

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE ROCHA ORNAMENTAL EM
ARGAMASSAS UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS
EM REDE SIMPLEX**

ALEXANDRE VIANNA BAHIENSE

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

JULHO – 2007

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE ROCHA ORNAMENTAL EM
ARGAMASSAS UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS
EM REDE SIMPLEX**

ALEXANDRE VIANNA BAHIENSE

“Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”

Orientador: Prof. Jonas Alexandre

Co-orientadora: Rosane Toledo Manhães

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

JULHO – 2007

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE ROCHA ORNAMENTAL EM
ARGAMASSAS UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS
EM REDE SIMPLEX**

ALEXANDRE VIANNA BAHIENSE

“Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”

Aprovada em 13 de julho de 2007

Comissão Examinadora:

Prof. Jean Marie Désir (D. Sc.) – UFRGS

Prof. Dylmar Penteado Dias (D. Sc.) – UENF

Rosane Toledo Manhães (D. Sc.) – UENF
(Co-orientadora)

Prof. Jonas Alexandre (D. Sc.) – UENF
(Orientador)

**Dedico este trabalho aos meus
amados pais, Edenildo e Istael.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por esta conquista e pela oportunidade a mim concedida.

Agradeço ao Professor D. Sc. Jonas Alexandre pelos conhecimentos transmitidos, cobrança, orientação e amizade durante a realização desta pesquisa.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil André, Luiz Gabriel, Vanusia, Milton e Rafael, pelo apoio e dedicação na realização dos experimentos.

Agradeço à Rosane Toledo, ao Professor D. Sc. Jean Marie Désir e ao Professor D. Sc. Gustavo Xavier pelo acompanhamento científico e companheirismo.

Agradeço aos velhos amigos de Viçosa que acompanharam-me nesta nova empreitada, Thiago (tica), Leonardo Pedroti, Alessandro, Francisco, Édson, André Destefani e Adilson (juiz), pela amizade na alegria e no trabalho.

Agradeço aos novos amigos Maicon, Cristiano, Larissa, Marcos Vinícius, Oscar.

Agradeço aos amigos de república Vinícius, Jair, Fábio (Pará) e Enerson (pretinho).

Agradeço à Michelle, pelo carinho, apoio e exemplo de vida, que deu mais força para a conclusão deste trabalho.

Agradeço a MARCEL - Mármore Comércio e Exportação Ltda pela receptividade e pelas amostras de resíduo cedidas.

Expresso meus sinceros agradecimentos a todos os professores que contribuíram na minha formação.

Também agradeço a todos os meus amigos que compartilharam de mais esta etapa da minha vida.

Agradeço à Universidade Estadual do Norte Fluminense pela estrutura e apoio financeiro.

Finalmente, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS.....	I
LISTA DE FIGURAS.....	V
RESUMO.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Aspectos Gerais	1
1.2 – Objetivos.....	4
1.2.1 – Objetivo geral.....	4
1.2.2 – Objetivos específicos	4
1.3 – Apresentação dos Capítulos.....	4
CAPÍTULO 2 – RESÍDUO NO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS.....	6
2.1 – Definição e Classificação de Resíduos.....	6
2.2 – Rochas Ornamentais: Considerações Gerais.....	8
2.3 – Uso de Rochas Ornamentais na Construção Civil.....	9
2.4 – Espírito Santo: Pólo Produtor de Rochas Ornamentais e Grande Gerador de Resíduos.....	10
2.5 – Beneficiamento de Rochas Ornamentais.....	13
2.5.1 – Processo de serragem.....	14
2.6 – Reaproveitamento de Resíduos	16
2.6.1 – Generalidades	16
2.6.2 – A construção civil como alternativa para o reaproveitamento de resíduos.....	17
2.6.3 – Incorporação do resíduo de rochas ornamentais em argamassas	18
2.6.3.1 – Viabilidade de aplicação do resíduo em construção de casas populares.....	19
CAPÍTULO 3 – ARGAMASSA.....	23
3.1 – Aspectos Conceituais	23

3.2 – Caracterização Tecnológica – Requisitos e Especificação.....	24
3.3 – Propriedades e Características.....	25
3.4 – Patologias em Argamassas mal Dimensionadas.....	26
3.5 – Propriedades no Estado Fresco – Trabalhabilidade e Consistência.....	28
CAPÍTULO 4 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO PLANEJAMENTO	
EXPERIMENTAL	30
4.1 – Uma Abordagem Geral	30
4.2 – Experimentos com Misturas em Argamassas.....	33
4.3 – Planejamento em Rede Simplex – Superfície de Resposta.....	34
4.4 – Projeto em Rede Simplex: Formulação dos Modelos Matemáticos.....	37
4.5 – Equações Polinomiais Canônicas.....	39
4.6 – Parâmetros dos Polinômios em Função das Respostas nos Pontos Experimentais	44
4.7 – Estimativa de Parâmetros em Polinômios $\{q,m\}$	46
4.8 – Representação Matricial da Forma Polinomial Canônica	47
4.9 – Cálculo dos Erros (e_i) e Estimativas dos Parâmetros $\beta (b)$	49
CAPÍTULO 5 – PROGRAMA EXPERIMENTAL	53
5.1 - Materiais	53
5.1. - Areia	53
5.1.2 - Cimento	54
5.1.3 – Resíduo de rocha	55
5.2 – Métodos Utilizados.....	55
5.2.1 - Caracterização dos materiais	55
5.2.2 - Resistência à compressão.....	57
5.2.3 - Modelagem numérica	58
5.2.3.1 - Modelos matemáticos.....	58
5.2.3.2 - Proporções	59
5.2.3.3 - Pseudocomponentes.....	60
5.2.3.4 - Restrições experimentais: determinação do índice de consistência das argamassas.....	63
5.2.3.5 - Programas <i>Surfer e Statistica</i>	67
5.2.3.6 - Análise de variância.....	67

5.2.3.7 - Significância estatística da regressão.....	70
5.2.3.8 - Falta de ajuste e erro puro.....	71
5.2.3.9 - Percentagem de variação explicada pela regressão	72
5.2.3.10 - Intervalos de confiança.....	73
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
6.1 – Caracterização das Matérias-Primas.....	76
6.1.1 – Composição química	76
6.1.2 – Granulometria e massa específica real dos grãos do resíduo	77
6.1.3 – Identificação das fases cristalinas	78
6.2 – Limites de Consistência.....	79
6.3 – Determinação das Restrições Experimentais	90
6.4 – Análise dos Modelos.....	90
6.4.1 – Consistência de 255 ± 10 mm	91
6.4.1.1 – Modelo linear	93
6.4.1.2 – Modelo quadrático	100
As superfícies de respostas geradas pelo modelo quadrático (\hat{y}^*), assim como os pontos usados em sua formulação, são representados na Figura 6.9.....	104
6.4.1.3 – Modelo cúbico especial.....	106
6.4.1.4 – Modelo cúbico completo	108
6.4.1.5 – Comparativo entre modelos para consistência de 255 ± 10 mm.....	115
6.4.2 – Consistência de 255 ± 20 mm	116
6.4.2.1 – Modelo linear	117
6.4.2.2 – Modelo quadrático	119
6.4.2.3 - Modelo cúbico especial	119
6.4.2.4 – Modelo cúbico completo	121
6.4.2.5 – Comparativo entre modelos para consistência de 255 ± 20 mm.....	125
6.4.3 – Consistência de 255 ± 30 mm	126
6.4.3.1 – Modelo linear	127

6.4.3.2 – Modelo quadrático	129
6.4.3.3 - Modelo cúbico especial	131
6.4.3.4 – Modelo cúbico completo	133
6.4.3.5 – Comparativo entre modelos para consistência de 255 ± 30 mm.....	136
6.5 – Obtenção de Traços com base em Superfícies de Respostas	137
6.5.1 – Exemplo de traços para as superfícies de resposta geradas no planejamento experimental.....	139
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	147
7.1 – Considerações Finais	147
7.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	149
CAPÍTULO 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Taxas de Crescimento da Produção Mundial de Rochas Ornamentais entre 1976 e 1995 de Consistência 255 ± 30 mm.....	10
Tabela 3.1 - Exigências Mecânicas e Reológicas para argamassas.....	25
Tabela 3.2 - Limites de Resistência de Aderência à Tração para Emboço em Camada Única.....	25
Tabela 4.1 - Número de Experimentos em uma Rede Simplex $\{q,m\}$	40
Tabela 4.2 - Número de Termos em Polinomiais Canônicas.....	42
Tabela 4.3 - Nomenclatura Usada em Misturas para $q = 3$ e $q = 4$ componentes.....	44
Tabela 5.1 - Frações granulométricas Segundo a NBR 7214.....	54
Tabela 5.2 - Composição do CP II E 32 – Votaram. Informações do fabricante.	54
Tabela 5.3 - Conversão dos L-pseudocomponentes em Componentes Originais.....	63
Tabela 5.4 - Tabela de Análise de Variância (ANOVA).....	73
Tabela 6.1 - Composição Química do Resíduo em Forma de Óxidos.....	77
Tabela 6.2 - 1º experimento: 1º Restrição: $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,10$ e $x_3 \geq 0,10$	80
Tabela 6.3 - 2º experimento: 2º Restrição: $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,20$ e $x_3 \geq 0,10$	80
Tabela 6.4 - 3º experimento: 3º Restrição: $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,30$ e $x_3 \geq 0,10$	81
Tabela 6.5 - 4º experimento: 4º Restrição: $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,40$ e $x_3 \geq 0,10$	81
Tabela 6.6 - 5º experimento: 5º Restrição: $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,50$ e $x_3 \geq 0,10$	81
Tabela 6.7 - 6º experimento: 6º Restrição: $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,60$ e $x_3 \geq 0,10$	82
Tabela 6.8 - 7º experimento: 7º Restrição: $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,70$ e $x_3 \geq 0,10$	82
Tabela 6.9- 1º experimento: 1º Restrição $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,10$ e $x_3 \geq 0,10$	84
Tabela 6.10- 2º experimento: 2º Restrição $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,20$ e $x_3 \geq 0,10$	84
Tabela 6.11- 3º experimento: 3º Restrição $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,30$ e $x_3 \geq 0,10$	84
Tabela 6.12- 4º experimento: 4º Restrição $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,40$ e $x_3 \geq 0,10$	85
Tabela 6.13- 5º experimento: 5º Restrição $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,50$ e $x_3 \geq 0,10$	85
Tabela 6.14- 6º experimento: 6º Restrição $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,60$ e $x_3 \geq 0,10$	85
Tabela 6.15- 1º experimento: 1º Restrição $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,10$ e $x_3 \geq 0,10$	87

Tabela 6.16-	2º experimento: 2º Restrição $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,20$ e $x_3 \geq 0,10$	87
Tabela 6.17-	3º experimento: 3º Restrição $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,30$ e $x_3 \geq 0,10$	88
Tabela 6.18-	4º experimento: 4º Restrição $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,40$ e $x_3 \geq 0,10$	88
Tabela 6.19-	5º experimento: 5º Restrição $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,50$ e $x_3 \geq 0,10$	88
Tabela 6.20-	Composição das Misturas para a Consistência de 255 ± 10 mm.....	92
Tabela 6.21-	Pontos Experimentais do Modelo Linear.....	93
Tabela 6.22-	Intervalos de Confiança dos Parâmetros do Modelo Linear.....	94
Tabela 6.23-	Valores Previstos pelo Modelo Linear e Valores Médios de Observações Feitas em Ensaios de Resistência à Compressão.....	95
Tabela 6.24-	ANOVA do Modelo Linear para Consistência de 255 ± 10 mm.....	96
Tabela 6.25-	Pontos Experimentais do Modelo Quadrático.....	100
Tabela 6.26-	Intervalos de Confiança dos Parâmetros do Modelo Quadrático....	101
Tabela 6.27-	Valores Obtidos pelo Modelo Quadrático e Valores Médios de Observações Feitas em Ensaios de Resistência à Compressão.....	102
Tabela 6.28-	ANOVA do Modelo Quadrático para Consistência de 255 ± 10 mm.....	103
Tabela 6.29-	Pontos Experimentais para o Modelo Cúbico Especial.....	106
Tabela 6.30-	Intervalos de Confiança dos Parâmetros do Modelo Cúbico Especial.....	107
Tabela 6.31-	Pontos experimentais do Modelo Cúbico Completo.....	109
Tabela 6.32-	Intervalos de Confiança dos Parâmetros do Modelo Cúbico Completo.....	110
Tabela 6.33-	Valores Previstos pelo Modelo Cúbico Completo e Valores Médios de Observações Feitas em Ensaios de Resistência à Compressão.....	111
Tabela 6.34-	ANOVA do Modelo Cúbico Completo Modificado, para Consistência de 255 ± 10 mm.....	112
Tabela 6.35-	Comparação entre os Valores Médios Observados (\bar{y}) e os Valores Previstos pelos Modelos (\hat{y} , \hat{y}^*).....	115
Tabela 6.36-	Composição das Misturas para a Consistência de 255 ± 20 mm.....	117
Tabela 6.37-	Pontos Experimentais do Modelo Linear.....	117
Tabela 6.38-	Valores Calculados pelo Modelo Linear e Valores Médios de	

