

# Planejamento de Experimentos

Rodrigo R. Pescim

21 de maio de 2020

# Planejamento de Experimentos

- Para que os resultados de uma análise estatística de dados produzam informações úteis, os dados precisam ser coletados de forma planejada.
- Assim, as principais etapas de uma pesquisa precisam ser desenvolvidas ainda na fase de planejamento da pesquisa.
- Observa-se que na **fase do planejamento** é necessário também pensar na forma de **análise estatística** dos dados, pois dependendo da análise, o projeto de pesquisa pode ter pequenas (ou muitas) mudanças.

# Pesquisa Observacional X Pesquisa Experimental

- Pesquisa Observacional → Características de uma população são levantadas, mas sem manipulação.
- Pesquisa Experimental → Grupos de indivíduos (pessoas, animais, plantas, corpos de prova) são manipulados para avaliar o efeito de diferentes tratamentos nos fatores.
  - Exemplo: Verificar o rendimento de um processo químico para diferentes temperaturas de reação
- Na área de tecnologia, é muito comum pesquisas experimentais, nas quais se manipulam de forma planejada certas **variáveis independentes ou fatores** ( $A, C, B, \dots$ ), para verificar o efeito que essa manipulação numa certa **variável dependente ou variável resposta  $Y$**

# Exemplos

1. Verificar quais são os fatores que mais interferem na resistência à compressão ( $Y$ ) de um concreto. Os fatores a serem estudados podem ser
  - (a) Tempo de hidratação (A);
  - (b) Dosagem do cimento (B);
  - (c) Qualidade do cimento (C);
  - (d) Uso de aditivos (D)
2. Encontrar a melhor condição de operação de um processo químico. A variável resposta  $Y$  pode ser o rendimento da reação química e os fatores podem ser
  - (a) Tempo de reação (A);
  - (b) Temperatura de reação (B)  $\rightarrow (B_1, B_2, B_3)$  Níveis de um fator

# Estratégias no Planejamento de Experimentos

- (1) Reconhecer, estabelecer e delimitar o problema;
- (2) Identificar os fatores que podem afetar o problema em estudo;
- (3) Escolher um delineamento (ou projeto) experimental adequado;
- (4) Escolher a variável resposta  $Y$  adequada, ou seja, a variável que mede adequadamente o resultado do processo;
- (5) Planejar como será a análise dos dados do experimento

# Exemplo 1

- Suponha que um engenheiro civil esteja investigando os efeitos de diferentes métodos de cura sobre a resistência compressiva do concreto.
- O Experimento poderia consistir em fabricar vários corpos de prova de concreto utilizando cada um dos métodos propostos de cura e então testar a resistência compressiva de cada espécime.
- Os dados desse experimento poderiam ser usados para determinar qual método de cura deveria ser usado para fornecer a máxima resistência média
- Se houver somente dois métodos de cura que sejam de interesse, esse experimento poderia ser planejado e analisado utilizando uma comparação por meio do teste t.

- **Dados experimentais** são dados obtidos por meio de trabalhos realizados propositadamente e em condições previamente especificadas.
- Um trabalho previamente planejado, que segue determinados princípios básicos e no qual se faz a comparação dos efeitos dos tratamentos é chamado de experimento ou ensaio.

## • Unidades Experimentais

- As "entradas" de um processo num experimento são as unidades experimentais.
- Em engenharia, as unid. exp. costumam ser corpos de prova, em medicina, são indivíduos (pessoas), em agronomia, são plantas e/ou animais
- É desejável fazer com que as unidades experimentais sejam tão homogêneas quanto possível

## • Fatores

- São quantidades (controláveis ou não) de um processo ou experimento que podem afetar ou alterar seu desempenho
- Exemplo: Temperatura de reação ( $A$ )  $\rightarrow (A_1, A_2, A_3)$  Níveis de um fator temperatura



## ● Tratamentos

- É o método, elemento ou **material cujo efeito se deseja medir ou comparar** em um experimento. Neste sentido, chamamos de tratamento **uma particular combinação dos níveis dos fatores** incluídos no modelo experimental
- Na pesquisa experimental, **os tratamentos** são aplicados as **unidades experimentais**.
- Exemplo: Um experimento com 2 fatores
  - Fator A  $\rightarrow A_1, A_2, A_3$
  - Fator B  $\rightarrow B_1, B_2$
- Tratamento: Combinação dos níveis dos fatores
  - $A_1B_1, A_1B_2, A_2B_1, A_2B_2, A_3B_1, A_3B_2$
- Observação: No caso de um experimento com um único fator, os tratamentos são os próprios níveis do fator no experimento

- **Delineamento experimental** é o plano utilizado na experimentação e implica a forma como os tratamentos serão designados às unidades experimentais, além de um amplo entendimento das análises a serem feitas quando todos os dados estiverem disponíveis.
- **Variação do acaso:** Fatores não controláveis causam variações em todas as observações, e isto, nos obriga a utilizar a análise estatística para testar as hipóteses formuladas. Estes fatores não controlados são chamados de variação do acaso.

