
 Z & \xrightarrow{p} & Y
 \end{array}$$

a qual existe pois f satisfaz a condição de levantamento à direita com relação a i por hipótese. ■

Usando o lema acima podemos demonstrar sem dificuldades que toda estrutura de modelos dá origem a dois sistemas de fatoração fracos envolvendo cofibrações e fibrações.

1.3.12 Proposição. *Seja $(\mathbf{M}, \mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F})$ seja uma categoria de modelos. As seguintes afirmações são verdadeiras:*

1. $(\mathcal{C} \cap \mathcal{W}, \mathcal{F})$ define um sistema de fatoração fraco em \mathbf{M} ;
2. $(\mathcal{C}, \mathcal{F} \cap \mathcal{W})$ define um sistema de fatoração fraco em \mathbf{M} .

Demonstração. 1. O axioma de fatoração (M5) garante que todo morfismo de \mathbf{M} pode ser fatorado como uma cofibração trivial seguida de uma fibração, portanto o par $(\mathcal{C} \cap \mathcal{W}, \mathcal{F})$ satisfaz a primeira condição na definição de sistema de fatoração fraco.

Resta mostrarmos agora as condições de projetividade e injetividade. O axioma de levantamento (M4) garante que toda cofibração trivial é projetiva com relação à classe das fibrações, ou seja, vale a inclusão $\mathcal{C} \cap \mathcal{W} \subseteq \mathcal{F}\text{Proj}$, mas precisamos mostrar que a inclusão reversa também é válida. Suponha então que $f : X \rightarrow Y$ seja um morfismo \mathcal{F} -projetivo, e considere uma fatoração

$$f = p \circ i,$$

onde $i : X \xrightarrow{\sim} Z$ é uma cofibração trivial, e $p : Z \rightarrow Y$ é uma fibração. A hipótese de projetividade garante que f satisfaça a condição de levantamento à esquerda com relação a p , logo f é um retrato de i pelo Argumento do Retrato (Lema 1.3.11) e, portanto, uma cofibração trivial também pelo axioma de retração (M3).

O axioma de levantamento (M4) também mostra que vale a inclusão $\mathcal{F} \subseteq (\mathcal{C} \cap \mathcal{W})\text{Inj}$. Agora, seja $f : X \rightarrow Y$ um morfismo injetivo com relação à classe das cofibrações triviais. Se $f = p \circ i$ é uma fatoração como acima, então f satisfaz a condição de levantamento à direita com relação a i , logo f é um retrato de p pelo argumento do retrato novamente e, portanto, uma fibração também pelo axioma de retração (M3).

2. O axioma de fatoração (M5) garante que todo morfismo de f possa ser fatorado como uma cofibração seguida de uma fibração trivial, portanto o par $(\mathcal{C}, \mathcal{F} \cap \mathcal{W})$ satisfaz a primeira condição na definição de sistema de fatoração fraco.

Vejamos agora as condições de projetividade e injetividade. O axioma de levantamento nos permite concluir que toda cofibração é projetiva com relação à classe de fibrações triviais. Reciprocamente, suponha que $f : X \rightarrow Y$ seja $(\mathcal{F} \cap \mathcal{W})$ -projetivo. Podemos fatorar tal morfismo como $f = q \circ j$, onde $j : X \rightarrow Z$ é uma cofibração, e $q : Z \xrightarrow{\sim} Y$ é uma fibração trivial. Ora, como f satisfaz a propriedade de levantamento à esquerda com relação a q , segue do argumento do retrato que f é um retrato de j e, portanto, uma cofibração.

O axioma de levantamento também nos diz que toda fibração trivial é injetiva com relação à classe das cofibrações. Reciprocamente, se $f : X \rightarrow Y$ é \mathcal{C} -injetivo, podemos considerar uma fatoração $f = q \circ j$ exatamente como acima e usar a hipótese de injetividade juntamente com o argumento do retrato para concluirmos que f é um retrato de q e, portanto, uma fibração trivial também. ■

1.3.13 Observação. É comum dizer que os resultados da Proposição 1.3.12 mostram que a estrutura de uma categoria modelo é *sobredeterminada*, pois o conhecimento de duas das três classes de morfismos \mathcal{W} , \mathcal{C} e \mathcal{F} nos permite determinar totalmente a terceira. De fato, se conhecemos as classes \mathcal{W} e \mathcal{C} , então conhecemos também a classe das cofibrações triviais $\mathcal{C} \cap \mathcal{W}$, e da proposição anterior sabemos que \mathcal{F} pode ser descrita então como a classe dos morfismos que satisfazem a propriedade de levantamento à direita com relação a $\mathcal{C} \cap \mathcal{W}$. Analogamente, se conhecemos as classes \mathcal{W} e \mathcal{F} , então conhecemos a classe das fibrações triviais $\mathcal{F} \cap \mathcal{W}$, e pelo resultado anterior recuperamos \mathcal{C} como a classe dos morfismos que satisfazem a propriedade de levantamento à esquerda com relação a $\mathcal{F} \cap \mathcal{W}$.

Essa propriedade de sobredeterminação é por vezes utilizada para *definirmos* uma estrutura modelo completa partindo apenas de alguns componentes de sua estrutura. Um exemplo onde esse fenômeno ocorre, e que abordaremos em detalhes mais tarde, é no estudo das categorias modelo *cofibrantemente geradas*, onde uma estrutura modelo é gerada a partir de uma coleção de morfismos que queremos considerar como cofibrações triviais. Um exemplo concreto é a estrutura modelo usual na categoria **Top**, onde a classe de cofibrações triviais inicial usada para gerar o resto da estrutura de modelos é o dos mapas $D^n \hookrightarrow D^n \times I$ incluindo o disco D^n na base inferior do cilindro associado.

Aplicando as propriedades gerais demonstradas na Proposição 1.3.10 aos sistemas explícitos construídos na Proposição 1.3.12 obtemos as propriedades de preservação abaixo válidas em uma categoria de modelos qualquer.

1.3.14 Corolário. *Em uma categoria de modelos qualquer valem as seguintes propriedades:*

1. *Todo isomorfismo é tanto uma cofibração trivial quanto uma fibração trivial.*
2. *Cofibrações e cofibrações triviais são preservadas por composições, retrações, pushouts e coprodutos.*
3. *Fibrações e fibrações triviais são preservadas por composições, retrações, pullback e produtos.*

Por fim, temos o resultado simples abaixo mostrando como “detectar” equivalências fracas usando outras classes de morfismos.

1.3.15 Lema. *Em uma categoria modelo, um morfismo $f : X \rightarrow Y$ é uma equivalência fraca se, e somente se, ele pode ser fatorado como uma cofibração trivial seguida de uma fibração trivial.*

Demonstração. Uma das implicações é simples: se f pode ser fatorado na forma descrita no enunciado, então f é em particular a composição de duas equivalências fracas e, portanto, uma equivalência fraca também. Reciprocamente, se f é uma equivalência fraca, pelo axioma de

fatoração podemos encontrar uma cofibração trivial $i : X \xrightarrow{\sim} \widehat{X}$ e uma fibração $p : \widehat{X} \rightarrow Y$ tais que $f = p \circ i$. Ora, como f e i são equivalências fracas, segue do axioma 2-de-3 que p também o é, ou seja, p é uma fibração trivial, e a fatoração $f = p \circ i$ exhibe f como uma cofibração trivial seguida de uma fibração trivial. ■

Encerramos essa subseção mostrando como os axiomas de uma categoria de modelos podem também ser enunciados em termos de sistemas de fatoração fracos.

1.3.16 Proposição. *Sejam \mathbf{M} uma categoria bicompleta e $\mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F} \subseteq \text{Mor}(\mathbf{M})$ três classes de morfismos. Suponha ainda que a classe \mathcal{W} satisfaça as seguintes condições:*

- (i) \mathcal{W} contém todos os isomorfismos;
- (ii) \mathcal{W} satisfaz a propriedade 2-de-3.

Nessas condições, as seguintes afirmações são equivalentes:

1. $(\mathbf{M}, \mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F})$ é uma categoria de modelos;
2. $(\mathcal{C} \cap \mathcal{W}, \mathcal{F})$ e $(\mathcal{C}, \mathcal{F} \cap \mathcal{W})$ são sistemas de fatoração fracos em \mathbf{M} .

Demonstração. A implicação $1 \implies 2$ é precisamente o conteúdo da Proposição 1.3.12.

Reciprocamente, suponha que $(\mathcal{C} \cap \mathcal{W}, \mathcal{F})$ e $(\mathcal{C}, \mathcal{F} \cap \mathcal{W})$ definam sistemas de fatoração fracos em \mathbf{M} , e vamos verificar então que os axiomas de uma categoria modelo são satisfeitos.

O axioma de completude (M1) e o axioma 2-de-3 (M2) seguem das hipóteses impostas sobre \mathcal{W} no próprio enunciado. Os axiomas de lavantamento (M4) e de fatoração (M5) seguem diretamente das das propriedades que definem os sistemas de fatoração fracos $(\mathcal{C} \cap \mathcal{W}, \mathcal{F})$ e $(\mathcal{C}, \mathcal{F} \cap \mathcal{W})$.

Resta apenas verificarmos então o axioma de retração (M3). Note que a validade deste para as classes de cofibrações e fibrações segue das propriedades demonstradas na Proposição 1.3.10. Falta então mostrarmos que a classe das equivalências fracas é também fechada por retrações, e isso será um tanto mais emocionante. Suponha que o morfismo $f : X \rightarrow Y$ seja retração de uma equivalência fraca $g : A \xrightarrow{\sim} B$ como mostrado no diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \text{id}_X & & \\
 & \nearrow & & \searrow & \\
 X & \xrightarrow{s_1} & A & \xrightarrow{r_1} & X \\
 f \downarrow & & \downarrow g & & \downarrow f \\
 Y & \xrightarrow{s_2} & B & \xrightarrow{r_2} & Y \\
 & \nwarrow & & \nearrow & \\
 & & \text{id}_Y & &
 \end{array} \tag{1.26}$$

Suponha inicialmente que f pertença à classe \mathcal{F} , de forma que nosso objetivo é então mostrar que nesse caso necessariamente temos $f \in \mathcal{F} \cap \mathcal{W}$. Nossa estratégia é então exibir f como o retrato de um outro morfismo que pertença à classe $\mathcal{F} \cap \mathcal{W}$, a qual sabemos ser fechada por retratos pela Proposição 1.3.10.

Aplicando qualquer um dos dois sistemas de fatoração fraca ao morfismo g juntamente com a propriedade 2-de-3 podemos escrever $g = p \circ i$, onde $i : A \rightarrow C$ pertence a $\mathcal{C} \cap \mathcal{W}$ e $p : C \rightarrow B$ pertence a $\mathcal{F} \cap \mathcal{W}$. Afirmamos que f é um retrato de p . Basta para isso construirmos um morfismo

$\theta : C \rightarrow X$ fazendo comutar o diagrama abaixo,

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \text{id}_X & & \\
 & \nearrow & & \searrow & \\
 X & \xrightarrow{i \circ s_1} & C & \dashrightarrow & X \\
 f \downarrow & & \downarrow p & & \downarrow f \\
 Y & \xrightarrow{s_2} & B & \xrightarrow{r_2} & Y \\
 & \nwarrow & & \nearrow & \\
 & & \text{id}_Y & &
 \end{array}$$

ou seja, θ deve satisfazer as igualdades $f \circ \theta = p \circ r_2$ e $\theta \circ i \circ s_1 = \text{id}_X$. Basta então tomarmos θ como uma solução qualquer do problema de levantamento abaixo, a qual certamente existe pois $i \in \mathcal{C} \cap \mathcal{W}$ e $p \in \mathcal{F}$.

$$\begin{array}{ccc}
 A & \xrightarrow{r_1} & X \\
 i \downarrow & \nearrow \theta & \downarrow f \\
 C & \xrightarrow{r_2 \circ p} & Y
 \end{array}$$

Sendo f um retrato de p , segue da Proposição 1.3.10 que $f \in \mathcal{F} \cap \mathcal{W}$ como queríamos mostrar.

Voltemos agora ao caso geral onde $f : X \rightarrow Y$ é um morfismo qualquer. Utilizando o sistema de fatoração fraca $(\mathcal{C} \cap \mathcal{W}, \mathcal{F})$ podemos escrever $f = q \circ j$, onde $j : X \rightarrow Z$ pertence a $\mathcal{C} \cap \mathcal{W}$ e $q : Z \rightarrow Y$ pertence a \mathcal{F} . Note que a propriedade 2-de-3 satisfeita por \mathcal{W} garante que mostrarmos que $f \in \mathcal{W}$ é equivalente a mostrarmos que $q \in \mathcal{W}$. Além disso, como já temos $q \in \mathcal{F}$ de antemão, segue do caso anterior que, a fim de concluirmos que $q \in \mathcal{W}$ também, basta mostrarmos que q é um retrato de um morfismo de \mathcal{W} ; e é isso que faremos agora.

Lembrando que a categoria \mathcal{C} em questão é por hipótese bicompleta, podemos em particular formar o pushout do diagrama

$$\begin{array}{ccc}
 X & \xrightarrow{s_1} & A \\
 j \downarrow & \wr & \\
 Z & &
 \end{array}$$

de forma a obtermos o quadrado comutativo mostrado abaixo. Como $j \in \mathcal{C} \cap \mathcal{W}$, segue da Proposição 1.3.10 que o morfismo J que aparece no diagrama de pushout abaixo pertence à classe $\mathcal{C} \cap \mathcal{W}$ também.

$$\begin{array}{ccc}
 X & \xrightarrow{s_1} & A \\
 j \downarrow & & \downarrow J \\
 Z & \xrightarrow{S} & P
 \end{array} \tag{1.27}$$

Uma primeira aplicação da propriedade universal do pushout fornece um morfismo $\varphi : P \rightarrow Z$ fazendo comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccccc}
 X & \xrightarrow{s_1} & A & & \\
 j \downarrow & & \downarrow J & \searrow j \circ r_1 & \\
 Z & \xrightarrow{S} & P & \dashrightarrow \varphi & Z \\
 & \searrow & & \nearrow \text{id}_Z & \\
 & & & &
 \end{array}$$

Agora, uma segunda aplicação da propriedade universal do pushout nos fornece o morfismo $\psi : P \rightarrow B$ fazendo comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccc}
 X & \xrightarrow{s_1} & A \\
 j \downarrow & & \downarrow J \\
 Z & \xrightarrow{S} & P \\
 & \searrow s_2 \circ q & \swarrow \psi \\
 & & B
 \end{array}$$

(Note: A curved arrow labeled g also goes from A to B .)

Note que esse morfismo ψ pertence à classe \mathcal{W} devido à propriedade 2-de-3, já que $g, J \in \mathcal{W}$ e temos a igualdade $\psi \circ J = g$.

Os morfismos envolvendo o pushout construídos acima podem então ser combinados no diagrama comutativo mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \text{id}_X & & \\
 & \curvearrowright & & \curvearrowleft & \\
 X & \xrightarrow{s_1} & A & \xrightarrow{r_1} & X \\
 j \downarrow & & \downarrow J & & \downarrow j \\
 Z & \xrightarrow{S} & P & \xrightarrow{\varphi} & Z \\
 q \downarrow & & \downarrow \psi & & \downarrow q \\
 Y & \xrightarrow{s_2} & B & \xrightarrow{r_2} & Y \\
 & \curvearrowleft & & \curvearrowright & \\
 & & \text{id}_Y & &
 \end{array}$$

(Note: A curved arrow labeled f goes from Z to Y .)

Temos que justificar ainda de alguma forma a comutatividade do quadrado inferior direito, mas vamos assumir isso momentaneamente e dar continuidade ao argumento. Como o morfismo φ por construção satisfaz a igualdade $\varphi \circ S = \text{id}_Z$, os dois quadrados comutativos inferiores exibem o morfismo $q : Z \rightarrow Y$ como um retrato do morfismo $\psi : P \rightarrow B$, o qual pertence à classe \mathcal{W} , como queríamos mostrar.

A fim de fecharmos a lacuna restante no argumento acima, note que a comutatividade do quadrado inferior direito segue imediatamente da unicidade na propriedade universal do pushout, já que os morfismos $q \circ \varphi, r_2 \circ \psi : P \rightarrow Y$ ambos fazem comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccc}
 X & \xrightarrow{s_1} & A \\
 j \downarrow & & \downarrow J \\
 Z & \xrightarrow{S} & P \\
 & \searrow q & \swarrow \psi \\
 & & Y
 \end{array}$$

(Note: A curved arrow labeled $f \circ r_1$ goes from A to Y . Inside the triangle, two arrows from P to Y are labeled $q \circ \varphi$ and $r_2 \circ \psi$.)

■

1.3.3 Fatorações funtoriais

Nessa subseção formalizamos a noção de uma fatoração funtorial de morfismos em uma categoria. O conceito de fatoração funtorial é um tanto peculiar: na teoria ele oferece uma vantagem para descrevermos certas construções, mas na prática o processo de fatoração funtorial pode não ser necessariamente o mais simples ou o mais vantajoso em uma dada situação.

Antes de definirmos uma fatoração propriamente dita, precisamos introduzir um outro tipo de categoria de setas relacionado à categoria $\text{Arr}(\mathcal{C})$ introduzida anteriormente. Dada uma categoria

C qualquer, considere a categoria $\mathbf{C}^{[2]}$ cujos objetos são pares (g, f) de *setas componíveis* em \mathbf{C} , ou seja, morfismos satisfazendo a condição $\text{dom}(g) = \text{cod}(f)$, situação esta que também representaremos por um diagrama como abaixo.

$$\begin{array}{c} X \\ f \downarrow \\ Y \\ g \downarrow \\ Z \end{array}$$

Os morfismos em $\mathbf{C}^{[2]}$, como esperado, são triplas de morfismos horizontais fazendo comutar os dois quadrados evidentes. Mais precisamente, dados dois pares de setas componíveis (g, f) e (g', f') , um morfismo do tipo $(g, f) \rightarrow (g', f')$ em $\mathbf{C}^{[2]}$ é dado por uma tripla de morfismos

$$(\alpha : \text{dom}(f) \rightarrow \text{dom}(f'), \beta : \text{cod}(f) \rightarrow \text{cod}(f'), \gamma : \text{cod}(g) \rightarrow \text{cod}(g'))$$

fazendo comutar o diagrama a seguir.

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{\alpha} & X' \\ f \downarrow & & \downarrow f' \\ Y & \xrightarrow{\beta} & Y' \\ g \downarrow & & \downarrow g' \\ Z & \xrightarrow{\gamma} & Z' \end{array} \quad (1.28)$$

A composição de morfismos é análoga àquela existente na categoria $\text{Arr}(\mathbf{C})$: colamos os dois pares de quadrados comutativos ao longo da “aresta” comum para obtermos um terceiro par de quadrados comutativos representando a composição dos dois morfismos entre setas componíveis.

1.3.17 Observação. A notação $\mathbf{C}^{[2]}$ escolhida para denotar a categoria introduzida acima não é por acaso. Lembre-se que todo conjunto parcialmente ordenado pode ser encarado como uma categoria. Quando fazemos isso com o conjunto parcialmente ordenado $\{0 \leq 1 \leq 2\}$, obtemos uma categoria comumente denotada por $[2]$, e que pode ser visualizada pictoricamente da forma abaixo (omitindo os morfismos identidade).

$$\begin{array}{ccccc} 0 & \xrightarrow{0 \leq 1} & 1 & \xrightarrow{1 \leq 2} & 2 \\ & \searrow & & \nearrow & \\ & & 0 \leq 2 & & \end{array}$$

A variante da categoria de setas que introduzimos anteriormente é então *precisamente* a categoria de funtores do tipo $[2] \rightarrow \mathbf{C}$, o que justifica o uso da notação $\mathbf{C}^{[2]}$. Note também que, se no lugar de $[2]$ considerarmos a categoria $[1]$ obtida a partir do conjunto parcialmente ordenado $0 \leq 1$, a qual está representada abaixo,

$$0 \xrightarrow{0 \leq 1} 1$$

então a categoria $\mathbf{C}^{[1]}$ formada por funtores do tipo $[1] \rightarrow \mathbf{C}$ é exatamente a categoria de setas $\text{Arr}(\mathbf{C})$ introduzida anteriormente.

Lembremos que a categoria de setas $\text{Arr}(\mathbf{C})$ vem equipada com os funtores domínio e codomínio $\text{dom}, \text{cod} : \text{Arr}(\mathbf{C}) \rightarrow \mathbf{C}$. Analogamente, a categoria de setas componíveis $\mathbf{C}^{[2]}$ vem equipada com três funtores $d_0, d_1, \text{comp} : \mathbf{C}^{[2]} \rightarrow \text{Arr}(\mathbf{C})$ que vamos agora definir. O funtor d_0 nos objetos registra o primeiro morfismo de um par componível, ou seja, $d_0(g, f) := f$, o que podemos visualizar da forma indicada a seguir.

$$\begin{array}{ccc} X & & X \\ f \downarrow & \xrightarrow{d_0} & f \downarrow \\ Y & & Y \\ g \downarrow & & \\ Z & & \end{array}$$

Já nos morfismos, dado um morfismo $(\alpha, \beta, \gamma) : (g, f) \rightarrow (g', f')$ na categoria $\mathbf{C}^{[2]}$, definimos $d_0(\alpha, \beta, \gamma) := (\alpha, \beta)$. Visualmente, d_0 seleciona o primeiro quadrado comutativo do par de quadrados comutativos que representa o morfismo (α, β, γ) em $\mathbf{C}^{[2]}$.

$$\begin{array}{ccc} X \xrightarrow{\alpha} X' & & X \xrightarrow{\alpha} X' \\ f \downarrow & \searrow f' & f \downarrow \searrow f' \\ Y \xrightarrow{\beta} Y' & \xrightarrow{d_0} & Y \xrightarrow{\beta} Y' \\ g \downarrow & \searrow g' & g \downarrow \searrow g' \\ Z \xrightarrow{\gamma} Z' & & Z \xrightarrow{\gamma} Z' \end{array}$$

O funtor d_1 é análogo: nos objetos ele seleciona o segundo morfismo do par componível, logo $d_1(g, f) := g$, e nos morfismos ele seleciona o segundo quadrado comutativo, de forma que $d_1(\alpha, \beta, \gamma) := (\beta, \gamma)$. Já o funtor $\text{comp} : \mathbf{C}^{[2]} \rightarrow \text{Arr}(\mathbf{C})$, como o nome muito sugere, é dado pela composição das duas setas componíveis. Dessa forma, nos objetos temos $\text{comp}(g, f) := g \circ f$,

$$\begin{array}{ccc} X & & X \\ f \downarrow & \xrightarrow{\text{comp}} & g \circ f \downarrow \\ Y & & Z \\ g \downarrow & & \\ Z & & \end{array}$$

enquanto nos morfismos temos $\text{comp}(\alpha, \beta, \gamma) := (\alpha, \gamma)$.

$$\begin{array}{ccc} X \xrightarrow{\alpha} X' & & X \xrightarrow{\alpha} X' \\ f \downarrow & \searrow f' & g \circ f \downarrow \searrow g' \circ f' \\ Y \xrightarrow{\beta} Y' & \xrightarrow{\text{comp}} & Z \xrightarrow{\gamma} Z' \\ g \downarrow & \searrow g' & \\ Z \xrightarrow{\gamma} Z' & & \end{array}$$

Tendo introduzido a categoria de setas componíveis $\mathbf{C}^{[2]}$, podemos enfim definir a noção de uma fatoração funtorial.

1.3.18 Definição. Uma **fatoração funtorial** em uma categoria \mathbf{C} é uma seção do funtor de composição $\text{comp} : \mathbf{C}^{[2]} \rightarrow \text{Arr}(\mathbf{C})$, ou seja, um funtor $\text{fac} : \text{Arr}(\mathbf{C}) \rightarrow \mathbf{C}^{[2]}$ satisfazendo a igualdade $\text{comp} \circ \text{fac} = \text{id}_{\text{Arr}(\mathbf{C})}$.

Vamos procurar entender o significado prático da existência de fatorações functoriais em uma categoria. O funtor fac associa a um morfismo $f : X \rightarrow Z$ em \mathbf{C} um par de morfismos *componíveis* (f_1, f_0) cuja composição $f_1 \circ f_0$ deve ser igual ao morfismo f . Essa última igualdade garante então que tenhamos $\text{dom}(f_0) = \text{dom}(f) = X$ e $\text{cod}(f_1) = \text{cod}(f) = Z$. Se denotarmos então $Y := \text{cod}(f_0) = \text{dom}(f_1)$, temos a situação indicada abaixo.

$$\begin{array}{ccc} X & & X \\ f \downarrow & \xrightarrow{\text{fac}} & f_0 \downarrow \\ Z & & Y \\ & & f_1 \downarrow \\ & & Z \end{array} \quad \begin{array}{c} \curvearrowright \\ f_1 \circ f_0 = f \end{array}$$

Dado outro morfismo $f' : X' \rightarrow Z'$, e um morfismo $(\alpha : X \rightarrow X', \gamma : Z \rightarrow Z')$ de f para f' em $\text{Arr}(\mathbf{C})$, aplicando o funtor fac ao morfismo (α, β) obtemos um morfismo do tipo $(f_1, f_0) \rightarrow (f'_1, f'_0)$ em $\mathbf{C}^{[2]}$, ou seja, uma tripla de morfismos $(\varphi : X \rightarrow X', \psi : Y \rightarrow Y', \theta : Z \rightarrow Z')$ fazendo comutar os dois quadrados adjacentes. Note que, como fac é uma seção de comp , devemos ter $(\alpha, \beta) = \text{comp}(\text{fac}(\alpha, \beta)) = \text{comp}(\varphi, \psi, \theta) = (\varphi, \theta)$, de forma que os morfismos α e β são em certo sentido preservados na fatoração functorial, conforme indicado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{\alpha} & X' \\ f \downarrow & & \downarrow f' \\ Z & \xrightarrow{\beta} & Z' \end{array} \quad \xrightarrow{\text{fac}} \quad \begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{\alpha} & X' \\ f_0 \downarrow & & \downarrow f'_0 \\ Y & \xrightarrow{\psi} & Y' \\ f_1 \downarrow & & \downarrow f'_1 \\ Z & \xrightarrow{\beta} & Z' \end{array}$$

Por fim, introduzimos a noção de um sistema de fatoração fraco functorial, a noção que será de fato de nosso interesse no estudo de categorias de modelos.