Observações Feitas em Ensaios de Resistência à Compressão.....	118
Tabela 6.39- ANOVA do Modelo Linear, para Consistência de 255 ± 20 mm	118
Tabela 6.40- Pontos Experimentais do Modelo Quadrático.....	119
Tabela 6.41- Pontos Experimentais do Modelo Cúbico Especial.....	119
Tabela 6.42- Valores Obtidos pelo Modelo Cúbico Especial (original e modificado) e Valores Médios Observados em Ensaios de Resistência à Compressão.....	120
Tabela 6.43- ANOVA do Modelo Cúbico Especial Modificado, para Consistência de 255 ± 20 mm.....	120
Tabela 6.44- Pontos Experimentais do Modelo Cúbico Completo.....	121
Tabela 6.45- Valores Obtidos pelo Modelo Cúbico Completo (original e modificado) e Valores Médios Observados em Ensaios de Resistência à Compressão.....	122
Tabela 6.46- ANOVA do Modelo Cúbico Especial Modificado, para Consistência de 255 ± 20 mm.....	122
Tabela 6.47- Comparação entre os Valores Médios Observados (\bar{y}) e os Valores Previstos pelos Modelos (\hat{y}).....	125
Tabela 6.48- Composição das Misturas para a Consistência de 255 ± 30 mm	127
Tabela 6.49- Pontos Experimentais do Modelo Linear.....	127
Tabela 6.50- Valores Previstos pelo Modelo Linear e Valores Médios Observados em Ensaios de Resistência à Compressão.....	128
Tabela 6.51- ANOVA do Modelo Linear, para Consistência de 255 ± 30 mm.....	128
Tabela 6.52- Pontos Experimentais do Modelo Quadrático.....	129
Tabela 6.53- Valores Previstos pelo Modelo Quadrático e Valores Médios Observados em Ensaios de Resistência à Compressão.....	129
Tabela 6.54- ANOVA do Modelo Quadrático, para Consistência de 255 ± 30 mm.....	130
Tabela 6.55- Pontos experimentais do Modelo Cúbico Especial.....	131
Tabela 6.56- Valores Previstos pelo Modelo Cúbico Especial e Valores Médios Observados em Ensaios de Resistência à Compressão.....	131
Tabela 6.57- ANOVA do Modelo Cúbico Especial, para Consistência de	

255 ± 30 mm.....	132
Tabela 6.58- Pontos Experimentais do Modelo Cúbico Completo.....	133
Tabela 6.59- Valores Previstos pelo Modelo Cúbico Completo (original e modificado) e Valores Médios de Observações Feitas em Ensaios de Resistência à Compressão.....	133
Tabela 6.60- ANOVA para o Modelo Cúbico Completo, para Consistência de 255 ± 30mm.....	134
Tabela 6.61- Comparação entre os Valores Médios Observados (\bar{y}) e os Valores Previstos pelos Modelos (\hat{y}).....	136
Tabela 6.62- Alguns Traços sob a Superfície de Resposta 255 ± 10 mm.....	141
Tabela 6.63- Consumo dos Constituintes de Alguns Traços Sob a Superfície ... de Resposta 255 ± 10 mm.....	142
Tabela 6.64- Alguns Traços sob a Superfície de Resposta 255 ± 20 mm.....	143
Tabela 6.65- Consumo dos Constituintes de Alguns Traços Sob a Superfície de Resposta 255 ± 20 mm.....	144
Tabela 6.66- Alguns Traços sob a Superfície de Resposta 255 ± 30 mm.....	145
Tabela 6.67- Consumo dos Constituintes de Alguns Traços Sob a Superfície de Resposta 255 ± 30 mm.....	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Mapa dos Principais Núcleos de Extração e Beneficiamento de Rochas no Espírito Santo.....	12
Figura 2.2- (a) Blocos de Rocha em Estado Bruto; (b) Processo de Serragem no Tear.....	14
Figura 2.3 - (a) Lama Abrasiva na Serragem dos Blocos; (b) Granalha.....	15
Figura 3.1 - Alguns Exemplos de Patologias em Argamassas.....	28
Figura 4.1 - Espaço Experimental para Misturas de Dois Componentes Limitados pela Reta $x_2 = 1 - x_1$	36
Figura 4.2 - Espaço Simplex para Três Componentes (superfície de resposta) (CORNELL, 1990).....	36
Figura 4.3 - Distribuição de Pontos no Espaço Simplex. (Alexandre, 2000)...	37
Figura 4.4 - Rede Simplex {3,2}.....	38
Figura 4.5 - Nomenclatura de Respostas para Pontos da Rede Simplex {3,2}, {3,3}. (Cornell, 1990).....	43
Figura 5.1 - Pontos para a Obtenção dos Modelos.(a) Linear; (b) Quadrático; (c)Cúbico Especial e (d) Cúbico Completo.....	58
Figura 5.2 - Pontos que Delimitam a Superfície de Resposta.....	59
Figura 5.3 - Sub-região do Espaço Simplex.....	61
Figura 5.4 - Argamassadeira para Mistura dos Componentes das Argamassas.....	64
Figura 5.5 - Mesa de Abatimento para Ensaio de Consistência.....	64
Figura 5.6 - Região Experimental Dada pelas Restrições Iniciais.....	65
Figura 5.7 - Desvio em Relação à Média Global (Barros Neto, 2003).....	68
Figura 6.1 - Curvas De Distribuição Granulométrica do Resíduo.....	78
Figura 6.2 - Difratoograma de Raios X do Resíduo de Granito.....	79
Figura 6.3 - Região em Negrito Delimitada pelos Pseudocomponentes para Consistência de 255 ± 10 mm.....	83

Figura 6.4 - Região em Negrito Delimitada pelos Pseudocomponentes para Consistência de 255 ± 20 mm.....	86
Figura 6.5 - Área Região Em Negrito Delimitada pelos Pseudocomponentes Para Consistência de 255 ± 30 mm.....	89
Figura 6.6 - Significância Estatística dos Parâmetros do Modelo Linear.....	95
Figura 6.7 - Superfície de Resposta (a) e Curvas Tipo “Iso-resposta” do Modelo Linear para resistência à compressão (MPa) para a Região Experimental de consistência 255 ± 10 mm (b).....	99
Figura 6.8 - Significância Estatística dos Parâmetros do Modelo Quadrático	102
Figura 6.9 - Superfície de Resposta (a) e Curvas Tipo “Iso-resposta” do Modelo Quadrático para Resistência à Compressão (MPa) da Região de Experimental Consistência 255 ± 10 mm (b).....	105
Figura 6.10 - Significância Estatística dos Parâmetros do Modelo Cúbico Especial.....	108
Figura 6.11 - Significância Estatística para os Parâmetros do Modelo Cúbico Completo.....	111
Figura 6.12 - Superfície de Resposta (a) e Curvas Tipo “Iso-resposta” do Modelo Cúbico Completo para Resistência à Compressão (MPa) da Região Experimental de Consistência 255 ± 10 mm (b).....	114
Figura 6.13 - Superfície de Resposta (a) e Curvas Tipo “Iso-resposta” do Modelo Cúbico Completo para Resistência à Compressão (MPa) da Região Experimental de Consistência 255 ± 20 mm (b).....	124
Figura 6.14 - Superfície de Resposta (a) e Curvas Tipo “Iso-resposta” do do Modelo Cúbico Completo para Resistência à Compressão (MPa) da Região Experimental de Consistência 255 ± 30 mm (b).....	135
Figura 6.15 - Representação de um Ponto Aleatório em uma Superfície de Resposta.....	137
Figura 6.16 - Determinação da Composição da Mistura no Ponto P – Construção das Bissetrizes.....	138
Figura 6.17 - Construção Geométrica para a Obtenção da Composição da	

Mistura P.....	139
Figura 6.18 - Pontos selecionados na superfície de resposta 255 ± 10 mm.....	140
Figura 6.19 - Pontos Selecionados sob a Superfície de Resposta 255 ± 20 mm.....	143
Figura 6.20 - Pontos Selecionados sob a Superfície de Resposta 255 ± 30 mm.....	145

RESUMO

O volume de resíduos sólidos produzidos pelas indústrias vem se tornando um sério problema ambiental, principalmente por não possuírem um destino correto. Como toda grande indústria, a de rochas ornamentais é também uma grande geradora de resíduos devido aos processos de extração e beneficiamento dos blocos. O município de Cachoeiro de Itapemirim-ES é o maior produtor de rochas ornamentais do Brasil com cerca de 600 empresas, principalmente de beneficiamento. Estima-se que essa atividade industrial gera, somente neste município, um volume de 4.000 ton/mês de resíduos em forma de lama abrasiva. Assim como a indústria do beneficiamento de rochas, a construção civil é o setor da indústria que consome grandes quantidades de matérias-primas naturais e, apesar de ser um grande gerador de resíduos, mostra-se como uma alternativa para diminuir parte do impacto ambiental causado pelo processo de beneficiamento de rochas ornamentais. Apesar dos vários estudos já realizados sobre incorporação de resíduos aos materiais de construção, torna-se necessário um planejamento dos experimentos para que se fuja do empirismo das misturas, a fim de que seja alcançado um desempenho satisfatório de suas propriedades e, sem dúvida, favorecer o desenvolvimento sustentável. A proposta desta dissertação se concentra no uso do planejamento de experimentos com aplicação da metodologia de rede simplex de misturas e avaliação do comportamento da argamassa em função do teor de incorporação do resíduo. A propriedade analisada foi a de resistência à compressão, por ser função de outras propriedades de interesse em concretos, tais com porosidade, tração, absorção de água, etc. Adotou-se, para a formulação das superfícies de resposta, três índices de consistência a fim de que se determinasse os teores de água e as restrições experimentais dos componentes das argamassas. As consistências adotadas foram de 255 ± 10 mm; 255 ± 20 mm e 255 ± 30 mm, cujas porcentagens máximas de incorporação de resíduo foram de 20, 30 e 40 % respectivamente. O modelo matemático que mais se ajustou aos experimentos foi o Modelo Cúbico Completo para todas as consistências.

Palavras-chave: Argamassa, Resíduo de granito, Planejamento Experimental, Rede Simplex.

ABSTRACT

The amount of solid waste produced by the industries has been become a serious environmental problem, mostly for doesn't has a correctly destination. As every great industry, the decorative stones industry also is a great generating of waste due to the extraction processes and sawing of the blocks. The municipal district of Cachoeiro de Itapemirim-ES is the greater producer of ornamentals rocks in Brazil, about 600 industries, mainly of sawing. It's considered that industrial activity produces, only in this municipal district, a volume of 4,000 tons/month of wastes in abrasive mud form. As well as the rocks sawing industry, the civil construction is the sector of the industry that consumes great amounts of natural raw materials and, although is a great generator of wastes, shows as an alternative to reduce part of the environmental impact caused by the ornamental rocks sawing process. Although some works already have been developed, still its necessary a design of the experiments to abandon the empiricism of the mix, so that a satisfactory performance his properties is reached and, without doubt, to the development sustainable. The proposal this work concentrates in the use of the design of experiments with application of the mixtures simplex lattice methodology and evaluation of the behavior of the mortar in function of the waste incorporation. The property analyzed was strength test, for to be function of other properties of interest in concrete, such with porosity, tensile strength, water absorption, etc. It was used, for the formulation of the response surfaces, three consistence indexes to determine the amount of water and the experimental restrictions of the mortars components. The used consistence values of 255 ± 10 mm; 255 ± 20 mm and 255 ± 30 mm, whose maximum amount of waste incorporation of 20, 30 and 40 % respectively. The adjusted math model to experiments was the Complete Cubical Model for all consistence indexes.

Key-Words: Mortar, Granite Waste, Design of Experiments, Simplex Lattice.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Aspectos Gerais

O município de Cachoeiro de Itapemirim, no sul do estado do Espírito Santo, tem como pilar de sua economia a indústria de beneficiamento de rochas ornamentais, que produz, em sua grande maioria, chapas brutas ou polidas, pisos e revestimentos para a construção civil.

