



As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 2

Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)

Atena
Editora
Ano 2019

Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)

As Engenharias frente a Sociedade, a
Economia e o Meio Ambiente 2

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Executiva: Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Natália Sandrini
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^a Dr^a Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^a Dr^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof^a Dr^a Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof^a Dr^a Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof.^a Dr.^a Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E57	<p>As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente 2 [recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (As Engenharias Frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente; v. 2)</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-430-6 DOI 10.22533/at.ed.306192506</p> <p>1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Série.</p> <p style="text-align: right;">CDD 658.5</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

As obras As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente Volume 1, 2, 3 e 4 abordam os mais diversos assuntos sobre métodos e ferramentas nas diversas áreas das engenharias a fim de melhorar a relação do homem com o meio ambiente e seus recursos.

O Volume 1 está disposto em 31 capítulos, com assuntos voltados a engenharia do meio ambiente, apresentando processos de recuperação e reaproveitamento de resíduos e uma melhor aplicação dos recursos disponíveis no ambiente, além do panorama sobre novos métodos de obtenção limpa da energia.

Já o Volume 2, está organizado em 32 capítulos e apresenta uma vertente ligada ao estudo dos solos e águas, com estudos de sua melhor utilização, visando uma menor degradação do ambiente; com aplicações voltadas a construção civil de baixo impacto.

O Volume 3 apresenta estudos de materiais para aplicação eficiente e econômica em projetos, bem como o desenvolvimento de projetos mecânico e eletroeletrônicos voltados a otimização industrial e a redução de impacto ambiental, sendo organizados na forma de 28 capítulos.

No último Volume, são apresentados capítulos com temas referentes a engenharia de alimentos, e a melhoria em processos e produtos.

Desta forma um compendio de temas e abordagens que facilitam as relações entre ensino-aprendizado são apresentados, a fim de se levantar dados e propostas para novas discussões em relação ao ensino nas engenharias, de maneira atual e com a aplicação das tecnologias hoje disponíveis.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ESTUDOS DA ÁGUA E SEDIMENTOS NA BACIA DO RIO UBERABINHA EM UBERLÂNDIA - MG	
Maria da Graça Vasconcelos	
Luiz Alfredo Pavanin	
Erich Vectore Pavanin	
DOI 10.22533/at.ed.3061925061	
CAPÍTULO 2	13
BATIMETRIA E MEDIÇÃO DE VAZÃO NA BACIA DO RIO JI-PARANÁ - RO	
Renato Billia de Miranda	
Camila Bermond Ruezzeno	
Bruno Bernardo dos Santos	
Frederico Fabio Mauad	
DOI 10.22533/at.ed.3061925062	
CAPÍTULO 3	26
MONITORAMENTO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA ENSAIO DE PROVA DE CARGA EM SOLO BASÁLTICO	
Daniel Russi	
Sandra Garcia Gabas	
Giancarlo Lastoria	
DOI 10.22533/at.ed.3061925063	
CAPÍTULO 4	37
UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PAPEL FILTRO E CENTRÍFUGA PARA DETERMINAÇÃO DE CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E CORRELAÇÕES COM PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	
Ana Carolina Dias Baêso	
Eduardo Souza Cândido	
Roberto Francisco de Azevedo	
Gustavo Armando dos Santos	
Tulyo Diniz Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.3061925064	
CAPÍTULO 5	51
DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DE UM SOLO TROPICAL DA BAIXADA FLUMINENSE NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO	
Fernando Benedicto Mainier	
Claudio Fernando Mahler	
Viktor Labuto Ramos	
DOI 10.22533/at.ed.3061925065	
CAPÍTULO 6	61
ELABORAÇÃO DE UMA CARTA DE UNIDADES DE TERRENO DO MUNICÍPIO DE CACHOEIRO DE ITAPEMIRIM – ES	
Bruna Xavier Faitanin	
Éder Carlos Moreira	
Altair Carrasco de Souza	
Vitor Roberto Schettino	
DOI 10.22533/at.ed.3061925066	

CAPÍTULO 7	69
ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO SILTE ARENOSO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA COM CAL PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO	
Wagner Teixeira Eclesielter Batista Moreira João Luiz Rissardi Vanessa Corrêa de Andrade Ronaldo Luis dos Santos Izzo	
DOI 10.22533/at.ed.3061925067	
CAPÍTULO 8	80
INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA NA RESISTÊNCIA DE SOLOS SEDIMENTARES	
Jair de Jesús Arrieta Baldovino Eclesielter Batista Moreira Ronaldo Luis Dos Santos Izzo Juliana Lundgren Rose Erico Rafael Da Silva Wagner Teixeira Felipe Perretto Roberto Pan	
DOI 10.22533/at.ed.3061925068	
CAPÍTULO 9	95
PERFILAGEM DO SUBSOLO NO MUNICÍPIO DE APUCARANA-PR COM BASE EM DADOS DE SONDAGENS DE SIMPLES RECONHECIMENTO COM SPT	
Mariana Alher Fernandes Augusto Montor de Freitas Luiz	
DOI 10.22533/at.ed.3061925069	
CAPÍTULO 10	104
UTILIZAÇÃO DO PERMEÂMETRO DE TUBO NA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE CAMADAS SUPERFICIAIS DE SOLOS	
Marcos Túlio Fernandes Glaucimar Lima Dutra	
DOI 10.22533/at.ed.30619250610	
CAPÍTULO 11	116
DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO EM SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS	
Alessandra Lidia Mazon Maytê Pietrobelli de Souza Bianca Penteado de Almeida Tonus André Fanaya	
DOI 10.22533/at.ed.30619250611	

