

---

# **DOE-Design of Experiments**

**Prof. Dr. Messias Borges Silva**

## **MESSIAS BORGES SILVA**

Faculty member at

**UNIVERSITY OF SÃO PAULO-USP**

School of Engineering of Lorena- EEL-USP

**SÃO PAULO STATE UNIVERSITY-UNESP**

School of Engineering of Guaratinguetá

Visiting Scientist at

**HARVARD UNIVERSITY**

School of Engineering And Applied Sciences



**Massachusetts Institute of Technology-MIT** facilitator in Lean Enterprise – International courses

- **Engenheiro Industrial Químico (EEL-USP)**
- **Certified Quality Engineer (American Society for Quality-ASQ-USA)**
- **Pós-graduado em Ciências Térmicas (ITA)**
- **Pós-graduado em Qualidade (USJT)**
- **Mestre em Engenharia Mecânica (UNESP)**
- **Doutor em Engenharia Química (UNICAMP)**
- **Pós doutorado Harvard University**
- **Livre Docente em Engenharia da Qualidade (UNESP)**
- **Espec. em Design of Experiments, Lean Enterprise, Lean Product Development (Massachusetts Institute of Technology-MIT-USA); Lean Production (Porsche Consulting)**
- **Professor convidado da Harvard University, Massachusetts Institute of Technology-MIT, University of Massachusetts e Colorado State University – USA, University British Columbia-UBC-Canada, University of Tennessee e Old Dominion University-USA**
- **Coordenador do projeto MIT-Brasil Educational Network**
- **Professor e Ex-Diretor Geral da EEL(USP-Lorena), UNESP**
- **Coordenador do Curso de Pós-graduação em Engenharia da Qualidade da EEL-USP Lorena**
- **Consultor de empresas**

**...We have a large reservoir of engineers (and scientists) with a vast background of engineering know-how. They need to learn statistical methods that can tap into the knowledge.**

**Statistics used as a catalyst to engineering creation will, I believe, always result in the fastest and most economical progress...**

**George Box, 1992**

# Cone of Learning

HOW MUCH  
WE TEND TO  
REMEMBER

OUR LEVEL OF  
INVOLVEMENT

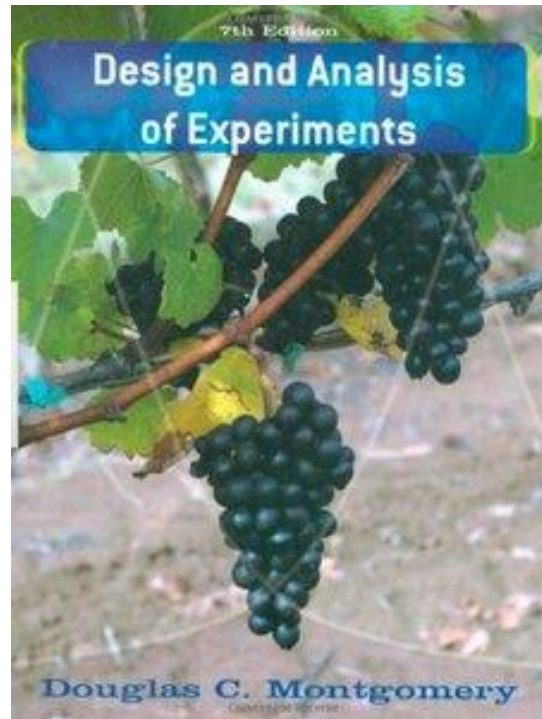
**DO THE  
REAL  
THING!**

Faça anotações!  
Aplicando os  
conhecimentos na  
sua área é a **única**  
forma de  
sedimentá-los!



