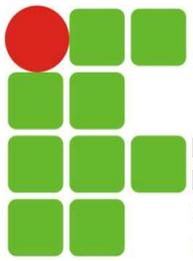


INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
SUL-RIO-GRANDENSE
Campus Passo Fundo

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

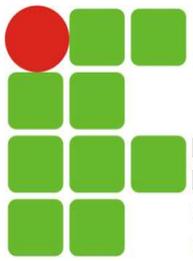
Introdução à Pesquisa Experimental

Professora Sabrina Elicker Hagemann



DEFINIÇÕES

- Metodologia apoiada fortemente em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento.
- O uso de Projeto de Experimentos permite que se estruture a seqüência de ensaios de forma a traduzir os objetivos preestabelecidos pelo pesquisador.
- A metodologia de Projeto de Experimentos é utilizada na Otimização de um sistema (produto, processo ou serviço), que é avaliado por indicadores de desempenho, ou seja, características de qualidade resultantes da operação do mesmo (produtividade, custos, características físicas e/ou mecânicas, etc).
- Existem parâmetros do sistema que podem ser alterados durante sua execução e essa alteração pode afetar as características de qualidade resultantes.
- Existem ainda os fatores de ruído, ou seja, fatores que podem influenciar o desempenho do sistema, no entanto não consegue-se controlá-los (Ex: temperatura e umidade do dia, o desgaste das ferramentas/equipamentos, a habilidade e cansaço do operador).



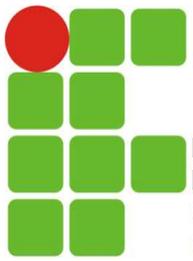
OBJETIVO CENTRAL DO PROJETO DE EXPERIMENTOS:

Achar o ajuste ótimo dos parâmetros do sistema de forma a:

- Maximizar o desempenho do sistema
- Minimizar custos
- Tornar o desempenho do sistema pouco sensível ao efeito dos fatores de ruído

Fazer isso:

- Definindo uma seqüência de ensaios econômica e eficiente
- Procedendo uma avaliação estatística dos resultados para assegurar respaldo científico e maximizar as informações obtidas



ETAPAS DE UM EXPERIMENTO

O QUÊ PESQUISAR?

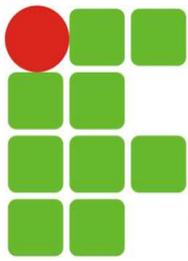


- ✓ Pesquisa de demanda para identificar o sistema de estudo
- ✓ Identificar as características de qualidade de interesse a importância relativa de cada uma.

COMO PESQUISAR?



- ✓ Definir variáveis de resposta associadas às características de qualidade e outras variáveis resposta de interesse
- ✓ Identificar os parâmetros do processo e intervalo de variação destes
- ✓ Identificar os fatores controláveis
- ✓ Definir o n° de níveis para cada fator controlável
- ✓ Definir possíveis interações entre os fatores controláveis
- ✓ Identificar as restrições experimentais: número máximo de ensaios, equipamento e RH disponíveis, tempo disponível, etc.
- ✓ Escolher o modelo estatístico do experimento



ETAPAS DE UM EXPERIMENTO

PLANEJAMENTO FINAL E EXECUÇÃO



- ✓ Escrever a matriz experimental
- ✓ Definir a ordem dos ensaios (aleatorização)
- ✓ Definir os procedimentos de ensaio (uniformização)
- ✓ Desenhar planilhas de coleta de dados
- ✓ Executar o experimento e anotar resultados

ANÁLISE

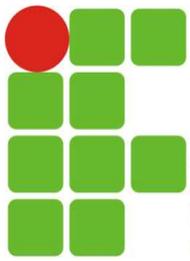


- ✓ Fazer a análise de variância
- ✓ Escrever uma tabela de médias
- ✓ Fazer gráficos dos efeitos dos fatores principais
- ✓ Fazer gráficos das interações significativas

OTIMIZAÇÃO



- ✓ Modelar individualmente cada Variável de Resposta $\rightarrow V.R. = f(F.C.)$
- ✓ Definir uma função objetivo
 $L = f_1(V.R.) \rightarrow L = f_2(F.C.)$
- ✓ Otimizar, isto é, achar o ajuste dos F.C. que minimiza/maximiza L.
- ✓ Verificar a consistência da solução



EXEMPLO

O QUÊ PESQUISAR?