Como toda grande indústria, principalmente a de beneficiamento de matérias-primas naturais, gera um grande volume de resíduos sólidos devido ao seu processo produtivo.

Estes resíduos ao longo do tempo vêm se tornando um sério problema ambiental para a sociedade atual, pois na maioria das vezes, são dispostos em locais inadequados, podendo provocar danos ao meio ambiente devido à contaminação de águas subterrâneas e ao assoreamento dos rios. Podem ainda causar danos diretos à saúde humana como, por exemplo, a ocorrência de silicose (doença pulmonar decorrente da inalação de partículas em suspensão) nos trabalhadores.

A motivação principal desta pesquisa é a tentativa de aproveitamento, de forma racional, dos resíduos provenientes deste processo industrial de beneficiamento de rochas ornamentais, que se encontra em grande disponibilidade no município de Cachoeiro de Itapemirim-ES.

O setor da construção civil é um grande gerador de resíduos, além de consumir um volume enorme de recursos naturais. Para garantir um desenvolvimento sustentável, torna-se imprescindível o equilíbrio entre preservação da natureza e desenvolvimento econômico. Justifica-se, portanto, a preocupação com a economia de matérias-primas na construção civil e também, como reaproveitamento dos resíduos que já se encontram dispostos ao meio ambiente. Sendo assim, é necessário o aproveitamento de materiais recicláveis como o resíduo em questão.

Apesar de já existirem muitos estudos sobre o aproveitamento dos resíduos de rochas ornamentais na construção civil, sobretudo na confecção de materiais de construção, existe ainda a necessidade de uma metodologia de aproveitamento racional deste resíduo.

Vários estudos já realizados sobre este tema não abordam uma metodologia clara para a determinação dos teores de incorporação dos constituintes dos materiais. Nota-se, em diversos estudos sobre incorporação de resíduos em argamassas, a falta de um planejamento de experimentos para se determinar faixas de respostas mais amplas sobre as propriedades analisadas, ficando a determinação das proporções das misturas feita de forma empírica, ou seja, baseada em diversas tentativas entre acertos e erros.

A proposta de estudo de adição do resíduo em argamassas se explica pelo fato de ser um produto obrigatório em quase todas as edificações, podendo ser concebida de forma mais econômica e eficiente com adição deste resíduo que, atualmente, é gerado em proporções elevadas.

É importante salientar que a adição de qualquer tipo de resíduo industrial em materiais de construção, no caso argamassas, deve manter as características tecnológicas que o material necessita para um bom desempenho.

Há de se ressaltar ainda a importância de se obter um maior número possível de misturas, em diferentes proporções dos materiais, a fim de que se tenha

uma idéia de seu comportamento em função da variação de seus componentes, principalmente do resíduo de rocha.

Portanto, utilizando ferramentas para otimização de experimentos pode-se determinar um número muito maior de proporções do resíduo na constituição das argamassas, permitindo obter melhores e mais amplas respostas experimentais (propriedades desejadas).

Este estudo sobre o comportamento de argamassas com adição de resíduo de rochas ornamentais inclui a modelagem numérico-experimental de misturas, por meio do planejamento experimental em rede simplex, caracterização do resíduo, determinação dos índices de consistência para a obtenção dos teores de água e das restrições experimentais e verificação da propriedade mecânica (resistência à compressão) de interesse para as condições de trabalho deste produto, de modo que se possa garantir um desempenho satisfatório.

Considerando que atualmente, na indústria da construção civil, tem-se observado uma grande tendência no uso da argamassa industrializada, sendo a determinação da proporção adequada dos materiais nesta cadeia produtiva é imprescindível. Este estudo, torna-se uma ferramenta para uma indústria de argamassas com a incorporação do resíduo em questão, de forma que se possa fechar o processo produtivo da atividade de beneficiamento de rochas ornamentais, que vai desde a lavra às indústrias.

O resíduo do desdobramento dos blocos de rocha ornamental será objeto de estudo deste trabalho, que visa definir um procedimento para o aproveitamento em materiais de construção civil como agregado miúdo.

Espera-se que a adição deste resíduo diminua os custos dos materiais de construção, melhore o desempenho das argamassas, reduza os impactos ambientais gerados pela atividade mineradora, além de agregar valor ao subproduto de rocha ornamental.

1.2 – Objetivos

1.2.1 – Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral aplicar um planejamento experimental em rede simplex para a incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em argamassas de assentamento e revestimentos de paredes e tetos, a fim de que se obtenha um procedimento racional de misturas.

1.2.2 – Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Avaliar algumas propriedades físicas, químicas e mineralógicas do resíduo de rochas ornamentais e suas relações no comportamento da argamassa.
- Avaliar o comportamento no estado endurecido (resistência à compressão) das argamassas para diversas proporções dos seus constituintes (cimento, areia e resíduo), por meio de um planejamento experimental.
- Determinar a melhor relação entre o teor de resíduo incorporado e às propriedades no estado endurecido.
- Determinar os índices de consistência para as argamassas.
- Avaliar estatisticamente o melhor modelo numérico-experimental gerado pelo planejamento.
- Gerar superfícies de respostas e curvas “iso-resposta” para áreas experimentais.
- Determinar alguns traços com base nas curvas de iso-resposta.

1.3 – Apresentação dos Capítulos

Este trabalho consiste em oito capítulos. Vale ressaltar que os Capítulos 2, 3 e 4 apresentam uma contribuição aos aspectos teóricos – revisão da literatura, para uma melhor compreensão das situações experimentais e dos resultados obtidos. Portanto, o trabalho está organizado da seguinte forma:

O capítulo 1 traz uma breve introdução, envolvendo as questões relativas à justificativa e importância da pesquisa, bem como seus objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo apresenta, também de forma sucinta, uma abordagem sobre definição e classificação de resíduos, seguida de aspectos teóricos sobre rochas ornamentais e resíduos do beneficiamento das mesmas. Mostra a importância econômica da indústria de rochas e a necessidade de uma solução para a crescente geração de resíduos sólidos, propondo a incorporação destes em argamassas.

O terceiro capítulo é dedicado a um breve histórico sobre argamassa, apresentando definição e alguns requisitos obrigatórios segundo às normas técnicas nacionais. Enfatiza-se as patologias, habitualmente vistas no dia-a-dia, decorrentes do mau preparo das argamassas.

O quarto capítulo aborda os fundamentos do planejamento experimental e suas vantagens na indústria, dentre elas, a indústria da construção civil. Descreve também a formulação de modelos matemáticos para misturas.

O quinto capítulo está reservado ao programa experimental da pesquisa. Neste capítulo apresentam-se os materiais e os métodos de caracterização e mistura dos mesmos. Também são abordadas a elaboração e a análise estatística dos modelos matemáticos, de acordo com as características das argamassas em estado fresco – índice consistência.

No capítulo 6, encontra-se a apresentação, análise e discussão dos resultados dos ensaios da propriedade da argamassa no estado endurecido (resistência à compressão). Apresentam-se os modelos matemáticos gerados e os resultados estimados por eles.

No sétimo capítulo são feitas as considerações finais sobre o trabalho e apresentadas algumas sugestões para trabalhos e o último capítulo contém as referências bibliográficas usadas neste trabalho.

CAPÍTULO 2 – RESÍDUO NO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

2.1 – Definição e Classificação de Resíduos

Para maior clareza na classificação dos resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais, torna-se necessário definir, além de classificar resíduos de forma geral, o que é feito neste item.

Com o constante crescimento mundial ocorre um aumento da produção de bens naturais e industrializados para suprir as necessidades do mundo moderno. Nos processos de beneficiamento de matérias primas, inevitavelmente, há geração de resíduos, sejam eles sólidos, líquidos ou gasosos.

Os resíduos sólidos podem ser definidos como sendo resíduos em estado rígido, gerados em qualquer ambiente; podendo ser sobras de algum processo qualquer e que ocupam um determinado espaço (FERREIRA, 2000).

Flohr *et al.* (2005) definem que os resíduos sólidos são aqueles que resultam das diversas atividades humanas; dentre elas, a atividade industrial que gera resíduos em quantidades e com características tais que necessitam de disposição

final adequada, obedecendo à classificação dos mesmos segundo às normas técnicas vigentes no país.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da NBR 10004/1987 (Resíduos Sólidos: Classificação) define resíduo sólido com sendo todo resíduo nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço e de varrição.

Os resíduos sólidos são classificados quanto à sua periculosidade em três classes: I, II e III. Essa classificação se dá por meio de análises químicas sobre o extrato lixiviado obtido a partir da amostra bruta do resíduo. As concentrações dos elementos detectados nos extratos lixiviados são então comparadas com os limites máximos estabelecidos nas listagens constantes da NBR 10004/1987.

➤ **Resíduos classe I: Perigosos**

Apresentam periculosidade e devem ser manuseados com muita cautela e dispostos em locais adequados. São considerados perigosos por possuírem características de risco à saúde pública e ao meio ambiente devido às propriedades intrínsecas de:

- Inflamabilidade
- Corrosividade
- Reatividade
- Toxicidade
- Patogenicidade

➤ **Resíduos classe II: Não-inertes**

Não se enquadram nas classificações das classes I e III, mas possuem propriedades tais como:

- Combustibilidade

- Biodegradabilidade
- Solubilidade em água

➤ **Resíduos classe III: Inertes**

Em geral, são os resíduos que têm a capacidade de permanecerem inalterados aos ataques do meio ambiente e também com o passar do tempo, sem com isso, contaminar o ecossistema e prejudicar a saúde pública.

A análise da periculosidade dos resíduos sólidos industriais é feita em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, seguindo, além da NBR 10004, as recomendações das normas brasileiras regulamentadoras:

- NBR 10005/1987 – Lixiviação de Resíduo: Procedimento
- NBR 10006/1987 – Solubilização de Resíduo: Procedimento
- NBR 10007/1987 – Amostragem de Resíduo

Há uma nova norma técnica, relativa à classificação de resíduos sólidos, a NBR 10004/2004, que propõe uma nova classificação:

- **Resíduos classe I: Perigosos**
- **Resíduos classe II: Não perigosos**

Sendo que os não perigosos são subdivididos em A – Não inertes e B inertes. Removendo assim a antiga classificação da norma de 1987 (NIQUEL, 2004).

2.2 – Rochas Ornamentais: Considerações Gerais

O termo rochas ornamentais é aplicado aos materiais rochosos utilizados para fins de ornamentação e revestimento sendo passíveis de polimento, como o granito, gnaisse, sienito, gabro – todas designadas comercialmente como granitos (rochas silicatadas) e mármore (rochas carbonatadas). Dentre esses, os mais importantes economicamente são os mármore e granitos (MOYA, 1992).

As rochas são classificadas cientificamente de acordo com suas composições químicas e mineralógicas e também, com base em sua textura (OLIVEIRA e BRITO, 1998).

Os granitos são rochas claras de origem vulcânica (intrusiva) e textura grossa, que possuem altos teores de sílica (SiO_2). Sua mineralogia apresenta, em maior porcentagem, o mineral quartzo, feldspatos e as micas (muscovita e biotita). Os gabros, também de origem vulcânica, são rochas escuras compostas predominantemente de minerais como o piroxênio. Os granitos e os gabros, quanto à sua origem, são classificados como rochas ígneas.

Os gnaisses (rochas metamórficas), designados comercialmente como granitos, assim como o gabro, são rochas que, no tempo geológico, sofreram transformações físicas e/ou mecânicas (metamorfismos). Essas transformações mudam o arranjo dos minerais constituintes, alterando textura e as características físicas da rocha de origem. (OLIVEIRA e BRITO, 1998).

O mármore é uma rocha metamórfica contendo mais de 50 % de carbonatos (calcita ou dolomita) formado pela recristalização de uma rocha carbonatada (GUERREIRO, 2000).

Quanto à aplicação das rochas ornamentais pode-se destacar o seu uso na indústria da construção civil e de edificações, arte funerária, arte sacra, decoração de interiores e monumentos (IEL/FIEC, 1996).

Segundo Chiodi Filho (2001) cerca de 70 % da produção mundial de rochas ornamentais é transformada em chapas e ladrilhos para revestimentos, 15 % é desdobrada em peças para arte funerária, 10 % para obras estruturais e 5 % para outros campos de aplicações.

2.3 – Uso de Rochas Ornamentais na Construção Civil

O mármore, devido a sua baixa resistência aos ataques ambientais, é freqüentemente utilizado em interiores como revestimento para pisos e paredes, sendo encontrados no mercado, ladrilhos de diversos tamanhos para esses fins.