1.3.19 Definição. Um sistema de fatoração fraco (L, R) em uma categoria \mathbf{C} é dito **functorial** se existe um funtor $\text{fac} : \text{Arr}(\mathbf{C}) \rightarrow \mathbf{C}^{[2]}$ satisfazendo as seguintes condições:

1. $\text{comp} \circ \text{fac} = \text{id}_{\text{Arr}(\mathbf{C})}$;
2. $d_0(\text{fac}(f)) \in L$ e $d_1(\text{fac}(f)) \in R$ para todo $f \in \text{Arr}(\mathbf{C})$.

A primeira condição acima diz simplesmente que o funtor fac define uma fatoração functorial em \mathbf{C} no sentido da Definição 1.3.18. Já a segunda condição impõe que os morfismos que aparecem nessa fatoração interajam adequadamente com o sistema de fatoração fraco existente: o primeiro morfismo da fatoração deve necessariamente pertencer à classe L , enquanto o segundo deve necessariamente pertencer à classe R .

$$\begin{array}{ccc} X & & X \\ f \downarrow & \xrightarrow{\text{fac}} & f_0 \in L \downarrow \\ Z & & Y \\ & & f_1 \in R \downarrow \\ & & Z \end{array} \quad \begin{array}{c} \curvearrowright \\ f_1 \circ f_0 = f \end{array} \quad (1.29)$$

Muitos autores exigem que os sistemas de fatoração fracos $(\mathcal{C} \cap \mathcal{W}, \mathcal{F})$ e $(\mathcal{C}, \mathcal{F} \cap \mathcal{W})$ provenientes de uma estrutura de modelos sejam functoriais no sentido acima. Isso nem sempre é estritamente

necessário, mas é algo que facilita a nossa vida em alguns momentos. Entretanto, como já mencionado anteriormente, as fatorações fornecidas por um funtor de fatoração, especialmente no contexto de estruturas de modelos, são muitas vezes bastante complicadas, tendo então um valor mais teórico do que prático.

É importante ressaltar que, embora nem toda estrutura de modelos admita fatorações funtoriais, uma grande parte delas admite, incluindo aquelas obtidas por meio do famigerado *Argumento do Objeto Pequeno* que estudaremos mais adiante.

1.4 Objetos fibrantes e cofibrantes

Nessa seção introduzimos o conceito de objetos cofibrantes e fibrantes. Estas duas classes de objetos em uma categoria modelo serão de extrema importância em diferentes pontos da teoria, como na construção de um modelo mais simples para a localização de uma categoria modelo e na descrição de uma noção puramente categórica de homotopia.

1.4.1 Definição. Sejam \mathbf{M} uma categoria modelo, $\emptyset \in \mathbf{M}$ um objeto inicial qualquer, e $*$ um objeto final qualquer.¹ Um objeto $X \in \mathbf{M}$ é dito **cofibrante** se o morfismo único $!_X : \emptyset \rightarrow X$ é uma cofibração, e é dito **fibrante** se o morfismo único $!_X : X \rightarrow *$ é uma fibração. Quando um objeto é simultaneamente cofibrante e fibrante, dizemos também que ele é **bifibrante**.

1.4.2 Observação. Veja que a noção de objeto cofibrante não depende do objeto inicial $\emptyset \in \mathbf{M}$ fixado acima. De fato, se \emptyset e \emptyset' são dois objetos iniciais, X é um objeto qualquer, podemos considerar o diagrama comutativo abaixo onde todos os morfismos são aqueles dados pela propriedade que caracteriza um objeto inicial.

$$\begin{array}{ccc}
 \emptyset & & \\
 \downarrow !_{\emptyset'} & \searrow !_X & \\
 & X & \\
 \uparrow !_{\emptyset} & \nearrow !'_X & \\
 \emptyset' & &
 \end{array}$$

Como objetos iniciais possuem apenas a identidade como automorfismo, $!_{\emptyset'}$ e $!_{\emptyset}$ são isomorfismos, sendo em particular cofibrações. Segue disso que $!_X : \emptyset \rightarrow X$ é uma cofibração se, e somente se, $!'_X : \emptyset' \rightarrow X$ também o é.

É claro que um raciocínio dual mostra que a noção de um objeto ser fibrante também independe do objeto final considerado na categoria modelo.

Vamos mostrar agora algumas propriedades simples a respeito de objetos cofibrantes e fibrantes.

1.4.3 Lema. *Em uma categoria modelo \mathbf{M} qualquer valem as seguintes propriedades:*

- (a) *Se X é um objeto cofibrante, e $i : X \rightarrow Y$ é uma cofibração, então Y também é cofibrante.*
- (b) *Se Y é um objeto fibrante, e $p : X \rightarrow Y$ é uma fibração, então X também é fibrante.*

Demonstração. (a) Queremos mostrar que o morfismo $!_Y : \emptyset \rightarrow Y$ é uma cofibração. Ora, como esse morfismo é *único*, certamente vale a igualdade $!_Y = f \circ !_X$, e como $!_X : \emptyset \rightarrow X$ é por hipótese uma cofibração, $!_Y$ é a composição de duas cofibrações e, portanto uma cofibração também.

(b) Queremos mostrar que o morfismo $!_X : X \rightarrow *$ é uma fibração. Ora, como esse morfismo é *único*, certamente vale a igualdade $!_X = !_Y \circ p$, e como $!_Y : Y \rightarrow *$ é por hipótese uma fibração, vemos que $!_X$ é a composição de duas fibrações e, portanto, uma fibração também. ■

¹O fato de \mathbf{M} ser cocompleta e completa garante a existência de objetos iniciais e finais.

Veremos mais adiante que muitas construções categóricas usuais só se comportam de forma homotopicamente adequada quando aplicadas a objetos que são fibrantes ou cofibrantes. Assim, para que possamos realizar tais construções com objetos quaisquer, precisamos antes *substituí-los* por outros que sejam fibrantes ou cofibrantes, uma noção que tornamos precisa na definição abaixo.

1.4.4 Definição. Sejam \mathbf{M} uma categoria modelo e $X \in \mathbf{M}$ um objeto qualquer.

1. Uma **substituição cofibrante** para X é um par (X_c, φ) , onde X_c é um objeto cofibrante, e $\varphi : X_c \xrightarrow{\sim} X$ é uma equivalência fraca. Quando φ é também uma fibração, ou seja, quando φ é uma fibração trivial, dizemos que o par (X_c, φ) define uma substituição cofibrante forte.
2. Uma **substituição fibrante** para X é um par (X_f, ψ) , onde X_f é um objeto fibrante, e $\psi : X \xrightarrow{\sim} X_f$ é uma equivalência fraca. Quando ψ é também uma cofibração, ou seja, quando ψ é uma cofibração trivial, dizemos que o par (X_f, ψ) define uma substituição fibrante forte.

1.4.5 Observação. Em alguns trabalhos da Literatura, é comum se referir a uma aproximação cofibrante forte $X_c \xrightarrow{\sim} X$ como uma *aproximação cofibrante fibrante*. Perceba então que nessa terminologia o adjetivo cofibrante se refere ao objeto X_c , enquanto o adjetivo fibrante se refere ao morfismo $X_c \rightarrow X$. Analogamente, uma aproximação fibrante forte $X_f \xrightarrow{\sim} X$ é também chamada de uma *aproximação fibrante cofibrante*. Não usarei essa terminologia absolutamente horrível em nenhum outro lugar dessas notas, e na verdade espero muito que meu cérebro a esqueça o quanto antes.

Naturalmente somos levados a nos indagar quanto à existência e à unicidade de substituições cofibrantes e fibrantes, e são essas duas questões que iremos investigar agora.

1.4.6 Proposição. *As seguintes afirmações são válidas em uma categoria modelo \mathbf{M} qualquer:*

1. *Todo objeto possui uma aproximação cofibrante forte e também uma aproximação fibrante forte.*
2. *Se $\varphi : X_c \xrightarrow{\sim} X$ é uma aproximação cofibrante forte, dada qualquer outra aproximação cofibrante $\psi : X'_c \xrightarrow{\sim} X$, existe uma equivalência fraca $\theta : X'_c \xrightarrow{\sim} X_c$.*
3. *Se $\psi : X \xrightarrow{\sim} X_f$ é uma aproximação fibrante forte, dada qualquer outra aproximação fibrante $\varphi : X \xrightarrow{\sim} X'_f$, existe uma equivalência fraca $\theta : X_f \xrightarrow{\sim} X'_f$.*

Demonstração. 1. Dado um objeto qualquer $X \in \mathbf{M}$, usando o axioma de fatoração (M5) podemos fatorar o morfismo único $!_X : \emptyset \rightarrow X$ como uma cofibração seguida de uma fibração trivial conforme indicado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} \emptyset & \xrightarrow{\quad} & X_c \xrightarrow[\varphi]{\sim} X \\ & \searrow \scriptstyle !_X & \nearrow \\ & & X \end{array}$$

Note então que o objeto X_c é cofibrante e que o par (X_c, φ) define uma aproximação cofibrante forte para X .

Usando novamente o axioma de fatoração podemos reescrever o morfismo único $!_X : X \rightarrow *$ como uma cofibração trivial seguida de uma fibração conforme indicado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow[\psi]{\sim} & X_f \xrightarrow[\scriptstyle !_X]{\rightarrow} * \\ & \searrow \scriptstyle !_X & \nearrow \\ & & * \end{array}$$

Basta notar então que o objeto X_f é fibrante e que o par (X_f, ψ) define uma aproximação fibrante forte para X .

2. Usando os morfismos dados podemos montar o quadrado comutativo mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} \emptyset & \xrightarrow{!_{X_c}} & X_c \\ !_{X'_c} \downarrow & & \downarrow \varphi \\ X'_c & \xrightarrow[\psi]{\sim} & X \end{array}$$

Note que o quadrado é realmente comutativo, já que as composições $\varphi \circ !_{X_c}$ e $\psi \circ !_{X'_c}$ ambas definem morfismos do tipo $\emptyset \rightarrow X$, mas só existe um único morfismo desse tipo. Como $!_{X'_c}$ é uma cofibração, e φ é uma fibração trivial, usando o axioma de levantamento (M4) podemos obter um morfismo diagonal $\theta : X'_c \rightarrow X_c$ fazendo comutar o diagrama todo. Em particular, temos a igualdade $\varphi \circ \theta = \psi$, e como φ e ψ são equivalências fracas, segue do axioma 2-de-3 que θ também é uma equivalência fraca.

3. A demonstração é análoga ao que fizemos no item 2. Usando os morfismos dados montamos o quadrado comutativo abaixo,

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow[\sim]{\psi} & X'_f \\ \varphi \downarrow & & \downarrow !_{X'_f} \\ X_f & \xrightarrow[\sim]{!_{X_f}} & * \end{array}$$

o qual admite um levantamento $\theta : X_f \rightarrow X'_f$ já que φ é uma cofibração trivial, e ψ é uma fibração. Esse levantamento satisfaz a equação $\theta \circ \varphi = \psi$, portanto pelo axioma 2-de-3 concluímos que θ é uma equivalência fraca. ■

Os itens 2 e 3 acima são o mais próximo que temos de uma unicidade para aproximações cofibrantes ou fibrantes. Podemos resumi-lo dizendo que toda aproximação cofibrante ou fibrante é fracamente equivalente a outra aproximação que é forte. Isso certamente não significa que as duas aproximações sejam *isomorfas*, já que equivalências fracas não são invertíveis em geral. É verdade, entretanto, que aproximações diferentes se tornam isomorfas ao passarmos para a categoria homotópica de \mathbf{M} , já que esta é obtida por localização na classe das equivalências fracas.

1.4.7 Observação (Substituições funtoriais). Suponha que a categoria de modelos \mathbf{M} admita fatoraões funtoriais, ou seja, que os dois sistemas de fatoraão fracos $(\mathcal{C} \cap \mathcal{W}, \mathcal{F})$ e $(\mathcal{C}, \mathcal{F} \cap \mathcal{W})$ sejam funtoriais, sendo $\text{fac}, \text{fac}' : \text{Arr}(\mathbf{M}) \rightarrow \mathbf{M}^{[2]}$ os respectivos funtores de fatoraão. Usando tais fatoraões funtoriais podemos obter funtores de substituição cofibrante e fibrante. Considere inicialmente o funtor $\text{init} : \mathbf{M} \rightarrow \text{Arr}(\mathbf{M})$ que associa a um objeto X o morfismo único $!_X : \emptyset \rightarrow X$, e que associa a um morfismo $f : X \rightarrow Y$ o par de morfismos (id_\emptyset, f) , o qual faz comutar o diagrama abaixo

$$\begin{array}{ccc} \emptyset & \xrightarrow{\text{id}_\emptyset} & \emptyset \\ !_X \downarrow & & \downarrow !_Y \\ X & \xrightarrow{f} & Y \end{array}$$

e portanto define um morfismo do tipo $!_X \rightarrow !_Y$ na categoria de setas $\text{Arr}(\mathbf{M})$.

Usando o funtor init introduzido acima, definirmos um funtor $\text{subcof} : \mathbf{M} \rightarrow \text{Arr}(\mathbf{M})$ por meio da composição mostrada abaixo.

$$\begin{array}{ccccc} \mathbf{M} & \xrightarrow{\text{init}} & \text{Arr}(\mathbf{M}) & \xrightarrow{\text{fac}'} & \mathbf{M}^{[2]} & \xrightarrow{d_1} & \text{Arr}(\mathbf{M}) \\ & & \text{subcof} & & & & \end{array}$$

Veja que, ao aplicarmos o funtor de fatoração fac' ao morfismo $!_X : \emptyset \rightarrow X$, obtemos uma fatoração dada por uma cofibração $!_{X_c} : \emptyset \rightarrow X_c$ seguida de uma fibração trivial $p_X : X_c \rightarrow X$ conforme indicado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} \emptyset & \xrightarrow{!_X} & X \\ \downarrow !_{X_c} & & \uparrow p_X \\ & X_c & \end{array}$$

Note então que o par (X_c, p_X) define uma substituição cofibrante forte para X . A funtorialidade da construção pode ser entendida da seguinte maneira: se $f : X \rightarrow Y$ é um morfismo em \mathbf{M} , existe também um morfismo induzido $f_c : X_c \rightarrow Y_c$ entre as substituições cofibrantes que faz comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccc} X_c & \xrightarrow{f_c} & Y_c \\ p_X \downarrow \wr & & \wr \downarrow p_Y \\ X & \xrightarrow{f} & Y \end{array} \quad (1.30)$$

Denotando por \mathbf{M}_c a subcategoria plena de \mathbf{M} gerada pelos objetos cofibrantes, temos um funtor

$$\text{dom} \circ \text{subcof} : \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{M}_c,$$

e a comutatividade do quadrado acima diz que a coleção de morfismos $(p_X)_{X \in \mathbf{M}}$ define uma transformação natural do tipo $i \circ (\text{dom} \circ \text{subcof}) \Rightarrow \text{id}_{\mathbf{M}}$, enquanto a coleção $(p_X)_{X \in \mathbf{M}_c}$ define uma transformação natural do tipo $(\text{dom} \circ \text{subcof}) \circ i \Rightarrow \text{id}_{\mathbf{M}_c}$, onde $i : \mathbf{M}_c \rightarrow \mathbf{M}$ é o funtor de inclusão.

Existe também um processo análogo para obtermos substituições fibrantes functoriais em uma categoria de modelos equipada com fatoraões functoriais. Consideramos inicialmente o funtor $\text{term} : \mathbf{M} \rightarrow \text{Arr}(\mathbf{M})$ que associa a cada objeto $X \in \mathbf{M}$ o morfismo terminal $!_X : X \rightarrow *$ e que associa a cada morfismo $f : X \rightarrow Y$ o par (f, id_*) , o qual faz comutar o quadrado indicado abaixo e, portanto, define um morfismo do tipo $!_X \rightarrow !_Y$ na categoria de setas.

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ !_X \downarrow & & \downarrow !_Y \\ * & \xrightarrow{\text{id}_*} & * \end{array}$$

Consideramos então o funtor $\text{subfib} : \mathbf{M} \rightarrow \text{Arr}(\mathbf{M})$ dado pela composição indicada abaixo.

$$\begin{array}{ccccc} \mathbf{M} & \xrightarrow{\text{term}} & \text{Arr}(\mathbf{M}) & \xrightarrow{\text{fac}} & \mathbf{M}^{[2]} & \xrightarrow{d_0} & \text{Arr}(\mathbf{M}) \\ & & \text{subfib} & & & & \end{array}$$

Tal funtor associa a cada objeto $X \in \mathbf{M}$ uma cofibração trivial $j_X : X \xrightarrow{\sim} X_f$ que faz comutar o

diagrama abaixo,

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{!_X} & * \\ j_X \searrow & & \nearrow !_X \\ & X_f & \end{array}$$

portanto o par (X_f, j_X) define uma substituição fibrante forte para X . Além disso, o funtor subfib em questão associa também a cada morfismo $g : X \rightarrow Y$ em \mathbf{M} um morfismo correspondente $g_f : X_f \rightarrow Y_f$ entre as substituições fibrantes que faz comutar o quadrado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{g} & Y \\ j_X \downarrow & & \downarrow j_Y \\ X_f & \xrightarrow{g_f} & Y_f \end{array} \quad (1.31)$$

Denotando por \mathbf{M}_f a subcategoria plena de \mathbf{M} gerada pelos objetos fibrantes, temos o funtor composto $\text{cod} \circ \text{subfib} : \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{M}_f$, e a comutatividade do diagrama (1.31) diz que a coleção de morfismos $(j_X)_{X \in \mathbf{M}}$ define uma transformação natural do tipo $\text{id}_{\mathbf{M}} \Rightarrow i \circ (\text{cod} \circ \text{subfib})$, enquanto a coleção de morfismos $(j_X)_{X \in \mathbf{M}_f}$ define uma transformação natural $\text{id}_{\mathbf{M}_f} \Rightarrow (\text{cod} \circ \text{subfib}) \circ i$, onde $i : \mathbf{M}_f \rightarrow \mathbf{M}$ denota o morfismo de inclusão.

1.5 Teoria de Homotopia em categorias modelo

Nessa seção introduzimos enfim noções homotópicas que podem ser descritas em uma categoria modelo qualquer. Veremos, entretanto, que mesmo a noção básica de homotopia entre dois morfismos possui sutilezas que a tornam mais complexa do que a noção clássica de homotopia entre mapas contínuos de espaços topológicos. Felizmente, também veremos que a noção categórica de homotopia se aproxima muito mais da clássica quando trabalhamos apenas com objetos cofibrantes ou fibrantes, e nesse caso podemos usar a construção usual da categoria homotópica para definirmos uma espécie de localização de uma categoria modelo.

A fim de imitarmos a noção topológica de homotopia, o primeiro passo será darmos uma descrição categórica para a construção do cilindro $B \times I$ associado a um espaço topológico B qualquer, onde é claro que I denota o intervalo unitário da reta.

Lembremos inicialmente que, dado um objeto B de uma categoria \mathbf{C} qualquer que admita coprodutos, a propriedade universal dessa construção garante a existência de um único mapa $\nabla : B \sqcup B \rightarrow B$ fazendo comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccccc} B & & \text{id}_B & & \\ & \searrow j_1 & & \searrow & \\ & & B \sqcup B & \xrightarrow{\nabla} & B \\ & \nearrow j_2 & & \nearrow & \\ B & & \text{id}_B & & \end{array}$$

Tal morfismo é comumente chamado de **morfismo codiagonal** ou também de **morfismo de dobra**². Intuitivamente, esse morfismo simplesmente cola duas cópias exatamente uma sobre a outra. Por vezes, se precisarmos distinguir entre os morfismos codiagonais associados a diferentes objetos, utilizaremos também a notação ∇_B para o morfismo descrito acima.

²Uma tradução direta do inglês *fold map*.

1.5.1 Definição. Sejam \mathbf{M} uma categoria modelo e $B \in \mathbf{M}$ um objeto qualquer. Um **objeto cilindro** para B é uma fatoração do morfismo codiagonal $\nabla : B \sqcup B \rightarrow B$ como uma cofibração seguida de uma equivalência fraca. Mais explicitamente, um objeto cilindro para B é uma tripla $(\text{Cyl}(B), i, \varepsilon)$, onde $i : B \sqcup B \rightarrow \text{Cyl}(B)$ é uma cofibração e $\varepsilon : \text{Cyl}(B) \xrightarrow{\sim} B$ é uma equivalência fraca tais que $\varepsilon \circ i = \nabla$, conforme mostrado no diagrama comutativo abaixo.

$$\begin{array}{ccc} B \sqcup B & & \\ \downarrow i & \searrow \nabla & \\ \text{Cyl}(B) & \xrightarrow[\varepsilon]{\sim} & B \end{array}$$

Dizemos que a tripla $(\text{Cyl}(B), i, \varepsilon)$ define um objeto cilindro **forte** se ε é também uma fibração, ou seja, se ε é uma fibração trivial.

1.5.2 Observação. O axioma de fatoração (M5) garante que o morfismo $\nabla : B \sqcup B \rightarrow B$ pode ser fatorado como uma cofibração seguida de uma fibração trivial, portanto todo objeto de uma categoria modelo admite um objeto cilindro forte. Entretanto, por vezes esse modelo para o objeto cilindro forte dado pelo axioma de fatoração pode ser muito complicado, por isso é vantajoso trabalharmos com cilindros fracos também, cuja descrição é por vezes mais simples.

Vamos introduzir mais um pouco de terminologia. Dado um objeto cilindro $(\text{Cyl}(B), i, \varepsilon)$ para B , se $j_1, j_2 : B \rightarrow B \sqcup B$ são as injeções canônicas, frequentemente denotaremos os morfismos do tipo $B \rightarrow \text{Cyl}(B)$ dados pelas composições $i \circ j_1$ e $i \circ j_2$ por i_0 e i_1 , respectivamente. Essa diferença nos índices pode parecer estranho, mas a motivação para tal vem do caso topológico clássico, onde um modelo para o objeto cilindro $\text{Cyl}(B)$ é o produto $B \times I$. Nesse caso, a composição $i_0 = i \circ j_1$ mapeia B para a face inferior $B \times \{0\}$ de $B \times I$, enquanto a composição $i_1 = i \circ j_2$ mapeia B para a face superior $B \times \{1\}$ do cilindro $B \times I$, o que justifica a razoabilidade dos índices aparecendo em cada uma das composições.

Antes de vermos como a noção de objeto cilindro nos permite definir uma noção categórica de homotopia, vejamos algumas propriedades simples satisfeitas por tais objetos.

1.5.3 Lema. *Sejam \mathbf{M} uma categoria modelo, $B \in \mathbf{M}$ um objeto qualquer, e $(\text{Cyl}(B), i, \varepsilon)$ um objeto cilindro qualquer para B .*

- (i) *Os morfismos $i_0, i_1 : B \rightarrow \text{Cyl}(B)$ são equivalências fracas.*
- (ii) *Se B é um objeto cofibrante, então os morfismos $i_0, i_1 : B \rightarrow \text{Cyl}(B)$ são também cofibrações e, portanto, cofibrações triviais.*

Demonstração. (i) Note que pela definição de i_0 temos

$$\varepsilon \circ i_0 = \varepsilon \circ i \circ j_1 = \nabla \circ j_1 = \text{id}_B.$$

Ora, como id_B é uma equivalência fraca, o mesmo valendo para ε pela definição de objeto cilindro, segue da propriedade 2-de-3 que i_0 é também uma equivalência fraca. A demonstração de que i_1 é uma equivalência fraca segue de um raciocínio completamente análogo.

(ii) Lembremos que em qualquer categoria, o coproduto pode ser interpretado também como um pushout sobre o objeto inicial. Mais precisamente, se \emptyset denota um objeto inicial de \mathbf{M} , então o quadrado comutativo abaixo é um pushout.

$$\begin{array}{ccc} \emptyset & \xrightarrow{!_B} & B \\ \downarrow !_B & & \downarrow j_1 \\ B & \xrightarrow{j_2} & B \sqcup B \end{array}$$

Por hipótese B é cofibrante, ou seja, o morfismo único $!_B$ é uma cofibração, mas já sabemos do Corolário 1.3.14 que cofibrações são preservadas por pushouts, portanto j_1 e j_2 são cofibrações. Mas segue então que os morfismos i_0 e i_1 são composições de cofibrações e, portanto, cofibrações também de acordo com o Corolário 1.3.14. ■

Tendo em mãos essas propriedades básicas, podemos enfim definir uma primeira noção de homotopia entre morfismos em uma categoria modelo.