CAPÍTULO 12 133

AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE DO SOLO DE CARACTERÍSTICA NÃO LATERÍTICA SOB O ENFOQUE GEOTÉCNICO NAS MARGENS DA TO-222 NO MUNICÍPIO DE ARAGUAÍNA - TO

Glacielle Fernandes Medeiros
Renata de Moraes Farias
Palloma Borges Soares
Ana Sofia Oliveira Japiassu
Andressa Fiuza de Souza
Igor Guimarães Matias

DOI 10.22533/at.ed.30619250612

CAPÍTULO 13 144

ADAPTAÇÃO DE METODOLOGIA DE HIERARQUIZAÇÃO DE NÍVEIS DE ATENÇÃO UTILIZADA EM MINERAÇÃO PARA TRABALHOS DE MAPEAMENTO DE RISCOS GEOTÉCNICOS EM ÁREA URBANA

Marcelo Corrêa da Silva
Daiara Luiza Guimarães

DOI 10.22533/at.ed.30619250613

CAPÍTULO 14 157

PRODUÇÃO DE CONCENTRADO ÚMIDO FOSFATADO: UMA EXPERIÊNCIA DE ESTÁGIO NA MINERAÇÃO

Matheus Henrique Borges Coutinho
Ricardo Antonio de Rezende
Cibele Tunussi
Marcos Vinicius Agapito Mendes

DOI 10.22533/at.ed.30619250614

CAPÍTULO 15 163

ESTUDO DOS DESPERDÍCIOS DE MATERIAIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL E SUGESTÕES PARA A MINIMIZAÇÃO E REUTILIZAÇÃO DOS MESMOS, VISANDO A OTIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DAS OBRAS E MENORES IMPACTOS AMBIENTAIS

Beatriz Zeurgo Fernandes
Rafael Bergjohann
Luiz Carlos de Campos

DOI 10.22533/at.ed.30619250615

CAPÍTULO 16 176

USO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND

Kenyson Diony Souza Silva
Raduan Krause Lopes
Fabiano Medeiros Da Costa

DOI 10.22533/at.ed.30619250616

CAPÍTULO 17 192

ESTUDOS PRELIMINARES DA APLICAÇÃO DE RESÍDUO DE MINÉRIO DE COBRE SULFETADO NA ELABORAÇÃO DE ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO

Julia Alves Rodrigues
Dilson Nazareno Pereira Cardoso
Abel Jorge Rodrigues Ferreira
Edinaldo José de Sousa Cunha
Bruno Marques Viegas
Edilson Marques Magalhães
José Antônio da Silva Souza

DOI 10.22533/at.ed.30619250617

CAPÍTULO 18 200

AValiação DO COMPORTAMENTO DE COMPOSIÇÕES A BASE DE CIMENTO DE ALUMINATO DE CÁLCIO FRENTE AOS MICRORGANISMOS STAPHYLOCOCCUS AUREUS E ESCHERICHIA COLI

Renata Martins Parrreira
Talita Luana de Andrade
Newton Soares da Silva
Cristina Pacheco Soares
Victor Carlos Pandolfelli
Ivone Regina de Oliveira

DOI 10.22533/at.ed.30619250618

CAPÍTULO 19 209

UMA TÉCNICA, BASEADA EM PROJETO DE EXPERIMENTOS, PARA OTIMIZAÇÃO DA DOSAGEM DE ARGAMASSA MISTA DE CIMENTO, CAL E AREIA

André Rodrigues Monticeli
Paulo César Mappa
Aellington Freire de Araújo
Emerson Ricky Pinheiro
Karoline Santos da Silva

DOI 10.22533/at.ed.30619250619

CAPÍTULO 20 221

REDUÇÃO DO CONSUMO DE AÇO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS AO ESFORÇO CORTANTE ATRAVÉS DA ESCOLHA DO ÂNGULO DAS BIELAS

Lucas Teotônio de Souza
Paula de Oliveira Ribeiro

DOI 10.22533/at.ed.30619250620

CAPÍTULO 21 232

ANÁLISE DE CRONOGRAMA FÍSICO x CRONOGRAMA REALIZADO NA OBRA DO FÓRUM DE RIO NEGRO/PR PARA FINS DE DIMINUIÇÃO DOS ATRASOS

Nathalia Loureiro de Almeida Correa

DOI 10.22533/at.ed.30619250621

CAPÍTULO 22 250

ANÁLISE DA IMPORTÂNCIA DO CORRETO DIMENSIONAMENTO DOS VERTEDORES EM BARRAGENS E SUAS INFLUÊNCIAS ECOLÓGICAS E SOCIOECONÔMICAS. ESTUDO DE CASO: USINA HIDRELÉTRICA DE XINGÓ