- ✓ Pesquisa de demanda: concreto com reduzido teor de cimento utilizando materiais sustentáveis ou reciclados;
- ✓ Características de qualidade: resistência e custo;

COMO PESQUISAR?



- ✓ Variável de Resposta: resistência à compressão

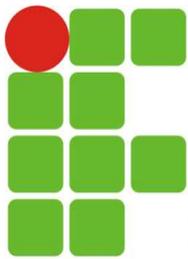
Variável	Tipo	Importância relativa	Alvo
Resistência à compressão	Maior-é-melhor	1	30MPa

COMO PESQUISAR?



- ✓ Parâmetros do processo

Designação	Intervalo de variação	Unidade
Teor de cinza de lodo de ETA	0 a 30	%
Teor de cinza de calcário	0 a 15	%
Relação água/aglomerante	0,35 a 0,65	-



EXEMPLO

COMO PESQUISAR?

✓ Níveis dos fatores controláveis

Designação	Nº de níveis	Níveis	Unidade
Teor de cinza de lodo de ETA	5	0 – 6,1 – 15 – 23,9 – 30	%
Teor de cinza de calcário	5	0 – 3,0 – 7,5 – 12,0 – 15,0	%
Relação água/aglomerante	5	0,35 – 0,41 – 0,5 – 0,59 – 0,65	-

COMO PESQUISAR?

✓ Interações entre os fatores controláveis

**TEOR ÓTIMO DE CINZA DE LODO
DE ETA**



**RELAÇÃO
ÁGUA/AGLOMERANTE**

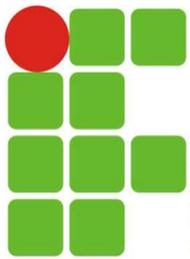
TEOR ÓTIMO DE CALCÁRIO



**RELAÇÃO
ÁGUA/AGLOMERANTE**

COMO PESQUISAR?

✓ Fatores de ruído: diferentes usuários do laboratório e falta de ajuste em equipamentos

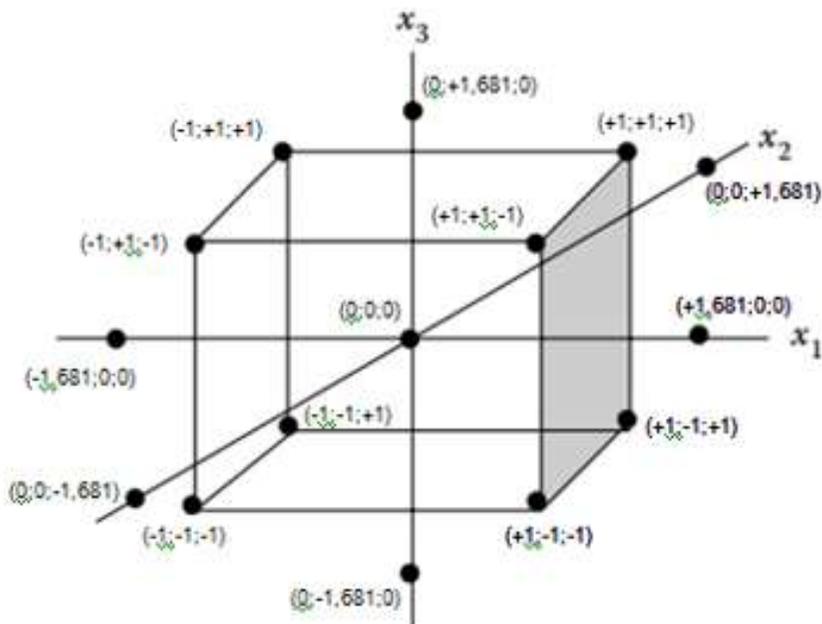


EXEMPLO

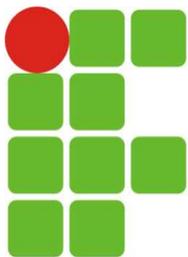
COMO PESQUISAR?