O granito (granitos, gabros e gnaisses), devido a maior resistência a impactos ambientais e à abrasão, dureza e apelo estético, é usualmente empregado em revestimento externo e trabalhos estruturais, sendo crescente seu uso em interiores como revestimentos, pisos, peças de banheiro e cozinha. Os ladrilhos e placas de granito disponíveis no mercado têm, em geral, as mesmas dimensões das de mármore (VILLASCHI e SABADINI, 2000).

2.4 – Espírito Santo: Pólo Produtor de Rochas Ornamentais e Grande Gerador de Resíduos

A produção mundial na indústria de rochas ornamentais tem crescido continuamente a uma taxa média anual de 4,7 % ao ano desde a década de 70 (VALE, 1997). A Tabela 2.1 mostra essa evolução até o final da década de 90.

Tabela 2.1 – Taxas de Crescimento da Produção Mundial de Rochas Ornamentais entre 1976 e 1995.

Período	1976/1986	1976/1990	1976/1995	1986/1990	1986/1995	1990/1995
Taxa de crescimento (%)	2,0	3,1	4,7	5,6	7,5	9,5

Os principais países responsáveis pela produção mundial de rochas ornamentais são, segundo dados do Departamento Nacional de Pesquisas Minerais (DNPM (1990) apud BANCO do BRASIL, 2000) são Itália, China, Espanha, Índia, Brasil, Grécia, entre outros. Essa produção compreende desde materiais brutos a rochas processadas.

O Brasil possui um lugar de destaque na produção mundial de rochas, alcançando a quinta posição mundial. Segundo Xavier (2006), este destaque se dá pelo fato de o país possuir em torno de 600 variedades de rochas ornamentais (granitos, mármore, ardósias, quartzitos, serpentitos, etc.), provenientes de mais de 1.500 frentes de lavra.

Chiodi Filho (2007) afirma que somente no mês de janeiro de 2007 as exportações brasileiras de rochas ornamentais tiveram um valor exportado de US\$ 72,01 milhões, correspondentes à comercialização de aproximadamente 167 mil toneladas, compreendidos principalmente entre granitos beneficiados em chapas polidas, além de blocos e chapas brutas.

Como visto, o crescimento da indústria de rochas no cenário mundial tem se refletido no contexto interno brasileiro, como percebido pelo impressionante volume das exportações brasileiras, fazendo do setor de rochas ornamentais um grande gerador de divisas para o país.

O estado do Espírito Santo ocupa lugar de destaque no setor de rochas ornamentais no Brasil, possuindo cerca de 1.200 empresas de extração, beneficiamento, produção de insumos e bens de capital, gerando mais de 20.000 empregos diretos equivalentes a 13 % de todos os empregos gerados pela indústria capixaba (SINDIROCHAS, 2004).

Segundo dados do INFOROCHAS (2006), o estado do Espírito Santo representou no ano de 2006, 65 % do valor exportado pelo Brasil, que obteve um faturamento superior a US\$ 1,04 bilhão, e mais de 81 % das exportações nacionais de manufaturados de mármore e granitos. O estado possui dois grandes pólos no setor, um na região sul e outra na norte. A região sul do estado possui grande concentração de empresas de beneficiamento, e a norte forte concentração da atividade extrativa, como pode ser visto na Figura 2.1 (SPÍNOLA, 2003).

O município de Cachoeiro de Itapemirim, no sul do Espírito Santo, é o maior produtor de rochas ornamentais do Brasil, possuindo cerca de 600 empresas, onde se concentram, em maior parte, atividades de desdobramento e beneficiamento, o que representa aproximadamente 64 % das empresas de rochas do estado (REDE ROCHAS, 2004). As rochas ornamentais deste município, além de atender ao mercado nacional, em grande parte são exportadas, principalmente para os Estados Unidos e países europeus (VILLASCHI e SABADINI, 2000).

Em contrapartida, esse desenvolvimento econômico traz danos ambientais devido à crescente geração de resíduos. Segundo Moura *et al.* (2002), a produção nacional de resíduo de granito é da ordem de 240.000 t/ano na forma de lama abrasiva. Esta intensa atividade industrial gera, somente em Cachoeiro de

Itapemirim, um volume estimado de 4000 t/mês de resíduos em forma de lama abrasiva (SILVA, 1998).

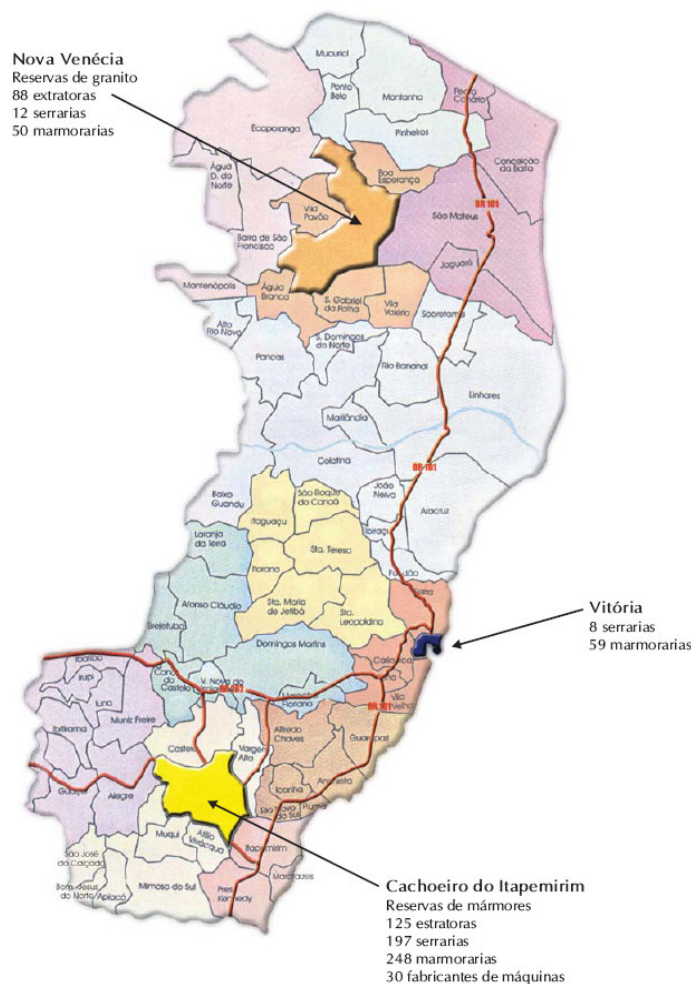


Figura 2.1 – Mapa dos Principais Núcleos de Extração e Beneficiamento de Rochas no Espírito Santo.

O resíduo sólido produzido por estas indústrias de beneficiamento, na maioria das vezes, não possui destinação definida. É depositado em locais impróprios, tais como ao redor das empresas ou depósitos provisórios, provocando a degradação do meio ambiente, como contaminação dos mananciais e dos solos, além de ocupar grandes áreas próximas às empresas que poderiam ser utilizadas para outros fins.

Existem projetos para tratamento e destinação destes resíduos em aterros industriais, onde os resíduos ficariam depositados até a sua destinação final,

possivelmente como matéria-prima a ser utilizada em outros projetos em estudo. Recentemente criou-se, na região sul do estado, a Associação Ambiental Monte Líbano – AAMOL, que prevê implantação da Central de Resíduos de Rochas Ornamentais em Cachoeiro de Itapemirim.

Em Nova Venécia, norte do estado, já está em funcionamento o Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) com capacidade de armazenar cerca de 325 mil m³ de lama, que preparará a lama abrasiva para ser reutilizada, possivelmente na fabricação de telhas e lajotas. (INFOROCHAS, 2006). O CTR recebe a lama e a submete a um tratamento em filtro-prensa para a retirada do excesso de umidade, contribuindo também para a reutilização de grande parte da água no próprio processo de beneficiamento.

O crescimento da produção da indústria de rochas aumenta ainda mais os problemas causados pela geração de resíduos, de forma que o setor industrial desempenha um papel fundamental neste processo, ao multiplicar a produção de bens, agravando a problemática da geração de resíduos (ROCHA e JOHN, 2003).

Em virtude desse panorama, torna-se necessária a reutilização do resíduo nesta cadeia produtiva, favorecendo o desenvolvimento sustentável da região.

2.5 – Beneficiamento de Rochas Ornamentais

As rochas ornamentais são usadas na construção civil principalmente como pisos, revestimentos e decoração, além de serem usadas também na fabricação de móveis e túmulos. Contudo, para serem usadas para tais fins devem ser extraídas de jazidas no seu estado bruto e depois beneficiadas (serradas e polidas).

O beneficiamento das rochas ornamentais é dividido em primário (serragem ou desdobramento) e secundário (polimento e acabamento final), que são desenvolvidos em empresas denominadas de serrarias e marmorarias, respectivamente (VILLASCHI e SABADINI, 2000).

Os processos de beneficiamento de matérias-primas, em sua grande maioria, se configuram como fontes geradoras de resíduos sólidos, que em análise

preliminar não possuem valor, e que comprometem o meio ambiente ao longo do tempo (FELLENBERG, 1980).

Durante o processo de beneficiamento, mais especificamente durante o corte da rocha, são gerados resíduos grossos e finos que, na maioria das vezes, são depositados em locais impróprios, como depósitos provisórios ao redor das empresas.

Ocorrem problemas quando despejados nos recursos hídricos, alterando a qualidade das águas e assoreando os rios ou córregos, ou seja, reduzindo a seção transversal dos mesmos. Quando dispostos em ambientes impróprios ou em poços de decantação, com a secagem do material, o vento ou a movimentação sobre este material pode produzir poeira, provocando a silicose e/ou calcificação dos pulmões, quando inalada. Além disso, ocorre a degradação das áreas exploradas, modificando completamente a paisagem local (XAVIER, 2001).

2.5.1 – Processo de serragem

O resíduo utilizado nesta pesquisa foi gerado no beneficiamento primário, ou seja, na serragem dos blocos de rocha ornamental, que é feita em equipamentos denominados teares. Após o processo de serragem os blocos são transformados em chapas para posterior polimento e acabamento – Figura 2.2.

(a)



(b)



Figura 2.2 – (a) Blocos de Rocha em Estado Bruto; (b) Processo de Serragem no Tear.

Para se ter uma idéia da ordem de grandeza do volume de resíduo sólido gerado nesta etapa do beneficiamento, estima-se que em média 25 a 30 % dos blocos de rocha são transformados em pó devido à serragem em chapas (VILLASCHI e SABADINI, 2000).

Segundo dados do INET (2001), na operação de serragem se perdem 15 % do bloco se este for rocha carbonatada, 25 % se for granito e 20 % se for ardósia e xisto.

A serragem nos teares é feita através do atrito de suas lâminas com a rocha em um meio fluido, chamado de lama abrasiva.

A constituição desta lama é uma mistura de granalha, água, cal e rocha moída. A granalha é uma liga metálica de forma granular, que é usada como material abrasivo no desdobramento dos blocos; tem a função de promover o atrito entre as lâminas do tear e a rocha. A cal e a água formam um material viscoso com a finalidade de refrigeração e lubrificação das lâminas – Figura 2.3.

(a)



(b)



Figura 2.3 – (a) Lama Abrasiva na Serragem dos Blocos; (b) Granalha.

2.6 – Reaproveitamento de Resíduos

2.6.1 – Generalidades

As atividades extrativas e industriais e, principalmente, nas atividades de beneficiamento de matéria-prima, costumeiramente geram resíduos em sua cadeia produtiva.

Para suprir as necessidades do mundo moderno é necessário um aumento da produção, que paulatinamente contribui para o aumento de resíduos, que nem sempre têm um destino ecologicamente correto. Como não é possível parar a produção, uma das grandes preocupações da atualidade consiste em reaproveitar os resíduos gerados nos diversos processos produtivos (MOREIRA *et al.*, 2005).

Considerando o conceito de desenvolvimento sustentável, torna-se evidente a necessidade de uma melhor distribuição dos recursos econômicos da humanidade, tendo-se a preocupação com a natureza. Os processos de produção devem economizar energia e não gerar subprodutos perigosos, que podem por em risco a natureza e o ser humano (PENTTALLA, 1997).

Segundo Batista Leite (2001) o consumo de recursos naturais e de energia tem aumentado proporcionalmente ao crescimento e desenvolvimento da população mundial, e atualmente há uma preocupação com o gasto excessivo ou ineficiente de recursos naturais. A crescente preocupação ambiental diz respeito à economia de recursos naturais, bem como à diminuição e o reaproveitamento dos resíduos das atividades industriais.