Jéssica Beatriz Dantas
Djair Félix da Silva

DOI 10.22533/at.ed.30619250622

CAPÍTULO 23	262
ANÁLISE DA IMPLANTAÇÃO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL EM UMA ÁREA DA CIDADE DE JOINVILLE/SC	
Adilon Marques dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.30619250623	
CAPÍTULO 24	281
ANÁLISE NUMÉRICA DA SENSIBILIDADE DO ALGORITMO IMPLEX APLICADO EM UM CENÁRIO HIPOTÉTICO DE ESTABILIDADE DE TALUDE VIA TÉCNICA DE DESCONTINUIDADES FORTES	
Nayara Torres Belfort	
Ana Itamara Paz de Araujo	
Kátia Torres Botelho Galindo	
Igor Fernandes Gomes	
Leonardo José do Nascimento Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.30619250624	
CAPÍTULO 25	294
DIMENSIONAMENTO DE LAJES MACIÇAS POR MEIO DE CÁLCULO MANUAL E COM O AUXÍLIO DE UM SOFTWARE COMPUTACIONAL	
Iva Emanuely Pereira Lima	
Vitor Bruno Santos Pereira	
Vinicius Costa Correia	
DOI 10.22533/at.ed.30619250625	
CAPÍTULO 26	306
DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS DE AÇO E CONCRETO	
Jéssica Salomão Lourenção	
Élcio Cassimiro Alves	
DOI 10.22533/at.ed.30619250626	
CAPÍTULO 27	325
ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS: MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	
João Augusto Dunck Dalosto	
Luiz Fernando Hencke	
Jhonatan Conceição dos Santos	
Hevrlí da Silva Carneiro Pilatti	
DOI 10.22533/at.ed.30619250627	
CAPÍTULO 28	336
APLICAÇÃO DO CPR EM SOLOS MOLES NA REGIÃO DO CAMPO DOS PERDIZES: DUPLICAÇÃO DA BR 135, ENTRE O KM 39,36 E O KM 39,90	
Rodrigo Nascimento Barros	
Larysse Lohana Leal Nunes	
Saymo Wendel de Jesus Peixoto Viana	
DOI 10.22533/at.ed.30619250628	
CAPÍTULO 29	348
ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR INTERNO DE UMA TERAPIA INTENSIVA	
Sylvia Katherine de Medeiros Moura	
Antonio Calmon de Araújo Marinho	
Wagner Amadeus Galvão de Souza	
Angelo Roncalli Oliveira Guerra	
DOI 10.22533/at.ed.30619250629	

CAPÍTULO 30	357
'ARTENGENHARIA': UMA PONTE TRANSDISCIPLINAR PARA O DESENVOLVIMENTO DO POTENCIAL HUMANO E SUAS CONTRIBUIÇÕES PARA A GESTÃO DO CONHECIMENTO	
Ana Alice Trubbianelli	
DOI 10.22533/at.ed.30619250630	
CAPÍTULO 31	371
PROCEDIMENTO DE ANÁLISE EXPERIMENTAL E NÚMÉRICO DE UMA PONTE EXECUTADA COM PALITOS DE PICOLÉ	
Matheus Henrique Morato de Moraes	
João Eduardo Sousa de Freitas	
Diogo Henrique Morato de Moraes	
Juarez Francisco Freire Junior	
Wellington Andrade da Silva	
Geraldo Magela Gonçalves Filho	
DOI 10.22533/at.ed.30619250631	
CAPÍTULO 32	383
EXERGIA HÍDRICA EM SISTEMAS REDUTORES DE PRESSÃO	
Conrado Mendes Moraes	
Ângela B. D. Moura	
Eduardo D. P. Schuch	
Eduardo de M. Martins	
DOI 10.22533/at.ed.30619250632	
SOBRE O ORGANIZADOR	393

UMA TÉCNICA, BASEADA EM PROJETO DE EXPERIMENTOS, PARA OTIMIZAÇÃO DA DOSAGEM DE ARGAMASSA MISTA DE CIMENTO, CAL E AREIA

André Rodrigues Monticeli

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Varginha
Varginha – Minas Gerais

Paulo César Mappa

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Varginha
Varginha – Minas Gerais

Aellington Freire de Araújo

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Varginha
Varginha – Minas Gerais

Emerson Ricky Pinheiro

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Varginha
Varginha – Minas Gerais

Karoline Santos da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Varginha
Varginha – Minas Gerais

RESUMO: Projeto de experimentos de mistura é uma classe especial de experimentos de superfície de resposta em que o produto sob investigação é composto de vários componentes. O objetivo principal de um projeto de experimentos de mistura é determinar a influência que cada componente possui sobre o produto final. Este trabalho tem por objetivo utilizar a metodologia de projeto de experimentos

de mistura na dosagem de argamassa mista de cimento, cal e areia, otimizando propriedades como trabalhabilidade, retenção de água e resistência de aderência à tração. Neste estudo, criamos um projeto de experimento denominado *simplex centroid*, com pontos adicionais, ajustamos modelos polinomiais para cada propriedade da argamassa para verificar a significância de seus parâmetros. Em seguida, construímos um modelo de otimização para as propriedades físicas da argamassa, utilizando a função *desirability*. Com as proporções obtidas, confeccionamos, em laboratório, a argamassa e analisamos os resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Argamassas; Projeto de Experimentos de Misturas; Otimização.