- ✓ Restrições experimentais: número máximo de 20 ensaios sendo 2 por dia em função do número de moldes de CPs disponíveis bem como o número de dispositivos para capeamento e rompimento dos CPs.

COMO PESQUISAR?



- ✓ Escolher o modelo estatístico do experimento: Delineamento Composto Central Rotacionado (DCCR), com 2^k pontos fatoriais, $2k$ pontos axiais e 3 pontos centrais, sendo k o número de fatores.
- ✓ Dessa forma
$$2^k + 2k + 3 = 2^3 + 2 \cdot 3 + 3 = 17 \text{ ensaios}$$



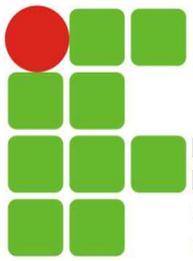
EXEMPLO

PLANEJAMENTO FINAL E EXECUÇÃO



✓ Matriz experimental e ordem dos ensaios

Ensaio	Ordem	CLETA (%)	Calcário (%)	Relação ag/agl
1	7	6,1	3,0	0,41
2	3	23,9	3,0	0,41
3	9	23,9	12,0	0,41
4	5	6,1	12,0	0,41
5	6	6,1	3,0	0,59
6	11	23,9	3,0	0,59
7	10	23,9	12,0	0,59
8	17	6,1	12,0	0,59
9	15	0,0	7,5	0,50
10	13	30,0	7,5	0,50
11	1	15,0	0,0	0,50
12	4	15,0	15,0	0,50
13	8	15,0	7,5	0,35
14	12	15,0	7,5	0,65
15	2	15,0	7,5	0,50
16	14	15,0	7,5	0,50
17	16	15,0	7,5	0,50



EXEMPLO

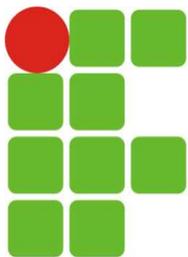
**PLANEJAMENTO
FINAL E EXECUÇÃO**



**PROCEDIMENTOS
DE ENSAIO**



- ✓ Aleatorizar a ordem dos ensaios
- ✓ Fixar parâmetros do processo não incorporados no experimento:
 - Pré homogeneização dos constituintes do aglomerante por um intervalo de tempo pré-definido (10 minutos)
 - Controle de temperatura dos materiais antes da moldagem ($20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$)
 - Tempo de mistura (5 minutos)
 - Slump (100 ± 20 mm)
- ✓ Observar sempre a mesma sistemática de ensaios:
 - método de adensamento dos CPs,
 - idade de desmoldagem,
 - tempo e condições de cura,
 - capeamento dos CPs,
 - velocidade de aplicação da carga no momento do rompimento.