1.5.4 Definição. Dois morfismos $f, g : B \rightarrow X$ em uma categoria modelo \mathbf{M} são ditos **homotópicos à esquerda** se existe um objeto cilindro $(\text{Cyl}(B), i, \varepsilon)$ para B e um morfismo $h : \text{Cyl}(B) \rightarrow X$ tal que $h \circ i = \langle f, g \rangle$, conforme mostrado no diagrama comutativo abaixo. Nesse caso, denotamos essa relação por $f \sim_L g$.

$$\begin{array}{ccccc} B & \xleftarrow{\nabla} & B \sqcup B & \xrightarrow{\langle f, g \rangle} & X \\ & \nwarrow \varepsilon & \downarrow i & \nearrow h & \\ & & \text{Cyl}(B) & & \end{array}$$

Se interpretarmos os morfismos $i_0, i_1 : B \rightarrow \text{Cyl}(B)$ como sendo as faces inferior e superior do cilindro como no caso topológico clássico, então as composições $h \circ i_0$ e $h \circ i_1$ determinam os estágios inicial e final da homotopia h . Usando a definição de tais morfismos e a comutatividade acima vemos que por um lado

$$h \circ i_0 = h \circ i \circ j_1 = \langle f, g \rangle \circ j_1 = f,$$

e por outro

$$h \circ i_1 = h \circ i \circ j_2 = \langle f, g \rangle \circ j_2 = g.$$

Assim, recuperamos em certo sentido a intuição clássica de uma família de morfismos que começa em f e termina em g .

Veja que a definição acima possui uma sutileza: exigimos que a homotopia h esteja definida em *algum* objeto cilindro $\text{Cyl}(B)$, mas B pode muito bem admitir diversos objetos cilindros distintos. Isso pode representar uma dificuldade para “combinarmos” homotopias à esquerda, já que elas podem não estar definidas nos mesmos objetos cilindros.

O resultado abaixo mostra que homotopias à esquerda são preservadas por composição de morfismos à esquerda, o que possivelmente justifica a terminologia usada. Além disso, mostramos que homotopias à esquerda também são preservadas por composição de morfismos à direita quando supomos que o codomínio é fibrante, e essa hipótese também garante a independência do objeto cilindro no qual a homotopia está definida.

1.5.5 Proposição. *Suponha que $f, g : B \rightarrow X$ sejam dois morfismos homotópicos à esquerda em uma categoria modelo \mathbf{M} .*

1. *Dado um morfismo $\beta : X \rightarrow Y$, os morfismos compostos $\beta \circ f, \beta \circ g : B \rightarrow Y$ são homotópicos à esquerda.*
2. *Se X é fibrante, então a homotopia entre f e g independe do objeto cilindro usado.*
3. *Se X é fibrante, então dado qualquer morfismo $\alpha : A \rightarrow B$, os morfismos compostos $f \circ \alpha, g \circ \alpha : A \rightarrow X$ são homotópicos à esquerda.*

Demonstração. 1. Por hipótese existe um objeto cilindro $(\text{Cyl}(B), i, \varepsilon)$ para B e um morfismo $h : \text{Cyl}(B) \rightarrow X$ satisfazendo $h \circ i = \langle f, g \rangle$. Afirmamos que $\beta \circ h$ é a homotopia à esquerda procurada de $\beta \circ f$ para $\beta \circ g$. De fato, basta notar que

$$\beta \circ h \circ i = \beta \circ \langle f, g \rangle = \langle \beta \circ f, \beta \circ g \rangle,$$

onde a última igualdade segue diretamente da propriedade universal do coproduto, já que a composição $\beta \circ \langle f, g \rangle$ satisfaz as igualdades

$$(\beta \circ \langle f, g \rangle) \circ j_1 = \beta \circ f \quad \text{e} \quad (\beta \circ \langle f, g \rangle) \circ j_2 = \beta \circ g.$$

2. Por hipótese sabemos que existe *algum* objeto cilindro $(\text{Cyl}(B), i, \varepsilon)$ para B e um morfismo $h : \text{Cyl}(B) \rightarrow X$ tal que $h \circ i = \langle f, g \rangle$. Afirmamos que existe também uma homotopia de f para g definida em um cilindro *forte*. De fato, sabemos do axioma de fatoração que a equivalência fraca $\varepsilon : \text{Cyl}(B) \rightarrow B$ pode ser fatorada como uma cofibração seguida de uma fibração trivial conforme indicado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} \text{Cyl}(B) & \xrightarrow[\sim]{\varepsilon} & B \\ & \searrow j & \nearrow p \\ & C & \end{array}$$

Afirmamos então que a tripla $(C, j \circ i, p)$ é um objeto cilindro forte para B . Veja que $j \circ i$ e p fatoram o morfismo de dobra $\nabla : B \rightarrow B \sqcup B$ pois

$$p \circ (j \circ i) = (p \circ j) \circ i = \varepsilon \circ i = \nabla,$$

e como p é uma fibração trivial pelo axioma de fatoração, a tripla em questão define de fato um cilindro forte.

Vamos agora mostrar que existe uma homotopia de f para g definida nesse cilindro forte. Note inicialmente que o morfismo $j : \text{Cyl}(B) \rightarrow C$ que apareceu na fatoração acima é uma cofibração trivial pela propriedade 2-de-3, já que ε e p são ambos equivalências fracas. Como o morfismo único $!_X : X \rightarrow *$ é por hipótese uma fibração, segue do axioma de levantamento que existe um morfismo diagonal $\tilde{h} : C \rightarrow X$ fazendo comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccc} \text{Cyl}(B) & \xrightarrow{h} & X \\ \downarrow j & \searrow \tilde{h} & \downarrow !_X \\ C & \xrightarrow{!_C} & * \end{array}$$

Note então que \tilde{h} define uma homotopia de f para g com relação ao cilindro forte $(C, j \circ i, p)$ pois

$$\tilde{h} \circ (j \circ i) = (\tilde{h} \circ j) \circ i = h \circ i = \langle f, g \rangle.$$

Vejamos agora como mostrar que a homotopia entre f e g independe do cilindro usado. Segue da discussão acima que podemos assumir sem perda de generalidade que o objeto cilindro $(\text{Cyl}(B), i, \varepsilon)$ no qual está definida a homotopia h por hipótese é forte. Suponha agora que (S, i', ε') seja um outro objeto cilindro qualquer. Queremos construir um morfismo $h' : S \rightarrow X$ tal que $h' \circ i' = \langle f, g \rangle$. A ideia é construirmos um morfismo do tipo $S \rightarrow \text{Cyl}(B)$ que, ao ser composto com a homotopia h já existente, forneça uma outra homotopia definida agora no objeto cilindro S . A fim de construirmos tal morfismo, note que o quadrado mostrado abaixo é comutativo, pois ambos os pares (i, ε) e (i', ε') são fatorações do morfismo de dobra ∇ . Ademais, como i' é uma cofibração, pois S é um objeto cilindro, e ε é uma fibração trivial, pois $\text{Cyl}(B)$ é um

cilindro forte; segue do axioma de levantamento que existe um morfismo diagonal $\phi : S \rightarrow \text{Cyl}(B)$ como indicado.

$$\begin{array}{ccc} B \sqcup B & \xrightarrow{i} & \text{Cyl}(B) \\ i' \downarrow & \nearrow \phi & \downarrow \varepsilon \\ S & \xrightarrow[\varepsilon']{\sim} & B \end{array}$$

Veja então que a composição $h' := h \circ \phi$ define a homotopia desejada, pois da comutatividade acima vemos que

$$h' \circ i' = h \circ \phi \circ i' = h \circ i = \langle f, g \rangle.$$

3. Considere $(\text{Cyl}(A), i_A, \varepsilon_A)$ um objeto cilindro qualquer para A e $(\text{Cyl}(B), i_B, \varepsilon_B)$ seja um objeto cilindro *forte* para B . Sabemos pelo item 2 que certamente existe uma homotopia $h : \text{Cyl}(B) \rightarrow X$ de f para g definida nesse cilindro forte. Considere o diagrama de levantamento exibido abaixo.

$$\begin{array}{ccc} A \sqcup A & \xrightarrow{i_B \circ \alpha \sqcup \alpha} & \text{Cyl}(B) \\ i_A \downarrow & & \downarrow \varepsilon_B \\ \text{Cyl}(A) & \xrightarrow[\alpha \circ \varepsilon_A]{} & B \end{array}$$

Veja que o quadrado externo é de fato comutativo pois por um lado

$$\alpha \circ \varepsilon_A \circ i_A = \alpha \circ \nabla_A = \alpha \circ \langle \text{id}_A, \text{id}_A \rangle = \langle \alpha, \alpha \rangle,$$

e por outro

$$\varepsilon_B \circ i_B \circ \alpha \sqcup \alpha = \nabla_B \circ \alpha \sqcup \alpha = \langle \alpha, \alpha \rangle.$$

Segue do axioma de levantamento que existe o morfismo diagonal $\phi : \text{Cyl}(A) \rightarrow \text{Cyl}(B)$ mostrado acima. Note então que $h \circ \phi : \text{Cyl}(A) \rightarrow X$ é a homotopia procurada pois

$$h \circ \phi \circ i_A = h \circ i_B \circ (\alpha \sqcup \alpha) = \langle f, g \rangle \circ (\alpha \sqcup \alpha) = \langle f \circ \alpha, g \circ \alpha \rangle. \quad \blacksquare$$

Uma consequência particularmente útil é que a noção de homotopia à esquerda se torna uma relação de equivalência quando trabalhamos com morfismos tendo codomínio fibrante.

1.5.6 Corolário. *Em uma categoria de modelos $(\mathbf{M}, \mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F})$, se B é um objeto cofibrante e X é um objeto qualquer, então a relação de homotopia à esquerda \simeq_L define uma relação de equivalência no conjunto de morfismos $\mathbf{M}(B, X)$.*

Demonstração. Vejamos primeiro a reflexividade da relação de homotopia à esquerda. Dado um morfismo $f : B \rightarrow X$, considere $(\text{Cyl}(B), i, \varepsilon)$ um objeto cilindro qualquer para B . Veja que o quadrado indicado abaixo é comutativo pois

$$f \circ \varepsilon \circ i = f \circ \nabla = f \circ \langle \text{id}_B, \text{id}_B \rangle = \langle f, f \rangle,$$

e como o morfismo idêntico $\text{id}_X : X \rightarrow X$ é uma fibração trivial, e $i : B \sqcup B \rightarrow \text{Cyl}(B)$ é uma cofibração por hipótese, segue do axioma de levantamento que existe o morfismo diagonal $h : \text{Cyl}(B) \rightarrow X$ mostrado, e a comutatividade mostra que tal morfismo define uma homotopia à esquerda de f para si mesmo.

$$\begin{array}{ccc} B \sqcup B & \xrightarrow{\langle f, f \rangle} & X \\ i \downarrow & \nearrow h & \downarrow \text{id}_X \\ \text{Cyl}(B) & \xrightarrow{f \circ \varepsilon} & X \end{array}$$

Note que a demonstração acima não usa em nenhum momento a hipótese de cofibrância sobre B , ou seja, a relação de homotopia à esquerda é *sempre* reflexiva.

Vejam agora a demonstração da simetria da relação. Dados dois morfismos $f, g : B \rightarrow X$ que sejam homotópicos à esquerda, suponhamos que tal homotopia $h : \text{Cyl}(B) \rightarrow X$ esteja definido em um objeto cilindro $(\text{Cyl}(B), i, \varepsilon)$ qualquer. A ideia é montarmos um outro objeto cilindro que tenha as “faces trocadas”, e faremos isso trocando a ordem das parcelas do coproduto $B \sqcup B$. Mais precisamente, sabemos da propriedade universal do coproduto que existe um único morfismo $\Sigma : B \sqcup B \rightarrow B$ tal que $\Sigma \circ j_1 = j_2$ e $\Sigma \circ j_2 = j_1$, onde $j_1, j_2 : B \rightarrow B \sqcup B$ denotam as injeções canônicas no coproduto. Intuitivamente, Σ troca as duas cópias de B que compõem o coproduto $B \sqcup B$. Uma propriedade do morfismo Σ que será importante para nós é sua interação com o morfismo codiagonal $\nabla : B \sqcup B \rightarrow B$. Mais precisamente, afirmamos que vale a igualdade $\nabla \circ \Sigma = \nabla$. Faz bastante sentido que essa igualdade seja verdadeira, pois se ∇ intuitivamente identifica as duas cópias de B que formam o coproduto $B \sqcup B$, não faz diferença trocarmos essas cópias de lugar antes de fazermos a identificação. A demonstração dessa igualdade é uma aplicação direta da propriedade universal do coproduto, pois ∇ é caracterizado unicamente por satisfazer as igualdades

$$\nabla \circ j_1 = \nabla \circ j_2 = \text{id}_B,$$

mas a composição $\nabla \circ \Sigma$ satisfaz as mesmas igualdades, pois por um lado

$$(\nabla \circ \Sigma) \circ j_1 = \nabla \circ (\Sigma \circ j_1) = \nabla \circ j_2 = \text{id}_B$$

e por outro

$$(\nabla \circ \Sigma) \circ j_2 = \nabla \circ (\Sigma \circ j_2) = \nabla \circ j_1 = \text{id}_B.$$

Sabendo das propriedades acima, afirmamos que a tripla $(\text{Cyl}(B), i \circ \Sigma, \varepsilon)$ define um outro objeto cilindro para B . Note primeiro que o morfismo de troca Σ é um automorfismo de $B \sqcup B$, já que uma aplicação direta da propriedade universal do coproduto mostra que vale a igualdade $\Sigma \circ \Sigma = \text{id}_{B \sqcup B}$. Segue em particular que Σ é uma cofibração, portanto o mesmo é válido para a composição $i \circ \Sigma : B \rightarrow \text{Cyl}(B)$. Por fim, usando a propriedade de Σ discutida no parágrafo anterior vemos que $i \circ \Sigma$ e ε fatoram o morfismo codiagonal, pois

$$\varepsilon \circ (i \circ \Sigma) = (\varepsilon \circ i) \circ \Sigma = \nabla \circ \Sigma = \nabla.$$

Afirmamos então que o próprio morfismo $h : \text{Cyl}(B) \rightarrow X$ define a homotopia desejada de g para f com respeito ao objeto cilindro “trocado” $(\text{Cyl}(B), i \circ \Sigma, \varepsilon)$. De fato, note que por um lado

$$h \circ (i \circ \Sigma) \circ j_1 = (h \circ i) \circ (\Sigma \circ j_1) = \langle f, g \rangle \circ j_2 = g,$$

e por outro

$$h \circ (i \circ \Sigma) \circ j_2 = (h \circ i) \circ (\Sigma \circ j_2) = \langle f, g \rangle \circ j_1 = f;$$

portanto $h \circ (i \circ \Sigma) = \langle g, f \rangle$ conforme desejado. Note que essa demonstração também não necessita da hipótese de cofibrância sobre B , ou seja, a relação de homotopia à esquerda é *sempre* simétrica.

Resta verificarmos a transitividade da relação, e é aqui onde finalmente usamos a hipótese de cofibrância sobre B . Suponha que tenhamos três morfismos $f_1, f_2, f_3 : B \rightarrow X$ tais que $f_1 \simeq_L f_2$ e $f_2 \simeq_L f_3$. A primeira homotopia à esquerda é dada por um morfismo $h_1 : \text{Cyl}(B) \rightarrow X$, enquanto a segunda é dada por um morfismo $h_2 : \text{Cyl}'(B) \rightarrow X$, sendo que $(\text{Cyl}(B), i, \varepsilon)$ e $(\text{Cyl}'(B), i', \varepsilon')$ são objetos cilindros possivelmente *distintos*.³ A ideia é que podemos colar os dois cilindros juntos de uma forma que vai nos permitir “concatenar” as homotopias h_1 e h_2 de

³Aqui não podemos usar o resultado de independência de objetos cilindro pois isso requer que o codomínio dos morfismos seja fibrante.

forma a obtermos uma homotopia de f_1 para f_3 . Inicialmente, consideramos o objeto $Q \in \mathbf{M}$ dado pelo diagrama de pushout abaixo, onde $i_1 : B \rightarrow \text{Cyl}(B)$ e $i'_0 : B \rightarrow \text{Cyl}'(B)$ são componentes das cofibrações $i : B \sqcup B \rightarrow \text{Cyl}(B)$ e $i' : B \sqcup B \rightarrow \text{Cyl}'(B)$, respectivamente.

$$\begin{array}{ccc} B & \xrightarrow{i_1} & \text{Cyl}(B) \\ i'_0 \downarrow & & \downarrow b \\ \text{Cyl}'(B) & \xrightarrow{t} & Q \end{array}$$

A hipótese de cofibrância sobre B garante por meio do Lema 1.5.3 que os morfismos i_1 e i'_0 são cofibrações triviais, e como esse tipo de morfismo é preservado por pushouts, segue que os morfismos $b : \text{Cyl}(B) \rightarrow Q$ e $t : \text{Cyl}'(B) \rightarrow Q$ que aparecem acima são também cofibrações triviais. Como os morfismos $\varepsilon : \text{Cyl}(B) \rightarrow B$ e $\varepsilon' : \text{Cyl}'(B) \rightarrow B$ satisfazem as igualdades $\varepsilon \circ i_1 = \varepsilon' \circ i'_0 = \text{id}_B$, segue da propriedade universal do pushout a existência de um morfismo $\tilde{\varepsilon} : Q \rightarrow B$ fazendo comutar o diagrama mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccccc} B & \xrightarrow{i_1} & \text{Cyl}(B) & & \\ i'_0 \downarrow & & \downarrow b & \searrow \varepsilon & \\ \text{Cyl}'(B) & \xrightarrow{t} & Q & \xrightarrow{\tilde{\varepsilon}} & B \\ & \searrow \varepsilon' & & \nearrow \tilde{\varepsilon} & \end{array}$$

Note que, como ε e b são equivalências fracas, o mesmo é válido para $\tilde{\varepsilon}$ por conta da igualdade $\tilde{\varepsilon} \circ b = \varepsilon$ e da propriedade 2-de-3.

Considere agora o morfismo $\tilde{i} : B \sqcup B \rightarrow Q$ definido como $\tilde{i} := \langle b \circ i_0, t \circ i'_1 \rangle$ por meio da propriedade universal do coproduto $B \sqcup B$. Afirmamos que $\tilde{\varepsilon}$ e \tilde{i} juntos fatoram o morfismo codiagonal. De fato, por um lado temos

$$\tilde{\varepsilon} \circ \tilde{i} \circ j_1 = \tilde{\varepsilon} \circ b \circ i_0 = \varepsilon \circ i_0 = \text{id}_B,$$

e por outro temos também

$$\tilde{\varepsilon} \circ \tilde{i} \circ j_2 = \tilde{\varepsilon} \circ t \circ i'_1 = \varepsilon' \circ i'_1 = \text{id}_B;$$

portanto a propriedade universal do coproduto implica a igualdade $\tilde{\varepsilon} \circ \tilde{i} = \nabla$ desejada.

Vejamos que como a homotopia $h_1 : \text{Cyl}(B) \rightarrow X$ “termina” em f_2 , enquanto a homotopia $h_2 : \text{Cyl}'(B) \rightarrow X$ “começa” em f_2 , ou seja, temos as igualdades $h \circ i_1 = h \circ i'_0 = f_2$, a camada externa do diagrama abaixo comuta, portanto pela propriedade universal do pushout obtemos o morfismo $h : Q \rightarrow X$ indicado.

$$\begin{array}{ccccc} B & \xrightarrow{i_1} & \text{Cyl}(B) & & \\ i'_0 \downarrow & & \downarrow b & \searrow h_1 & \\ \text{Cyl}'(B) & \xrightarrow{t} & Q & \xrightarrow{h} & B \\ & \searrow h_2 & & \nearrow h & \end{array}$$

Afirmamos que o morfismo h construído dessa forma satisfaz a igualdade $h \circ \tilde{i} = \langle f_1, f_3 \rangle$. De fato, pré-compondo com a injeção j_1 no coproduto vemos que

$$h \circ \tilde{i} \circ j_1 = h \circ b \circ i_0 = h_1 \circ i_0 = f_1,$$

e pré-compondo com a outra injeção j_2 vemos também que

$$h \circ \tilde{i} \circ j_2 = h \circ t \circ i'_1 = h_2 \circ i'_1 = f_3;$$

de forma que a igualdade desejada segue da propriedade universal do coproduto novamente.

Infelizmente, embora isso pareça muito ser verdade, h não define uma homotopia de f_1 para f_3 , pois a tripla $(Q, \tilde{i}, \tilde{\varepsilon})$ não define um objeto cilindro para B já que \tilde{i} pode não ser uma cofibração. Felizmente, podemos usar o axioma de fatoração para corrigirmos esse defeito sem grandes dores de cabeça. Mais precisamente, usando tal axioma podemos reescrever \tilde{i} como uma cofibração $\hat{i} : B \sqcup B \rightarrow \hat{Q}$ seguida de uma fibração trivial $p : \hat{Q} \xrightarrow{\sim} Q$ conforme mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} B \sqcup B & \xrightarrow{\tilde{i}} & Q \\ \searrow \hat{i} & & \nearrow p \\ & \hat{Q} & \end{array}$$

Veja que a tripla $(\hat{Q}, \hat{i}, \tilde{\varepsilon} \circ p)$ define realmente um objeto cilindro: \hat{i} é uma cofibração por hipótese, $\tilde{\varepsilon} \circ p$ é a composição de duas equivalências fracas e, portanto, uma equivalência fraca também; e os dois morfismos em questão fatoram a codiagonal pois

$$\tilde{\varepsilon} \circ p \circ \hat{i} = \tilde{\varepsilon} \circ \tilde{i} = \nabla.$$

Note agora que o morfismo composto $h \circ p : \hat{Q} \rightarrow X$ define enfim a homotopia procurada com relação a esse verdadeiro objeto cilindro como mostra a sequência de igualdades

$$h \circ p \circ \hat{i} = h \circ \tilde{i} = \langle f_1, f_3 \rangle. \quad \blacksquare$$

Tendo em vista o Corolário 1.5.6, se X é um objeto cofibrante, então para qualquer outro objeto Y podemos formar o conjunto quociente

$$[X, Y]_\ell := M(X, Y) / \simeq_\ell$$

cujos elementos chamaremos de **classes de homotopia à esquerda** de morfismos. Dado um morfismo qualquer $f : X \rightarrow Y$, denotaremos por $[f]_\ell$ sua imagem no quociente $[X, Y]_\ell$.

Note que, se $\beta : Y \rightarrow Z$ é um morfismo *qualquer*, temos a função $M(X, \beta) : M(X, Y) \rightarrow M(X, Z)$ de pushforward (pós-composição) ao longo de β . Sabemos da Proposição 1.5.5 que homotopias à esquerda são preservadas por pushforwards, a composição $\pi_{X, Z} \circ M(X, \beta) : M(X, Y) \rightarrow [X, Z]_\ell$ é constante nas classes de homotopia à esquerda, portanto existe uma única função induzida $[X, \beta]_\ell : [X, Y]_\ell \rightarrow [X, Z]_\ell$ fazendo comutar o diagrama abaixo,

$$\begin{array}{ccc} M(X, Y) & \xrightarrow{M(X, \beta)} & M(X, Z) \\ \pi_{X, Y} \downarrow & & \downarrow \pi_{X, Z} \\ [X, Y]_\ell & \xrightarrow{[X, \beta]_\ell} & [X, Z]_\ell \end{array}$$

onde $\pi_{X, Y} : M(X, Y) \rightarrow [X, Y]_\ell$ e $\pi_{X, Z} : M(X, Z) \rightarrow [X, Z]_\ell$ denotam as projeções canônicas no quociente. Explicitamente, dada uma classe de homotopia à esquerda $[f]_\ell \in [X, Y]_\ell$, pela comutatividade do quadrado acima temos

$$[X, \beta]_\ell([f]_\ell) = [\beta \circ f]_\ell.$$

1.5.7 Definição. Sejam \mathbf{M} uma categoria modelo e $X \in \mathbf{M}$ um objeto qualquer. Um **objeto de caminhos** para B é uma fatoração do morfismo diagonal $\Delta : X \rightarrow X \times X$ como uma equivalência fraca seguida de uma fibração. Mais explicitamente, um objeto de caminhos para B é uma tripla $(P(X), c, p)$, onde $P(X) \in \mathbf{M}$ é um objeto da categoria, $c : X \xrightarrow{\sim} P(X)$ é uma equivalência fraca, e $p : P(X) \rightarrow X \times X$ é uma fibração tais que $\Delta = p \circ c$, conforme mosrado no diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccc} & & P(X) \\ & \nearrow c & \downarrow p \\ X & \xrightarrow{\Delta} & X \times X \end{array}$$

Quando o morfismo c é também uma cofibração, portanto uma cofibração trivial, dizemos que a tripla $(P(X), c, p)$ define um objeto de caminhos **forte** para X .

1.5.8 Observação. O axioma de fatoração (M5) garante que o morfismo diagonal $\Delta : X \times X \rightarrow X$ pode ser fatorado como uma cofibração trivial seguida de uma fibração, portanto todo objeto de uma categoria modelo admite um objeto de caminhos que é até mesmo forte. Como no caso do objetos cilindro, nem sempre esse modelo obtido pelo axioma de fatoração é o mais conveniente para trabalharmos, de forma que é vantajoso considerarmos também objetos de caminhos que não necessariamente sejam fortes.