ABSTRACT: Mixture Design of Experiments is a special class of surface response experiments in which the product under investigation is composed of several components. The main purpose of a Mixture Design of Experiments is to determine the influence each component has on the final product. The object this work is to use the methodology of mixture design of experiments in the dosing of mixed mortar of cement, lime and sand, optimizing properties such as workability, water retention and tensile strength. In this study, we created an experiment project called centroid simplex, with additional points, we adjusted polynomial models for each

property of the mortar to verify the significance of its parameters. Next, we constructed an optimization model for the physical properties of the mortar, using the desirability function. With the obtained proportions, we made, in laboratory, the mortar and analyzed the results.

KEYWORDS: Mortar; Mixture Design of Experiments; Optimization.

1 | INTRODUÇÃO

Em geral, argamassa é um material obtido a partir da mistura de agregados miúdos, geralmente areia, aglomerantes inorgânicos e água, em proporções adequadas. É usada sobretudo no assentamento ou revestimento de alvenarias. Estas proporções chamam-se traço, que é, na verdade, as proporções em volume ou massa entre os componentes das argamassas, que pode variar de acordo com a finalidade e as características desejadas.

As argamassas mais comuns são constituídas de cimento, areia e água. Em alguns casos costuma-se adicionar cal, saibro, barro ou resinas, para a obtenção de propriedades especiais.

Neste trabalho, utilizamos a metodologia de planejamento de experimentos com mistura com a função *desirability*, para obtenção da dosagem para argamassa mista de cimento, cal e areia, buscando otimizar as propriedades como trabalhabilidade, retenção de água e densidade de massa.

O Projeto de experimentos de misturas (MDE) é uma classe especial de experimentos de superfície de resposta em que o produto sob investigação é composto de vários componentes ou ingredientes. O objetivo principal de um projeto de experimentos de misturas é determinar a influência que cada componente possui sobre o produto final (OLIVEIRA *et al.*, 2011).

Com a função *desirability* é possível transformar um problema de otimização multivariado, em um problema univariado, fazendo transformações em cada variável resposta, em um valor desejável, de 0 a 1. (Monticeli *et al.*, 2017)

A análise do experimento é facilitada com o uso da Metodologia de Superfície de Resposta. A Metodologia de superfície de resposta (MSR), é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas usadas para modelar e analisar problemas onde a resposta de interesse é influenciada por muitas variáveis para alcançar um valor ótimo (MYERS E MONTGOMERY, 2002).

Segundo Cornell (2002), as principais considerações relacionadas com a exploração da superfície de resposta sobre a região simplex são: (i) a escolha de um modelo adequado para a aproximação da superfície sobre a região de interesse; (ii) o teste da adequação do modelo que represente a superfície de resposta.

Este artigo está organizado da seguinte forma: Na seção 2, uma abordagem sobre projeto de experimentos de mistura e a função *desirability* são apresentadas. Na seção 3, temos o resultado dos experimentos com algumas discussões e, na seção 4,

algumas conclusões.

2 | PROJETO DE EXPERIMENTO DE MISTURA (MDE)

Em experimentos com misturas, a soma das proporções dos componentes ou ingredientes deve ser igual a 100%, ou seja, em uma mistura de componentes temos

$$\sum_{i=1}^q x_i = 1 \quad (1)$$

onde x_i representa a proporção do i -ésimo componente, com $0 \leq x_i \leq 1$.

O espaço formado pelos experimentos de mistura de componentes é descrito como um sistema de coordenadas *simplex*. A distribuição dessas coordenadas de modo uniforme sobre o *simplex* é conhecida como *lattice* (Cornell, 2002).

Por exemplo, para uma mistura de dois componentes, o *simplex* será uma linha. Quando existem três componentes na mistura, o espaço geométrico *simplex* será um triângulo equilátero. Para um experimento com quatro componentes, o *simplex* será um tetraedro. Na Figura 1, temos um exemplo de um *simplex* de três componentes.