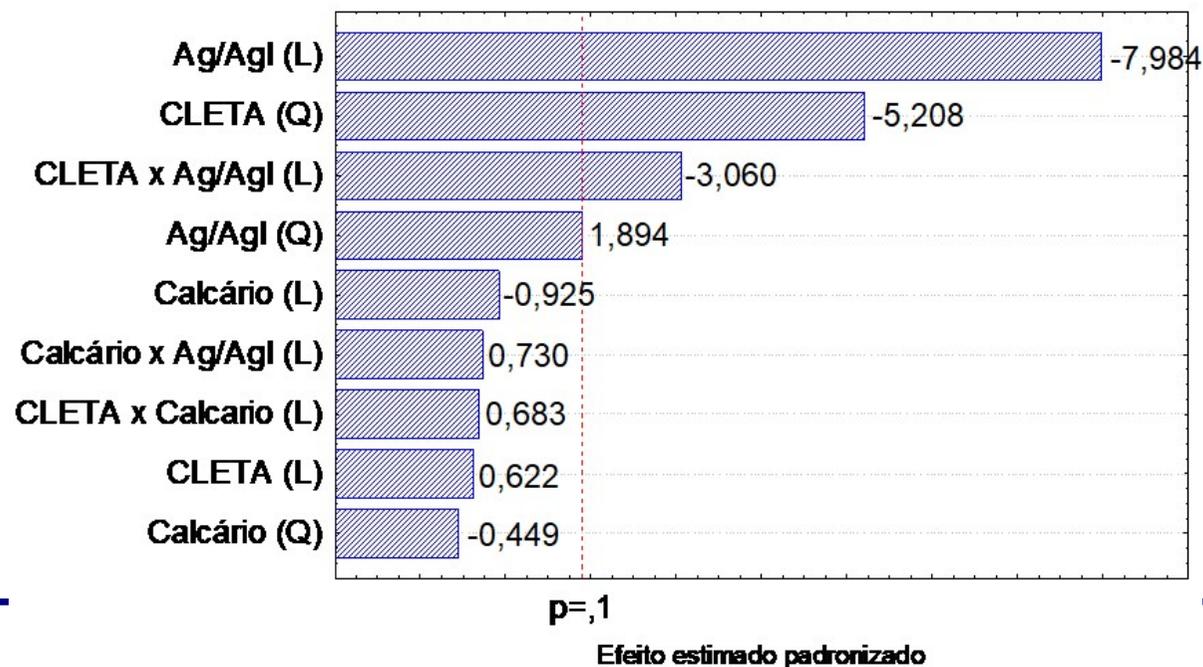
EXEMPLO

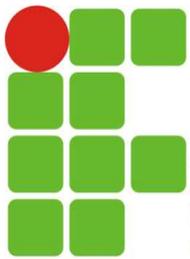
ANÁLISE



✓ **Análise de variância do modelo**

	SQ	GL	MQ	F _{calculado}	F _{tabelado}	p-valor	R ²