Neste caso temos também algumas notações associadas. Dado um objeto de caminhos $(P(X), c, p)$ para X , se $\pi_1, \pi_2 : X \times X \rightarrow X$ são as projeções canônicas associadas ao produto, denotaremos os morfismos compostos $\pi_1 \circ p, \pi_2 \circ p : P(X) \rightarrow X$ por p_0 e p_1 , respectivamente. Note então que a fibração p é precisamente o morfismo induzido por p_0 e p_1 por meio da propriedade universal do produto, ou seja, $p = (p_0, p_1)$. Como no caso de objetos cilindros, os índices usados na notação ficam claros quando examinamos o caso topológico clássico, onde o objeto de caminhos é dado pelo espaço de mapas X^I munido da topologia compacto-aberta, a equivalência fraca $c : X \rightarrow X^I$ associa a cada ponto $x \in X$ o caminho $c(b) : I \rightarrow X$ constante naquele ponto, e a fibração $p : X^I \rightarrow X \times X$ associa a um caminho $\gamma \in X^I$ seus pontos inicial e final, ou seja, $p(\gamma) := (\gamma(0), \gamma(1))$. Nesse caso, os mapas $p_0, p_1 : X^I \rightarrow X$ introduzidos acima são simplesmente os mapas de avaliação no instante inicial 0 e no instante final 1, respectivamente, o que justifica nossa escolha de índice na notação usada para tais morfismos.

Vamos agora percorrer um caminho completamente análogo ao que percorremos para objetos cilindros. Começamos inicialmente verificando algumas das propriedades básicas satisfeitas por objetos de caminhos.

1.5.9 Lema. *Sejam \mathbf{M} uma categoria modelo, $X \in \mathbf{M}$ um objeto, e $(P(X), c, p)$ um objeto de caminhos qualquer para X .*

- (i) *Os morfismos $p_0, p_1 : P(X) \rightarrow X$ são equivalência fracas.*
- (ii) *Se X é um objeto fibrante, então os morfismos $p_0, p_1 : P(X) \rightarrow X$ são também fibrações e, portanto, fibrações triviais.*

Demonstração. (i) Note que pela definição de p_0 e do morfismo diagonal Δ temos

$$p_0 \circ c = \pi_1 \circ p \circ c = \pi_1 \circ \Delta = \text{id}_X.$$

Ora, como id_X é uma equivalência fraca, o mesmo valendo para c pela definição de objeto de caminhos, segue da propriedade 2-de-3 que p_0 é uma equivalência fraca. A demonstração de que p_1 também é uma equivalência fraca segue de um raciocínio completamente análogo.

(ii) Lembremos que em qualquer categoria, um produto por der interpretado como um pull-back sobre o objeto final. Mais precisamente, se $*$ $\in \mathbf{M}$ denota um objeto final qualquer de \mathbf{M} , então o quadrado comutativa abaixo é um pullback.

$$\begin{array}{ccc} X \times X & \xrightarrow{\pi_1} & B \\ \pi_2 \downarrow & & \downarrow !_B \\ B & \xrightarrow{!_B} & * \end{array}$$

Como X é por hipótese fibrante, ou seja, o morfismo $!_X : X \rightarrow *$ é uma fibração, e como fibrações são preservadas por pullbacks de acordo com a Corolário 1.3.14, concluímos que as projeções canônicas π_1 e π_2 são fibrações também. Segue então que os morfismos $p_0 = \pi_1 \circ p$ e $p_1 = \pi_2 \circ p$ são composições de fibrações e, portanto, fibrações também de acordo com o Corolário 1.3.14 novamente. ■

Objetos de caminhos dão origem a uma noção de homotopia entre morfismos que é dual à noção de homotopia à esquerda introduzida anteriormente em termos de objetos cilindros.

1.5.10 Definição. Dois morfismos $f, g : B \rightarrow X$ em uma categoria modelo \mathbf{M} são ditos **homotópicos à direita** se existe algum objeto de caminhos $(P(X), c, p)$ para X e um morfismo $h : B \rightarrow P(X)$ tal que $p \circ h = (f, g)$, conforme mostrado no diagrama abaixo. Neste caso, denotamos essa relação por $f \sim_r g$.

$$\begin{array}{ccccc} & & P(X) & & \\ & \nearrow h & \downarrow p & \nwarrow c & \\ B & \xrightarrow{(f,g)} & X \times X & \xleftarrow{\Delta} & X \end{array}$$

Veja que a definição acima recupera a definição clássica da Topologia. O mapa $h : B \rightarrow X^I$ define uma família de caminhos em X parametrizada pelos pontos do espaço B . Para cada $b \in B$, o caminho associada $h(b)$ tem $f(b)$ como ponto inicial pois

$$[h(b)](0) = p_0(h(b)) = \pi_1(p(h(b))) = \pi_1(f(b), g(b)) = f(b),$$

e analogamente, $h(b)$ tem como ponto final a imagem $g(b)$. Assim, a família de caminhos definida pela homotopia h em certo sentido “conecta” a imagem do estágio inicial f da homotopia ao estágio final g da mesma.

Nosso objetivo agora é demonstrar um resultado análogo à Proposição 1.5.5 para homotopias à direita.

1.5.11 Proposição. *Suponha que $f, g : B \rightarrow X$ sejam dois morfismos homotópicos à direita em uma categoria modelo \mathbf{M} .*

1. *Dado um morfismo $\alpha : A \rightarrow B$, os morfismos compostos $f \circ \alpha, g \circ \alpha : A \rightarrow X$ são homotópicos à direita.*
2. *Se B é cofibrante, então a homotopia entre f e g independe do objeto de caminhos para X .*
3. *Se B é cofibrante, então dado qualquer morfismo $\beta : X \rightarrow Y$, os morfismos compostos $\beta \circ f, \beta \circ g : B \rightarrow Y$ são homotópicos à direita.*

Demonstração. 1. Como f e g são homotópicos à direita, existe *algum* objeto de caminhos $(P(X), c, p)$ para X juntamente com um morfismo $h : B \rightarrow P(X)$ tal que $p \circ h = (f, g)$. Afirmamos que o morfismo composto $h \circ \alpha : A \rightarrow P(X)$ define uma homotopia à direita de $f \circ \alpha$ para $g \circ \alpha$. De fato, basta para isso notarmos que

$$p \circ h \circ \alpha = (f, g) \circ \alpha = (f \circ \alpha, g \circ \alpha),$$

sendo que a última igualdade é uma consequência direta da propriedade universal que caracteriza o produto $X \times X$.

2. Considere um objeto de caminhos $(P(X), c, p)$ para X juntamente com uma homotopia à direita $h : B \rightarrow P(X)$ de f para g com relação a esse objeto de caminhos. Afirmamos inicialmente que podemos encontrar uma outra homotopia à direita entre f e g que esteja definida em um objeto de caminhos *forte* para X . Inicialmente, aplicamos o axioma de fatoração (M5) à equivalência fraca $c : X \rightarrow P(X)$ para obtermos uma cofibração trivial $i : X \xrightarrow{\sim} P$ seguida de uma fibração $q : P \rightarrow P(X)$ tais que $c = q \circ i$, conforme mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{c} & P(X) \\ & \searrow i & \nearrow q \\ & P & \end{array}$$

Afirmamos que a tripla $(P, i, p \circ q)$ define um objeto de caminhos forte para X . De fato, i é uma cofibração trivial pela fatoração acima, enquanto $p \circ q$ é a composição de duas fibrações e, portanto, uma fibração também. Além disso, esses morfismos fatoram o morfismo diagonal de X já que

$$(p \circ q) \circ i = p \circ (q \circ i) = p \circ c = \Delta.$$

Tendo em mãos o objeto de caminhos forte acima, vejamos como obter uma homotopia que tome valores nele a partir da homotopia h já existente. Veja inicialmente que o problema de levantamento abaixo admite uma solução $H : B \rightarrow P$, já que $!_B : \emptyset \rightarrow B$ é uma cofibração pela hipótese de B ser cofibrante, e $q : P \rightarrow P(X)$ é uma fibração trivial pela fatoração acima e pela propriedade 2-de-3.

$$\begin{array}{ccc} \emptyset & \xrightarrow{!_P} & P \\ !_B \downarrow & \nearrow H & \downarrow q \\ B & \xrightarrow{h} & P(X) \end{array}$$

Esse morfismo H é precisamente a homotopia à direita procurada, pois

$$(p \circ q) \circ H = p \circ (q \circ H) = p \circ h = (f, g).$$

Podemos assumir então sem perda de generalidade que o objeto de caminhos $(P(X), c, p)$ no qual está definida a homotopia à direita entre f e g é forte. Se (P', c', p') é outro objeto de caminhos *qualquer* para X , vejamos como construir uma homotopia à direita $h' : B \rightarrow P'$ tomando valores nesse objeto. Note primeiro que o problema de levantamento dado pelo quadrado comutativo abaixo admite uma solução ϕ , já que c é uma cofibração trivial, e p' é uma fibração.

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{c'} & P' \\ c \downarrow & \nearrow \phi & \downarrow p' \\ P(X) & \xrightarrow{p} & X \times X \end{array}$$

Basta notar agora que a composição $\phi \circ h : B \rightarrow P'$ define a homotopia à direita desejada, pois

$$p' \circ \phi \circ h = p \circ h = (f, g).$$

3. Suponha que $(P(X), c_X, p_X)$ seja um objeto de caminhos forte para X e que $(P(Y), c_Y, p_Y)$ seja um objeto de caminhos qualquer para Y . Sendo B cofibrante, segue do item 2 que certamente existe uma homotopia de f para g em termos do objeto de caminhos $P(X)$, ou seja, um morfismo $h : B \rightarrow P(X)$ tal que $p_X \circ h = (f, g)$. A ideia é obtermos um morfismo $\phi : P(X) \rightarrow P(Y)$ que nos permita “empurrar” a homotopia h ao longo do morfismo β , e para isso é claro que vamos usar o axioma de levantamento.

Note que o quadrado abaixo é comutativo, pois

$$p_Y \circ c_Y \circ \beta = \Delta_Y \circ \beta = \beta \times \beta = (\beta \times \beta) \circ \text{id}_X = (\beta \times \beta) \circ \Delta_X = (\beta \times \beta) \circ c_X \circ p_X.$$

Aplicando o axioma de levantamento (M4) obtemos então o levantamento $\phi : P(X) \rightarrow P(Y)$ conforme indicado.

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{c_Y \circ \beta} & P(Y) \\ c_X \downarrow \wr & \nearrow \phi & \downarrow p_Y \\ P(X) & \xrightarrow{(\beta \times \beta) \circ p_X} & Y \times Y \end{array}$$

Afirmamos que o morfismo composto $\phi \circ h : B \rightarrow P(Y)$ define a homotopia à direita desejada então $\beta \circ f$ e $\beta \circ g$. De fato, basta notar que

$$p_Y \circ \phi \circ h = (\beta \times \beta) \circ p_X \circ h = (\beta \times \beta) \circ (f, g) = (\beta \circ f, \beta \circ g). \quad \blacksquare$$

O próximo passo no nosso estudo de homotopias em categorias de modelos é dualizarmos o Corolário 1.5.6 para obtermos um resultado análogo para homotopias à direita.

1.5.12 Corolário. *Em uma categoria de modelos $(M, \mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F})$, se B é um objeto qualquer, e X é um objeto fibrante, então a relação de homotopia à direita \simeq_r define uma relação de equivalência no conjunto de morfismos.*

Demonstração. Dado um morfismo $f : B \rightarrow X$ qualquer, note primeiro que o morfismo idêntico id_X é certamente homotópico à direita a si mesmo, pois se $(P(X), c, p)$ é um objeto de caminhos qualquer para X , o próprio morfismo $c : X \rightarrow P(X)$ define a homotopia à direita mencionada já que $p \circ c = \Delta = (\text{id}_X, \text{id}_X)$. Ora, sabendo então que $\text{id}_X \simeq_r \text{id}_X$ e que homotopias à direita são preservadas por composições à direita pela Proposição 1.5.11, segue que $\text{id}_X \circ f \simeq_r \text{id}_X \circ f$, ou seja, $f \simeq_r f$; mostrando assim a reflexividade da relação. De forma similar ao que ocorreu com homotopias à esquerda, note que essa demonstração não depende da hipótese de fibrância sobre X , ou seja, a relação de homotopia à direita é *sempre* reflexiva.

Vejamos agora a questão da simetria da relação. A estratégia é completamente análoga à que empregamos na demonstração da simetria da relação de homotopia à esquerda. Dados dois morfismos $f, g : B \rightarrow X$ e uma homotopia $h : B \rightarrow P(X)$ de f para g tomando valores em um objeto de caminhos $(P(X), c, p)$ qualquer para X , precisamos produzir um outro objeto de caminhos no qual os pontos inicial e final estejam trocados, e a estratégia para conseguirmos isso é trocarmos a ordem dos fatores do produto $B \times B$. Mais precisamente, se $\pi_1, \pi_2 : X \times X \rightarrow X$ denotam as projeções canônicas, consideramos o morfismo $\Sigma := (\pi_2, \pi_1) : X \times X \rightarrow X \times X$. Note que as igualdades

$$\pi_1 \circ (\Sigma \circ \Delta) = (\pi_1 \circ \Sigma) \circ \Delta = \pi_2 \circ \Delta = \text{id}_X$$

juntamente com as igualdades

$$\pi_2 \circ (\Sigma \circ \Delta) = (\pi_2 \circ \Sigma) \circ \Delta = \pi_1 \circ \Delta = \text{id}_X$$

mostram que o morfismo diagonal é invariante pelo morfismo Δ , ou seja, vale a igualdade $\Sigma \circ \Delta = \Delta$. Uma aplicação similar da propriedade universal do produto mostra que o morfismo Σ satisfaz também a igualdade $\Sigma \circ \Sigma = \text{id}_{X \times X}$, de onde concluímos, em particular, que Σ é um isomorfismo e portanto uma fibração trivial.

Afirmamos agora que a tripla $(P(X), c, \Sigma \circ p)$ define um objeto de caminhos para X . De fato, já sabemos que c é uma equivalência fraca, $\Sigma \circ p : P(X) \rightarrow X \times X$ é a composição de duas fibrações, logo uma fibração também, e usando as propriedades acima vemos que

$$(\Sigma \circ p) \circ c = \Sigma \circ (p \circ c) = \Sigma \circ \Delta = \Delta;$$

portanto temos uma outra fatoração do morfismo diagonal. Basta notar agora que $h : B \rightarrow P(X)$ satisfaz as igualdades

$$\pi_1 \circ (\Sigma \circ p) \circ h = (\pi_1 \circ \Sigma) \circ (p \circ h) = \pi_2 \circ (f, g) = g$$

e também

$$\pi_2 \circ (\Sigma \circ p) \circ h = (\pi_2 \circ \Sigma) \circ (p \circ h) = \pi_1 \circ (f, g) = f;$$

portanto h define uma homotopia à direita de g para f com relação ao objeto de caminhos “trocado” $(P(X), c, \Sigma \circ p)$. Veja que essa demonstração também não exige a condição de fibrância sobre X , ou seja, a relação de homotopia à direita é *sempre* simétrica.

Resta apenas mostrarmos a transitividade da relação, e aqui a condição de fibrância de X será essencial. Suponha que tenhamos três morfismos $f_1, f_2, f_3 : B \rightarrow X$ juntamente com homotopias à direita $f_1 \simeq_r f_2$ e $f_2 \simeq_r f_3$ dadas, respectivamente, por morfismos $h_1 : B \rightarrow P(X)$ e $h_2 : B \rightarrow P'(X)$, onde $(P(X), c, p)$ e $(P'(X), c', p')$ são dois objetos de caminhos possivelmente distintos. Analogamente ao que fizemos no caso de homotopias à esquerda, precisamos de alguma forma combinar os objetos $P(X)$ e $P'(X)$ de forma a obtermos um outro objeto de caminhos onde faça sentido a concatenação das homotopias h_1 e h_2 . O primeiro passo nesse sentido é formarmos o pullback P indicado abaixo,

$$\begin{array}{ccc} P & \xrightarrow{\phi} & P(X) \\ \phi' \downarrow & & \downarrow p_1 \\ P'(X) & \xrightarrow{p'_0} & X \end{array}$$

onde $p_1 : P(X) \rightarrow X$ e $p'_0 : P'(X) \rightarrow X$ são componentes das fibrações $p : P(X) \rightarrow X \times X$ e $p' : P'(X) \rightarrow X \times X$, respectivamente. A hipótese de fibrância de X garante que tais morfismos sejam fibrações triviais de acordo com o Lema 1.5.3, portanto os morfismos ϕ e ϕ' que aparecem no pullback acima são também fibrações triviais graças ao Corolário 1.3.14.

As igualdades $p_1 \circ c = p'_0 \circ c' = \text{id}_X$ dão origem por meio da propriedade universal do pullback a um morfismo $\bar{c} : X \rightarrow P$ fazendo comutar o diagrama mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccccc} X & & & & \\ & \searrow \bar{c} & & \searrow c & \\ & P & \xrightarrow{\phi} & P(X) & \\ & \downarrow \phi' & & \downarrow p_1 & \\ & P'(X) & \xrightarrow{p'_0} & X & \end{array}$$

Note que o fato de ϕ e c serem equivalências fracas, juntamente com a igualdade $\phi \circ \bar{c} = c$ garantem que \bar{c} seja uma equivalência fraca também graças à propriedade 2-de-3.

O pullback P vem equipado também com um morfismo $q : P \rightarrow X \times X$ devido por meio da propriedade universal do produto como $q := (p_0 \circ \phi, p'_1 \circ \phi')$. Esse morfismo q define juntamente com o morfismo \bar{c} obtido acima uma fatoração do morfismo diagonal de X , fato este que segue diretamente das igualdades

$$\pi_1 \circ q \circ \bar{c} = p_0 \circ \phi \circ \bar{c} = p_0 \circ c = \text{id}_X$$

e também das igualdades

$$\pi_2 \circ q \circ \bar{c} = p'_1 \circ \phi' \circ \bar{c} = p'_1 \circ c' = \text{id}_X.$$

As homotopias h_1 e h_2 consideradas inicialmente satisfazem as igualdades $p_1 \circ h_1 = p'_0 \circ h_2 = f_2$, logo a propriedade universal do pullback fornece então um morfismo $h : B \rightarrow P$ fazendo comutar o diagrama mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccccc} B & & & & \\ & \searrow^{h_1} & & & \\ & & P & \xrightarrow{\phi} & P(X) \\ & \swarrow_{h_2} & \downarrow \phi' & & \downarrow p_1 \\ & & P'(X) & \xrightarrow{p'_0} & X \end{array}$$

Afirmamos que esse morfismo h satisfaz a igualdade $q \circ h = (f_1, f_3)$. De fato, por um lado temos

$$\pi_1 \circ q \circ h = p_0 \circ \phi \circ h = p_0 \circ h_1 = f_1,$$

enquanto por outro temos

$$\pi_2 \circ q \circ h = p'_1 \circ \phi' \circ h = p'_1 \circ h_2 = f_3;$$

portanto a igualdade desejada segue da propriedade universal do produto.

Infelizmente, embora o morfismo h satisfaça a igualdade acima, ele *não* define uma homotopia à direita de f_1 para f_3 pois a tripla (P, \bar{c}, q) *não* necessariamente define um objeto de caminhos para X já que q pode não ser uma fibração. Felizmente podemos corrigir isso facilmente como no caso da homotopia à esquerda. Usando o axioma de fatoração podemos reescrever $q : P \rightarrow X \times X$ como uma cofibração trivial $i : P \rightarrow \tilde{P}$ seguida de uma fibração $\tilde{q} : \tilde{P} \rightarrow X \times X$ conforme indicado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} P & \xrightarrow{q} & X \times X \\ & \searrow \scriptstyle i & \nearrow \scriptstyle \tilde{q} \\ & \tilde{P} & \end{array}$$

A tripla $(\tilde{P}, i \circ \bar{c}, \tilde{q})$ sim define um objeto de caminhos para X . De fato, o morfismo $i \circ \bar{c} : X \rightarrow \tilde{P}$ é a composição de duas equivalências fracas e, portanto, uma equivalência fraca também, $\tilde{q} : \tilde{P} \rightarrow X \times X$ é uma fibração por construção; e temos também a igualdade

$$\tilde{q} \circ (i \circ \bar{c}) = (\tilde{q} \circ i) \circ \bar{c} = q \circ \bar{c} = \Delta.$$

Notamos enfim que o morfismo composto $i \circ h : B \rightarrow \tilde{P}$ define a homotopia à direita de f_1 para f_3 desejada como mostram as igualdades

$$\tilde{q} \circ (i \circ h) = (\tilde{q} \circ i) \circ h = q \circ h = (f_1, f_3). \quad \blacksquare$$

Como no caso da relação de homotopia à esquerda, se Y é um objeto fibrante, então para qualquer outro objeto X podemos formar o conjunto quociente

$$[X, Y]_r := M(X, Y) / \simeq_r$$

cujos elementos são chamados de **classes de homotopia à direita** de morfismos. Dado um morfismo $f : X \rightarrow Y$, denotamos por $[f]_r$ sua imagem no conjunto quociente $[f]_r$.

Analogamente ao que tínhamos no caso da relação de homotopia à esquerda, se $\alpha : W \rightarrow X$ é um morfismo *qualquer*, a compatibilidade de homotopias à direita com pullbacks provada na Proposição 1.5.11 nos permite fatorar a função $M(\alpha, Y) : M(X, Y) \rightarrow M(W, Y)$ de pullback (pré-composição) ao longo de α pelas projeções canônicas para obtermos uma única função induzida $[\alpha, Y]_r : [X, Y]_r \rightarrow [W, Y]_r$ fazendo comutar o quadrado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} M(W, Y) & \xleftarrow{M(\alpha, Y)} & M(X, Y) \\ \pi_{W, Y} \downarrow & & \downarrow \pi_{X, Y} \\ [W, Y]_r & \xleftarrow{[\alpha, Y]_r} & [X, Y]_r \end{array}$$

Explicitamente, dada uma classe de homotopia à direita $[f]_r \in [X, Y]_r$, pela comutatividade acima temos

$$[\alpha, Y]_r([f]_r) = [f \circ \alpha]_r.$$

Encerraremos essa seção comparando as noções de homotopias à esquerda e à direita e procurando entender quando as duas coincidem ou não. Em suma, o resultado abaixo diz que essas duas noções sempre coincidem quando o domínio ou o codomínio são objetos bons do ponto de vista homotópico, ou seja, satisfazem condições de cofibrância ou fibrância.

1.5.13 Proposição. *Seja $(M, \mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F})$ uma categoria de modelos.*

1. *Se B é um objeto cofibrante, X é um objeto qualquer, e $f, g : B \rightarrow X$ são dois morfismos homotópicos à esquerda, então f e g são também homotópicos à direita.*
2. *Se B é um objeto qualquer, X é um objeto fibrante, e $f, g : B \rightarrow X$ são dois morfismos homotópicos à direita, então f e g são também homotópicos à esquerda.*

Demonstração. 1. Sejam $(\text{Cyl}(B), i, \varepsilon)$ um objeto cilindro qualquer para B e $h : \text{Cyl}(B) \rightarrow X$ uma homotopia à esquerda de f para g . A cofibrância de B garante que $i_0 : B \rightarrow \text{Cyl}(B)$ seja uma cofibração trivial pelo Lema 1.5.3. Veja que o quadrado mostrado abaixo é comutativo como mostra a sequência de igualdades

$$(f \circ \varepsilon, h) \circ i_0 = (f \circ \varepsilon \circ i_0, h \circ i_0) = (f, f) = \Delta \circ f = p \circ c \circ f.$$

$$\begin{array}{ccc} B & \xrightarrow{c \circ f} & P(X) \\ i_0 \downarrow \wr & \nearrow \theta & \downarrow p \\ \text{Cyl}(B) & \xrightarrow{(f \circ \varepsilon, h)} & X \times X \end{array}$$

O axioma de levantamento garante então a existência do morfismo diagonal $\theta : \text{Cyl}(B) \rightarrow P(X)$ fazendo comutar o diagrama todo como mostrado acima.

Vamos tentar entender a função do morfismo θ . Tal morfismo transforma pontos do objeto cilindro $\text{Cyl}(B)$ em pontos do objeto $P(X)$, que pensamos intuitivamente como caminhos em X . A igualdade $p \circ \theta = (f \circ \varepsilon, h)$ diz que o ponto inicial desse caminho é determinada por

$f \circ \varepsilon$, enquanto o ponto final é determinado pelo valor da própria homotopia h . Ora, como nossa homotopia termina em g , a ideia é que se compormos θ com a cofibração $i_1 : B \xrightarrow{\sim} \text{Cyl}(B)$ que determina a parte superior do cilindro, então teremos um caminho de f até g . De fato, o morfismo composto $H := \theta \circ i_1$ satisfaz

$$p \circ H = p \circ \theta \circ i_1 = (f \circ \varepsilon, h) \circ i_1 = (f \circ \varepsilon \circ i_1, h \circ i_1) = (f, g),$$

definindo, portanto, uma homotopia à direita de f para g .