Menezes *et al.* (2002) afirmaram que a reciclagem de resíduos, independentemente do seu tipo, apresenta várias vantagens em relação à utilização de recursos naturais, dentre as quais têm-se: redução do volume de extração de matérias-primas, redução do consumo de energia, menores emissões de poluentes e melhoria da saúde e segurança da população.

Do ponto de vista ambiental e econômico, o reaproveitamento de resíduos em materiais de construção tende a reduzir o consumo de areia natural como agregado miúdo, pois a exploração de areia natural proveniente dos leitos dos rios tem grande potencial de degradação ambiental e tem sido uma prática cada vez mais

coibida pelos órgãos ambientais, sendo necessário buscar novos locais, distanciando-se dos centros consumidores, o que acarreta maiores custos principalmente com o transporte, além de ser considerado um recurso natural não renovável.

Diante da importância econômica da indústria de rochas e, das evidências aqui expostas, cresce a necessidade de uma produção mais limpa, que seja menos agressiva ao meio ambiente.

No caso em questão, os resíduos gerados pela atividade de beneficiamento de rochas se mostram viáveis para o seu reaproveitamento, uma vez que estes resíduos são materiais constituídos, em sua grande maioria, de fragmentos de rocha com grandes possibilidades de aplicação.

2.6.2 – A construção civil como alternativa para o reaproveitamento de resíduos

A construção civil, assim como o setor de rochas ornamentais é um ramo da indústria brasileira que possui uma parcela significativa da geração de resíduos sólidos, alcançando a marca de 30 % de desperdício dos materiais de construção.

Oliveira *et al.* (2001) presumem que na maioria das cidades brasileiras, as obras são projetadas e construídas sem considerar os impactos ambientais, resultando numa grande quantidade de entulho depositado em aterros sanitários. Parte desse material é abandonada em locais inadequados, quase sempre clandestinos, provocando danos às áreas sadias, como esgotamento e poluição de aquíferos, assoreamento das margens, poluição de cursos d'água e proliferação de vetores. No Brasil, o entulho de construção representa de 60 a 68 % da massa total dos resíduos sólidos urbanos (PINTO, 1997).

Considerando o grande desperdício nos canteiros de obras, a indústria da construção civil é responsável, por exemplo, pelo consumo de 20 a 50 % dos recursos naturais extraídos (ALAVEDRA *et al.* 1997, SIJOSTROM, 1997). O consumo dos agregados naturais varia de 1 a 8 ton/hab.ano. Além dos recursos extraídos, deve-se mencionar a geração da poluição, como emissão da poeira e gás

carbônico, principalmente durante a produção de cimento (JOHN, 1998 e PENTALLA, 1997).

Pelo fato de consumir grandes quantidades de matérias-primas naturais e, apesar de ser um grande gerador de resíduos, a construção civil mostra-se como uma alternativa para absorver parte dos resíduos sólidos industriais.

A necessidade de reciclar resíduos industriais tem motivado cada vez mais as investigações científicas, visando minimizar o impacto ambiental provocado pelo acúmulo destes resíduos por meio do desenvolvimento e de aplicações apropriadas dos mesmos (RESCHKE, *et al.* 2005).

John (1996) considera que o mercado da construção civil se apresenta como uma das mais eficazes alternativas para consumir materiais reciclados, pois a atividade da construção é realizada em qualquer região, com a ampliação cada vez maior do ambiente construído, o que permitirá reduzir os custos de transporte.

O setor de materiais de construção, apesar do desperdício no âmbito local, de modo geral já é o setor da economia que emprega o maior volume de resíduos reciclados (JOHN, 1997).

Nos últimos anos, a incorporação do resíduo de rocha ornamental em materiais de construção surge como uma das alternativas para diminuir os custos dos mesmos, além de agregar valor ao subproduto de rocha e reduzir os impactos ambientais e ainda minimizar os danos causados pela disposição inadequada da lama abrasiva.

Alguns pesquisadores vêm estudando e verificando o desempenho deste material; como por exemplo, na produção de argamassas (CALMON *et al.* 1997, SILVA 1998 e AFONSO 2005), tijolos cerâmicos (NEVES *et al.* 1999), peças cerâmicas (LIMA FILHO *et al.* 1999 e XAVIER 2006) e concretos (GONÇALVES, 2000), dentre outros trabalhos.

2.6.3 – Incorporação do resíduo de rochas ornamentais em argamassas

Este trabalho propõe a incorporação do resíduo em argamassas, onde o mesmo terá a função de agregado miúdo e filler na composição da mistura.

Os fillers são os agregados mais finos, constituídos de particular minerais de dimensões inferiores a 0,075 mm. Os fillers têm grãos de dimensões da ordem dos de cimento portland (PETRUCI, 1998).

As argamassas preparadas neste programa experimental não possuem como componente a cal, o que é comum em argamassas. Tal decisão promove redução de custos, pois a cal hidratada é um material com valor econômico considerável; portanto, a adição do resíduo de rocha agrega valor a este subproduto.

Além do apelo ambiental, pela reutilização de resíduos industriais, o uso de resíduos e subprodutos da indústria de beneficiamento de rochas em argamassas apresenta-se como uma alternativa para o aumento do desempenho desses materiais (MOURA, 2002).

Sendo assim, os materiais de construção apresentam-se como uma alternativa para a diminuição do crescente volume dos resíduos de rochas ornamentais. Isto porque o resíduo em questão é um material, em grande parte, constituído de fragmentos de rocha que possui características químicas, físicas, mecânicas e mineralógica que o habilitam para ser usado como adição mineral (agregado, *filler*).

O resíduo de rocha passa, então, de um rejeito industrial para um potencial componente de materiais de construção, amenizando o problema ambiental causado pelo crescente aumento de sua geração.

Silva (1998) mostra, com base nos resultados da caracterização do resíduo da serragem de blocos de granito e nas suas propriedades (físicas, mecânicas, *etc.*), que o resíduo de rocha ornamental é potencialmente viável para a aplicação na fabricação de argamassas de assentamento, além de minimizar os impactos ambientais na região produtora, pode proporcionar a construção de casas para a população.

2.6.3.1 – Viabilidade de aplicação do resíduo em construção de casas populares

Silva (1998), após estudos de potencialidades de aplicação do resíduo de rocha ornamental em materiais de construção, conclui que o reaproveitamento deste

material pode colaborar com a redução do custo da habitação, especialmente a popular, criando elementos de construção alternativos, para as populações de mais baixa renda.

Uma das necessidades básicas do homem é a habitação. Tendo em vista os custos relativos à construção civil tradicional, sobretudo com relação aos materiais de construção, a procura de novos sistemas construtivos e materiais que possam vir a minimizar os custos e também, diminuir os impactos ambientais, vem se tornando uma necessidade cada vez maior, tanto por parte do poder público quanto do privado.

O Brasil possui um déficit habitacional estimado em 7,8 milhões de domicílios, 77 % concentrados em famílias com até três salários mínimos (CASTELO e GARCIA, 2007).

Segundo dados da Fundação João Pinheiro (2007), os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo possuem respectivamente, um déficit da ordem de 580 mil e 125 mil unidades habitacionais.

Nesse sentido o uso de argamassas com o reaproveitamento de resíduos de rocha ornamental aparece como uma forma redução dos custos das moradias, economia de matérias-primas naturais e redução do potencial poluidor do resíduo, favorecendo o desenvolvimento sustentável.

A título de exemplificação, considera-se uma moradia de interesse social, desenvolvida no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense, com aproximadamente 55 m² de área construída. Tem-se a seguinte estimativa para assentamento e revestimento de alvenarias usuais (blocos cerâmicos de 19 x 19 x 9 cm):

- Volume de argamassa de revestimento de paredes e tetos, considerando uma espessura média de 2 cm : 6,14 m³
- Volume de argamassa de assentamento de alvenaria, com uma espessura média de 2 cm: 2,15 m³

Tem-se, então, um volume final de argamassa de 8,29 m³ por moradia, sem considerar os desperdícios durante a execução.

Para se ter uma idéia, este valor unitário, quando comparado ao déficit habitacional brasileiro de 7,8 milhões de domicílios, reafirma a necessidade de novas alternativas para a concepção de construções de interesse social, considerando um volume de aproximadamente 64,6 milhões de m³ de argamassa necessário para a confecção das mesmas.

Adotando-se uma argamassa com densidade de massa aparente no estado endurecido de 1800 kg/m³, têm-se em torno de 116,4 milhões de toneladas de argamassa para suprir a demanda do déficit habitacional brasileiro.

Se, e somente se, 1 % dessas argamassas fossem constituídas de resíduo de rocha ornamental, 1,16 milhões de toneladas de resíduo seriam reaproveitadas, promovendo a economia, do mesmo valor em toneladas, de matérias-primas naturais além do aspecto ambiental pela não disposição desses resíduos no meio ambiente.

De maneira análoga, pode-se estender essa estimativa para o Estado do Espírito Santo, assim como para o estado do Rio de Janeiro, devido a proximidade do pólo de beneficiamento de rochas sul capixaba e, também, devido ao pólo de beneficiamento de Santo Antonio de Pádua, no norte fluminense.

Sendo assim, o volume de argamassa necessário para suprir a demanda por moradias populares do Espírito Santo é de, aproximadamente 1 milhão de m³ o que equivale a 1,8 milhões de toneladas. No Estado do Rio de Janeiro um volume de 4,8 milhões de m³, aproximadamente 6,65 milhões de toneladas de argamassa.

Partindo-se da hipótese de 1 % de incorporação de resíduo em massa na composição das argamassas, pode ser retirado do meio ambiente 18 e 66,5 mil toneladas de resíduos dos estados do Espírito Santo e Rio de Janeiro, respectivamente.

É evidente que se faz pretensiosa a hipótese da construção desse número imediato de moradias populares, porém essas estimativas mostram a ordem de grandeza de aplicação do resíduo em argamassas.

Em decorrência, tem-se um incentivo aos construtores na busca por uma economia de matérias-primas e, também, uma forma do empresário do ramo de beneficiamento de granitos diminuir os impactos ambientais gerados pela disposição inadequada dos seus resíduos.

Uma oportunidade para atitudes sócio-ambientais por parte dos empresários do setor de rochas ornamentais são as centrais de recebimento, armazenamento e tratamento de resíduos, tais como a AAMOL e o CTR. Segundo o Inforochas (2006) com a criação de AAMOL os rejeitos industriais poderão ser utilizados como matéria-prima para a construção de civil, artesanato, construção de casas populares, pavimentação, fabricação de telhas, argamassas e tijolos.

Os custos relativos às multas junto aos órgãos ambientais, dificuldades relativas a aquisição de licenças de funcionamento, exploração e beneficiamento de rochas e obtenção de certificados ISO^S poderiam ser consideravelmente diminuídos, se os empresários do ramo de rochas investissem no reaproveitamento de resíduos. Uma das alternativas, exposta neste trabalho é a utilização em argamassas, sabendo-se da viabilidade de aplicação deste produto.

CAPÍTULO 3 – ARGAMASSA

3.1 – Aspectos Conceituais

Segundo a NBR 13281/2001, argamassa é uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada). É essencialmente um concreto sem agregado graúdo (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os aglomerantes são os elementos ativos da mistura, pois são eles os responsáveis pelo endurecimento da argamassa. São mais usados como aglomerantes, os aglomerantes hidráulicos. São assim definidos por só endurecerem por meio de reações com a água, como também por formar um produto resistente à água depois de endurecidos (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Os aglomerantes mais usados são a cal hidratada e o cimento Portland.

As argamassas são largamente usadas na indústria da construção civil, onde são usadas em assentamento de alvenarias e cerâmico, além de revestimento de paredes e tetos. São divididas em dois grandes grupos em função do seu uso:

- Argamassas de Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos;
- Argamassas Colantes;
- As argamassas de múltiplo uso, termo utilizado para designar aquelas que podem ser empregadas em assentamento de alvenaria de vedação, revestimento de paredes e tetos, e ainda para revestimento de pisos e contrapisos têm seus constituintes (cimento, cal, areia) e sua composição determinados pela finalidade de emprego do produto, de modo a conferir propriedades necessárias ao bom desempenho (SELMO *et al.* 2002).

Estudos de novos agregados para argamassas se justificam, pois são largamente utilizadas na construção civil. MARTINS NETO (1999) estima que o volume de argamassa produzida no Brasil é de aproximadamente 85 milhões de metros cúbicos/ano, correspondendo a um consumo de aproximadamente 40 % da produção de cimento Portland.