Regressão	3239,1588	9	359,9065	12,83	2,72	0,0014	0,9428
Erro	196,3745	7	28,0535				
Total	3435,5333	16					

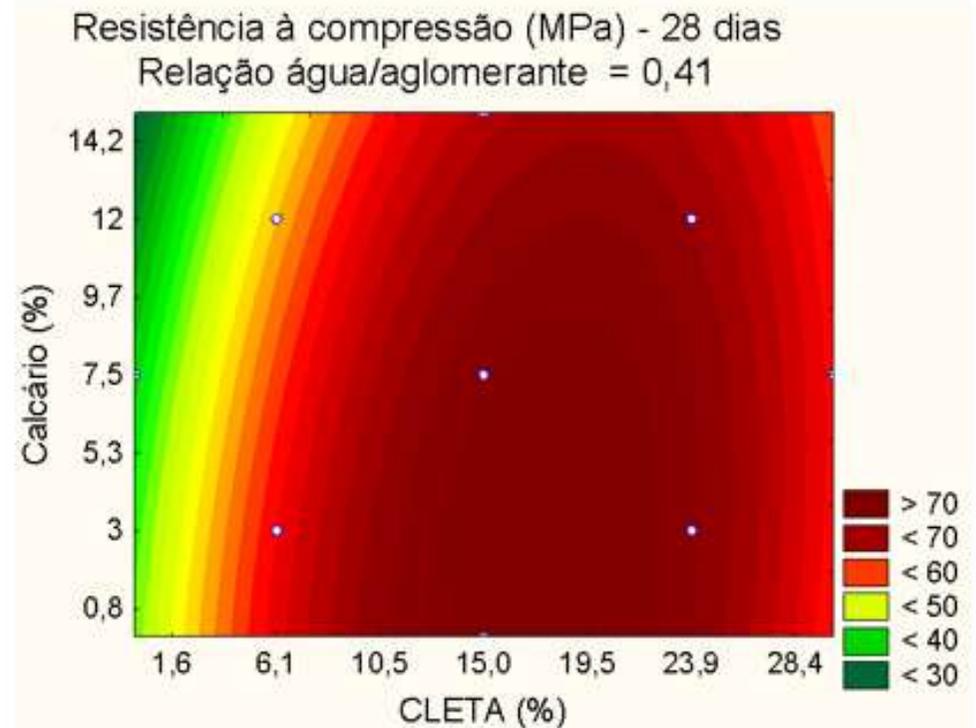
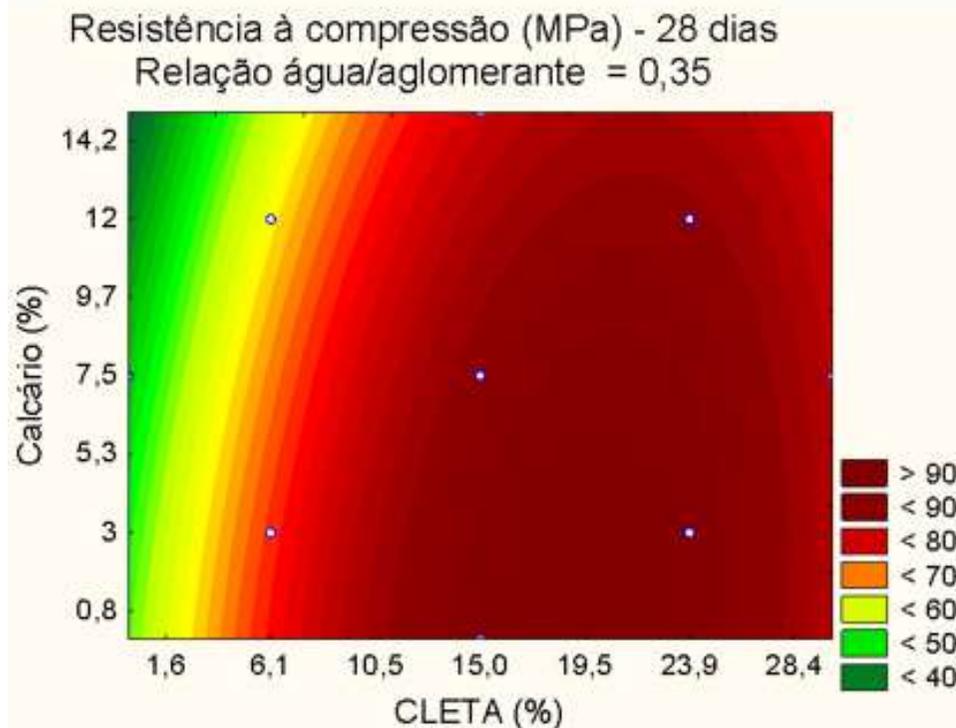