2. A demonstração desse segundo item é simplesmente uma dualização da demonstração do primeiro. Considere $h : B \rightarrow P(X)$ uma homotopia à direita de f para g . Aplicando o Lema 1.5.9 concluímos que a projeção $p_0 : P(X) \rightarrow X$ é uma fibração trivial. A sequência de igualdades

$$p_0 \circ \langle c \circ f, h \rangle = \langle p_0 \circ c \circ f, p_0 \circ h \rangle = \langle f, f \rangle = f \circ \nabla = f \circ \varepsilon \circ i$$

mostra que o quadrado abaixo é comutativo.

$$\begin{array}{ccc} B \sqcup B & \xrightarrow{\langle c \circ f, h \rangle} & P(X) \\ \downarrow i & \searrow \psi & \downarrow p_0 \\ \text{Cyl}(B) & \xrightarrow{f \circ \varepsilon} & X \end{array}$$

Aplicando o axioma de levantamento obtemos o mapa diagonal $\psi : \text{Cyl}(B) \rightarrow P(X)$ também indicado acima e que faz o diagrama todo comutar ainda. Basta notar então que o morfismo composto $H := p_1 \circ \psi$ satisfaz as igualdades

$$H \circ i = p_1 \circ \psi \circ i = p_1 \circ \langle c \circ f, h \rangle = \langle p_1 \circ c \circ f, p_1 \circ h \rangle = \langle f, g \rangle$$

e define, portanto, uma homotopia à esquerda de f para g . ■

1.5.14 Definição. Dois morfismos $f, g : B \rightarrow X$ em uma categoria de modelos \mathbf{M} são ditos **homotópicos** quando são simultaneamente homotópicos à esquerda e à direita.

Tendo a definição acima em mãos, podemos reformular o enunciado da Proposição 1.5.13 da seguinte forma: quando o domínio é cofibrante, então dois morfismos homotópicos à esquerda são também homotópicos; e quando o codomínio é fibrante, dois morfismos homotópicos à direita são também homotópicos. O caso que nos será mais útil e que deixamos registrados na forma do próximo corolário é aquele onde as condições de cofibrância e fibrância são ambas satisfeitas, de forma que as várias noções de homotopia vistas até agora coincidam.

1.5.15 Corolário. Em uma categoria de modelos, dados um objeto cofibrante B , um objeto fibrante X , e dois morfismos $f, g : B \rightarrow X$, as seguintes afirmações são equivalentes:

1. f e g são homotópicos à esquerda;
2. f e g são homotópicos à direita;
3. f e g são homotópicos.

Dados então um objeto cofibrante X e um objeto fibrante Y em uma categoria de modelos \mathbf{M} , sabemos pelo Corolário 1.5.6, ou pelo Corolário 1.5.12 que a relação de homotopia \simeq entre morfismos define uma relação de equivalência no conjunto de morfismos $\mathbf{M}(X, Y)$, de forma que podemos então considerar o conjunto quociente

$$[X, Y] := \mathbf{M}(X, Y) / \simeq \tag{1.32}$$

cujos elementos são chamados de **classes de homotopia** de morfismos de X para Y . Veremos na próxima seção que podemos usar estes conjuntos de classes de homotopia de morfismos para construirmos um modelo (a menos de equivalência) explícito para a localização de M na classe das equivalências fracas imitando a construção da categoria homotópica usual vinda da Teoria de Homotopia clássica.

1.6 Localizações

Nessa seção discutimos inicialmente a noção de localização de uma categoria C em uma classe qualquer de morfismos, e em seguida discutimos como a estrutura de uma categoria de modelos nos permite de certa forma simplificar o processo de localização na classe das equivalências fracas, simplificação esta que nos permitirá mais adiante construir modelos muito mais manejáveis para essa localização em termos de classes de homotopia.

Em geral, a única forma possível de compararmos dois morfismos em uma categoria C qualquer é por meio de igualdades. Note, entretanto, que a situação é mais sutil para morfismos na categoria de categorias \mathbf{Cat} , já que dois funtores podem estar relacionados por uma igualdade ou também por um isomorfismo natural. Isso significa que construções universais envolvendo *categorias em si* podem ser formuladas de duas formas: uma versão *estrita* usando apenas igualdades entre funtores, e uma versão *fraca* usando isomorfismos naturais entre funtores. A primeira definição de localização que daremos, a qual aparece por exemplo nas referências [HM22, Definição 7.30] e [nLa23], é a versão fraca. Essa é a versão que realmente aparece na teoria de categoria de modelos, já que a construção de uma localização na classe de equivalências fracas por meio das classes de homotopia de morfismos entre objetos bifibrantes satisfaz apenas essa versão fraca da definição. Uma boa discussão comparando estas duas possíveis definições e também outras existentes na literatura também pode ser encontrada em [Shu].

1.6.1 Definição. Sejam C uma categoria e $\mathcal{W}\text{Mor}(C)$ uma classe qualquer de morfismos. Uma **localização fraca de C em \mathcal{W}** é um par (L, γ) , onde L é uma categoria e $\gamma : C \rightarrow L$ é um funtor, satisfazendo as seguintes condições:

- (i) O funtor γ transforma os morfismos de \mathcal{W} em isomorfismos de L .
- (ii) Dada uma outra categoria D qualquer, o funtor de pré-composição com γ define uma *equivalência* de categorias

$$\text{Fun}(\gamma, D) : \text{Fun}(L, D) \xrightarrow{\simeq} \text{Fun}_{\mathcal{W}}(C, D),$$

onde $\text{Fun}_{\mathcal{W}}(C, D)$ denota a subcategoria plena da categoria de funtores $\text{Fun}(C, D)$ gerada por aqueles funtores que transformam morfismos de \mathcal{W} em isomorfismos de D .

O resultado abaixo mostra que a definição acima pode ser reformulada de forma a ficar mais similar a outras definições feitas por meio de propriedades universais.

1.6.2 Proposição. Sejam C uma categoria e $\mathcal{W} \subseteq \text{Mor}(C)$ uma classe de morfismos. Dada uma categoria L e um funtor $\gamma : C \rightarrow L$ que transforma os morfismos de \mathcal{W} em isomorfismos de L , o par (L, γ) define uma localização fraca de C em \mathcal{W} se, e somente se, as duas condições abaixo são satisfeitas para qualquer categoria D :

1. Se $F : C \rightarrow D$ é um funtor que transforma morfismos de \mathcal{W} em isomorfismos de D , então existe um funtor $\bar{F} : L \rightarrow D$ e um isomorfismo natural de funtores $\bar{F} \circ \gamma \cong F$.
2. Dados dois funtores $G_1, G_2 : L \rightarrow D$ quaisquer, a função

$$\text{Fun}(\gamma, D)_{G_1, G_2} : \text{Hom}_{\text{Fun}(L, D)}(G_1, G_2) \rightarrow \text{Hom}_{\text{Fun}_{\mathcal{W}}(C, D)}(G_1 \circ \gamma, G_2 \circ \gamma)$$

associada ao funtor de pré-composição $\text{Fun}(\gamma, D) : \text{Fun}(L, D) \rightarrow \text{Fun}_{\mathcal{W}}(C, D)$ é uma bijeção.

Demonstração. Lembremos que um funtor $F : C \rightarrow D$ define uma equivalência de categorias se, e somente se, ele é essencialmente sobrejetivo, pleno e fiel, ou seja, se ele satisfaz as seguintes condições:

1. Dado um objeto $Y \in D$ qualquer, existe um objeto $X \in C$ e um isomorfismo $F(X) \cong Y$.
2. Dados dois objetos $X_1, X_2 \in C$ quaisquer, a função

$$F_{X_1, X_2} : \text{Hom}_C(X_1, X_2) \rightarrow \text{Hom}_D(F(X_1), F(X_2))$$

associado a funtor $F : C \rightarrow D$ é uma bijeção.

O resultado do enunciado segue então dessa caracterização de equivalência aplicada ao funtor $\text{Fun}(\gamma, D) : \text{Fun}(L, D) \rightarrow \text{Fun}_{\mathcal{W}}(C, D)$. ■

Apesar da formulação de localização acima ser mais similar a outras propriedades univversais com as quais estamos acostumados, existe uma diferença sutil mas importante: as propriedades universais usuais estabelecem a existência sob certas condições de um morfismo *único* satisfazendo certas *igualdades*. Já a propriedade universal da Proposição 1.6.2 que caracteriza a localização fraca estabelece a existência sob certas hipóteses de *algum* funtor satisfazendo uma condição de *isomorfismo natural* e não de igualdade. Veremos agora que, apesar de não termos a unicidade na caracterização acima, temos uma unicidade a menos de isomorfismos naturais de funtores.

1.6.3 Proposição. *Sejam C e D categorias, $\mathcal{W} \subseteq \text{Mor}(C)$ uma classe qualquer de morfismos, e $F : C \rightarrow D$ um funtor que inverte os morfismos de \mathcal{W} . Se (L, γ) é uma localização fraca de C em \mathcal{W} , e $\bar{F}, \hat{F} : L \rightarrow D$ são dois funtores tais que $\bar{F} \circ \gamma \cong F$ e $\hat{F} \circ \gamma \cong F$, então existe também um isomorfismo natural $\bar{F} \cong \hat{F}$.*

O resultado acima segue facilmente do seguinte resultado mais geral a respeito de equivalências de categorias.

1.6.4 Lema. *Suponha que $F : C \rightarrow D$ seja uma equivalência de categorias. Se $X, Y \in C$ são dois objetos tais que $F(X) \cong F(Y)$, então existe também um isomorfismo $X \cong Y$.*

Demonstração. Sejam $G : D \rightarrow C$ o funtor quase-inverso a F e $\theta : G \circ F \Rightarrow \text{id}_C$ um isomorfismo natural de funtores. Existe por hipótese um isomorfismo $\alpha : F(X) \rightarrow F(Y)$, e aplicando G obtemos então um isomorfismo $G(\alpha) : G(F(X)) \rightarrow G(F(Y))$. Considerando então os isomorfismos componentes $\theta_X : G(F(X)) \rightarrow X$ e $\theta_Y : G(F(Y)) \rightarrow Y$, a composição

$$\theta_Y \circ G(\alpha) \circ \theta_X^{-1} : X \rightarrow Y$$

define o isomorfismo desejado. ■

Demonstração da Proposição 1.6.3. Sabemos da definição de localização fraca que o funtor de pré-composição

$$\text{Fun}(\gamma, D) : \text{Fun}(L, D) \rightarrow \text{Fun}_{\mathcal{W}}(C, D)$$

é uma equivalência de categorias, mas pelas hipóteses do enunciado temos

$$\text{Fun}(\gamma, D)(\bar{F}) = \bar{F} \circ \gamma \cong F \cong \hat{F} \circ \gamma = \text{Fun}(\gamma, D)(\hat{F});$$

logo o resultado segue diretamente do Lema 1.6.4 aplicado à equivalência $\text{Fun}(\gamma, D)$. ■

Uma consequência importante é que, embora duas localizações fracas possam não ser isomorfias, elas serão sempre equivalentes. Isso pode parecer mais fraco do que gostaríamos, mas a experiência mostra que em geral a noção de equivalência entre categorias é mais razoável do que a noção de isomorfismo entre categorias.

1.6.5 Corolário. *Dada uma categoria \mathcal{C} e uma classe de morfismos $\mathcal{W} \subseteq \mathcal{C}$, quaisquer duas localizações de \mathcal{C} em \mathcal{W} são equivalentes.*

Demonstração. Suponha que (\mathcal{L}, γ) e (\mathcal{J}, δ) sejam duas localizações de \mathcal{C} em \mathcal{W} . Como $\delta : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{J}$ inverte morfismos de \mathcal{W} , aplicando a Proposição 1.6.2 ao par (\mathcal{L}, γ) obtemos um funtor $\bar{\delta} : \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{J}$ juntamente com um isomorfismo natural de funtores $\bar{\delta} \circ \gamma \cong \delta$. Ora, como $\gamma : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{L}$ também inverte morfismos de \mathcal{W} , aplicado o mesmo resultado agora ao par (\mathcal{J}, δ) obtemos um funtor $\bar{\gamma} : \mathcal{J} \rightarrow \mathcal{L}$ e um isomorfismo natural de funtores $\delta \circ \bar{\gamma} \cong \gamma$.

Afirmamos que $\bar{\delta}$ e $\bar{\gamma}$ são funtores quase-inversos, ou seja, que existem isomorfismos naturais de funtores $\bar{\gamma} \circ \bar{\delta} \cong \text{id}_{\mathcal{L}}$ e $\bar{\delta} \circ \bar{\gamma} \cong \text{id}_{\mathcal{J}}$. No primeiro caso, veja que, como o funtor idêntico $\text{id}_{\mathcal{L}}$ satisfaz $\text{id}_{\mathcal{L}} \circ \gamma = \gamma$, segue da Proposição 1.6.3 que, se $G : \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{L}$ é um funtor tal que $G \circ \gamma \cong \gamma$, então necessariamente devemos ter também um isomorfismo natural $G \cong \text{id}_{\mathcal{L}}$. Ora, basta notar agora que

$$\bar{\gamma} \circ \bar{\delta} \circ \gamma \cong \bar{\gamma} \circ \delta \cong \gamma,$$

de onde concluímos que $\bar{\gamma} \circ \bar{\delta} \cong \text{id}_{\mathcal{L}}$. Analogamente, o funtor $\text{id}_{\mathcal{J}}$ é o único a menos de isomorfismo do seu tipo que fatora δ , mas temos os isomorfismos naturais

$$\bar{\delta} \circ \bar{\gamma} \circ \delta \cong \bar{\delta} \circ \gamma \cong \delta,$$

portanto temos também o isomorfismo natural $\bar{\delta} \circ \bar{\gamma} \cong \text{id}_{\mathcal{J}}$. ■

Tendo em vista essa unicidade a menos de equivalências, é comum denotarmos qualquer localização de \mathcal{C} em \mathcal{W} por $\mathcal{C}[\mathcal{W}^{-1}]$.

Tendo estudado algumas propriedades básicas das localizações fracas, a próxima pergunta natural é quanto a sua existência. Será que podemos sempre construir uma localização de uma categoria \mathcal{C} em uma classe de morfismos $\mathcal{W} \subseteq \text{Mor}(\mathcal{C})$? A resposta é que sim *a menos de técnicas conjuntistas*. Usando a construção da categoria livre gerada por um conjunto de setas, odemos construir no braço uma localização fraca, mas a categoria obtida dessa forma não é localmente pequena, o que nos força então a trabalhar com algum universo de Grothendieck grande o suficiente para que a construção faça sentido. Felizmente, no caso de uma categoria de modelos $(\mathcal{M}, \mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F})$, a estrutura adicional dada pelas cofibrações e fibrações nos permite construir um *modelo alternativo* para uma localização fraca $\mathcal{M}[\mathcal{W}^{-1}]$ nas equivalências fracas. Essa construção alternativa depende crucialmente do resultado abaixo, o qual diz que podemos obter uma localização fraca para uma categoria de modelos trabalhando apenas com subcategorias de objetos bem comportados.

1.6.6 Teorema. *Seja $(\mathcal{M}, \mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F})$ uma categoria de modelos. Denote por \mathcal{M}_c (respectivamente \mathcal{M}_f e \mathcal{M}_{cf}) a subcategoria plena gerada pelos objetos cofibrantes (respectivamente fibrantes e bifibrantes), e denote por \mathcal{W}_c (respectivamente \mathcal{W}_f e \mathcal{W}_{cf}) a classe de morfismos dada pela interseção $\mathcal{W} \cap \text{Mor}(\mathcal{M}_c)$ (respectivamente $\mathcal{W} \cap \text{Mor}(\mathcal{M}_f)$ e $\mathcal{W} \cap \text{Mor}(\mathcal{M}_{cf})$). As seguintes categorias são todas equivalentes:*

- (i) $\mathcal{M}[\mathcal{W}^{-1}]$;
- (ii) $\mathcal{M}_c[\mathcal{W}_c^{-1}]$;
- (iii) $\mathcal{M}_f[\mathcal{W}_f^{-1}]$;

(iv) $M_{cf}[\mathcal{W}_c^{-1}]$.

Demonstração. Vejamos primeiro a equivalência entre as localizações fracas $M[\mathcal{W}^{-1}]$ e $M_c[\mathcal{W}_c^{-1}]$. Se $\gamma : M \rightarrow M[\mathcal{W}^{-1}]$ e $\gamma_c : M_c \rightarrow M[\mathcal{W}_c^{-1}]$ são os funtores de localização, e $i : M_c \rightarrow M$ denota o funtor de inclusão, note que o funtor composto

$$\gamma \circ i : M_c \rightarrow M[\mathcal{W}^{-1}]$$

inverte os morfismos de \mathcal{W}_c , pois γ inverte os morfismos de \mathcal{W} , e $\mathcal{W}_c \subseteq \mathcal{W}$. Segue da propriedade universal da localização fraca que existe um funtor induzido $\bar{i} : M_c[\mathcal{W}_c^{-1}] \rightarrow M[\mathcal{W}^{-1}]$ juntamente com um isomorfismo natural $\bar{i} \circ \gamma_c \cong \gamma \circ i$.

Vejamos agora como construir um funtor no sentido contrário $M[\mathcal{W}^{-1}] \rightarrow M_c[\mathcal{W}_c^{-1}]$. Seja $\text{subcof} : M \rightarrow \text{Arr}(M)$ o funtor de substituição cofibrante como descrito na Observação 1.4.7. Lembremos que tal funtor associa a cada objeto $X \in M$ uma fibração trivial $p_X : X_c \rightarrow X$, onde X_c é um objeto cofibrante, e associa a um morfismo $f : X \rightarrow Y$ um morfismo correspondente $f_c : X_c \rightarrow Y_c$ entre as substituições cofibrantes que faz comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccc} X_c & \xrightarrow{f_c} & Y_c \\ p_X \downarrow \wr & & \wr \downarrow p_Y \\ X & \xrightarrow{f} & Y \end{array}$$

Afirmamos que o funtor composto

$$\gamma_c \circ \text{dom} \circ \text{subcof} : M \rightarrow M_c[\mathcal{W}_c^{-1}]$$

inverte os morfismos de \mathcal{W} . De fato, note que, se $f : X \rightarrow Y$ é uma equivalência fraca, então o mesmo vale para a composição $f \circ p_X$, a qual é igual à composição $p_Y \circ f_c$; mas sendo p_Y uma equivalência fraca também, segue da propriedade 2-de-3 que f_c é uma equivalência fraca, portanto $\gamma_c(f_c)$ é um isomorfismo. Segue da propriedade universal da localização fraca que existe um morfismo induzido $\varphi : M[\mathcal{W}^{-1}] \rightarrow M_c[\mathcal{W}_c^{-1}]$ juntamente com um isomorfismo natural de funtores $\varphi \circ \gamma \cong \gamma_c \circ \text{dom} \circ \text{subcof}$.

Nosso objetivo agora é mostrar que os funtores \bar{i} e φ são quase-inversos. Vimos na Observação 1.4.7 que a coleção $(p_X)_{X \in M}$ define uma transformação natural $i \circ \text{dom} \circ \text{subcof} \Rightarrow \text{id}_M$. Como $\gamma(p_X)$ é um isomorfismo para todo $X \in M$, segue que a coleção $(\gamma(X))_{X \in M}$ define um *isomorfismo* natural de funtores

$$\gamma \circ i \circ \text{dom} \circ \text{subcof} \cong \gamma,$$

mas note que pelas propriedades caracterizando os vários funtores acima temos também uma sequência de isomorfismos naturais

$$\gamma \circ i \circ \text{dom} \circ \text{subcof} \cong \bar{i} \circ \gamma_c \circ \text{dom} \circ \text{subcof} \cong \bar{i} \circ \varphi \circ \gamma.$$

Combinando esses vários isomorfismos naturais obtemos o isomorfismo $\bar{i} \circ \varphi \circ \gamma \cong \gamma$, de onde concluímos que $\bar{i} \circ \varphi \cong \text{id}_M$, já que o funtor de pré-composição

$$\text{Fun}(\gamma, M[\mathcal{W}^{-1}]) : \text{Fun}(M[\mathcal{W}^{-1}], M[\mathcal{W}^{-1}]) \rightarrow \text{Fun}_{\mathcal{W}}(M, M[\mathcal{W}^{-1}])$$

define uma equivalência de categorias.

O outro isomorfismo é obtido de forma similar. A coleção $(p_X)_{X \in M_c}$ define uma transformação natural $\text{dom} \circ \text{subcof} \circ i \Rightarrow \text{id}_{M_c}$, mas $\gamma_c(p_X)$ é um isomorfismo para todo $X \in M_c$, portanto

$(\gamma_c(p_X))_{X \in \mathcal{M}_c}$ define um *isomorfismo* natural $\gamma_c \circ \text{dom} \circ \text{subcof} \circ i \cong \gamma_c$. Basta ver agora que temos os isomorfismos naturais

$$\gamma_c \circ \text{dom} \circ \text{subcof} \circ i \cong \varphi \circ \circ i \cong \varphi \circ \bar{i} \circ \gamma_c,$$

logo $\varphi \circ \bar{i} \circ \gamma_c \cong \gamma_c$, o que implica o isomorfismo desejado $\varphi \circ \bar{i} \cong \text{id}_{\mathcal{M}_c}$ já que o funtor

$$\text{Fun}(\gamma_c, \mathcal{M}_c[\mathcal{W}_c^{-1}]) : \text{Fun}(\mathcal{M}_c[\mathcal{W}_c^{-1}], \mathcal{M}_c[\mathcal{W}_c^{-1}]) \rightarrow \text{Fun}_{\mathcal{W}_c}(\mathcal{M}_c, \mathcal{M}_c[\mathcal{W}_c^{-1}])$$

define uma equivalência de categorias.

O argumento para mostrarmos a equivalência $\mathcal{M}[\mathcal{W}^{-1}] \cong \mathcal{M}_f[\mathcal{W}_f^{-1}]$ é análogo. Por um lado, a composição do funtor de inclusão $i : \mathcal{M}_f \rightarrow \mathcal{M}$ com o funtor de localização $\gamma : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}[\mathcal{W}^{-1}]$ inverte os morfismos de \mathcal{W}_f , portanto nesse caso obtemos também um funtor $\bar{i} : \mathcal{M}_f[\mathcal{W}_f^{-1}] \rightarrow \mathcal{M}[\mathcal{W}^{-1}]$ juntamente com um isomorfismo natural $\bar{i} \circ \gamma_f \cong \gamma \circ i$. A fim de obtermos um funtor no outro sentido, consideramos inicial o funtor de substituição fibrante

$$\text{subfib} : \mathcal{M} \rightarrow \text{Arr}(\mathcal{M})$$

discutido também na Observação 1.4.7, e verificamos que o funtor composto

$$\gamma_f \circ \text{cod} \circ \text{subfib} : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}_f[\mathcal{W}_f^{-1}]$$

inverte os morfismos de \mathcal{W} , induzindo portanto um funtor $\psi : \mathcal{M}[\mathcal{W}^{-1}] \rightarrow \mathcal{M}_f[\mathcal{W}_f^{-1}]$ juntamente com um isomorfismo natural $\psi \circ \gamma \cong \gamma_f \circ \text{cod} \circ \text{subfib}$. A demonstração de que os funtores \bar{i} e ψ são quase-inversos é análoga ao que fizemos no caso anterior.

Mostramos por fim a existência de uma equivalência $\mathcal{M}_{cf}[\mathcal{W}_{cf}^{-1}] \cong \mathcal{M}_c[\mathcal{W}_c^{-1}]$. Se $\lambda : \mathcal{M}_{cf} \rightarrow \mathcal{M}_c$ denota o funtor de inclusão, como nos outros casos temos que a composição

$$\gamma_c \circ \lambda : \mathcal{M}_{cf} \rightarrow \mathcal{M}_c[\mathcal{W}_c^{-1}]$$

inverte os morfismos de \mathcal{W}_{cf} , portanto a propriedade universal da localização fraca dá origem a um funtor $\bar{\lambda} : \mathcal{M}_{cf}[\mathcal{W}_{cf}^{-1}] \rightarrow \mathcal{M}_c[\mathcal{W}_c^{-1}]$ juntamente com um isomorfismo natural $\gamma_c \circ \lambda \cong \bar{\lambda} \circ \gamma_{cf}$. Denote por $\text{subfib}' : \mathcal{M}_c \rightarrow \text{Arr}(\mathcal{M})$ a restrição do funtor de substituição fibrante à categoria \mathcal{M}_c gerada pelos objetos cofibrantes. Tal funtor associa a cada objeto cofibrante $X \in \mathcal{M}_c$ uma *cofibracão trivial* $j_X : X \xrightarrow{\sim} X_f$, onde X_f é um objeto fibrante. Note que, sendo X cofibrante e j_X uma cofibracão, segue do Lema 1.4.3 que X_f é ainda cofibrante, sendo portanto um objeto *bifibrante*. Dessa forma, a composição $\text{cod} \circ \text{subfib}'$ pode ser vista como um funtor do tipo $\mathcal{M}_c \rightarrow \mathcal{M}_{cf}$, e podemos então mostrar que a composição $\gamma_{cf} \circ \text{cod} \circ \text{subfib}' : \mathcal{M}_c \rightarrow \mathcal{M}_{cf}[\mathcal{W}_{cf}^{-1}]$ inverte morfismos de \mathcal{W}_c , dando origem portanto a um funtor induzido $\theta : \mathcal{M}_c[\mathcal{W}_c^{-1}] \rightarrow \mathcal{M}_{cf}[\mathcal{W}_{cf}^{-1}]$ juntamente com um isomorfismo natural $\theta \circ \gamma_c \cong \gamma_{cf} \circ \text{cod} \circ \text{subfib}'$. A demonstração de que os funtores $\bar{\lambda}$ e θ são quase-inversos segue, de forma similar aos casos anteriores, das propriedades universais das localizações fracas envolvidas e também do fato de que as coleções de morfismos $(\gamma_c(j_X))_{X \in \mathcal{M}_c}$ e $(\gamma_{cf}(j_X))_{X \in \mathcal{M}_{cf}}$ definem isomorfismos naturais $\gamma \cong \gamma \circ \lambda \circ \text{cod} \circ \text{subfib}'$ e $\gamma_{cf} \cong \gamma_{cf} \circ \text{cod} \circ \text{subfib}' \circ \lambda$, respectivamente. ■

1.7 A categoria homotópica

Nessa seção utilizamos as ferramentas homotópicas desenvolvidas na seção anterior para descrevermos uma construção explícita da localização de uma categoria de modelos na sua classe de equivalências fracas. O arcabouço técnico que sustenta tal construção é uma versão do celebrado Teorema de Whitehead válido para categorias de modelos que relaciona equivalências fracas e equivalências homotópicas.