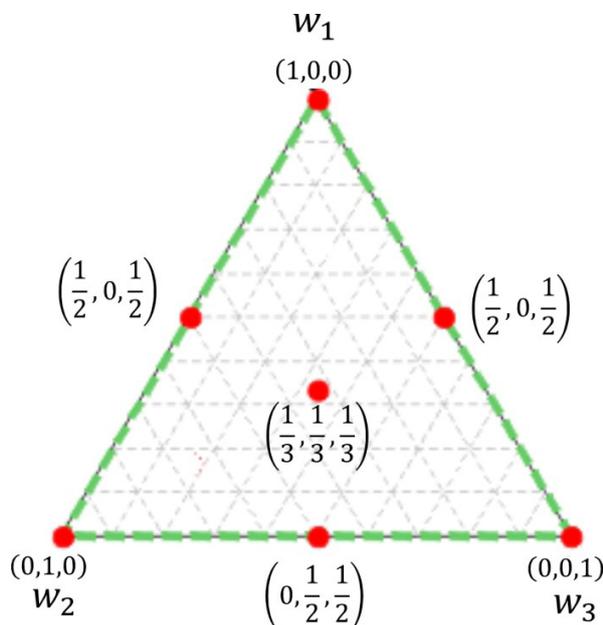


Figura 1: Sistema de coordenadas *simplex* com três componentes

Os vértices do *simplex*, ou triângulo, representam as misturas puras. Os pontos interiores do triângulo representam as misturas nas quais nenhum dos três componentes está ausente, ou seja, $w_i > 0$, para $i = 1, 2$ e 3 . O ponto que está no centro do *simplex* é chamado de centroide, este ponto corresponde à mistura com iguais

proporções de cada componente.

Frequentemente existem situações em que algumas das proporções, w_i , são restritas a um limite inferior e/ou limite superior. Assim, estas restrições podem ser escritas como (2),

$$0 \leq L_i \leq w_i \leq U_i \leq 1, \quad 1 \leq i \leq q \quad (2)$$

onde L_i é o limite inferior e U_i é o limite superior.

Os limites inferiores, L_i , são necessários quando se deseja que qualquer um dos componentes esteja presente na mistura. Já os limites superiores, U_i , são necessários quando a mistura não pode conter mais do que uma dada proporção de um componente (MYERS E MONTGOMERY, 2002). É conveniente transformar estas proporções em “pseudocomponentes”.

Os pseudocomponentes são definidos em termos dos componentes originais e seus limites inferiores/superiores. Considerando um experimento com q componentes e $L_i \geq 0$, sendo w_i a proporção do componente i , a transformação para pseudocomponente é feita pela equação (3).

$$w'_i = \frac{w_i - L_i}{1 - L} \quad (3)$$

onde $L = \sum_{i=1}^q L_i < 1$.

Quando duas ou mais proporções são limitadas superiormente, Crosier (1984) define o pseudocomponente como (4).

$$u_i = \frac{U_i - w_i}{U - 1}, \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (4)$$

onde $U = \sum_{i=1}^q U_i < 1$.

A região mostrada na Figura 2 é um *simplex* bidimensional nos pseudocomponentes w'_i onde $w'_1 + w'_2 + w'_3 = 1$.

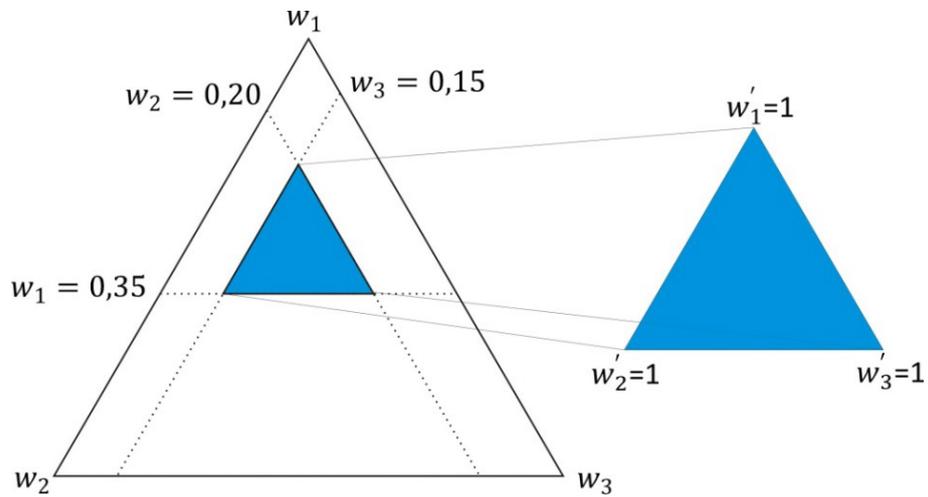


Figura 2: Sub-região do *simplex* original redefinido como um pseudocomponente para w'_1 , w'_2 e w'_3 .

A análise do experimento é facilitada com o uso da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR).

Na metodologia de superfície de resposta, é preciso escolher um modelo adequado para a aproximação da superfície sobre a região de interesse. De um modo geral, funções polinomiais de baixa ordem são modelos ideais que descrevem bem a superfície em análise.

Na Tabela 1, apresentamos alguns modelos para um projeto de experimento com três componentes.