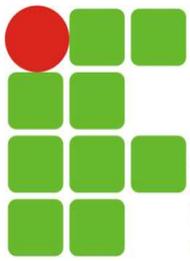


EXEMPLO

ANÁLISE

✓ Gráficos dos efeitos dos fatores principais e das interações significativas

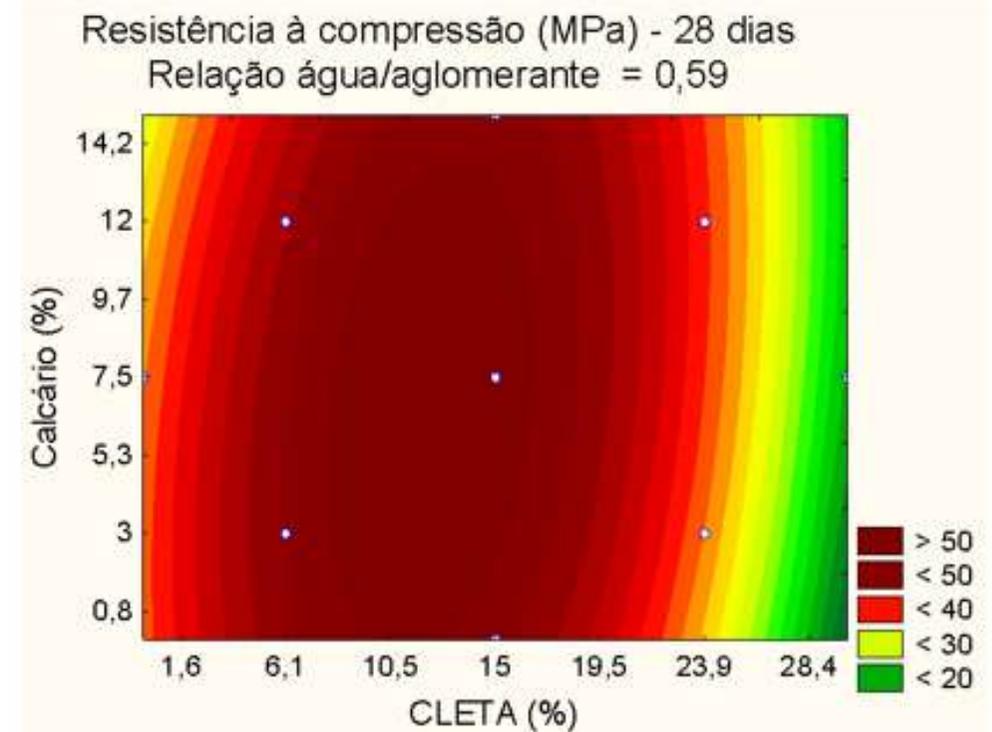
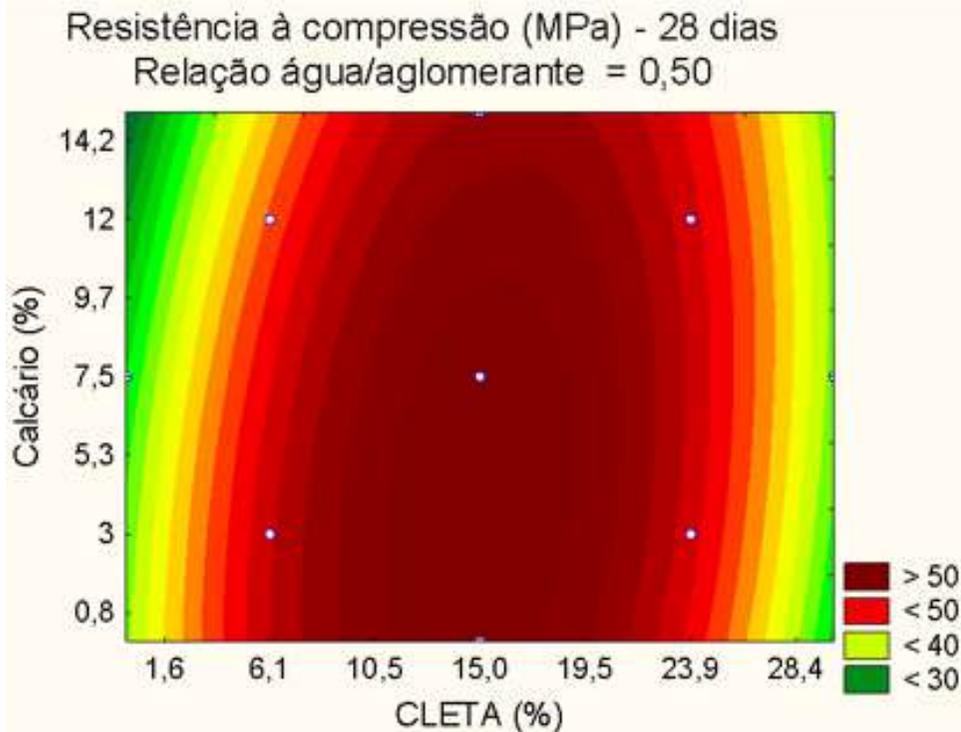