1.7.1 Lema (Levantamentos a menos de homotopia). *Em uma categoria de modelos \mathbf{M} , suponha que $p : X \rightarrow Y$ seja uma fibração, B seja um objeto cofibrante, e $f : B \rightarrow Y$ seja um morfismo qualquer. Se existe um morfismo $f' : B \rightarrow X$ tal que a composição $p \circ f'$ seja homotópica à esquerda a f , então existe também um morfismo $\tilde{f} : B \rightarrow X$ satisfazendo a igualdade $p \circ \tilde{f} = f$.*

Demonstração. Seja $H : \text{Cyl}(B) \rightarrow Y$ uma homotopia à esquerda de $p \circ f'$ para f , e considere o quadrado comutativo abaixo.

$$\begin{array}{ccc} B & \xrightarrow{f'} & X \\ i_0 \downarrow \wr & & \downarrow p \\ \text{Cyl}(B) & \xrightarrow{H} & Y \end{array}$$

Veja que o fato de i_0 ser uma cofibração trivial segue da hipótese de cofibrância de B e do Lema 1.5.3. Aplicando o axioma de levantamento obtemos um morfismo $\tilde{H} : \text{Cyl}(B) \rightarrow X$ conforme indicado no diagrama comutativo abaixo.

$$\begin{array}{ccc} B & \xrightarrow{f'} & X \\ i_0 \downarrow \wr & \nearrow \tilde{H} & \downarrow p \\ \text{Cyl}(B) & \xrightarrow{H} & Y \end{array}$$

Note então que $\tilde{f} := H \circ i_1 : B \rightarrow X$ é o morfismo procurado pois

$$p \circ \tilde{f} = p \circ (H \circ i_1) = (p \circ H) \circ i_1 = H \circ i_1 = f. \quad \blacksquare$$

1.7.2 Lema (Extensão a menos de homotopia). *Em uma categoria de modelos \mathbf{M} , suponha que $i : A \rightarrow B$ seja uma cofibração, X seja um objeto fibrante, e $f : A \rightarrow X$ seja um morfismo qualquer. Se existe um morfismo $f' : B \rightarrow X$ tal que $f' \circ i \simeq_r f$, então existe também um morfismo $\tilde{f} : B \rightarrow X$ tal que $\tilde{f} \circ i = f$.*

Demonstração. Seja $h : A \rightarrow P(X)$ uma homotopia à direita de $f' \circ i$ para f . Sabemos do Lema 1.5.9 que o morfismo $p_0 : P(X) \rightarrow X$ é uma fibração trivial, e aplicando então o axioma de levantamento obtemos o morfismo $H : B \rightarrow P(X)$ mostrado no diagrama comutativo abaixo.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{h} & P(X) \\ i \downarrow & \nearrow H & \downarrow p_0 \\ B & \xrightarrow{f'} & X \end{array}$$

Basta notar agora que $\tilde{f} := p_1 \circ H$ é o morfismo procurado pois temos a sequência de igualdades

$$\tilde{f} \circ i = (p_1 \circ H) \circ i = p_1 \circ (H \circ i) = p_1 \circ h = f. \quad \blacksquare$$

Vimos na seção anterior que, se B é um objeto cofibrante, então qualquer morfismo $\beta : X \rightarrow Y$ dá origem a uma função $[B, \beta]_\ell : [B, X]_\ell \rightarrow [B, Y]_\ell$. Inicialmente estudamos condições suficientes para que a função de pushforward

$$[B, p]_\ell : [B, X]_\ell \rightarrow [B, Y]_\ell$$

nas classes de homotopia (possivelmente à esquerda apenas) seja uma bijeção. A demonstração que apresentamos aqui é de certa forma uma combinação das demonstrações apresentadas em [HM22, Proposição 7.25] e em [Hov07, Proposição 1.2.5]. Um ponto interessante da demonstração apresentada na segunda referência é que elas dá a oportunidade de apresentar o famigerado *Lema de Brown*. Inicialmente provamos uma versão mais simples deste resultado que é usada para provar a versão usual.

1.7.3 Proposição (Lema de Fatoração). *Seja $f : X \rightarrow Y$ uma equivalência fraca entre objetos fibrantes de uma categoria de modelos. Então f pode ser fatorada como uma cofibração trivial $i : X \xrightarrow{\sim} Z$ seguida de uma fibração trivial $p : Z \xrightarrow{\sim} Y$, e além disso existe também uma fibração trivial $q : Z \xrightarrow{\sim} X$ tal que $q \circ i = \text{id}_X$.*

Demonstração. Podemos fatorar o morfismo induzido $(\text{id}_X, f) : X \rightarrow X \times Y$ como uma cofibração trivial $i : X \xrightarrow{\sim} Z$ seguida de uma fibração $\theta : Z \xrightarrow{\sim} X \times Y$.

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{(\text{id}_X, f)} & X \times Y \\ \downarrow \lambda & \searrow \theta & \uparrow \\ & Z & \end{array}$$

Se $\pi_1 : X \times Y \rightarrow X$ e $\pi_2 : X \times Y \rightarrow Y$ são as projeções canônicas, definimos então

$$q := \pi_1 \circ \theta : Z \rightarrow X \quad \text{e} \quad p := \pi_2 \circ \theta : Z \rightarrow Y.$$

Veja que tais morfismos satisfazem as igualdades necessárias, já que por um lado

$$p \circ i = \pi_2 \circ \theta \circ i = \pi_2 \circ (\text{id}_X, f) = f,$$

e por outro

$$q \circ i = \pi_1 \circ \theta \circ i = \pi_1 \circ (\text{id}_X, f) = \text{id}_X.$$

Resta apenas mostrarmos que p e q são fibrações triviais. O fato de p ser uma equivalência fraca segue da propriedade 2-de-3, já que temos a igualdade $p \circ i = f$ onde tanto i quanto f são equivalências fracas. O fato de q ser uma equivalência fraca também segue da propriedade 2-de-3, pois temos a igualdade $q \circ i = \text{id}_X$ onde i e id_X são equivalências fracas. Por fim, para ver que p e q são fibrações, veja que temos um diagrama de pullback

$$\begin{array}{ccc} X \times Y & \xrightarrow{\pi_1} & X \\ \pi_2 \downarrow & & \downarrow !_X \\ Y & \xrightarrow{!_Y} & * \end{array}$$

onde $!_X$ e $!_Y$ são fibrações graças ao fato de X e Y serem fibrantes. Como fibrações são preservadas por pullbacks, segue que as projeções canônicas π_1 e π_2 são fibrações também, logo p e q são ambos composições de fibrações e, portanto, fibrações também. ■

O tradicional Lema de Brown é então uma consequência direta da Proposição 1.7.3.

1.7.4 Corolário (Lema de Brown). *Sejam $(\mathbf{M}, \mathcal{W}, \mathcal{C}, \mathcal{F})$ uma categoria de modelos e $(\mathcal{D}, \mathcal{W}')$ uma categoria com equivalências fracas, ou seja, $\mathcal{W}' \subseteq \text{Mor}(\mathcal{D})$ é uma classe de morfismos satisfazendo a propriedade 2-de-3. Suponha que $F : \mathbf{M} \rightarrow \mathcal{D}$ seja um funtor que transforma fibrações triviais entre objetos fibrantes de \mathbf{M} em equivalências fracas de \mathcal{D} . Então F também transforma equivalências fracas entre objetos fibrantes de \mathbf{M} em equivalências fracas de \mathcal{D} .*

Demonstração. Seja $p : X \xrightarrow{\sim} Y$ uma equivalência fraca entre objetos fibrantes de \mathbf{M} . Aplicando o Proposição 1.7.3 obtemos uma cofibração trivial $i : X \xrightarrow{\sim} Z$, uma fibração trivial $p : Z \xrightarrow{\sim} Y$ e uma fibração trivial $q : Z \xrightarrow{\sim} X$ tais que $p \circ i = f$ e $q \circ i = \text{id}_X$. Veja que Z é um objeto fibrante, já que ele manda uma fibração para um objeto fibrante. Assim, p é uma fibração trivial entre objetos fibrantes, portanto $F(p) : F(Z) \rightarrow F(Y)$ é uma equivalência fraca em \mathcal{D} . Se conseguirmos mostrar que $F(i) : F(X) \rightarrow F(Z)$ é também uma equivalência fraca, o resultado desejado seguirá

então da igualdade $F(p) \circ F(i) = F(f)$ e da propriedade 2-de-3 em \mathbf{M} . Ora, sendo $q : Z \rightarrow X$ uma fibração trivial entre objetos fibrantes também, vale que $F(q) : F(Z) \rightarrow F(X)$ é uma equivalência fraca, e a propriedade 2-de-3 aplicada à igualdade $F(q) \circ F(i) = \text{id}_{F(X)}$ nos permite concluir que $F(i)$ é uma equivalência fraca, já que o morfismo idêntico $\text{id}_{F(X)}$ é também uma equivalência fraca. ■

Uma aplicação bastante bacana do Lema de Brown é uma demonstração simples de que equivalências fracas entre objetos fibrantes dão origem a bijeções entre classes de homotopia.

1.7.5 Proposição. *Seja B um objeto cofibrante de uma categoria de modelos \mathbf{M} .*

1. *Se $p : X \xrightarrow{\sim} Y$ é uma fibração trivial, então $[B, p]_\ell : [B, X]_\ell \rightarrow [B, Y]_\ell$ é uma bijeção.*
2. *Se $p : X \xrightarrow{\sim} Y$ é uma equivalência fraca entre objetos fibrantes, então $[B, p]_\ell : [B, X]_\ell \rightarrow [B, Y]_\ell$ é uma bijeção.*

Demonstração. 1. Nesse caso, a função de pushforward $\mathbf{M}(B, p) : \mathbf{M}(B, X) \rightarrow \mathbf{M}(B, Y)$ a nível de morfismos já é sobrejetora. De fato, dado um morfismo $g : B \rightarrow Y$ qualquer, aplicando o axioma de levantamento ao quadrado abaixo, onde $!_B : \emptyset \rightarrow B$ é uma cofibração e $p : X \rightarrow Y$ é uma fibração trivial,

$$\begin{array}{ccc} \emptyset & \xrightarrow{!_X} & X \\ \downarrow !_B & \nearrow f & \downarrow p \\ B & \xrightarrow{g} & Y \end{array}$$

obtemos um morfismo $f : B \rightarrow X$ tal que $p \circ f = g$. Consequentemente, a nível de classes de homotopia à esquerda temos

$$[B, p]_\ell([f]_\ell) = [p \circ f]_\ell = [g]_\ell,$$

portanto $[B, p]_\ell$ é também uma função sobrejetora.

Vejamos agora a questão da injetividade. Suponha que $[f_1]_\ell, [f_2]_\ell \in [B, X]_\ell$ sejam duas classes de homotopia à esquerda tais que $[B, p]_\ell([f_1]_\ell) = [B, p]_\ell([f_2]_\ell)$, ou seja, existe uma homotopia à esquerda $p \circ f_1 \simeq_\ell p \circ f_2$ dada pelo morfismo $h : \text{Cyl}(B) \rightarrow Y$. Usando a trivialidade da fibração p podemos obter um levantamento $H : \text{Cyl}(B) \rightarrow X$ para o quadrado comutativo indicado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} B \sqcup B & \xrightarrow{\langle f_1, f_2 \rangle} & X \\ \downarrow i & \nearrow H & \downarrow p \\ \text{Cyl}(B) & \xrightarrow{h} & Y \end{array}$$

A condição $H \circ i = \langle f_1, f_2 \rangle$ diz precisamente que H define uma homotopia à esquerda $f_1 \simeq_\ell f_2$, portanto $[f_1]_\ell = [f_2]_\ell$, e $[B, p]_\ell$ é uma função injetora.

2. Vamos aplicar o Lema de Brown (Corolário 1.7.4) de uma forma espertinha. Considere o funtor $[B, -]_\ell : \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{Set}$ que associa a cada objeto $X \in \mathbf{M}$ a classe de homotopia à esquerda $[B, X]_\ell$ e que associa a um morfismo $f : X \rightarrow Y$ a função de pushforward $[B, f]_\ell : [B, X]_\ell \rightarrow [B, Y]_\ell$ correspondente. Considere \mathbf{Set} como uma categoria com equivalências fracas no sentido do Corolário 1.7.4 tomando a classe $\mathbf{W}' \subseteq \mathbf{Mor}(\mathbf{Set})$ formada por todos as bijeções. O item 1 diz então que o funtor $[B, -]_\ell : \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{Set}$ introduzido transforma qualquer fibração trivial de \mathbf{M} em uma equivalência fraca de \mathbf{Set} no sentido acima. Em particular, $[B, -]_\ell$ transforma também fibrações triviais entre objetos fibrantes em equivalências fracas, portanto pelo Lema de Brown concluímos que $[B, -]_\ell$ também transforma equivalência fracas entre objetos fibrantes em equivalências fracas; ou seja, se $p : X \xrightarrow{\sim} Y$ é uma equivalência fraca entre objetos fibrantes, a função de pushforward correspondente $[B, p]_\ell : [B, X]_\ell \rightarrow [B, Y]_\ell$ é uma bijeção. ■

Apêndices

Apêndice A

Complementos categóricos

Esse apêndice contém algumas seções discutindo conceitos e construções auxiliares da Teoria de Categorias que estão conectados com tópicos discutidos ao longo das notas, mas que não são essenciais a ponto de merecerem suas próprias seções no corpo principal do texto. A verdade é que os tópicos incluídos aqui refletem um desejo pessoal de entender melhor alguns assuntos que costumam ser mencionados apenas brevemente nas referências tradicionais a respeito de categorias de modelos.

A.1 Categorias livres

Comumente representamos uma categoria por meio de um grafo orientado tendo os objetos da categoria como vértices e os morfismos da categoria como arestas. Apesar dessa representação bastante útil, uma categoria possui mais estrutura do que um mero grafo orientado, visto que podemos compor os morfismos de uma categoria para obtermos novos morfismos, mas não existe uma operação análoga de composição das arestas de um grafo. Mais precisamente, toda categoria possui um grafo orientado *subjacente* que esquece da estrutura algébrica da composição. Os leitores com alguma experiência em Teoria de Categorias já devem esperar que exista também uma construção no sentido contrário por meio da qual um grafo orientado dá origem a uma categoria obtida pela adição da forma mais simples possível de morfismos que representem a composição das arestas do grafo. A categoria assim obtida é a chamada *categoria livre* gerada pelo grafo, e essa construção é o objetivo central desta seção.

Antes de continuarmos, cabe aqui um aviso sobre terminologia. O termo *grafo* é particularmente carregado na literatura matemática, e por esse motivo escolhemos usar daqui em diante o termo *aljava* (tradução do inglês *quiver*) no lugar de grafo orientado.

A.1.1 Definição. Uma **aljava** consiste de uma tupla (V, A, s, t) , onde V e A são conjuntos, e $s, t : A \rightarrow V$ são funções.

Dada uma aljava (V, A, s, t) , os elementos de V são chamados de **vértices** da aljava, enquanto os elementos de A são chamados de **arestas** da aljava. As funções s e t são chamadas de funções **source** e **target**, respectivamente. Visualmente, cada elemento $e \in A$ deve ser visualizado como uma aresta direcionada começando no vértice $s(e)$ e terminando no vértice $t(e)$. Por vezes será mais conveniente denotarmos uma aljava simplesmente por uma letra como Q , e caso seja necessário nos referirmos às estruturas constituintes dessa aljava, usaremos então notações como $V(Q)$, $A(Q)$, s_Q e t_Q .

A.1.2 Exemplo. Um conjunto X pode ser usado para definir uma aljava QX dada pela tupla $QX := (X, X, \text{id}_X, \text{id}_X)$. Visualmente, tal aljava possui um vértice para cada elemento $x \in X$ e também uma aresta direcionada desse elemento para si mesmo formando um laço. A aljava QX assim definida é chamada de **aljava discreta** gerado por X .

A.1.3 Exemplo. Seja $R \subseteq X \times X$ uma relação qualquer em um conjunto X . Podemos construir a partir dessa relação uma aljava $Q := (X, R, s, t)$, onde $s, t : R \rightarrow X$ são as restrições das projeções canônicas associadas ao produto $X \times X$, ou seja, $s(x_1, x_2) := x_1$ e $t(x_1, x_2) := x_2$ para qualquer par $(x_1, x_2) \in R$.

É especialmente comum considerarmos essa construção no caso em que a relação R é uma pré-ordem \leq no conjunto X , ou seja, uma relação reflexiva e transitiva. Nesse caso, as arestas da aljava “acompanham o sentido de crescimento” da pré-ordem \leq .

A.1.4 Exemplo. Toda aljava $Q = (V, A, s, t)$ dá origem a uma **aljava oposta** Q^{op} definida pela tupla (V, A, t, s) . Visualmente, Q^{op} possui os mesmos vértices de Q , mas com as arestas indo no sentido oposto.

A.1.5 Exemplo. Seja X um espaço topológico qualquer, e considere o conjunto¹ X^I formado por todas as funções contínuas do tipo $I \rightarrow X$, onde I denota o intervalo unitário $[0, 1]$. Podemos considerar as funções de avaliação $e_0, e_1 : X^I \rightarrow X$ dadas por $e_0(\gamma) := \gamma(0)$ e $e_1(\gamma) := \gamma(1)$ para todo $\gamma \in X^I$. A tupla $PX := (X, X^I, e_0, e_1)$ define então a **aljava de caminhos** do espaço X .

A.1.6 Exemplo. Seja \mathbf{C} uma categoria pequena. Se $\text{dom}, \text{cod} : \text{Mor}(\mathbf{C}) \rightarrow \mathbf{C}$ são as funções que associam a cada morfismo de \mathbf{C} seu domínio e codomínio, respectivamente, então a tupla $U(\mathbf{C}) := (\mathbf{C}, \text{Mor}(\mathbf{C}), \text{dom}, \text{cod})$ define a **aljava subjacente à categoria \mathbf{C}** .

A.1.7 Definição. Dadas duas aljvas Q_1 e Q_2 , um **morfismo de aljvas** do tipo $Q_1 \rightarrow Q_2$ é por definição um par de funções $(f_V : V(Q_1) \rightarrow V(Q_2), f_A : A(Q_1) \rightarrow A(Q_2))$ satisfazendo as igualdades $s_{Q_2} \circ f_A = f_V \circ s_{Q_1}$ e $t_{Q_2} \circ f_A = f_V \circ t_{Q_1}$, ou seja, os dois diagramas abaixo são comutativos.

$$\begin{array}{ccc} A(Q_1) & \xrightarrow{f_A} & A(Q_2) \\ s_{Q_1} \downarrow & & \downarrow s_{Q_2} \\ V(Q_1) & \xrightarrow{f_V} & V(Q_2) \end{array} \quad \begin{array}{ccc} A(Q_1) & \xrightarrow{f_A} & A(Q_2) \\ t_{Q_1} \downarrow & & \downarrow t_{Q_2} \\ V(Q_1) & \xrightarrow{f_V} & V(Q_2) \end{array}$$

Durante as demonstrações faremos questão por motivos de clareza de utilizar símbolos diferentes para denotar as duas funções que compõem um morfismo de aljvas. Entretanto, na prática é muito comum denotarmos ambas as funções pelo mesmo símbolo, da mesma forma como usamos um único símbolo para denotar a ação de um funtor nos objetos e nos morfismos.

A.1.8 Exemplo. Dados dois conjuntos X_1 e X_2 e uma função $f : X_1 \rightarrow X_2$, o par (f, f) define um morfismo $QX_1 \rightarrow QX_2$ entre as aljvas discretas geradas por X_1 e X_2 de acordo com o Exemplo A.1.2.

A.1.9 Exemplo. Sejam (X_1, R_1) e (X_2, R_2) dois conjuntos equipados com relações, e suponha que $f : X_1 \rightarrow X_2$ seja uma função que respeita as relações, ou seja, se $(x, x') \in R_1$, então $(f(x), f(x')) \in R_2$. Considere as aljvas Q_1 e Q_2 associados às relações R_1 e R_2 , respectivamente, conforme discutido no Exemplo A.1.3. Como f respeita as relações R_1 e R_2 , a função produto $f \times f : X_1 \times X_1 \rightarrow X_2 \times X_2$ satisfaz $(f \times f)(R_1) \subseteq R_2$, portanto podemos considerar a função restrita

$$f \times f|_{R_1} : R_1 \rightarrow R_2.$$

¹É verdade que também podemos considerar X^I como um espaço equipado com a topologia compacto-aberto, por exemplo, mas aqui não existe essa necessidade.

O par de funções $(f, f \times f|_{R_1})$ define então um morfismo de aljavas do tipo Q_1 para Q_2 .

No caso em que R_1 e R_2 são relações de pré-ordem \leq_1 e \leq_2 , a condição de f respeitar as relações diz que, se $x \leq_1 x'$, então $f(x) \leq_2 f(x')$; ou seja, f é uma função monótona. Segue da discussão acima que funções monótonas entre conjuntos pré-ordenados dão origem a morfismos entre as aljavas obtidas a partir deles.

A.1.10 Exemplo. Uma função contínua $f : X \rightarrow Y$ entre espaços topológicos dá origem a uma função de pushforward $X^f : X^I \rightarrow Y^I$ definida por $X^f(\gamma) := f \circ \gamma$ para todo $\gamma \in X^I$. O par (f, X^f) define então um morfismo aljavas

$$(f, X^f) : (X, X^I, e_0^X, e_1^X) \rightarrow (Y, Y^I, e_0^Y, e_1^Y)$$

entre as aljavas de caminhos definidas no Exemplo A.1.5. De fato, para qualquer $\gamma \in X^I$ por um lado temos

$$e_0^Y(X^f(\gamma)) = e_0^Y(f \circ \gamma) = f(\gamma(0)) = f(e_0^X(\gamma)),$$

enquanto por outro temos

$$e_1^Y(X^f(\gamma)) = e_1^Y(f \circ \gamma) = f(\gamma(1)) = f(e_1^X(\gamma)).$$

A.1.11 Exemplo. Lembre-se que um funtor $F : C \rightarrow D$ é dado por uma função $F : C \rightarrow D$ a nível de objetos e também por uma função $\text{Mor}(F) : \text{Mor}(C) \rightarrow \text{Mor}(D)$ a nível de morfismos a qual é compatível com as funções de domínio e codomínio de cada uma das categorias e também com as respectivas operações de composição. A compatibilidade com as funções de domínio e codomínio, em particular, faz com que o par $(F, \text{Mor}(F))$ defina um morfismo do tipo $U(C) \rightarrow U(D)$ entre as aljavas subjacentes às categorias discutidas no Exemplo A.1.6.

Dois morfismos de aljavas $(f_1, F_1) : Q_1 \rightarrow Q_2$; e $(f_2, F_2) : Q_2 \rightarrow Q_3$ podem ser compostos para definir um outro morfismo de aljavas $(f_2, F_2) \circ (f_1, F_1) : Q_1 \rightarrow Q_3$ pela regra

$$(f_2, F_2) \circ (f_1, F_1) := (f_2 \circ f_1, F_2 \circ F_1).$$

Além disso, toda aljava Q tem associada a ela um morfismo identidade $\text{id}_Q : Q \rightarrow Q$ dado pelo par $(\text{id}_{V(Q)}, \text{id}_{A(Q)})$. Uma conta simples mostra que o morfismo id_Q realmente age como uma identidade para a composição de morfismos de grafos orientados introduzida acima. Em resumo, temos uma categoria Alj formada por aljavas e morfismos entre elas. Diversas das construções introduzidas nos exemplos anteriores podem ser estendidas para funtores definidos na categoria Alj , ou então tomando valores nela.

A.1.12 Exemplo. Considere a categoria SetRel cujos objetos são conjuntos equipados com alguma relação e cujos morfismos são funções preservando tais relações.² Vimos no Exemplo A.1.3 que todo conjunto equipado com uma relação (X, \leq) dá origem a uma aljava, e que funções preservando tais relações dão origem a morfismos entre as aljavas correspondentes. Uma conta simples mostra que essa construção preserva composições e morfismos identidade, definindo portanto um funtor $F : \text{SetRel} \rightarrow \text{Alj}$.

Existe também um funtor no sentido contrário $\text{Alj} \rightarrow \text{SetRel}$. Dada uma aljava Q , definimos uma relação R_Q no conjunto de vértices $V(Q)$ da aljava por meio da fórmula

$$R_Q := \{(u, v) \in V(Q) \times V(Q) \mid s_Q(e) = u \text{ e } t_Q(e) = v \text{ para alguma aresta } e \in A(Q)\}.$$

Note também que, se $(f, F) : Q_1 \rightarrow Q_2$ é um morfismo de aljavas, então a função a nível dos vértices $f : V(Q_1) \rightarrow V(Q_2)$ preserva as relações R_{Q_1} e R_{Q_2} . De fato, se $(u, v) \in R_{Q_1}$, então

²É tentador usar o nome Rel para tal categoria, mas é comum na literatura usar esse nome para identificar a categoria onde relações aparecem como *morfismos* entre conjuntos.

existe alguma aresta $e \in A(Q_1)$ tal que $s_{Q_1}(e) = u$ e $t_{Q_1}(e) = v$. Note então que pelas condições de compatibilidade entre f , F e as funções source e target das aljavas temos

$$s_{Q_2}(F(e)) = f(s_{Q_1}(e)) = f(u) \quad \text{e} \quad t_{Q_2}(F(e)) = f(t_{Q_1}(e)) = f(v),$$

portanto $(f(u), f(v)) \in R_{Q_2}$. Isso nos permite então definir um funtor $\text{Alj} \rightarrow \text{SetRel}$ como mencionado.