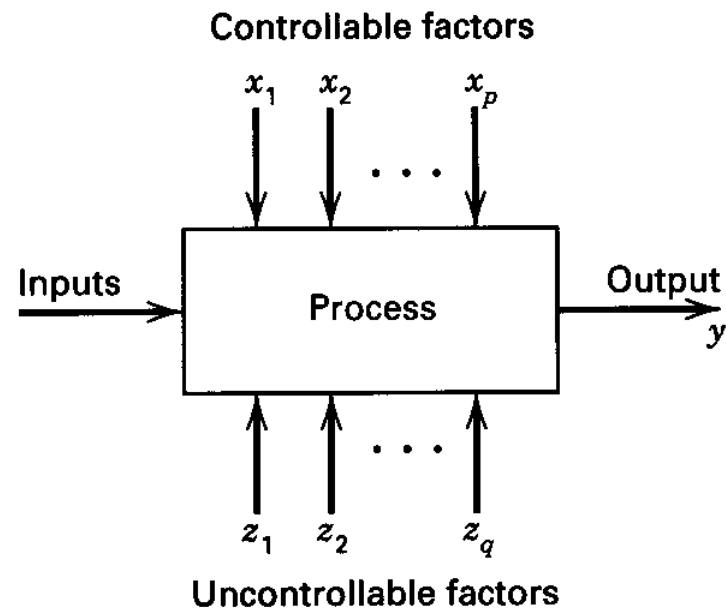
# Bibliografia de DOE

## Projeto de Experimentos



# Engineering Experiments

- Reduce **time** to design/develop new products & processes
- Improve **performance** of existing processes
- Improve **reliability** and performance of products
- Achieve product & process **robustness**
- **Evaluation** of materials, design alternatives, **setting** component & system tolerances, etc.



**Figure 1-1** General model of a process or system.

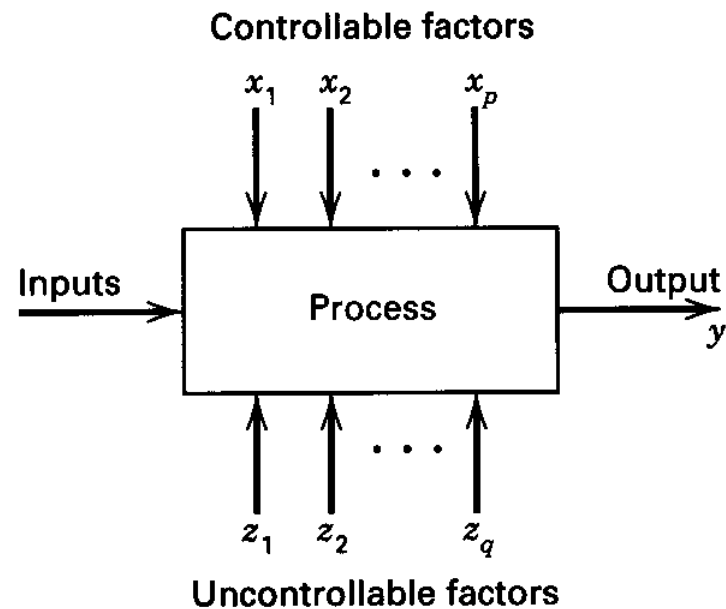
# DESIGN OF EXPERIMENTS

## DOE



# Engineering Experiments

- Reduce **time** to design/develop new products & processes
- Improve **performance** of existing processes
- Improve **reliability** and performance of products
- Achieve product & process **robustness**
- **Evaluation** of materials, design alternatives, **setting** component & system tolerances, etc.



**Figure 1-1** General model of a process or system.

# Medidas de Posição e Dispersão

**Média aritmética (média):**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x}{n}$$

**Amplitude (R):**

$$R = \text{maior valor} - \text{menor valor}$$

**Variância ( $s^2$ ):**

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum (x - \bar{x})^2$$

**Desvio padrão (s):**

$$s = \sqrt{s^2}$$

# PROJETO DE EXPERIMENTOS

## DESIGN OF EXPERIMENTS-DOE

Ferramenta que vem sendo utilizada para verificar o funcionamento de sistemas ou processos produtivos, permitindo melhoria destes, redução na variabilidade, e conformidade próxima do resultado desejado, além de redução no tempo de processo e, conseqüentemente, nos custos operacionais.

# Benefícios do DOE

- Larga aplicação em todas as áreas
- Mostra as variáveis mais importantes do processo
- Permite a otimização
- Requer menor número de experimentos que os métodos convencionais
- Maior controle dos processos
- Redução significativa dos custos
- Redução no tempo de desenvolvimento de um produto
- Redução na variabilidade dos produtos e maior aproximação com os requisitos exigidos pelos clientes

# Etapas do DOE

- Planejamento
- Execução dos experimentos
- Análise dos dados
- Experimento de confirmação
- Conclusão