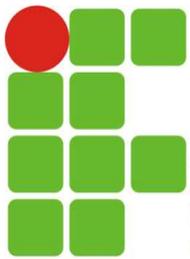


EXEMPLO

ANÁLISE

✓ Gráficos dos efeitos dos fatores principais e das interações significativas



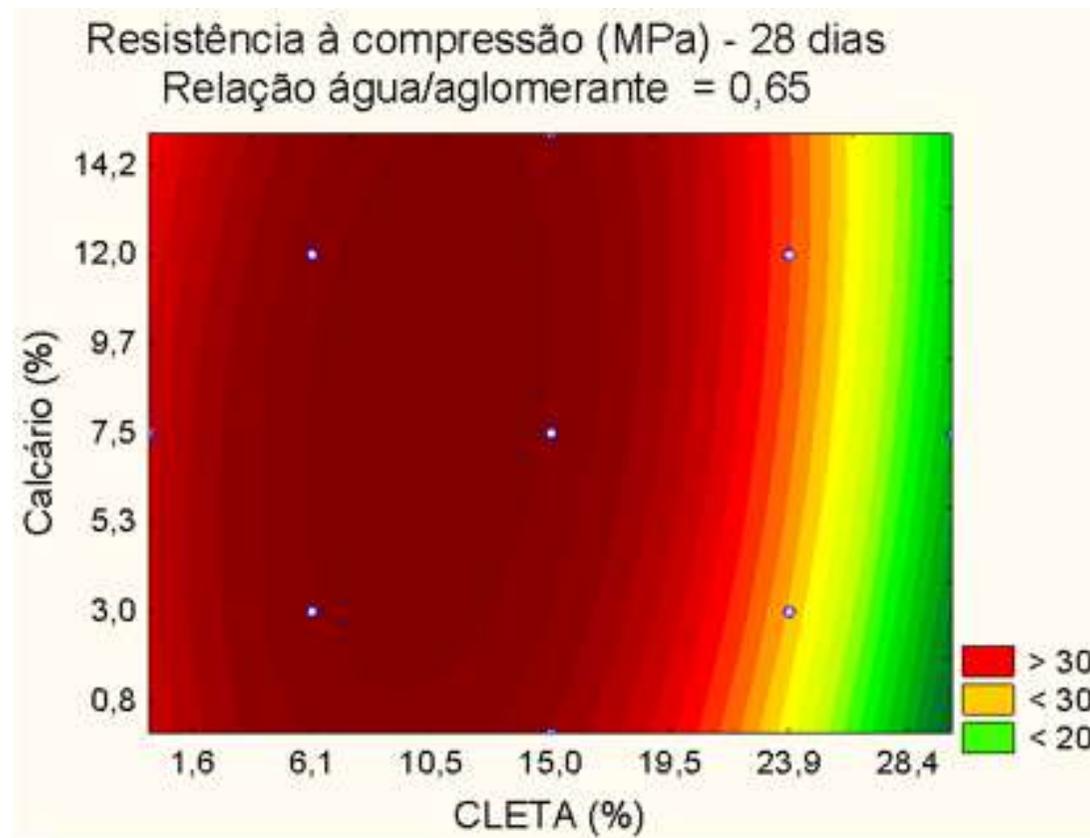


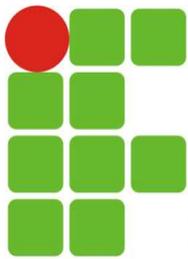
EXEMPLO

ANÁLISE



✓ Gráficos dos efeitos dos fatores principais e das interações significativas





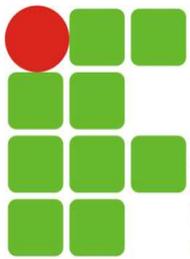
EXEMPLO

OTIMIZAÇÃO



✓ Modelar individualmente cada Variável de Resposta → V.R. = f (F.C.)

Termo do modelo	Coefficiente da regressão	P _{valor}
Média/Termo independente	59,0794	0,0000
CLETA – Linear	0,8910	0,5540
CLETA – Quadrático	-8,2210	0,0012
Calcário – Linear	-1,3254	0,3860
Calcário – Quadrático	-0,7094	0,6667
Relação Ag/AgI - Linear	-11,4447	0,0001
Relação Ag/AgI - Quadrático	2,9902	0,1000
Interação CLETA x Calcário	1,2788	0,5166
Interação CLETA x Relação Ag/AgI	-5,7294	0,0183
Interação Calcário x Relação Ag/AgI	1,3672	0,4890