3.2 – Caracterização Tecnológica – Requisitos e Especificação

As normas técnicas nacionais NBR 13749/1996 e NBR 13281/2001 fixam condições exigíveis e os requisitos obrigatórios para as argamassas utilizadas em assentamento e revestimento de paredes e tetos. A Tabela 3.1 mostra os requisitos mecânicos e reológicos.

A Tabela 3.2 mostra os valores mínimos especificados para a resistência de aderência (Ra) em MPa, de acordo com as prescrições da NBR 13749/1996.

Tabela 3.1 - Exigências Mecânicas e Reológicas para Argamassas.

Características	Identificação	Limites	Método
Resistência à Compressão aos 28 Dias (MPa)	I	$\geq 0,1$ e $< 4,0$	NBR 13279
	II	$\geq 4,0$ e $\leq 8,0$	
	III	$> 8,0$	
Capacidade de Retenção de Água (%)	Normal	≥ 80 e ≤ 90	NBR 13277
	Alta	> 90	
Teor de Ar Incorporado (%)	A	< 8	NBR 13278
	B	≥ 8 e ≤ 18	
	C	> 18	

Tabela 3.2 - Limites de Resistência de Aderência à Tração para Emboço em Camada Única.

Local		Acabamento	Ra
Parede	Interna	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,20$
		Cerâmica ou laminado	$\geq 0,30$
	Externa	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,30$
		Cerâmica ou laminado	$\geq 0,30$
Teto		Pintura ou base para reboco	$\geq 0,20$

3.3 – Propriedades e Características

Para que as argamassas tenham um bom desempenho tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, devem possuir determinadas propriedades e características. Dessa forma, AFONSO (2005) diz que os traços empregados são proporcionados de forma a garantir certas características às argamassas, sejam em termos de aplicação (plasticidade, trabalhabilidade, *etc.*) ou em termos de propriedades (resistência à compressão, aderência, absorção, *etc.*).

Para assentamento de blocos de alvenaria de vedação as argamassas devem possuir características apropriadas a este fim, tais como:

- Alta retenção de água;
- Baixo teor de ar incorporado;
- Aderência entre blocos;
- Resistência à compressão;
- Durabilidade.

Para revestimentos as argamassas são utilizadas internamente para tetos e interna e externamente para paredes. São destinadas a proteger as paredes de tijolos ou blocos, de forma a ajudar a proteger a edificação contra a penetração da chuva e de outros fenômenos atmosféricos, aumentando a durabilidade por meio de um revestimento de superfícies cujo acabamento final não é considerado satisfatório, obtendo um efeito estético melhorado. Para tanto é necessário que cumpram os seguintes requisitos de desempenho:

- Capacidade de absorver deformações (movimento térmico, higroscópico e diferencial entre os componentes);
- Aderência à base (que depende da capacidade do revestimento de absorver deformações, da rugosidade da base e dos cuidados com a sua preparação);
- Resistência à compressão e ao desgaste superficial;
- Baixa permeabilidade ou impermeabilidade à água;
- Baixa absorção de água;
- Durabilidade.

As características e os requisitos de desempenho citados devem ser obtidos principalmente na fase de escolha de um traço adequado.

3.4 – Patologias em Argamassas mal Dimensionadas

Em revestimentos mal dimensionados, isto é, onde não houve uma escolha adequada dos materiais, problemas de execução ou misturas inadequadas para o

qual o revestimento será submetido, é comum se observar o aparecimento de patologias que além de prejudicar o seu desempenho, afetam negativamente o aspecto estético das construções.

A NBR 13749/1996 em seus anexos A e B informa sobre alguns fenômenos patológicos e suas possíveis causas, que podem ser observados em um breve período após a aplicação do revestimento:

- Fissuras mapeadas: podem formar-se pela retração da argamassa, por excesso de finos no traço, quer sejam de aglomerantes, quer sejam de finos no agregado;
- Fissuras Geométricas: uma das causas de seu aparecimento é devido à retração da argamassa de assentamento;
- Pulverulência: pode ser causada por excesso de finos no agregado ou traço pobre em aglomerante.

Além dessas patologias citadas pela NBR 13749/1996, é comum observarmos nos revestimentos em argamassas o aparecimento de outras patologias que surgem em função do tempo, uma vez que a ABNT não quantifica o espaço de tempo definido como “um breve período”. É comum o aparecimento de eflorescências, devido à percolação de sais solúveis e excesso de água na mistura, e deslocamento de placas que ocorre pela falta de resistência à aderência (R_a) do emboço. Estas patologias, que danificam o revestimento, podem ser evitadas aplicando-se às argamassas um processo de mistura e formulações de seus constituintes mais adequado. Para tanto, o planejamento de experimentos surge como mais uma ferramenta para determinação de traços em argamassas e concretos.

A Figura 3.1 ilustra alguns exemplos da ocorrência de patologias em argamassas.

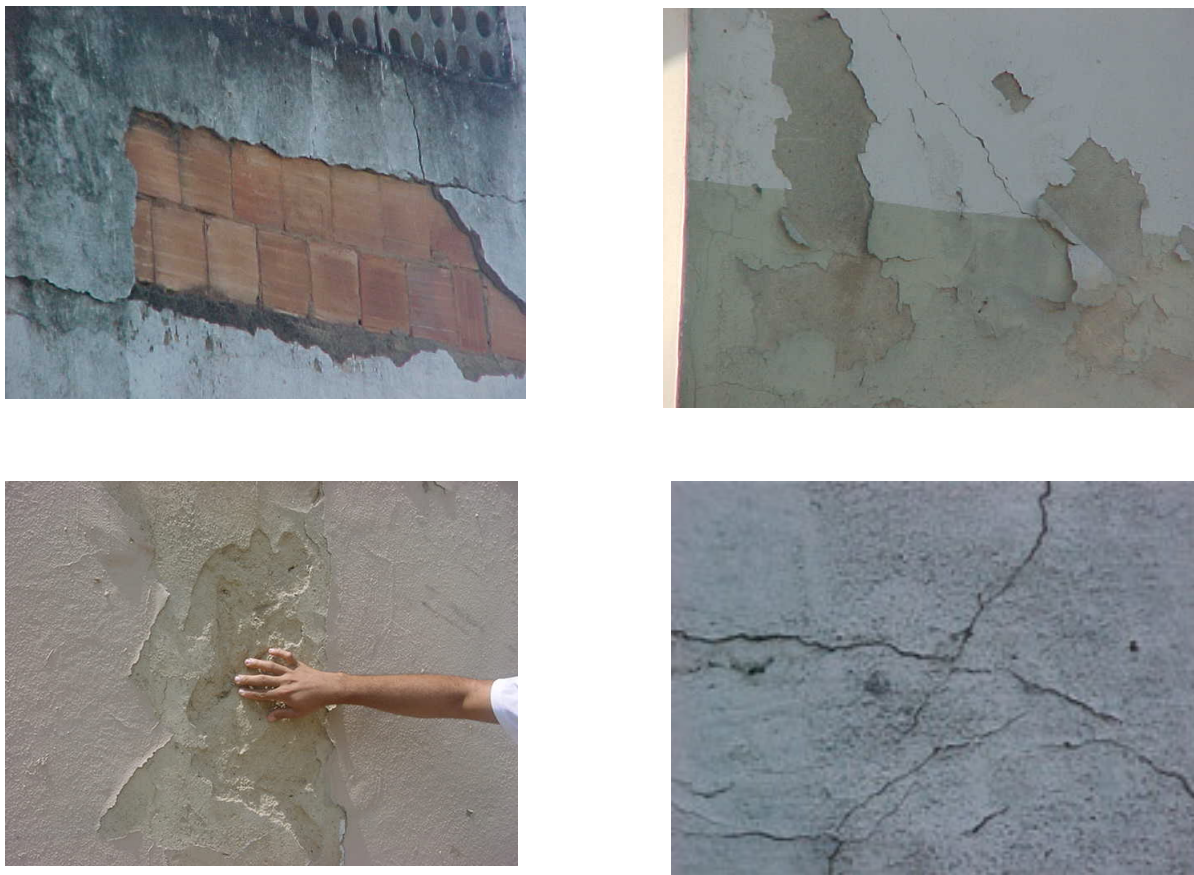


Figura 3.1 – Alguns Exemplos de Patologias em Argamassas

3.5 – Propriedades no Estado Fresco – Trabalhabilidade e Consistência

O comportamento das argamassas no estado fresco pode ser descrito como uma associação de propriedades. A trabalhabilidade resulta da conjunção de diversas propriedades, entre elas: consistência, plasticidade, retenção de água, exsudação, coesão, estruturação interna, tempo de pega e adesão inicial (BAUER *et al.* 2005).

Segundo Petrucci (1998) a trabalhabilidade é a propriedade do concreto fresco que identifica sua maior ou menor aptidão para ser empregado com determinada finalidade sem perda da sua homogeneidade. O termo consistência refere-se ao grau de plasticidade da massa, isto é, maior ou menor facilidade de deformar-se sob a ação de cargas. A consistência é um dos fatores que influenciam a trabalhabilidade, porém, não pode ser confundida com a mesma.

A NBR 13276/1995 prescreve o método de ensaio para a determinação do índice de consistência padrão, por meio de uma relação entre a massa total seca da argamassa, a quantidade de água e a trabalhabilidade exigida.

CAPÍTULO 4 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

4.1 – Uma Abordagem Geral

O planejamento de experimentos proporciona uma redução do tempo de execução e obtenção de respostas, garantindo um maior detalhamento da informação. Este detalhamento envolve muitos fatores, tais como, determinar quais variáveis influenciam mais nos resultados, atribuir valores às variáveis influentes de modo a otimizar os resultados, minimizar a variabilidade dos resultados e a influência de variáveis incontroláveis (OLIVEIRA e SILVA, 2003).

Alguns dos problemas encontrados ao realizar os ensaios são decorrentes da necessidade de estudar simultaneamente o efeito dos fatores com diferentes níveis. Nesse caso, observa-se que o número de testes requeridos para a experimentação tende a crescer à medida que a quantidade de fatores e níveis aumenta. Isso torna os experimentos em escala industrial inviáveis economicamente, visto que os custos e o tempo de execução são elevados (GALDAMEZ e CARPINETTI, 2004).

O planejamento de experimentos com misturas tem sido uma ferramenta utilizada em diversas áreas da indústria, tais como: alimentos, materiais de construção, detergentes, tintas, vidros, metais, produtos químicos, *etc.*. Alguns autores que seguem esta linha de pesquisa podem ser citados, tais como: ALEXANDRE (2000), SENA *et al.* (2001), OLIVEIRA e SILVA (2003), GALDAMEZ e CARPINETTI (2004), COSCIONE *et al.* (2005), VALDECIR e CINCOTTO (2005), XAVIER (2006), dentre outros.

Destacam-se, segundo Barros Neto (2003), os objetivos que buscam a utilização das técnicas estatísticas de planejamento experimental, que são:

- A redução do número de ensaios (utilização de menor tempo) sem prejuízo da qualidade de informação;
- O estudo simultâneo de diversas variáveis separando seus efeitos;
- A determinação da confiabilidade dos resultados;
- A realização da pesquisa em etapas num processo com número reduzido de ensaios;
- A representação do processo estudado por meio de expressões matemáticas;
- A elaboração de conclusões a partir de resultados quantitativos e qualitativos;
- Menos recursos materiais e humanos;
- Conhecimento das interações entre os componentes da mistura;
- Possibilidade de utilização de ferramentas matemáticas para simulação.

Segundo MONTGOMERY (1997), as técnicas de planejamento e análise de experimentos são utilizadas basicamente para melhorar as características da qualidade dos produtos ou processos de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos da empresa (material, tempo dos funcionários, disponibilidade dos equipamentos, *etc.*).

Na indústria da construção civil, para a confecção dos materiais de construção, tais como: tijolos, argamassas e concretos, é necessária a combinação

de seus constituintes (cimento, argila e agregados) que possuem características diferentes, seja de graduação ou de propriedades físicas e mecânicas. ALEXANDRE (2000) utilizou uma metodologia de planejamento de experimentos para a identificação das melhores proporções de mistura entre as camadas de argila de Campos dos Goytacazes-RJ a serem usadas em processos industriais de fabricação de peças cerâmicas.

Portanto, torna-se imperativo o conhecimento das propriedades que esses materiais de construção terão como resultado dessas misturas em diferentes proporções de seus constituintes, de forma que se atenda às normas técnicas nacionais e que tenha estabilidade com o tempo.

Dessa maneira, é de fundamental importância o desenvolvimento de técnicas de planejamento de experimentos que permitam determinar as proporções da mistura, para que se satisfaça uma determinada propriedade e característica do material.