Modelo	Equação
Linear:	$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3$
Quadrático:	$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3$
Cúbico especial:	$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3$

Tabela 1: Modelos usados em Projeto de Experimentos de Mistura

Após a obtenção do polinômio que representa a superfície de resposta, é necessário definir indicadores para analisar o quão bem o modelo é capaz de representar a superfície. Segundo Oliveira (2009), a primeira propriedade é a de verificar se o polinômio é capaz de explicar as variações nos conjuntos de respostas, ou seja, se o número de termos presente no modelo é suficiente para torná-lo adequado à superfície de resposta. Conforme Monticeli (2016), esta verificação pode ser feita através do coeficiente de determinação R^2 , que é calculado pela equação (5)

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (5)$$

onde

$$SSR = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

$$SST = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (6)$$

\hat{y}_i é o valor previsto para a resposta considerando o i-ésimo experimento utilizando o polinômio. O termo y_i é o valor da variável de resposta para o i-ésimo experimento e \bar{y} é a média geral dos valores assumidos pela variável resposta considerando todos os experimentos realizados.

Um teste estatístico para verificar os termos do polinômio pode ser feito. Este teste pode evitar que o polinômio tenha um grau excessivamente elevado, quando na verdade um polinômio com grau menor pode representar muito bem a superfície de resposta (MONTICELI, 2016).

As hipóteses são as seguintes:

H_0 : A resposta não depende dos componentes da mistura

H_1 : A resposta depende dos componentes da mistura

Quando a hipótese nula é verdadeira, todos os componentes lineares são iguais a um valor constante e os outros termos são iguais a zero. O teste da hipótese nula é feito através do parâmetro F, calculado pela equação (7).

$$F = \frac{\frac{SSR}{(p-1)}}{\frac{SSE}{(N-p)}} \quad (7)$$

Sendo,

$$SSE = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2 \quad (8)$$

O grau de liberdade é o número de parâmetros que são estimados pelo modelo, por exemplo, um polinômio de grau 2 terá 6 parâmetros: $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{12}, \beta_{13}$ e β_{23} é o

número de observações. O valor determinado de F é comparado com $F_{(p-1, N-p, \alpha)}$ tabelado. A hipótese nula é rejeitada a um nível de significância α , se $F_{(p-1, N-p, \alpha)}$.

2.1 Otimização pelo MDE

Na otimização pelo MDE, o problema mais comum consiste em otimizar as variáveis de resposta do experimento. As variáveis de resposta (y_i) que se deseja otimizar, são dependentes das variáveis de entrada, w_i , as quais representam as proporções de cada componente da mistura. A relação entre y_i e w_i é obtida por meio da análise do experimento de misturas e o objetivo da otimização consiste em maximizar e/ou minimizar cada variável de resposta y_i . A solução para esse problema não é trivial. Uma estratégia bastante eficiente para encontrar a solução para este problema é a Função *Desirability*, desenvolvida por Derringer e Suich (1980).

2.1.1 Função *Desirability*

A função *desirability* envolve a transformação de cada variável resposta estimada \hat{y}_i para um valor desejável individual, d_i , onde $0 \leq d_i \leq 1$. A *desirability* individual é combinada através da média geométrica simples, conforme (9), ou através da média geométrica ponderada dada pela equação (10). Estes pesos, z_i , revelam a importância de cada propriedade em relação às demais do processo de otimização multiobjetivo.

$$D = \left(\prod_{i=1}^k d_i \right)^{\frac{1}{k}} = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_k)^{\frac{1}{k}} \quad (9)$$

$$D = \left(\prod_{i=1}^k d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^k w_i}} = (d_1^{z_1} \times d_2^{z_2} \times \dots \times d_k^{z_k})^{\frac{1}{\sum_{i=1}^k z_i}} \quad (10)$$

onde k é o número de variáveis de resposta e o valor de D mede a *desirability* total, ou seja, a combinação das *desirability* individuais para cada nível de resposta e seu valor está no intervalo $[0, 1]$. Vale destacar que, se qualquer $d_i = 0$, ou seja, quando uma variável não consegue atingir o valor ótimo, a *desirability* geral é zero, isto é, $D = 0$, significando que não foram encontrados, simultaneamente, valores para w_1, \dots, w_p que otimizam y_1, \dots, y_k (Monticeli *et al.*, 2017).

No caso de minimizar uma variável resposta, (y), utiliza-se as transformações de variáveis conforme a equação (11) e para maximizar uma variável resposta (y), utiliza-se a equação (12) (DERRINGER E SUICH, 1980).

$$d[y] = \begin{cases} 0 & \text{se } y > H_i \\ \left[\frac{H_i - y}{H_i - T_i} \right]^t & \text{se } L_i \leq y \leq T_i \\ 1 & \text{se } y < T_i \end{cases} \quad (11)$$

$$d[y] = \begin{cases} 0 & \text{se } y < L_i \\ \left[\frac{y - L_i}{T_i - L_i} \right]^t & \text{se } L_i \leq y \leq T_i \\ 1 & \text{se } y > T_i \end{cases} \quad (12)$$

Também pode-se desejar que uma variável resposta, (y), atinja um alvo. Neste caso, a função *desirability*, conforme definida por Derringer e Suich (1980), é calculada pela equação (13).

$$d[y] = \begin{cases} \left[\frac{\hat{y}_i - A_i}{B_i - A_i} \right]^r, & \text{se } A_i \leq \hat{y}_i \leq B_i \\ \left[\frac{\hat{y}_i - C_i}{B_i - C_i} \right]^s, & \text{se } B_i \leq \hat{y}_i \leq C_i \\ 0 & \text{se } \hat{y}_i < A_i \text{ ou } \hat{y}_i > C_i \end{cases} \quad (13)$$

Assim, com a determinação da *desirability* total, o problema de otimização multivariado fica reduzido a um problema univariado, conforme a equação (14), baseada em Oliveira *et al.* (2011).