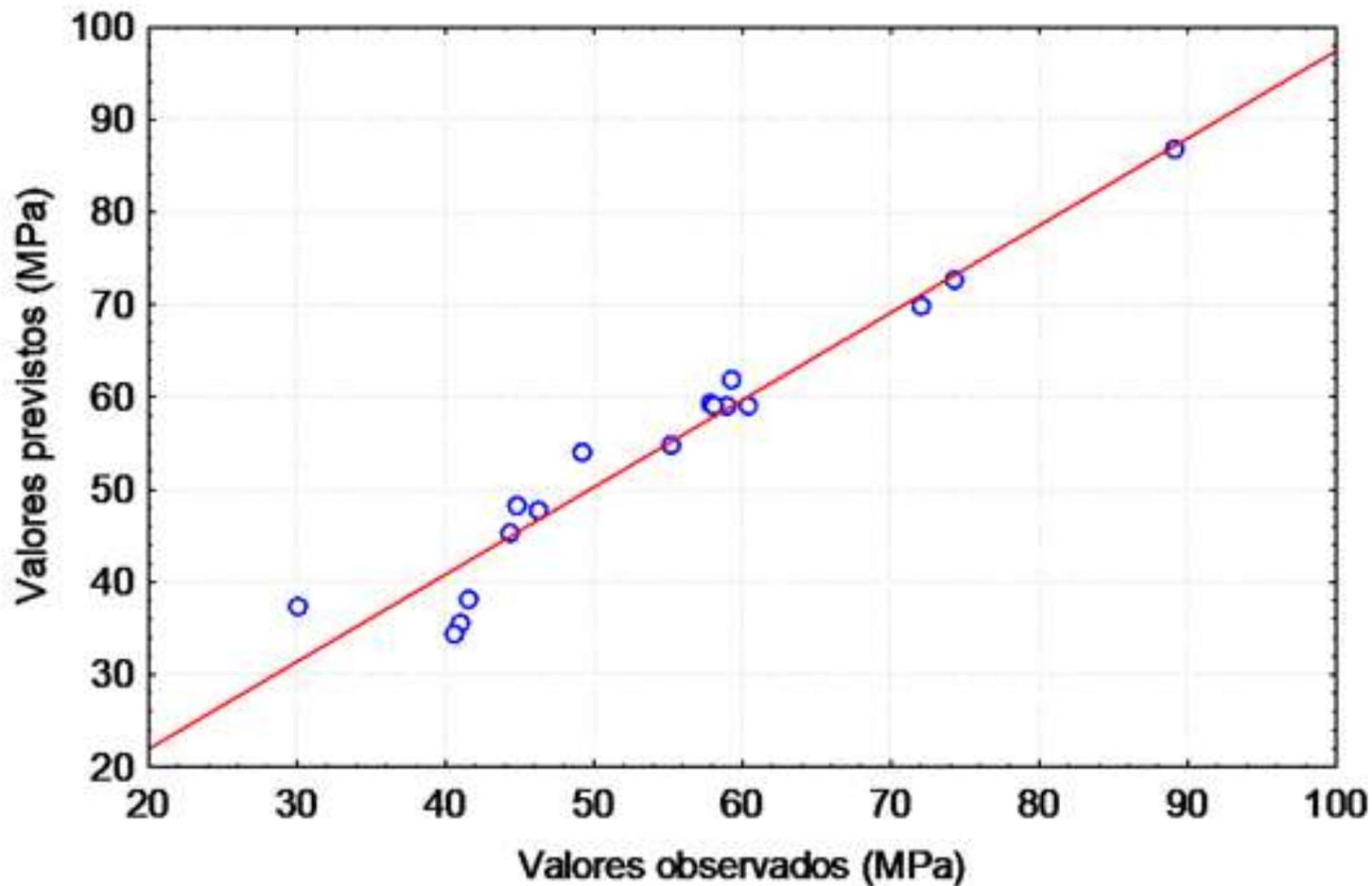


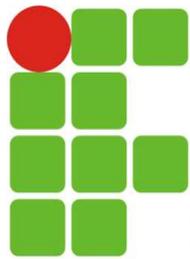
EXEMPLO

OTIMIZAÇÃO



- ✓ Otimizar, isto é, achar o ajuste dos F.C. que minimiza/maximiza L .
- ✓ Verificar a consistência da solução





INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
SUL-RIO-GRANDENSE
Campus Passo Fundo

BIBLIOGRAFIA

MONTGOMERY, Douglas. C. Design and Analysis of Experiments. 5. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2001.

RIBEIRO, J.L.D.; CATEN, C.S.ten. Projeto de experimentos. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2011.