De uma maneira geral, para confecção de materiais de construção, é bastante comum a mistura de dois ou mais componentes na sua composição. No entanto, não se conhece *a priori* o comportamento das propriedades que resultará da mistura, em função de todas as possíveis proporções usadas de cada material.

Muitos estudos já foram realizados a respeito de adição de resíduos de rochas ornamentais em materiais de construção, porém pouco se sabe sobre a melhor proporção de resíduo a ser adicionada aos materiais para que se obtenha um bom desempenho. As propriedades dos materiais (resistência, absorção, trabalhabilidade, durabilidade, *etc.*), muitas vezes, são determinadas empiricamente, sem que haja um planejamento experimental racional.

No contexto deste trabalho, a incorporação do resíduo de rocha ornamental, como adição mineral às argamassas, deve ser feita de tal forma que a mistura resultante seja um produto com um desempenho satisfatório, ou seja, que possua as características e propriedades necessárias a sua conformidade perante as normas técnicas vigentes.

Sendo assim, em busca de um modelo mais adequado para as misturas, principalmente com relação às misturas com resíduos, este trabalho se baseia na modelagem numérico-experimental de misturas por meio da Metodologia de Rede

Simplex (*Simplex-Lattice Design*), apresentado de forma descritiva por Cornell (1990) e Barros Neto *et al.* (2003).

O planejamento de experimentos, adotado serve, não só para melhoria das argamassas, obtidas a partir de um traço, como também, um melhor e maior aproveitamento do resíduo disponível e economia de matérias-primas naturais, minimizando-se desta maneira impactos mais drásticos ao meio ambiente.

Essas proporções serão calculadas matematicamente e, após o modelo numérico estabelecido para a determinação da propriedade de interesse das argamassas, se seguirá uma comprovação experimental dos modelos gerados pela rede simplex.

O estudo de misturas terá como objetivo a determinação de traços com potencialidade aos diversos empregos de argamassas de revestimento de paredes e tetos, sendo neste trabalho analisada uma propriedade no estado endurecido (resistência à compressão), além do consumo de cimento e de resíduo.

4.2 – Experimentos com Misturas em Argamassas

Experimentos com misturas podem ser definidos como experimentos cuja resposta assumida depende somente das proporções relativas dos constituintes presentes na mistura e não na quantidade total da mistura (Cornell, 1990).

A mistura em argamassas pode ser definida como a determinação das proporções entre seus constituintes; no caso, cimento, agregados, água e resíduo (adição mineral). As propriedades e características que se desejam obter são funções desta mistura. Portanto, é importante encontrar um melhor proporcionamento a partir do tipo de cimento e agregados escolhidos, para estabelecer uma composição que proporciona o melhor desempenho com o menor custo.

4.3 – Planejamento em Rede Simplex – Superfície de Resposta

Este trabalho propõe a definição de um modelo numérico-experimental para a determinação de traços mais adequados à produção de argamassas com o máximo de incorporação de resíduo, porém que apresentem melhor desempenho. Desta forma, foi usada, para o proporcionamento dos constituintes (cimento-areia-resíduo) das argamassas, a metodologia de rede simplex discutida por Cornell (1990) e Barros Neto *et al.* (2003).

Depois de definidos os modelos matemáticos mais adequados às restrições experimentais impostas para as argamassas, seguiram-se à comprovação experimental e à análise estatística dos modelos.

A metodologia usada neste trabalho buscou a identificação das melhores proporções de mistura entre os constituintes das argamassas que permitem a análise de proporções, e que podem ser feitas não só visando melhoria das propriedades, como também uma utilização racional do ponto de vista de uma melhor incorporação do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais.

Em uma mistura, a quantidade total se mantém constante, variando apenas as proporções de seus componentes. Se a quantidade total é mantida constante, o valor da resposta varia quando mudanças são feitas nas proporções relativas dos componentes.

Experimentos freqüentemente satisfazem a definição requerida pela fixação da quantidade total dos constituintes, sendo o mesmo valor para toda mistura. As suas proporções expressam a fração onde elas devem somar a unidade, especialmente se elas são somente constituintes para serem estudados juntos na mistura.

De acordo com a Equação 4.1, a soma das proporções dos componentes não negativos ou fração é a unidade, onde x_i representa a proporção do i -ésimo componente. Para especificar a composição da mistura, só é preciso fixar as proporções de $q - 1$ componentes. A proporção do último componente será sempre o que falta para completar 100 % da mistura. A soma das proporções dos diversos componentes de uma mistura é sempre 100 % (Equação 4.2).

$$x_i \geq 0 \quad i=1,2,3,\dots,q \quad (4.1)$$

e

$$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1,0 \quad (4.2)$$

Satisfazendo-se as restrições das Equações 4.1 e 4.2, significa que a composição de uma mistura será formada pela adição das quantidades não negativas juntas. Em virtude das restrições sobre os x_i , mostradas nas Equações 4.1 e 4.2, a descrição geométrica do espaço contendo os q componentes, consiste em todos os pontos sobre ou dentro de uma região experimental de dimensões $(q - 1)$.

O espaço simplex corresponde aos pontos de resposta de um planejamento de experimentos, ou também, a superfície de resposta para dados experimentais. A metodologia da superfície de resposta é um conjunto de técnicas de planejamento e análise de experimentos usados na modelagem matemática de respostas. Ou seja, procura-se identificar o relacionamento que existe entre os parâmetros, representado por variáveis quantitativas, tais como tempo, velocidade, pressão, temperatura, *etc.*, e as respostas do sistema analisado (HILL & HUNTER, 1966; MYERS & MONTGOMERY, 1995).

Para $q = 2$ componentes, o fator espaço simplex é uma linha reta. Com três componentes $q = 3$ o espaço simplex é um triângulo equilátero e para $q = 4$ um tetraedro. Barros Neto *et al.* (2003) exemplificam a descrição do espaço experimental da seguinte forma:

Para uma mistura binária, isto é, uma mistura formada por apenas dois componentes ($q = 2$) a Equação 4.2 reduz-se a $x_1 + x_2 = 1$. No sistema de eixos mostrado na Figura 4.1 esta equação é representada pela reta $x_2 = 1 - x_1$. Todas as possíveis misturas dos dois componentes correspondem a pontos localizados sobre essa reta. Sendo assim, no estudo de misturas, o espaço experimental fica restrito aos pontos da reta, ou seja, torna-se unidimensional.

A Figura 4.2 representa o fator espaço de três componentes ($q = 3$), e a Equação (4.2) torna-se $x_1 + x_2 + x_3 = 1$. A Figura 4.3 representa a distribuição dos componentes nesse espaço. No interior do triângulo os pontos representam misturas

nas quais nenhum dos componentes está ausente, isto é, $x_1 > 0$, $x_2 > 0$ e $x_3 > 0$. O centróide do triângulo corresponde às misturas com proporções iguais (1/3, 1/3, 1/3) para cada componente, e a interação na qual um dos três componentes não está presente, é representada por pontos sobre as arestas do triângulo. Os vértices do triângulo são representados pelos componentes puros, ou seja, $x_i = 1$, $x_j = 0$ para $i, j = 1, 2$ e 3 , $i \neq j$.

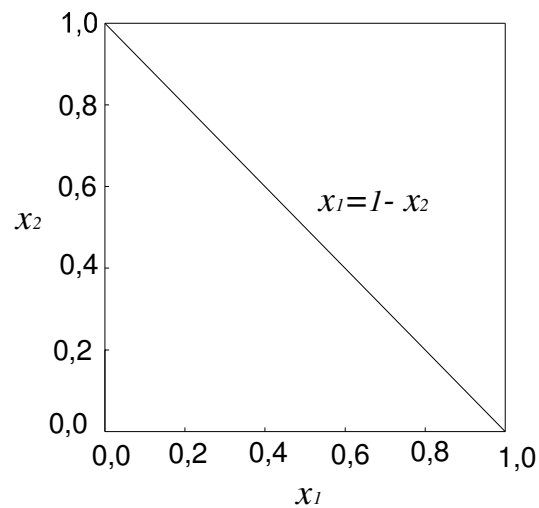


Figura 4.1 - Espaço Experimental para Misturas de dois Componentes Limitados pela Reta $x_2 = 1 - x_1$

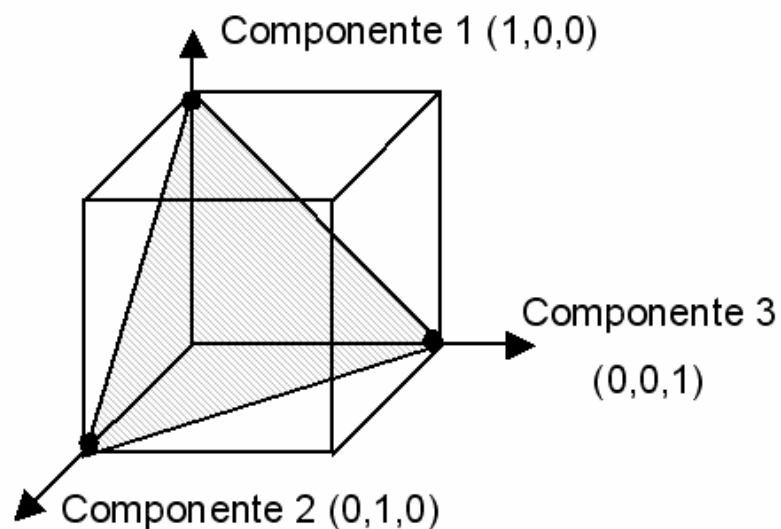


Figura 4.2 - Espaço Simplex para Três Componentes (superfície de resposta).
(Cornell, 1990)

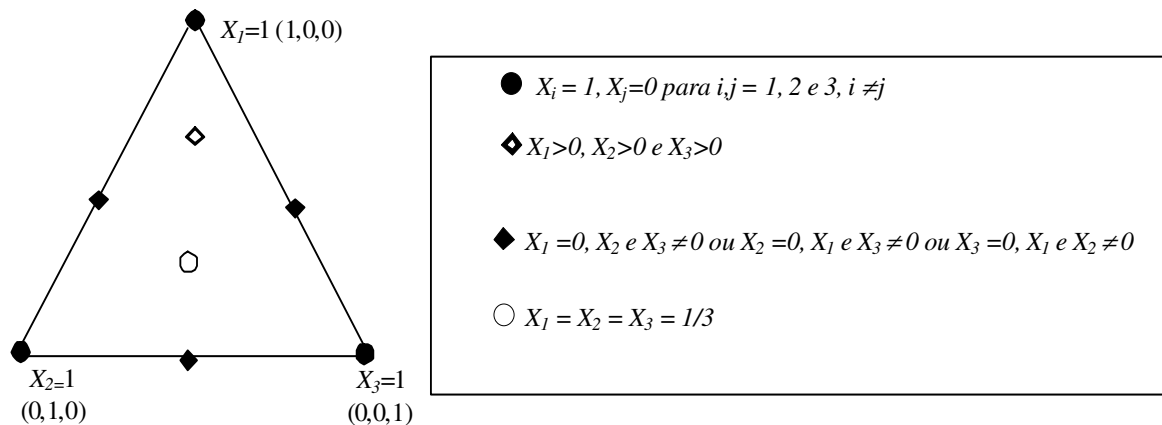


Figura 4.3 – Distribuição de Pontos no Espaço Simplex. (ALEXANDRE, 2000)

4.4 – Projeto em Rede Simplex: Formulação dos Modelos Matemáticos

Cornell (1990) associa modelos polinomiais para ajustar dados que são coletados em pontos do projeto experimental.

Para acomodar uma equação polinomial que represente uma superfície de resposta sobre uma região simplex, uma escolha natural seria um plano cujos pontos são distribuídos igualmente sobre todo espaço simplex. Um arranjo de pontos consistindo em uma distribuição uniforme sobre uma superfície simplex é conhecido como *lattice* (rede).

Uma rede pode ter uma correspondência especial para uma equação polinomial específica. Por exemplo, para suportar um modelo polinomial de grau m e q componentes sobre a rede simplex $\{q, m\}$, consistindo de pontos cujas coordenadas são definidas pelas combinações das proporções dos componentes, a proporção assumida para cada um deles toma $m+1$ valores igualmente espaçados de 0 a 1, como:

$$x_i = 0, 1/m, 2/m, \dots, 1 \quad (4.3)$$

Onde a rede simplex $\{q, m\}$ consiste em todas as possíveis combinações de mistura entre os componentes, onde as proporções da Equação 4.3 para cada componente são usadas.