A.1.13 Exemplo. Vimos no Exemplo A.1.6 que toda categoria pequena \mathbf{C} possui uma aljava subjacente $U(\mathbf{C})$ e vimos também no Exemplo A.1.11 que um funtor $F : \mathbf{C} \rightarrow \mathbf{D}$ induz um morfismo $U(F) := (F, \text{Mor}(F)) : U(\mathbf{C}) \rightarrow U(\mathbf{D})$ entre as aljavas subjacentes. Essas duas construções combinadas nos permitem definir um *funtor de esquecimento* $U : \text{Cat} \rightarrow \text{Alj}$ definido na categoria de categorias pequenas e tomando valores na categoria de aljavas. Usamos o termo funtor de esquecimento pois ao passar da categoria \mathbf{C} para sua aljava subjacente $U(\mathbf{C})$ nos esquecemos da estrutura de composição de morfismos existente na categoria original.

Nosso interesse é investigar a existência de um funtor no sentido contrário $\text{Alj} \rightarrow \text{Cat}$ que associa a cada aljava uma categoria onde podemos compor formalmente suas arestas da forma mais simples possível. A existência de tal funtor está ligada à existência de categorias livres gerados por aljavas que definimos agora.

A.1.14 Definição. Dada uma aljava Q , uma **categoria livre gerada por Q** é um par (\mathbf{C}, i) , onde \mathbf{C} é uma categoria pequena, e $i : Q \rightarrow U(\mathbf{C})$ é um morfismo de aljavas satisfazendo a seguinte propriedade universal: se \mathbf{D} é outra categoria pequena qualquer, e $j : Q \rightarrow U(\mathbf{D})$ é um morfismo de aljavas, então existe um único funtor $F : \mathbf{C} \rightarrow \mathbf{D}$ tal que $U(F) \circ i = j$.

$$\begin{array}{ccc} U(\mathbf{C}) & \xrightarrow{U(F)} & U(\mathbf{D}) \\ \uparrow i & \nearrow j & \\ Q & & \end{array}$$

Tendo em mãos a definição de uma categoria livre, começaremos a caminhar agora em direção à construção de um modelo explícito para uma categoria livre. Dado um natural $n \in \mathbb{N}$, considere a aljava $[n]$ definida da seguinte maneira: o conjunto de vértices é por definição $V([n]) := \{0, \dots, n\}$, enquanto o conjunto de arestas é por definição $A([n]) := \{(k, k+1) \mid 0 \leq k \leq n-1\}$. As funções source e target são então restrições das projeções canônicas associadas ao produto $\{0, \dots, n\} \times \{0, \dots, n\}$, ou seja, temos

$$s(k, k+1) := k \quad \text{e} \quad t(k, k+1) := k+1$$

para todo $0 \leq k \leq n-1$. Visualmente, $[n]$ possui $n+1$ vértices rotulados pelos números o conjunto $\{0, \dots, n\}$ e n vértices, sendo que cada vértice liga um número desse conjunto ao seu sucessor como mostrado na figura abaixo. Note, em particular, que a aljava $[0]$ consiste de um único vértice 0 sem nenhuma aresta.

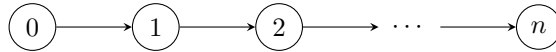


Figura A.1: Representação visual da aljava $[n]$.

A.1.15 Observação. A aljava $[n]$ introduzida acima é *diferente* da aljava associada ao conjunto parcialmente ordenado $(\{0, \dots, n\}, \leq)$ como no Exemplo A.1.3! Enquanto a primeira possui

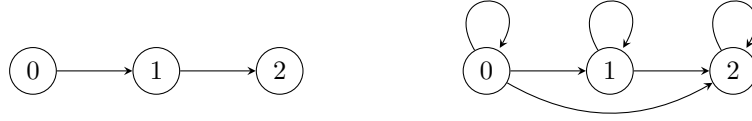


Figura A.2: Comparação entre a aljava [2], representada à esquerda, e a aljava associada ao conjunto parcialmente ordenado $\{0, 1, 2\}$, representada à direita.

arestas apenas entre vértices sucessivos, a segunda possui arestas ligando dois vértices m e n sempre que $m \leq n$, ou seja, a segunda possui uma quantidade bem maior de vértices. Em particular, a segunda aljava possui arestas formando laços, já que a relação \leq é reflexiva, enquanto a primeira aljava não possui nenhum laço como é evidente de sua definição. A figura Figura A.2 ilustra explicitamente a diferença entre a aljava [2] e a aljava obtida a partir do conjunto $\{0, 1, 2\}$ munido de sua ordem parcial usual.

Definimos um **caminho de comprimento** $n + 1$ em uma aljava Q como sendo um morfismo de aljavas $\gamma : [n] \rightarrow Q$. A justificativa para a terminologia é que a aljava $[n]$ possui $n + 1$ vértices, portanto o morfismo γ seleciona $n + 1$ vértices de Q conectados por uma sequência de arestas.

A ideia básica para construirmos uma categoria a partir de uma aljava é que, embora não possamos compor duas arestas consecutivas de uma aljava de forma a obtermos uma *outra aresta*, podemos compor caminhos de comprimentos quaisquer, portanto podemos reinterpretar arestas como caminhos de comprimento 2 na aljava e encarar sua composição como sendo um caminho de comprimento 3. O fato que nos permite compor caminhos é que duas aljavas $[m]$ e $[n]$ podem ser coladas ao longo de seus pontos extremos para formarem uma aljava do tipo $[m + n]$. A melhor maneira de formalizarmos essa ideia de colagem é por meio de um pushout na categoria de aljavas, mas para isso precisamos antes introduzir alguns morfismos específicos.

Dados números naturais m e n tais que $m \leq n$, considere o morfismo de aljavas

$$\iota_{m,n} : [m] \rightarrow [n]$$

definido da seguinte maneira: nos vértices temos $\iota_{m,n}(k) := k$ para todo $k \in \{0, \dots, m\}$, enquanto nas arestas de $[m]$ temos $\iota_{m,n}(k, k+1) := (k, k+1)$ para qualquer $k \in \{0, \dots, m-1\}$. Visualmente, $\iota_{m,n}$ inclui a aljava $[m]$ no *segmento inicial* da aljava $[n]$ formado pelos $m + 1$ primeiros vértices e todas as arestas entre eles, conforme mostrado na Figura A.3.

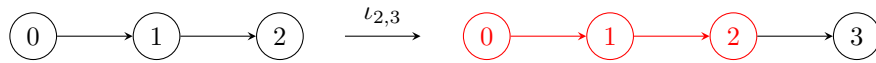


Figura A.3: Visualização do morfismo de aljavas $\iota_{2,3} : [2] \rightarrow [3]$. Os vértices e arestas em vermelho indicam a “imagem” do morfismo.

Considere também o morfismo $\tau_{m,n} : [m] \rightarrow [n]$ definido da seguinte forma: nos vértices temos $\tau_{m,n}(k) := k + n - m$ para todo $k \in \{0, \dots, m\}$, enquanto nas arestas temos $\tau_{m,n}(k, k+1) := (k + n - m, k + n - m + 1)$ para todo $k \in \{0, \dots, m-1\}$. Visualmente, $\tau_{m,n}$ inclui a aljava $[m]$ no *segmento terminal* da aljava $[n]$ formado pelos seus últimos $m + 1$ vértices e todas as arestas entre eles, conforme mostrado na Figura A.4.

Note que, quando $m = 0$, o morfismo $\iota_{0,n}$ destaca o vértice inicial de $[n]$, enquanto o morfismo $\tau_{0,n}$ destaca o último terminal de $[n]$.

O lema abaixo descreve o processo de colagem de aljavas mencionado anteriormente em termos de um pushout.

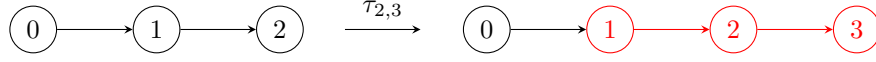


Figura A.4: Visualização do morfismo de aljavas $\tau_{2,3} : [2] \rightarrow [3]$. Os vértices e arestas em vermelho indicam a “imagem” do morfismo.

A.1.16 Lema. *O diagrama comutativo abaixo define um pushout na categoria Alj .*

$$\begin{array}{ccc}
 [0] & \xrightarrow{\tau_{0,m}} & [m] \\
 \iota_{0,n} \downarrow & & \downarrow \iota_{m,m+n} \\
 [n] & \xrightarrow{\tau_{n,m+n}} & [m+n]
 \end{array} \tag{A.1}$$

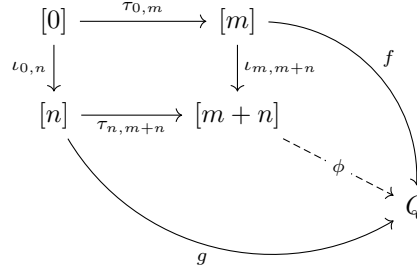
Demonstração. Note primeiro que o diagrama acima é realmente comutativo. No único vértice 0 da aljava $[0]$ temos por um lado

$$\iota_{m,m+n}(\tau_{0,m}(0)) = \iota_{m,m+n}(0 + m - 0) = \iota_{m,m+n}(m) = m$$

e por outro

$$\tau_{n,m+n}(\iota_{0,n}(0)) = \tau_{n,m+n}(0) = 0 + (m + n) - n = m.$$

Suponha agora que Q seja uma aljava qualquer e que tenhamos morfismos $f : [m] \rightarrow Q$ e $g : [n] \rightarrow Q$ tais que $f \circ \tau_{0,m} = g \circ \iota_{0,n}$. Nosso objetivo é mostrar a existência de um único morfismo $\phi : [m+n] \rightarrow Q$ fazendo comutar o diagrama abaixo.



Nos vértices de $[m+n]$ definimos

$$\phi(k) := \begin{cases} f(k), & \text{se } 0 \leq k \leq m; \\ g(k-m), & \text{se } m \leq k \leq m+n. \end{cases}$$

Veja que ϕ está bem-definida nos vértices pois a condição de comutatividade $f \circ \tau_{0,m} = g \circ \iota_{0,n}$ diz precisamente que vale a igualdade $f(m) = g(0)$. A definição de ϕ nas arestas é a esperada: utilizamos o morfismo f nas m primeiras arestas e o morfismo g nas n últimas. Explicitamente, definimos

$$\phi(k, k+1) := \begin{cases} f(k, k+1), & \text{se } 0 \leq k \leq m-1; \\ g(k-m, k-m+1), & \text{se } m \leq k \leq m+n-1. \end{cases}$$

Uma conta direta usando o fato de f e g morfismos de aljavas mostra que ϕ é também um morfismo de aljavas. Resta agora mostrarmos que ϕ é na verdade o único morfismo possível satisfazendo as condições de comutatividade em questão. Suponha então que $\psi : [m+n] \rightarrow Q$

seja um outro morfismo de aljavas tal que $\psi \circ \iota_{m,m+n} = f$ e $\psi \circ \tau_{n,m+n} = g$. Dado um vértice $k \in \{0, \dots, m+n\}$ qualquer, se $0 \leq k \leq m$, então

$$\psi(k) = \psi(\iota_{m,m+n}(k)) = f(k) = \phi(k),$$

e se $m \leq k \leq m+n$, então

$$\psi(k) = \psi((k-m) + m) = \psi(\tau_{n,m+n}(k-m)) = g(k-m) = \phi(k);$$

portanto ψ coincide com ϕ nos vértices. Dada agora uma aresta $(k, k+1)$ de $[m+n]$, se $0 \leq k \leq m-1$ temos

$$\psi(k, k+1) = \psi(\iota_{m,m+n}(k, k+1)) = f(k, k+1) = \phi(k, k+1),$$

e se $m \leq k \leq m+n-1$ temos

$$\begin{aligned} \psi(k, k+1) &= \psi((k-m) + m, (k-m+1) + m) \\ &= \psi(\tau_{n,m+n}(k-m, k-m+1)) \\ &= g(k-m, k-m+1) \\ &= \phi(k, k+1); \end{aligned}$$

portanto ψ coincide com ϕ nos vértices também como queríamos mostrar. ■

Temos agora em mãos todos os ingredientes necessários para construirmos uma categoria que depois mostraremos que satisfaz a propriedade universal que caracteriza a categoria livremente gerada por uma aljava.

Dada uma aljava qualquer Q , considere a categoria \mathbf{FQ} tendo como objetos os vértices $V(Q)$ da aljava inicial Q e tendo como morfismos entre dois objetos $a, b \in V(Q)$ o conjunto definido por

$$\text{Hom}_{\mathbf{FQ}}(a, b) := \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \{F : [n] \rightarrow Q \mid F(0) = a \text{ e } F(n) = b\}; \quad (\text{A.2})$$

ou seja, um morfismo de a para b em \mathbf{FQ} é um caminho de tamanho qualquer na aljava Q começando em a e terminando em b .

Vamos definir uma operação de composição nesses conjuntos de morfismos. Dados três objetos a, b e c em \mathbf{FQ} , se $F : [m] \rightarrow Q$ é um morfismo de a para b , e $G : [n] \rightarrow Q$ é um morfismo de b para c , como $F(m) = b = G(0)$, os morfismos compostos $F \circ \tau_{0,m}$, $G \circ \iota_{0,n} : [0] \rightarrow Q$ são iguais, portanto existe um único morfismo de aljavas $G \star F : [m+n] \rightarrow Q$ fazendo comutar o diagrama mostrado abaixo graças ao Lema A.1.16.

$$\begin{array}{ccccc} [0] & \xrightarrow{\tau_{0,m}} & [m] & & \\ \downarrow \iota_{0,n} & & \downarrow \iota_{m,m+n} & \searrow F & \\ [n] & \xrightarrow{\tau_{n,m+n}} & [m+n] & \xrightarrow{G \star F} & Q \\ & \searrow G & & & \end{array}$$

Veja que pelas condições de comutatividade temos

$$(G \star F)(0) = [(G \star F) \circ \iota_{m,m+n}](0) = F(0) = a$$

e também

$$(G \star F)(m+n) = [(G \star F) \circ \tau_{n,m+n}](n) = G(n) = c;$$

ou seja, $G \star F$ define um caminho em Q começando em a e terminando em c , portanto um morfismo de a para c em FQ conforme definido em (A.2). É este morfismo $G \star F$ que consideraremos como sendo a composição dos morfismos F e G . Note que pela construção dada no Lema A.1.16 podemos descrever $G \star F$ explicitamente: em um vértice $k \in \{0, \dots, m+n\}$ qualquer temos

$$(G \star F)(k) = \begin{cases} F(k), & \text{se } 0 \leq k \leq m, \\ G(k-m), & \text{se } m \leq k \leq m+n; \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

e em uma aresta $(k, k+1)$ qualquer temos

$$(G \star F)(k, k+1) = \begin{cases} F(k, k+1), & \text{se } 0 \leq k \leq m-1, \\ G(k-m, k-m+1), & \text{se } m \leq k \leq m+n-1. \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

Dado um objeto $a \in FQ$ qualquer, considere o morfismo de aljavas $p_a : [0] \rightarrow Q$ que mapeia o único vértice $0 \in [0]$ para a . Esse morfismo define um caminho na aljava Q começando e terminando no vértice a , ou seja, um morfismo do tipo $a \rightarrow a$ na categoria FQ . Vamos mostrar que esse morfismo é uma identidade para a operação de composição definida acima. Considere um morfismo do tipo $a \rightarrow b$ dado por um caminho $G : [n] \rightarrow Q$ começando em a e terminando em b e vamos mostrar que vale a igualdade $G \star p_a = G$. Uma maneira de fazermos isso é simplesmente compararmos diretamente ambos os lados usando a descrição explícita para a composição $G \star p_a$ dada acima, mas também podemos mostrar essa igualdade usando a unicidade que caracteriza o morfismo $G \star p_a$. Mais precisamente, $G \star p_a$ é o *único* morfismo de alajvas do tipo $[0+n] = [n] \rightarrow Q$ que faz comutar o diagrama mostrado abaixo.

$$\begin{array}{ccc} [0] & \xrightarrow{\tau_{0,0}} & [0] \\ \downarrow \iota_{0,n} & & \downarrow \iota_{0,n} \\ [n] & \xrightarrow{\tau_{n,n}} & [n] \\ & \searrow G \star p_a & \\ & & Q \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{curva } p_a \text{ de } [0] \text{ para } Q \\ \text{curva } G \text{ de } [n] \text{ para } Q \end{array}$$

Segue dessa unicidade que caracteriza $G \star p_a$ que a validade da igualdade $G \star p_a = G$ é equivalente à validade das igualdades

$$\begin{cases} G \circ \iota_{0,n} = p_a, \\ G \circ \tau_{n,n} = G. \end{cases}$$

A primeira dessas igualdade é verdadeira pois G é por hipótese um caminho começando no vértice a , enquanto a segunda é verdadeira pois o morfismo $\tau_{n,n}$ é igual ao morfismo identidade $\text{id}_{[n]}$. Considere agora um morfismo do tipo $z \rightarrow a$ na categoria FQ dado por um caminho $F : [m] \rightarrow Q$ começando em z e terminando em a . A composição $p_a \star F : [m] \rightarrow Q$ é por definição o único

morfismo de aljavas do tipo $[m] \rightarrow Q$ fazendo comutar o diagrama abaixo.

$$\begin{array}{ccc}
 [0] & \xrightarrow{\tau_{0,m}} & [m] \\
 \downarrow \iota_{0,0} & & \downarrow \iota_{m,m} \\
 [0] & \xrightarrow{\tau_{0,m}} & [m] \\
 & \searrow p_a \star F & \\
 & & Q
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{Curved arrow from } [0] \text{ to } Q \text{ labeled } p_a \\
 \text{Curved arrow from } [m] \text{ to } Q \text{ labeled } F
 \end{array}$$

A igualdade $p_a \star F = F$ seguirá então se mostrarmos que F satisfaz as igualdades

$$\begin{cases} F \circ \iota_{m,m} = F, \\ F \circ \tau_{0,m} = p_a. \end{cases}$$

A primeira das igualdades acima é válida pois o morfismo $\iota_{m,m}$ é igual ao morfismo identidade $\text{id}_{[m]}$, enquanto a segunda é válida pois o caminho F termina no vértice a por hipótese. Concluimos enfim que o morfismo do tipo $a \rightarrow a$ em \mathbf{FQ} dado pelo caminho $p_a : [0] \rightarrow Q$ é uma identidade para a operação de composição \star em questão.

Vejamos agora a questão da associatividade da operação de composição \star . Essa propriedade pode ser verificada de uma forma categórica similar ao que fizemos acima, mas por comodidade vamos mostrar isso usando as fórmulas explícitas para a composição. Considere então objetos a, b, c e d em \mathbf{FQ} e dados morfismos do tipo $a \rightarrow b, b \rightarrow c$ e $c \rightarrow d$ representados por caminhos $F : [\ell] \rightarrow Q, G : [m] \rightarrow Q$ e $H : [n] \rightarrow Q$, respectivamente. Usando (A.3) vemos que a ação do morfismo $(H \star G) \star F : [\ell + m + n] \rightarrow Q$ nos vértices é dada pela fórmula

$$\begin{aligned}
 ((H \star G) \star F)(k) &= \begin{cases} F(k), & \text{se } 0 \leq k \leq \ell, \\ (H \star G)(k - \ell), & \text{se } \ell \leq k \leq \ell + m + n \end{cases} \\
 &= \begin{cases} F(k), & \text{se } 0 \leq k \leq \ell, \\ G(k - \ell), & \text{se } \ell \leq k \leq \ell + m, \\ H(k - \ell - m), & \text{se } \ell + m \leq k \leq \ell + m + n; \end{cases}
 \end{aligned}$$

enquanto sua ação nas arestas é dada pelas fórmulas

$$\begin{aligned}
 ((H \star G) \star F)(k, k+1) &= \begin{cases} F(k, k+1), & \text{se } 0 \leq k \leq \ell - 1, \\ (H \star G)(k - \ell, k - \ell + 1), & \text{se } \ell \leq k \leq \ell + m + n - 1, \end{cases} \\
 &= \begin{cases} F(k, k+1), & \text{se } 0 \leq k \leq \ell - 1, \\ G(k - \ell, k - \ell + 1), & \text{se } \ell \leq k \leq \ell + m - 1, \\ H(k - \ell - m, k - \ell - m + 1), & \text{se } \ell + m \leq k \leq \ell + m + n - 1. \end{cases}
 \end{aligned}$$

Analogamente, a ação de $H \star (G \star F) : [\ell + m + n] \rightarrow Q$ nos vértices é dada pelas fórmulas

$$\begin{aligned}
 (H \star (G \star F))(k) &= \begin{cases} (F \star G)(k) & \text{se } 0 \leq k \leq \ell + m, \\ H(k - \ell - m), & \text{se } \ell + m \leq k \leq \ell + m + n, \end{cases} \\
 &= \begin{cases} F(k), & \text{se } 0 \leq k \leq \ell, \\ G(k - \ell), & \text{se } \ell \leq k \leq \ell + m, \\ H(k - \ell - m), & \text{se } \ell + m \leq k \leq \ell + m + n; \end{cases}
 \end{aligned}$$

enquanto sua ação nas arestas é dada pelas fórmulas

$$\begin{aligned} (H \star (G \star F))(k, k+1) &= \begin{cases} (G \star F)(k, k+1), & \text{se } 0 \leq k \leq \ell + m - 1, \\ H(k - \ell - m, k - \ell - m + 1), & \text{se } \ell + m \leq k \leq \ell + m + n - 1, \end{cases} \\ &= \begin{cases} F(k, k+1), & \text{se } 0 \leq k \leq \ell - 1, \\ G(k - \ell, k - \ell + 1), & \text{se } \ell \leq k \leq \ell + m - 1, \\ H(k - \ell - m, k - \ell - m + 1), & \text{se } \ell + m \leq k \leq \ell + m + n. \end{cases} \end{aligned}$$

Comparando as fórmulas obtidas vemos que os morfismos $(H \star G) \star F$ e $H \star (G \star F)$ agem exatamente da mesma forma tanto nos vértices quanto nas arestas de $[\ell + m + n]$, portanto vale a igualdade $(H \star G) \star F = H \star (G \star F)$ desejada.

O raciocínio acima mostra a associatividade da operação de composição \star definida e nos permite concluir enfim que FQ define de fato uma categoria. Veja que FQ é uma categoria pequena, visto que seus objetos formam um conjunto - o conjunto de vértices de Q por definição - e para quaisquer dois objetos a e b de FQ, os morfismos do tipo $a \rightarrow b$, ou seja, os caminhos na aljava Q começando em a e terminando em b também constituem um conjunto.

Uma propriedade bastante útil da categoria FQ é que todo morfismo nela pode ser decomposto como uma composição de morfismos que são em certo sentidos mais simples. O significado preciso disso é o conteúdo do lema abaixo.

A.1.17 Lema. *Seja Q um aljava qualquer. Dado um natural $n \geq 1$ e um caminho $\gamma : [n] \rightarrow Q$, existem caminhos $\gamma_1, \dots, \gamma_n : [1] \rightarrow Q$ tais que*

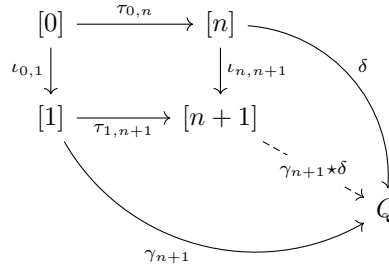
$$\gamma = \gamma_n \star \dots \star \gamma_1.$$

Demonstração. A prova é por indução sobre o comprimento do caminhos. Se $n = 1$ o resultado é imediato pois o caminho já está decomposto na forma necessária, ou seja, basta tomarmos $\gamma_1 := \gamma$.

Suponha agora que o resultado seja verdadeiro para caminhos do tipo $[n] \rightarrow Q$ e considere então um caminho $\gamma : [n+1] \rightarrow Q$. Lembrando dos morfismos de aljavas $\tau_{1,n+1} : [1] \rightarrow [n+1]$ e $\iota_{n,n+1} : [n] \rightarrow [n+1]$ introduzidos logo antes do Lema A.1.16, considere os caminhos $\gamma_{n+1} : [1] \rightarrow Q$ e $\delta : [n] \rightarrow Q$ definidos pelas composições

$$\gamma_{n+1} := \gamma \circ \tau_{1,n+1} \quad \text{e} \quad \delta := \gamma \circ \iota_{n,n+1}.$$

Podemos então formar o caminho composto $\gamma_{n+1} \star \delta : [n+1] \rightarrow Q$ que por construção é o único de seu tipo que faz comutar o diagrama abaixo.