# Definições

- **Fatores** : são as variáveis (independentes) do processo que podem ser controladas. Ex: temperatura, pressão, agitação, etc
- **Resposta** : são as variáveis de saída do processo (dependentes). Ex: rendimento, resistência, vida útil, etc
- **Nível** : os níveis de um fator são os valores do fator examinado. Ex : temperatura ( 273K e 373K )
- **Replicação** : é a repetição de um experimento ou observação

# Matriz de Experimento

<b>Exp.</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>Resposta</b>
1	-	-	-	
2	+	-	-	
3	-	+	-	
4	+	+	-	
5	-	-	+	
6	+	-	+	
7	-	+	+	
8	+	+	+	

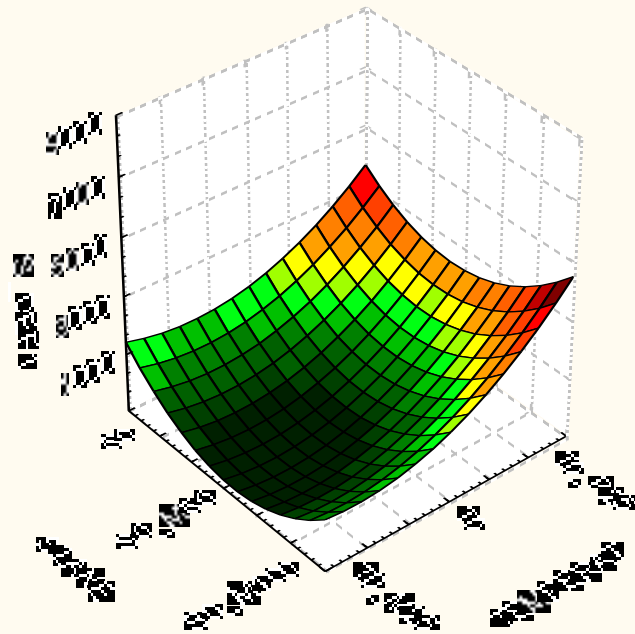
# Interpretação

- Cálculo dos Efeitos dos Fatores
- Análise de Variância
- Gráficos Tridimensionais (Superfície de Resposta) e de Contorno



# Gráfico Tridimensional

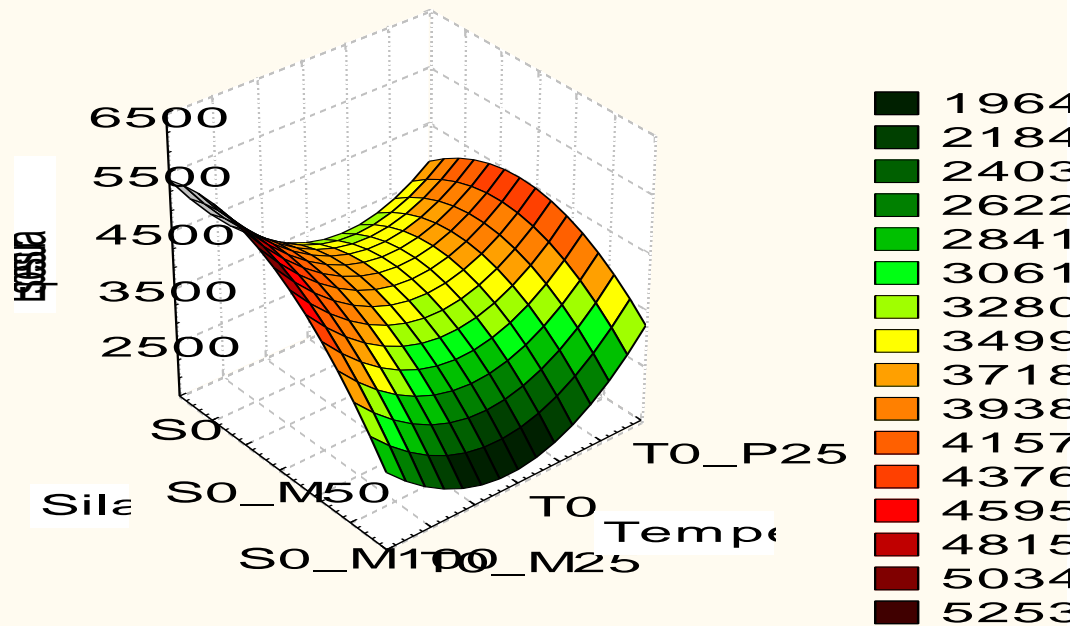
3D Surface Plot (TAGUCHI.STA 32)  
 $z = 4.489e3 - 1.629e3 * x - 4.492e3 * y + 851.4$