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & D \\ \text{Sujeito a:} \quad & d^{n+1}(y_i) \geq D, \quad i = 1, 2, \dots, k \\ & D \geq 0 \\ & w \in \Omega \end{aligned} \quad (14)$$

sendo $D^{n+1}(y_i)$ a função *desirability* de Y_i na $(n+1)^{\text{th}}$ iteração; D é o valor mínimo da *desirability* definido no início do modelo iterativo de minimização; $w \in \Omega$ denota toda a região definida no início do processo.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho utilizamos a metodologia MDE e a função *desirability* para encontrar a dosagem ótima para uma argamassa de revestimento. O objetivo foi maximizar a retenção de água e a densidade de massa e, para a trabalhabilidade, atingir o alvo (*target*). Assim, temos um problema de otimização multiobjetivo. A função *desirability* foi utilizada para reduzir o problema multivariado para um problema univariado, e assim, obter a dosagem ideal.

A argamassa produzida em laboratório, utilizando projeto de experimento de misturas, foi composta por três ingredientes: cimento, cal e areia. Os limites desses componentes, em massa, estão descritos na Tabela 2.

Limite inferior	Componente	Limite superior
6%	Cimento	19%
6%	Cal	19%
75%	Areia	88%

Tabela 2: Limites para os componentes da argamassa: cimento, cal e areia.

Construímos o planejamento de experimento de mistura *simplex centroid* com um ponto central e pontos interiores, totalizando 10 pontos. Na Figura 3 temos o *simplex* do experimento.

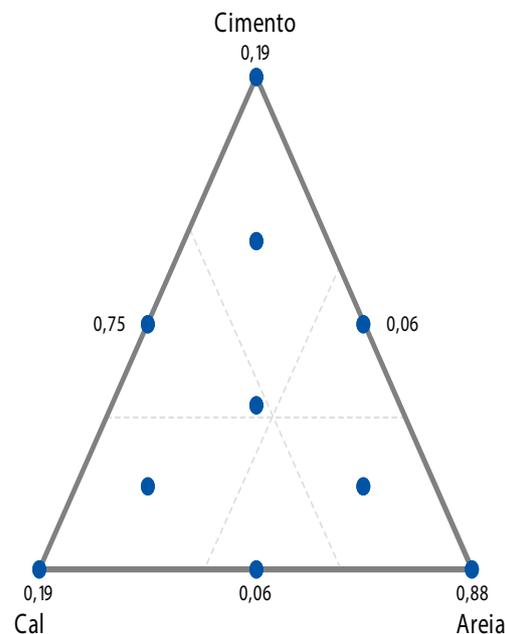


Figura 3: Simplex do MDE.

As argamassas produzidas foram avaliadas quanto à trabalhabilidade e retenção e água e a densidade de massa, conforme NBR NM 52/2009.

Na Tabela 3 apresentamos um resumo dos dados obtidos nos experimentos, para cada proporção realizada, e na Tabela 4, os modelos ajustados para cada propriedade.

Proporções (%)			Propriedades avaliada		
Cimento	Cal	Areia	Retenção de água (%)	Trabalhabilidade	Densidade de massa
0,125	0,060	0,815	87,0013	26,5000	1921,4724
0,082	0,082	0,837	67,6698	26,3333	1908,7117
0,103	0,103	0,793	79,4013	25,6667	1906,5031

0,125	0,125	0,750	89,2362	26,1667	1947,4847
0,060	0,060	0,880	63,9036	25,8333	1884,1718
0,060	0,190	0,750	89,2507	26,3333	1910,6748
0,147	0,082	0,772	74,9775	26,5000	1980,1227
0,082	0,147	0,772	84,3181	25,5000	1883,4356
0,190	0,060	0,750	73,8934	26,1667	1998,7730
0,060	0,125	0,815	77,1258	25,8333	1903,8037

Tabela 3: Média dos resultados obtidos nos experimentos, por proporções.

Propriedade	Modelo	R ²	Equação
Retenção de água	Cúbico especial	0,9043	$y = -8428,12x_1 - 5359,98x_2 - 129,519x_3 + 101402x_1x_2 + 11991,9x_1x_3 + 8079,54x_2x_3 - 132811x_1x_2x_3$
Trabalhabilidade	Linear	0,9414	$y = 28,8098x_1 + 25,3910x_2 + 25,8184x_3$
Densidade de massa	Linear	0,8682	$y = 2701,86x_1 + 1956,85x_2 + 1819,05x_3$

Tabela 4: Modelos polinomiais ajustados.

Após a obtenção dos modelos, utilizamos a função *desirability* para maximizar a retenção de água e a densidade de massa, e a propriedade trabalhabilidade em atingir o alvo de 26, número este definido baseado em NBR 13276/2016. Apresentamos o resultado obtido na Figura 4.