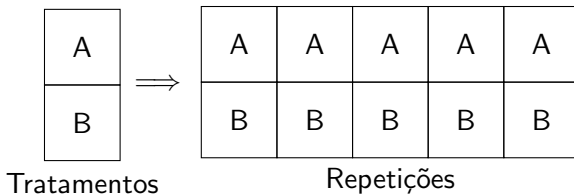
- O pesquisador deve fazer o planejamento do experimento visando minimizar a variação do acaso de tal forma que consiga isolar os efeitos de todos fatores que podem ser controlados.

Exemplos de fatores não controlados:

- Diferenças em fertilidade do solo.
- Diferença entre raças de animais.
- Mais de uma pessoa aplicando o tratamento.
- Diferença entre equipamentos.
- Diferença de temperatura.

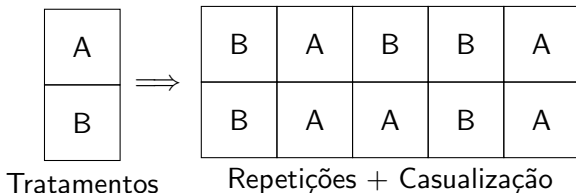
## (1) Repetição

- Consiste em ter várias unidades experimentais com o mesmo tratamento
- Por meio da repetição, pode-se avaliar o **erro experimental** ou seja, o efeito provocado pelos possíveis fatores que estão agindo no experimento



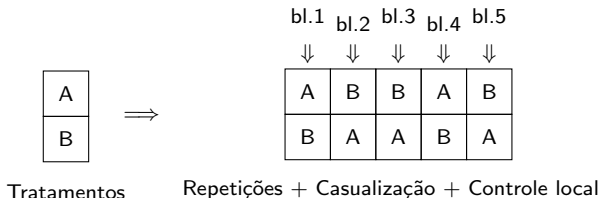
## (2) Causalização (Aleatorização)

- É um procedimento que garante a validade de um estudo experimental
- Consiste em "alocar" os tratamentos nas unidades experimentais de forma aleatória, isto é, cada tratamento possui a mesma probabilidade de ocupar uma posição no experimento



### (3) Controle Local (Blocos)

- Quando algum fator de heterogeneidade está presente nas unidades experimentais, pode-se construir o que chamamos de blocos, que em geral, possuem unidades experimentais homogêneas.
- Exemplo: Se os corpos de provas utilizados num determinado experimento são provenientes de diferentes lotes. Então, pode-se pensar cada lote como um bloco.



# Condução do experimento

- Não se deve permitir que uma técnica experimental inadequada ou imperfeita seja a responsável principal pelo tamanho do erro experimental.
- Deve-se pesar o material, calibrar o equipamento ou tirar as medidas necessárias, com o **máximo de precisão** possível.
- Uma **falha bastante comum** é a aplicação **não uniforme** dos tratamentos em todas as repetições.

# Planejamento de Experimento

Para se ter um experimento planejado, é necessário definir:

- Os tratamentos que serão comparados.
- A unidade experimental.
- A forma como os tratamentos serão designados às unidades experimentais.
- A variável resposta em análise e a forma como será medida.
- O delineamento experimental.



- Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC)
- Delineamento em Blocos Casualizados (DBC)
- Delineamento em Quadrado-Latinos (DQL)
- Delineamentos nos Ensaios Fatoriais

## Exemplo 2

Um pesquisador deseja verificar se quatro diferentes aditivos, com seis repetições cada, tem efeito sobre a resistência à compressão do concreto de certas estruturas. Para a realização do experimento, dispomos de corpos de prova totalmente homogêneos. Com base nessas informações, pergunta-se:

- (a) Quem são as unidades experimentais?
- (b) Identifique os tratamentos.
- (c) Qual é o número de unid. exp. utilizadas no experimento?
- (d) Para a validação do experimento, como você utiliza o processo de casualização?

## Exemplo 2 - Respostas

- (a) Quem são as unidades experimentais?

As unid. exp. são os corpos de prova constituídos de forma homogênea.

- (b) Identifique os tratamentos.

Os tratamentos são os 4 diferentes aditivos aplicados aos corpos de prova.

- (c) Qual é o número de unid. exp. utilizadas no experimento?

$n = \text{tratamentos} \times \text{repetições} = 24 \text{ unid. experimentais.}$

- (d) Para a validação do experimento, como você utiliza o processo de casualização?

Para a validação do experimento deve-se realizar um procedimento aleatório (sorteio) para distribuir os tratamentos (aditivos) aos corpos de prova.