■	-574
■	-256
■	60.5
■	378.0
■	695.4
■	1012
■	1330
■	1647
■	1965
■	2282
■	2600
■	2917
■	3235
■	3552
■	3869
■	4187

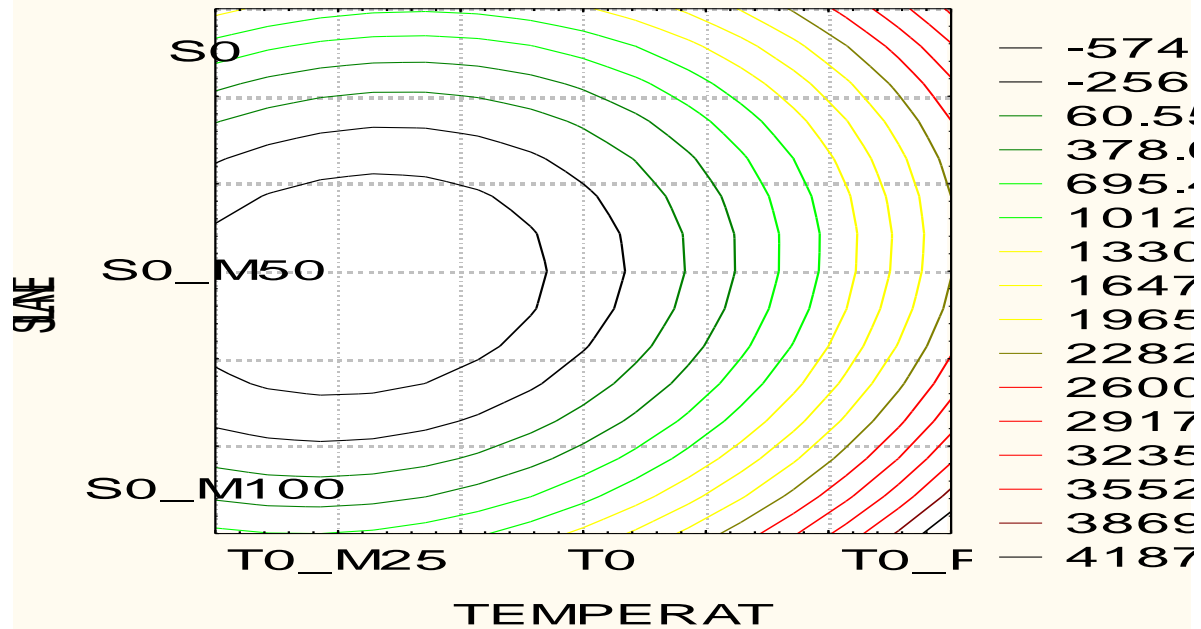
# Gráfico Tridimensional

3D Surface Plot (TAGUCHI.STA 32)  
 $z = 2.335e3 - 3.199e3 * x + 3.937e3 * y + 904.10$



# Gráfico de Contorno

3D Contour Plot (TAGUCHI.STA 3  
 $z = 4.489e3 - 1.629e3 * x - 4.492e3 * y + 851.4$ )



# Análise de Variância

Analysis of Variance (taguchi.sta)

Mean = 3621.94    Sigma = 1207.08

	SS	df	MS	F	p
SED_1	592961.	1	592961.	7.66058	.109510
{2}TEMPERAT	4042231.	2	2021115.	26.11120	.036885
{3}PRESSURE	7744105	2	3872053.	50.02383	.019599
{4}NITROGEN	3632181.	2	1816090.	23.46244	.040879
{5}SILANE	6610248	2	3305124	42.69956	.022884
{6}SETT_TIM	401897.	2	200949.	2.59610	.278079
{7}UNUSED_2	68022.	2	34011.	.43940	.694736
{8}CLEANING	1523430.	2	761715.	9.84075	.092245
Residual	154808.	2	77404.		

# Variações no Processo

Aplicação : Experimento da Pipoca

Fatores	Nível Baixo ( - )	Nível Alto ( + )
A-Fogo	baixo	alto
B- Agitação	sem	Com
C-Fluido	óleo	manteiga

Experimentos	Fatores			Volume			Volume Médio	$S_i^2$
	A	B	C					
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								