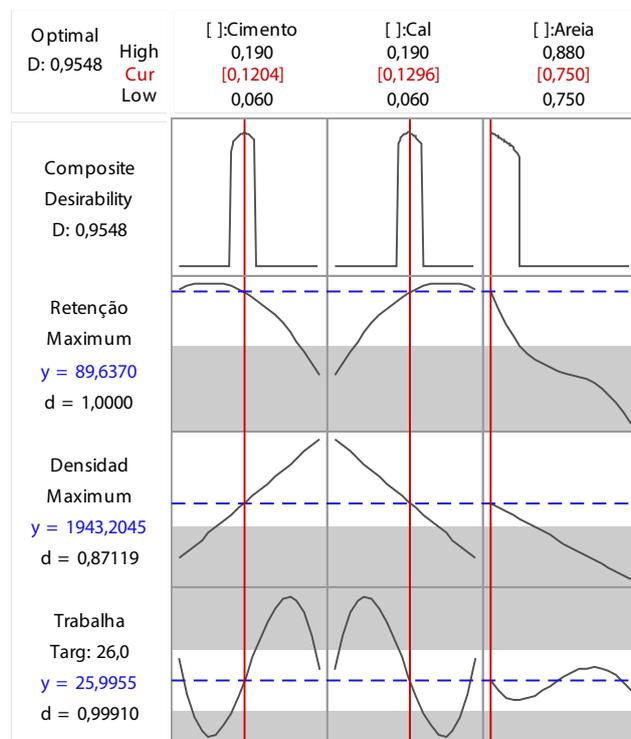


Figura 4: Resultado ótimo obtido pela função desirability.

Na Figura 4, podemos ver que, aumentando a proporção de cimento, a

propriedade retenção de água é reduzida, porém a propriedade densidade de massa e a propriedade trabalhabilidade aumenta. Analisando a componente cal, aumentando a proporção na argamassa, há um aumento na retenção de água, mas reduz a densidade de massa e a trabalhabilidade. A melhor combinação, que chamamos de dosagem ótima é, 12,04% para cimento, 12,96% para cal e 88% para areia.

Para validar o método, uma nova argamassa foi feita e as propriedades medidas. A comparação do resultado obtido através da função *desirability* com a argamassa feita no laboratório está apresentada na Tabela 5.

	Retenção de água	Densidade de massa	Trabalhabilidade
Função <i>desirability</i>	89,6370	1943,2045	25,9955
Realizado no laboratório	89,8875	1985,2761	26
Diferença (%)	0,2795%	2,1651%	0,0173%

Tabela 5: Comparação entre função *desirability* e argamassa experimental.

Pelo resultado obtido, podemos concluir que a metodologia proposta foi satisfatória.

4 | CONCLUSÃO

Neste estudo aplicamos ferramentas estatísticas na dosagem de argamassas para revestimento. Vimos que é possível aplicar a metodologia de planejamento de experimentos com misturas para modelar o comportamento das propriedades das argamassas, e utilizar tais modelos para obter uma dosagem ótima, utilizando a função *desirability*. Também é possível, através da função *desirability*, fazer análise de sensibilidade em cada componente, o que facilita a compreensão do quanto a proporção de cada componente (cimento, cal e areia) altera as propriedades das argamassas.

Como trabalho futuro, pretendemos verificar se reduzindo o número de traços, neste trabalho foram 10 traços, a metodologia ainda será eficiente; além de explorar mais a análise de sensibilidade da função *desirability*.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NB 53**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

CORNELL, J. **Experiments with Mixtures**. 3rd editions. John Wiley & Sons, New York, 2002.

CROSIER, R.B. Mixture experiments: geometry and pseudocomponents. **Technometrics**, v. 26, n. 3, p. 209-216, 1984.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous-Optimization of Several Response Variables. **Journal of Quality Technology**, v. 12, n. 4, p. 214–219, 1980.

MONTICELI, A. R., BALESTRASSI, P. P., DE SOUZA, A. C. Z, LEME, R. C., DE PAIVA, A. P. Mixture design of experiments on portfolio optimisation of power generation. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 11, n. 2, p. 322–329, 2017.

MONTICELI, A. R. **Delineamento de Experimento de Mistura na Otimização de Portfólios de Geração de Energia Elétrica** (Tese de doutorado) – Instituto de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

MYERS, R.H.; MONTGOMERY, D.C. **Response surface methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. 2 Ed., John Wiley & Sons, New York, NY, 2002.

OLIVEIRA, F. A. DE; PAIVA, A. P. DE; LIMA, J. W. M.; BALESTRASSI, P. P.; MENDES, R. R. A. Portfolio optimization using Mixture Design of Experiments: Scheduling trades within electricity markets. **Energy Economics**, v. 33, n. 1, p. 24–32, 2011.

OLIVEIRA, E. **Estratégia de comercialização de energia elétrica através da otimização de portfólios de contratos utilizando projetos de experimentos de misturas** (Tese de doutorado) – Instituto de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, 2009.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-430-6



9 788572 474306