Ora, fica claro da definição dos morfismos δ e γ_{n+1} que o caminho inicial $\gamma : [n+1] \rightarrow Q$ também faz comutar o diagrama acima, portanto segue da unicidade que vale a igualdade

$$\gamma = \gamma_{n+1} \star \delta.$$

Aplicando a hipótese de indução ao caminho $\delta : [n] \rightarrow Q$ obtemos caminhos $\gamma_1, \dots, \gamma_n : [1] \rightarrow Q$ tais que $\delta = \gamma_n \star \dots \star \gamma_1$. Substituindo isso na igualdade anterior obtemos a decomposição desejada

$$\gamma = \gamma_{n+1} \star \delta = \gamma_{n+1} \star \gamma_n \star \dots \star \gamma_1. \quad \blacksquare$$

Nosso objetivo é mostrar que a categoria FQ que acabamos de construir fornece um modelo concreto para a categoria livremente gerada por Q . Tendo em vista a Definição A.1.14, precisamos antes de algum morfismo de aljavas $i : Q \rightarrow U(FQ)$, onde $U : \mathbf{Cat} \rightarrow \mathbf{Alj}$ denota o funtor de esquecimento. Pensando inicialmente na ação de i nos vértices, lembre que pela definição do funtor U , a aljava $U(FQ)$ tem como vértices os objetos de FQ , mas o conjunto de tais objetos é por definição o conjunto $V(Q)$ de vértices da aljava Q inicial, portanto faz sentido definirmos $i : V(Q) \rightarrow V(U(FQ))$ pondo $i(a) := a$ para todo vértice $a \in V(Q)$. Pensando agora na ação nas arestas, lembre-se que por definição o conjunto de arestas $A(U(FQ))$ é dado pelo conjunto de todos os morfismos em FQ , ou seja, todos os caminhos na aljava Q . Assim, precisamos associar a cada aresta de Q um caminho na própria aljava Q , e a ideia por trás disso é interpretar uma aresta como um caminho entre seus vértices inicial e final. Mais precisamente, se $e \in A(Q)$ é uma aresta qualquer, considere o caminho $i_e : [1] \rightarrow Q$ definido da seguinte forma: nos vértices de $[1]$ temos $i_e(0) := s_Q(e)$ e $i_e(1) := t_Q(e)$, onde $s_Q, t_Q : A(Q) \rightarrow V(Q)$ são as funções *source* e *target* de Q ; enquanto na única aresta $(0, 1) \in A([1])$ temos $i_e(0, 1) := e$. Uma conta direta mostra que i_e é compatível com as funções *source* e *target* de $[1]$ e Q , definindo de fato um morfismo de aljavas e, portanto, um morfismo na categoria FQ . Tendo essa construção em mãos, definimos uma função $i : A(Q) \rightarrow A(U(FQ))$ entre as arestas simplesmente por $i(e) := i_e$ para toda aresta $e \in A(Q)$.

As funções i a nível de vértices e arestas construídas acima juntas definem um morfismo de aljavas $i : Q \rightarrow U(FQ)$. De fato, como as funções *source* e *target* da aljava $U(FQ)$ são as funções domínio e codomínio da categoria FQ , e para toda aresta $e \in A(Q)$, i_e define explicitamente um morfismo do tipo $s_Q(e) \rightarrow t_Q(e)$, fica claro que as funções i são compatíveis com as funções *source* e *target* das aljavas Q e FQ .

Tendo em mãos um “morfismo de comparação” entre Q e $U(FQ)$, podemos enfim demonstrar o resultado principal da seção.

A.1.18 Teorema. *Dada uma aljava qualquer Q , o par (FQ, i) satisfaz a propriedade universal de uma categoria livremente gerada por Q .*

Demonstração. Seja C uma categoria pequena e suponha que tenhamos um morfismo de aljavas $f : Q \rightarrow U(C)$. Nosso objetivo é mostrar que esse morfismo de aljavas pode ser unicamente “estendido” a um funtor $F : FQ \rightarrow C$. Vamos denotar por $f_V : V(Q) \rightarrow V(U(C)) = \text{Ob}(C)$ a ação do morfismo f a nível dos vértices e por $f_A : A(Q) \rightarrow A(U(C)) = \text{Mor}(C)$ a ação do morfismo f a nível das arestas.

Um funtor $F : FQ \rightarrow C$ é dado por funções $F_{\text{Ob}} : \text{Ob}(FQ) \rightarrow \text{Ob}(C)$ e $F_{\text{Mor}} : \text{Mor}(FQ) \rightarrow \text{Mor}(C)$ compatíveis com toda a estrutura presente. Por construção temos $\text{Ob}(FQ) = V(Q)$, logo a nível de objetos podemos definir uma função $F_{\text{Ob}} : V(Q) \rightarrow \text{Ob}(C)$ por $F_{\text{Ob}}(a) := f_V(a)$ para todo vértice $a \in V(Q)$.

Resta definirmos uma função $F_{\text{Mor}} : \text{Mor}(FQ) \rightarrow \text{Mor}(C)$. Lembrando que por construção os morfismos em FQ são dados por caminhos de comprimento qualquer na aljava Q , a ideia é pensar em um caminho como uma “composição de arestas” vistas como caminhos de comprimento 2, e transformar essa composição de arestas em uma composição de morfismos em C por meio da função $f_A : A(Q) \rightarrow \text{Mor}(C)$. Mais precisamente, dado um caminho $\gamma : [n] \rightarrow Q$ com $n \geq 1$, ou seja, γ tem comprimento pelo menos 2, definimos um morfismo $F_{\text{Mor}}(\gamma) \in \text{Mor}(C)$ pela fórmula:

$$F(\gamma) := f_A(\gamma_A(n-1, n)) \circ \dots \circ f_A(\gamma_A(1, 2)) \circ f_A(\gamma_A(0, 1)). \quad (\text{A.5})$$

Vejam os que a expressão acima faz sentido. Primeiramente, para qualquer $k \in \{0, \dots, n-1\}$, $(k, k+1)$ é uma aresta de $[n]$, logo $\gamma_A(k, k+1)$ é uma aresta de Q , e $f_A(\gamma_A(k, k+1))$ é uma aresta da aljava subjacente $U(C)$, ou seja, um morfismo da categoria C . Além disso, como f e γ são morfismos de aljaves por hipótese, por um lado temos

$$\begin{aligned} \text{dom}(f_A(\gamma_A(k+1, k+2))) &= f_V(s_Q(\gamma_A(k+1, k+2))) \\ &= f_V(\gamma_V(s(k+1, k+2))) \\ &= f_V(\gamma_V(k+1)), \end{aligned}$$

e por outro

$$\begin{aligned} \text{cod}(f_A(\gamma_A(k, k+1))) &= f_V(t_Q(\gamma_A(k, k+1))) \\ &= f_V(\gamma_V(t(k, k+1))) \\ &= f_V(\gamma_V(k+1)); \end{aligned}$$

ou seja, as composições da forma $f_A(\gamma_A(k+1, k+2)) \circ f_A(\gamma_A(k, k+1))$ que aparecem na equação (A.5) fazem sentido.

É claro que a definição acima só funciona se $n \geq 1$. No caso de um caminho $\gamma : [0] \rightarrow Q$ de tamanho 1, definimos à força $F_{\text{Mor}}(\gamma) := \text{id}_{f_V(\gamma_V(0))}$. Veja que isso faz bastante sentido pois os caminhos de comprimento 1 são os morfismos idênticos da categoria \mathbf{FQ} , e é bom que a função F_{Mor} preserve esses morfismos.

Vejam os agora que as funções F_{Ob} e F_{Mor} juntas definem de fato um funtor $\mathbf{FQ} \rightarrow C$. O primeiro passo é verificarmos a compatibilidade com as funções de domínio e codomínio das respectivas categorias. Veja inicialmente que pela definição de um morfismo de aljaves temos as condições de compatibilidade

$$f_V \circ s_Q = \text{dom}_C \circ f_A \quad \text{e} \quad f_V \circ t_Q = \text{cod}_C \circ f_A.$$

Inicialmente, se $\gamma : [0] \rightarrow Q$ é um caminho de comprimento de 1, temos

$$\begin{aligned} \text{dom}_C(F_{\text{Mor}}(\gamma)) &= \text{dom}_C(\text{id}_{f_V(\gamma_V(0))}) \\ &= f_V(\gamma_V(0)) \\ &= F_{\text{Ob}}(\gamma_V(0)) \\ &= F_{\text{Ob}}(\text{dom}_{\mathbf{FQ}}(\gamma)). \end{aligned}$$

Um raciocínio completamente análogo mostra que nesse caso também temos a compatibilidade com os codomínios, ou seja, que vale a igualdade $\text{cod}_C(F_{\text{Mor}}(\gamma)) = F_{\text{Ob}}(\text{cod}_{\mathbf{FQ}}(\gamma))$.

Suponha agora que $\gamma : [n] \rightarrow Q$ seja um caminho tal que $n \geq 1$. Usando então a definição de F temos

$$\begin{aligned} \text{dom}_C(F_{\text{Mor}}(\gamma)) &= \text{dom}_C(f_A(\gamma_A(n-1, n)) \circ \dots \circ f_A(\gamma_A(1, 2)) \circ f_A(\gamma_A(0, 1))) \\ &= \text{dom}_C(f_A(\gamma_A(0, 1))) \\ &= f_V(s_Q(\gamma_A(0, 1))) \\ &= f_V(\gamma_V(s(0, 1))) \\ &= f_V(\gamma_V(0)) \\ &= F_{\text{Ob}}(\text{dom}_{\mathbf{FQ}}(\gamma)). \end{aligned}$$

Analogamente, no caso das funções codomínio temos

$$\begin{aligned}
\text{cod}_{\mathbb{C}}(F_{\text{Mor}}(\gamma)) &= \text{cod}_{\mathbb{C}}(f_A(\gamma_A(n-1, n)) \circ \cdots \circ f_A(\gamma_A(1, 2)) \circ f_A(\gamma_A(0, 1))) \\
&= \text{cod}_{\mathbb{C}}(f_A(\gamma_A(n-1, n))) \\
&= f_V(t_Q(\gamma_A(n-1, n))) \\
&= f_V(\gamma_V(t(0, 1))) \\
&= f_V(\gamma_v(n)) \\
&= F_{\text{Ob}}(\text{cod}_{\text{FQ}}(\gamma)).
\end{aligned}$$

Já discutimos anteriormente que F_{Mor} por construção preserva os morfismos identidade de FQ dados pelos caminhos de comprimento 1, logo resta apenas verificarmos a compatibilidade de F_{Mor} com a operação de composição. Considere então dois morfismos $a \rightarrow b$ e $b \rightarrow c$ dados, respectivamente, por caminhos $\gamma : [m] \rightarrow Q$ e $\delta : [n] \rightarrow Q$. Vamos assumir por simplicidade inicialmente que $n = 1$. Como já sabemos que F_{Mor} preserva morfismos identidade, podemos assumir também que $m \geq 1$. Temos então

$$\begin{aligned}
F_{\text{Mor}}(\delta) \circ F_{\text{Mor}}(\gamma) &= f_A(\delta_A(0, 1)) \circ f_A(\gamma_A(m-1, m)) \circ \cdots \circ f_A(\gamma_A(0, 1)) \\
&= f_A((\delta \star \gamma)_A(m, m+1)) \circ f_A((\delta \star \gamma)_A(m-1, m)) \circ \cdots \circ f_A((\delta \star \gamma)_A(0, 1)) \\
&= F_{\text{Mor}}(\delta \star \gamma).
\end{aligned}$$

Isso mostra que F_{Mor} preserva todas as composições nas quais o segundo caminho é do tipo $[1] \rightarrow Q$.

O caso acima nos permite demonstrar o caso geral fazendo uma indução no comprimento do segundo caminho que aparece na composição. O caso em que $n = 1$ é o que demonstramos acima. Supondo que o resultado seja verdadeiro para caminhos do tipo $[n] \rightarrow Q$, considere agora que o segundo caminho é do tipo $\delta : [n+1] \rightarrow Q$. Uma consequência do Lema A.1.17 é que podemos encontrar caminhos $\delta_{n+1} : [1] \rightarrow Q$ e $\delta' : [n] \rightarrow Q$ tais que $\delta = \delta_{n+1} \star \delta'$. Note então que

$$\begin{aligned}
F_{\text{Mor}}(\delta) \circ F_{\text{Mor}}(\gamma) &= F_{\text{Mor}}(\delta_{n+1} \star \delta') \circ F_{\text{Mor}}(\gamma) \\
&= F_{\text{Mor}}(\delta_{n+1}) \circ F_{\text{Mor}}(\delta') \circ F_{\text{Mor}}(\gamma) && \text{(caso base da indução)} \\
&= F_{\text{Mor}}(\delta_{n+1}) \circ F_{\text{Mor}}(\delta' \star \gamma) && \text{(hipótese de indução)} \\
&= F_{\text{Mor}}(\delta_{n+1} \star \delta' \star \gamma) && \text{(caso base da indução)} \\
&= F_{\text{Mor}}(\delta \star \gamma).
\end{aligned}$$

Sabendo que as funções F_{Ob} e F_{Mor} juntas definem realmente um funtor $F : \text{FQ} \rightarrow \mathbb{C}$, vejamos que ele satisfaz a condição, $U(F) \circ i = f$. Lembremos que o morfismo de aljavas $i : Q \rightarrow U(\text{FQ})$ a nível de objetos é dado pela função identidade $\text{id}_{V(Q)}$, enquanto o morfismo $U(F) : U(\text{FQ}) \rightarrow U(\mathbb{C})$ é dado pela função $F_{\text{Ob}} : \text{Ob}(\text{FQ}) \rightarrow \text{Ob}(\mathbb{C})$, a qual foi definida como sendo igual à função $f_V : V(Q) \rightarrow \text{Ob}(\mathbb{C})$. É imediato então que os morfismos de aljavas $U(F) \circ i$ e f coincidem nos vértices de Q . Lembre agora que $U(F)$ é dado nas arestas pela função $F_{\text{Mor}} : \text{Mor}(\text{FQ}) \rightarrow \text{Mor}(\mathbb{C})$ que construímos acima, e que $i_A : A(Q) \rightarrow A(U(\text{FQ}))$ mapeia uma aresta $e \in A(Q)$ para o caminho $i_e : [1] \rightarrow Q$ conectando $s_Q(e)$ a $t_Q(e)$ por meio da própria aresta e . Usando então a definição de F_{Mor} vemos que

$$F_{\text{Mor}}(i_A(e)) = F_{\text{Mor}}(i_e) = f_A(i_e(0, 1)) = f_A(e);$$

mostrando assim que $F \circ i$ e f também coincidem nas arestas de Q , portanto vale a igualdade $F \circ i = f$ desejada.

Enfim, resta apenas verificarmos a unicidade do funtor F satisfazendo tal condição de comutatividade. Suponha que $G = (G_{\text{Ob}}, G_{\text{Mor}}) : \text{FQ} \rightarrow \mathbb{C}$ seja um outro funtor satisfazendo

$U(G) \circ i = f$. No nível dos vértices, isso significa que vale a igualdade $G_{\text{Ob}} \circ i_V = f_V$, mas como i_V é dado pela função idêntica $\text{id}_{V(Q)}$, essa igualdade diz apenas que $G_{\text{Ob}} = f_v = F_{\text{Ob}}$, ou seja, já concluímos assim que F e G coincidem nos objetos da categoria \mathbf{FQ} . Pensando agora nas arestas, temos a igualdade $G_{\text{Mor}} \circ i_A = f_A$. Afirmamos então que G_{Mor} e F_{Mor} coincidem nos morfismos de \mathbf{FQ} dados por caminhos do tipo $[1] \rightarrow Q$. Dado um tal caminho $\gamma : [1] \rightarrow Q$, se definirmos a aresta $e := \gamma_A(0, 1) \in A(Q)$, então por hipótese temos $G_{\text{Mor}}(i_A(e)) = f_A(e)$. Ora, o caminho $i_A(e) = i_e : [1] \rightarrow Q$ é nada mais que o próprio caminho γ considerado inicialmente, já que no vértice $0 \in V([1])$ temos

$$i_e(0) = s_Q(e) = s_Q(\gamma_A(0, 1)) = \gamma_V(s(0, 1)) = \gamma_V(0),$$

no vértice $1 \in V([1])$ temos uma igualdade análoga, e na única aresta $(0, 1) \in A([1])$ temos

$$i_e(0, 1) = e = \gamma_A(0, 1).$$

Sabendo disso, a hipótese sobre G nos permite concluir que $G_{\text{Mor}}(\gamma)$ é dado por $f_A(\gamma_A(0, 1))$, mas esse é justamente o valor de $F_{\text{Mor}}(\gamma)$ também. Concluímos assim que G_{Mor} e F_{Mor} coincidem nos caminhos de comprimento 2 em Q , e combinando isso com uma aplicação direta do Lema A.1.17 concluímos que as funções G_{Mor} e F_{Mor} coincidem na verdade em todos os caminhos. ■

A.1.19 Observação (Questões de tamanho). Frequentemente na Teoria de Categorias somos naturalmente levados a manipular coleções grandes demais para serem consideradas conjuntos legítimos segundo os axiomas de ZFC usuais da Teoria de Conjuntos, e a manipulação descuidada de tais coleções pode causar algumas dores de cabeça.

Uma maneira de contornarmos esse problema é trabalharmos com um sistema de axiomas que nos permita manipular formalmente tais coleções muito grandes. Um exemplo possível de tal sistema são os axiomas de *Neumann-Bernays-Gödel*, no qual as coleções muito grandes mencionadas anteriormente são chamadas de *classes*.

Existe uma outra estratégia - a qual vem se tornando mais e mais popular - para contornarmos o problema em questão sem nos distanciarmos tanto da axiomática usual da Teoria de Conjuntos: suplementamos os axiomas de ZFC com novos axiomas a respeito da existência dos chamados *universos de Gröthendieck*. Sem entrar em muitos detalhes, um universo de Gröthendieck é um conjunto U grande o suficiente para que possamos “fazer Teoria dos Conjuntos internamente a U ”, ou seja, podemos utilizar todas as construções usuais da Teoria de Conjuntos com os elementos de U e ter a certeza de que ao final obteremos um outro elemento de U . Quando fixamos um tal universo, dizemos que os conjuntos que pertencem a U são *pequenos*.

Fixada então essa noção *relativa* de tamanho, redefinimos nossos objetos de estudo como sendo os conjuntos pequenos, os grupos pequenos, os espaços topológicos pequenos, e por aí vai... Redefinimos então nos objetos de estudo de forma a levarmos em conta essa restrição relativa sobre o tamanho dos conjuntos subjacentes: passamos a estudar grupos pequenos, espaços vetoriais pequenos e espaços topológicos pequenos, por exemplo.

Poderíamos então considerar apenas categorias cujos conjuntos de objetos e morfismos são pequenos em relação ao universo fixado inicialmente. Infelizmente, isso não é suficiente para resolver todos os nossos problemas. Veja que o universo U em si não é pequeno, pois isso implicaria $U \in U$, relação esta que nunca é válida em ZFC graças ao Axioma de Regularidade. Consequentemente, diversas coleções de objetos pequenas não são pequenas. Assim, embora possamos falar de conjuntos pequenos em relação ao U , não podemos formar a categoria $U\text{Set}$ cujos objetos são os conjuntos pequenos, já que U em si não é um conjunto pequeno. Essa noção de categoria com uma condição de tamanho relativas nos objetos e morfismos é então restrita demais na prática.

A solução frequentemente adotada é então trabalharmos com *dois* universos de Gröthendieck U_1 e U_2 tais que $U_1 \in U_2$. Os conjuntos pertencentes a U_1 seriam então os conjuntos pequenos

da teoria, os conjuntos pertencentes a U_2 seria os conjuntos grandes, e os conjuntos que não pertencem nem mesmo a U_2 seriam considerado demasiadamente grandes e estariam fora do escopo da teoria.

Adotando então essa estratégia de dois universos de Gröthendieck, definimos uma categoria C como tendo conjuntos possivelmente grandes de objetos e morfismos, ou seja, consideramos que $\text{Ob}(C)$ e $\text{Mor}(C)$ pertencem a U_2 . No caso especial em que $\text{Ob}(C)$ e $\text{Mor}(C)$ pertencem não só a U_2 , mas também a U_1 , dizemos que C é uma categoria pequena. Note que agora podemos construir uma categoria $U_1 - \text{Set}$ tendo como objetos os conjuntos pequenos da categoria. Embora tal categoria não seja pequena, a existência do segundo universo U_2 nos permite construí-la formalmente dentro da teoria. Analogamente, podemos também considerar a categorias (grandes!) $U_1 - \text{Grp}$ cujos objetos são os grupos pequenos da teoria, ou a categoria $U_1 - \text{Top}$ cujos objetos são os espaços topológicos pequenos da teoria.

As duas noções relativas de tamanho nos permitem formalizar também a noção de uma categoria localmente pequena. Precisamente, uma categoria C (possivelmente grande) é dita *localmente pequena* se, dados quaisquer dois objetos $X, Y \in \text{Ob}(C)$, o conjunto de morfismos $\text{Mor}_C(X, Y)$ é pequeno na teoria, ou seja, $\text{Mor}_C(X, Y) \in U_1$. Todas as categorias mencionadas no parágrafo anterior são localmente pequenas nesse sentido preciso.

Veja que é possível então impormos condições de tamanho sobre outros objetos que tenham relação com categorias. Por exemplo, podemos agora considerar aljavas Q pequenas ou grandes, a depender do tamanhos dos conjuntos $V(Q)$ e $A(Q)$ de vértices e arestas. Naturalmente, podemos também definir a noção de uma aljava localmente pequena. A construção apresentada na demonstração do Teorema A.1.18 mostra então que, se uma aljava Q é pequena em relação a algum universo fixado, então a categoria FQ livremente gerada por ela é também pequena em relação a esse universo. Note, entretanto, que a propriedade universal de uma categoria livre só faz sentido para o primeiro universo U_1 , já que a categoria $U_1 - \text{Cat}$ formada pelas categorias pequenas forma uma categoria de fato, a qual é grande, mas a coleção de todas as categorias grandes é grande demais para pertencer a U_2 , portanto não somos capazes de formar a categoria $U_2 - \text{Cat}$ utilizando apenas dois universos.

Um cuidado particular deve ser tomado com as aljavas localmente pequenas. Parece razoável esperar que a categoria FQ livremente gerada por uma aljava localmente pequena Q seja localmente pequena também, mas o exemplo abaixo mostra que isso não é verdade em geral!

A.1.20 Exemplo. Considere dois universos do Gröthendieck U_1 e U_2 tais que $U_1 \in U_2$ como na Observação A.1.19, e considere a aljava $Q := (U_1, U_1 \times U_1, \pi_1, \pi_2)$, onde $\pi_1, \pi_2 : U_1 \times U_1 \rightarrow U_1$ são as projeções canônicas. Note que Q é uma aljava grande, pois o conjunto de vértices U_1 e o conjunto de arestas $U_1 \times U_2$ não pertencem ao primeiro universo U_1 , mas sim ao segundo universo U_2 . Note, entretanto, que para quaisquer dois vértices $A, B \in U_1$, o conjunto de arestas de Q começando em A e terminando em B possui como único elemento o par (A, B) , e como tal par pertence ao universo U_1 , o mesmo vale para o conjunto unitário formado por ele. Isso mostra que temos um conjunto pequeno de arestas entre dois vértices quaisquer, ou seja, Q é uma aljava localmente pequena.

Afirmamos, entretanto, que a categoria FQ livremente gerada por Q não é localmente pequena. De fato, afirmamos mais ainda que, para quaisquer dois objetos $A, B \in U_1 = \text{Ob}(\text{FQ})$, o conjunto de morfismos $\text{Mor}_{\text{FQ}}(A, B)$ entre eles é necessariamente grande. Dado qualquer conjunto pequeno $X \in U_1$, considere o caminho

$$\gamma^X : [2] \rightarrow Q$$

definido da seguinte forma: nos vértices γ^X é definido por $\gamma_V^X(0) := A$, $\gamma_V^X(1) := X$ e $\gamma_V^X(2) := B$; enquanto nas arestas γ^X é dado por $\gamma_A^X(0, 1) := (A, X)$ e $\gamma_A^X(1, 2) := (X, B)$. Uma verificação direta mostra que γ^X define de fato um morfismo de aljavas, e como tal caminho começa em A e termina em B , ele define um morfismo do tipo $A \rightarrow B$ na categoria FQ . Ora, é claro que se $Y \in U_1$

é outro conjunto pequeno diferente de X , então o caminho γ^Y correspondente é diferente de γ^X , portanto a associação $X \mapsto \gamma^X$ define uma injeção $U_1 \hookrightarrow \text{Mor}_{\mathbf{FQ}}(A, B)$. Concluimos então que $\text{Mor}_{\mathbf{FQ}}(A, B)$ não pode ser um conjunto pequeno, pois nesse caso usando a injeção mencionada concluiríamos que U_1 em si é um conjunto pequeno, mas já discutimos anteriormente que isso não é verdade.

Bibliografia

- [HM22] Gijs Heuts e Ieke Moerdijk. *Simplicial and Dendroidal Homotopy Theory*. 1^a ed. A Series of Modern Surveys in Mathematics 75. Springer Cham, 2022.
- [Hov07] Mark Hovey. *Model Categories*. Mathematical Surveys and Monographs. American Mathematical Society, 2007.
- [nLa23] nLab authors. *Localization*. <https://ncatlab.org/nlab/show/localization>. Revision 78. Nov. de 2023.
- [nLa24] nLab authors. *injective or projective morphism*. <https://ncatlab.org/nlab/show/injective+or+projective+morphism>. Revision 8. Jan. de 2024.
- [Shu] Mike Shulman. *What is the correct definition of localisation of a category?* MathOverflow. URL:<https://mathoverflow.net/q/312123> (version: 2018-10-05). eprint: <https://mathoverflow.net/q/312123>. URL: <https://mathoverflow.net/q/312123>.