Para se definir qual aditivo será aplicada em cada corpo de prova, realiza-se um **sorteio** enumerando cada um dos 24 corpos de prova (unidades experimentais) do estudo (1 a 24) e, em seguida, aplicam-se os tratamentos em uma sequência, como a dada a seguir:

$A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6$     $B_1 B_2 B_3 B_4 B_5 B_6$     $C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 C_6$     $D_1 D_2 D_3 D_4 D_5 D_6$

e, a partir daí, sorteia-se a alocação do aditivo a cada corpo de prova. Suponha a seguinte sequência de números aleatórios:

5 16 21 6 3 14      10 19 23 2 4 7      17 13 20 15 12 11      8 24 22 18 1 9

Para obter a sequência de números aleatórios e alocá-las a cada tratamentos usando o R, bastam os seguintes comandos:

```
set.seed(5)
(corpodeprova = sample(1:24))
aditivos = factor(rep(c('A','B','C','D'), each=6))
data.frame(aditivos, corpodeprova)
```

Assim, ter-se-ia a seguinte configuração do experimento:

Corpos de Prova Aditivos	1 $D_5$	2 $B_4$	3 $A_5$	4 $B_5$	5 $A_1$	6 $A_4$
Corpos de Prova Aditivos	7 $B_6$	8 $D_1$	9 $D_6$	10 $B_1$	11 $C_6$	12 $C_5$
Corpos de Prova Aditivos	13 $C_2$	14 $A_6$	15 $C_4$	16 $A_2$	17 $C_1$	18 $D_4$
Corpos de Prova Aditivos	19 $B_2$	20 $C_3$	21 $A_3$	22 $D_3$	23 $B_3$	24 $D_2$

Considere os seguintes valores de resistência à compressão dos corpos de prova submetidos a aplicação de quatro diferentes aditivos.

1 - $D_5$ 19.54	2 - $B_4$ 25.12	3 - $A_5$ 22.81	4 - $B_5$ 22.94	5 - $A_1$ 19.58	6 - $A_4$ 25.42
7 - $B_6$ 21.56	8 - $D_1$ 22.15	9 - $D_6$ 24.06	10 - $B_1$ 23.40	11 - $C_6$ 35.19	12 - $C_5$ 35.04
13 - $C_2$ 32.47	14 - $A_6$ 23.54	15 - $C_4$ 33.79	16 - $A_2$ 21.07	17 - $C_1$ 35.42	18 - $D_4$ 20.37
19 - $B_2$ 22.37	20 - $C_3$ 34.48	21 - $A_3$ 23.43	22 - $D_3$ 26.54	23 - $B_3$ 24.36	24 - $D_2$ 24.37

Seja  $y_{ij}$  o valor da resistência do concreto à compressão do  $j$ -ésimo corpo de prova que recebeu o  $i$ -ésimo aditivo (tratamento). Os valores das resistências podem ser resumidos na forma da Tabela abaixo.

**Tabela:** Valores da resistência à compressão.

	Aditivo A	Aditivo B	Aditivo C	Aditivo D
	19,58	23,40	35,42	22,15
	21,07	22,37	32,47	24,37
	23,43	24,36	34,48	26,54
	25,42	25,12	33,79	20,37
	22,81	22,94	35,04	19,54
	23,54	21,56	35,19	24,06
$\sum_{j=1}^6 y_{ij}$	135,85	139,75	206,39	137,03
$\sum_{i=1}^6 y_{ij}^2$	3.096,8903	3.263,4781	7.105,6495	3.164,523
$\bar{y}_i$	22,6417	23,2917	34,3983	22,8383

É sempre importante examinar os dados graficamente. Pode-se, por exemplo, utilizar o box-plot para estudar cada nível da variável resistência á compressão.

## Exemplo 3

Um engenheiro está interessado no efeito da condutividade de cinco tipos diferentes de recobrimento de tubos de raios catódicos, com cinco repetições cada, em uma tela de um sistema de telecomunicações. Supondo-se que o pesquisador dispõe de um conjunto de tubos em condições similares, realize o planejamento desse experimento respondendo as seguintes perguntas:

- (a) Quem são as unidades experimentais?
- (b) Quais são os tratamentos?
- (c) Qual é o número de unid. exp. utilizadas no experimento?
- (d) Para a validação do experimento, como você utiliza o processo de casualização?
- (e) Faça o croqui (ou desenho esquemático) do experimento.



# Planejamento de Ensaios Fatoriais

- Em geral, os experimentos envolvem vários fatores
- Uma forma eficiente de obter os tratamentos **é combinar os níveis dos diversos fatores**, de tal forma que cada nível de um fator seja combinado com todos os níveis dos outros fatores.
- **Exemplo:** Considere um processo químico em que se quer pesquisar a influência dos fatores (abaixo) sobre o rendimento da reação química ( $Y$ )
  - O tipo de catalisador ( $A$ ) com dois níveis ( $A_1$  e  $A_2$ )
  - O tipo de reação ( $B$ ) com quatro níveis ( $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  e  $B_4$ )

**Tratamentos:**  $A_1B_1$ ,  $A_1B_2$ ,  $A_1B_3$ ,  $A_1B_4$ ,  $A_2B_1$ ,  $A_2B_2$ ,  $A_2B_3$ ,  $A_2B_4$

- Observa-se que os ensaios fatoriais são apenas um **esquema de tratamento**.
- Nesses ensaios pode-se avaliar não somente o **efeito de cada fator**, mas também as possíveis **interações** entre os fatores .