Exemplificando para uma equação de primeiro grau ($m = 1$) e $q = 2$, tem-se uma reta $x_2 = 1 - x_1$ onde os pontos da rede se situam sobre esta reta.

Em um sistema contendo três componentes ($q = 3$) o fator espaço é um triângulo equilátero (espaço que neste trabalho será utilizado). Deixando cada componente assumir as proporções $x_i = 0, 1/2$ e 1 para $i = 1, 2$ e 3 , com $m = 2$ para as proporções na Equação 4.3.

Usando um modelo de segundo grau para representar as respostas sobre a superfície do triângulo, tem-se a rede simplex $\{3, 2\}$ por meio de seis pontos sobre o contorno do triângulo, onde $(x_1, x_2, x_3) = (1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1), (1/2, 1/2, 0), (1/2, 0, 1/2), (0, 1/2, 1/2)$. Os três pontos definidos por $(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)$, representam os componentes puros, e esses são os vértices do triângulo.

Os pontos $(1/2, 1/2, 0), (1/2, 0, 1/2), (0, 1/2, 1/2)$ representam misturas binárias com $x_i = x_j = 1/2, x_k = 0, k \neq i, j$ e essas misturas binárias são localizadas no meio das arestas do triângulo. A rede simplex $\{3,2\}$ é apresentada na Figura 4.4.

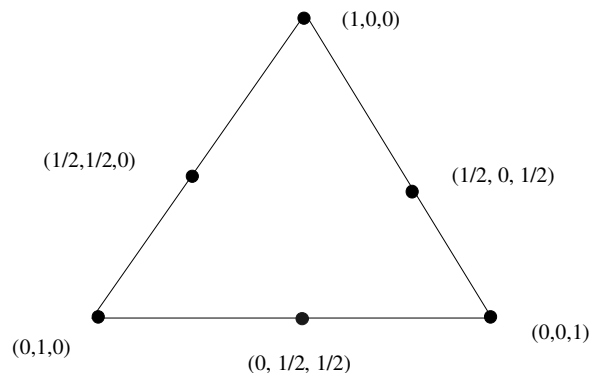


Figura 4.4 – Rede Simplex $\{3,2\}$

O arranjo de pontos numa rede simplex representa a ordem dos componentes da mistura, sendo simétrica à sua distribuição em relação aos vértices e ao lado do triângulo.

O número de pontos em uma rede simplex $\{q,m\}$ é $\binom{q+m-1}{m} = \frac{(q+m-1)!}{m!(q-1)!}$, considerando a notação $\binom{a}{b} = \frac{a!}{b!(a-b)!}$. Para um simplex $\{3, 2\}$, por exemplo, o número de pontos é $\binom{3+2-1}{2} = 6$, como foi mostrado geometricamente na Figura 4.4. Em uma rede simplex $\{q,m\}$ os pontos correspondem a componentes puros, misturas binárias, ternárias, até misturas que consistem em no máximo componentes de grau m .

4.5 – Equações Polinomiais Canônicas

Segundo Cornell (1990), a forma geral da equação de regressão que pode ajustar os dados coletados em uma rede simplex $\{q, m\}$ decorre do seguinte procedimento: primeiro se calcula a equação polinomial de grau m que é escrita genericamente como:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_i^q \sum_{\leq j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_i^q \sum_{\leq j}^q \sum_{\leq k}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (4.4)$$

Onde são incluídas equações até o grau de m . O número de termos da Equação 4.4 é $\binom{q+m}{m}$, mas devido aos termos da mesma terem sentido somente sujeitos às restrições $x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1$, sabendo-se ainda que os parâmetros $\beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ijk}, \dots$ associados com os termos não são únicos, pode-se fazer a substituição por

$$x_q = 1 - \sum_{i=1}^{q-1} x_i \quad (4.5)$$

Fazendo-se a substituição da Equação 4.5 na Equação 4.4 remove-se a dependência entre os termos x_i , não afetando o grau do polinômio. O efeito da

substituição da Equação 4.5 em 4.4 é que η torna-se uma equação de grau m em $(q-1)$ componentes, x_1, x_2, \dots, x_{q-1} com $\binom{q+m-1}{m}$ termos.

Os números de pontos em uma rede simplex $\{q, m\}$ para $3 \leq q \leq 10$, $1 \leq m \leq 4$, onde o número de níveis para cada componente é $m+1$ estão na Tabela 4.1 (CORNELL, 1990).

Tabela 4.1 - Número de Experimentos em uma Rede Simplex $\{q, m\}$.

Grau do Modelo (m)	Número de Componentes (q)							
	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3	4	5	6	7	8	9	10
2	6	10	15	21	28	36	45	55
3	10	20	35	56	84	120	165	220
4	15	25	70	126	210	330	495	715

Exemplificando para $m = 1$, tem-se:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^q \beta_i x_i \quad (\text{polinômio de } 1^0 \text{ grau}) \quad (4.6)$$

Aplicando a condição $\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1,0$ e multiplicando-a pelo termo β_0 , tem-se:

$$\eta = \beta_0 \left(\sum_{i=1}^q x_i \right) + \sum_{i=1}^q \beta_i x_i = \sum \beta_i^* x_i \quad (4.7)$$

Onde, $\beta_i^* = \beta_0 + \beta_i$ para todo $i = 1, 2, 3, \dots, q$. O número de termos na Equação 4.7 é q , que é o número de pontos na rede $\{q, m\}$. O parâmetro β_i^* , $i = 1, 2, 3, \dots, q$, tem significado simples e claro em termos de descrição da forma da superfície de respostas sobre a região simplex.

Para $m = 2$, o polinômio geral de 2^0 grau com q variáveis é representado pela Equação 4.8.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i=1}^q \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j \quad (4.8)$$

Substituindo a identidade $x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1$ e $x_i^2 = x_i \left(1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^q x_j \right)$ (4.9)

Tem-se:

$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i^* x_i + \sum_{i<j}^q \beta_{ij}^* x_i x_j \quad (4.10)$$

O número de termos da Equação 4.10 é $q(q+1)/2$

A comparação feita entre as Equações 4.8 e 4.10 revela que os parâmetros da Equação 4.10 são simples funções dos parâmetros da Equação 4.8 com

$$\beta_i^* = \beta_0 + \beta_i + \beta_{ii} \quad e \quad \beta_{ij}^* = \beta_{ij} - \beta_{ii} - \beta_{jj}, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, q, \quad i < j$$

A Equação 4.10 pode ser escrita ainda na forma homogênea

$$\eta = \sum_{i=j}^q \delta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}^q \delta_{ij} x_i x_j = \sum_{i \leq j}^q \delta_{ij} x_i x_j \quad (4.11)$$

Que é a resultante da multiplicação de $\sum_{i=1}^q \beta_i^* x_i$ na Equação 4.10 pela identidade $(x_1 + x_2 + \dots + x_q) = 1$, simplificando os termos.

A fórmula do polinômio de 3º grau é dada, para o modelo cúbico completo ou polinômio $\{q, 3\}$, por:

$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i^* x_i + \sum_{i<j}^q \beta_{ij}^* x_i x_j + \sum_{i<j}^q \delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) + \sum_{i<j<k}^q \beta_{ijk}^* x_i x_j x_k \quad (4.12)$$

A fórmula simplificada para o caso polinomial cúbico especial cujos termos $\delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j)$ não são considerados, é dada por:

$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i^* x + \sum_{i<j}^q \beta_{ij}^* x_i x_j + \sum_{i<j<k}^q \beta_{ijk}^* x_i x_j x_k \quad (4.13)$$

Os asteriscos podem ser removidos para os β_i^* , β_{ij}^* , β_{ijk}^* e em seus lugares usar β_i , β_{ij} , β_{ijk} para todos os polinômios $\{q,m\}$, pois os asteriscos foram atribuídos para os parâmetros somente para mantê-los no polinômio geral da Equação 4.4, diferenciados dos parâmetros da derivada do polinômio $\{q,m\}$.

O número de termos em um polinômio $\{q,m\}$ é função de m , do grau da equação, como também do número de componentes q . O número de componentes para vários valores de q estão listados na Tabela 4.2, para os modelos linear, quadrático, cúbico especial e cúbico completo (CORNELL, 1990).

Tabela 4.2 - Número de Termos em Polinomiais Canônicas.

Número de Componentes (q)	Linear	Quadrático	Cúbico Especial	Cúbico Completo
2	2	3	—	—
3	3	6	7	10
4	4	10	14	20
5	5	15	25	35
6	6	21	41	56
7	7	28	63	84
8	8	36	92	120
...
q	q	$q(q+1)/2$	$q(q^2+5)/6$	$q(q+1)(q+2)/6$

A resposta para componentes puros é denominada por η_i e para misturas binárias com proporções iguais (50 %,50 %) para componentes i e j por η_{ij} e ainda para misturas ternárias com iguais proporções dos componentes i, j, k por η_{ijk} . A Figura 4.5 ilustra a nomenclatura de respostas para pontos da rede simplex $\{3,2\}$ e $\{3,3\}$.

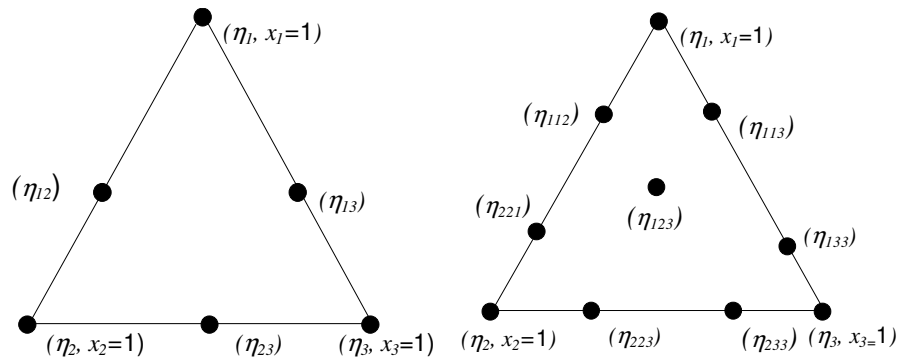


Figura 4.5 – Nomenclatura de Respostas para Pontos da Rede Simplex {3,2} {3,3}. (CORNELL, 1990).

Analisando a Figura 4.5, os subscritos sob as respostas designam três características, que são:

- Números iguais indicam que as frações dos componentes presentes na mistura são iguais
- Números distintos ou letras indicam os componentes presentes na mistura
- O número de vezes que as letras ou números aparecem no subscrito indica as relativas proporções assumidas pelo componente na mistura

A Tabela 4.3 lista as nomenclaturas de respostas, usadas para misturas de três e quatro elementos (SCHEFFÉ, 1958 apud CORNELL, 1990).

Tabela 4.3 – Nomenclatura Usada em Misturas para $q = 3$ e $q = 4$ componentes.

Respostas	Composição das Misturas						
	$q = 3$			$q = 4$			
	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_4
η_1	1	0	0	1	0	0	0
η_2	0	1	0	0	1	0	0
η_{12}	1/2	1/2	0	1/2	1/2	0	0
η_{23}	0	1/2	1/2	0	1/2	1/2	0
η_{123}	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	0
η_{112}	2/3	1/3	0	2/3	1/3	0	0
η_{233}	0	1/3	2/3	0	1/3	2/3	0
η_{1112}	3/4	1/4	0	3/4	1/4	0	0
η_{1223}	1/4	1/2	1/4	1/4	1/2	1/4	0
η_{1144}				1/2	0	0	1/2
η_{2344}				0	1/4	1/4	1/2
η_{1234}				1/4	1/4	1/4	1/4

4.6 – Parâmetros dos Polinômios em Função das Respostas nos Pontos Experimentais

Para obter os parâmetros de um modelo polinomial de grau m em função das respostas η_i , η_{ij} e η_{ijk} , deve-se resolver o sistema de $\binom{q+m-1}{m}$ equações simultâneas. Esse número não corresponde somente ao número de parâmetros de uma equação polinomial $\{q, m\}$, mas também ao número de pontos da rede e, conseqüentemente, ao número de respostas η , medidas nos pontos da rede simplex $\{q, m\}$. Como exemplo, se o modelo de segundo grau da Equação 4.10 for usado em um sistema de três componentes, tendo as respostas esperadas nos pontos da rede simplex $\{3, 2\}$ especificados na Figura 4.5, tem-se substituindo

$$\eta_i \text{ em } x_i=1, \quad x_j=0, \quad i, j = 1,2,3, \quad j \neq i$$

$$\eta_{ij} \text{ em } x_i=1/2, x_j=1/2, \quad x_k=0 \quad i < j \quad k \neq i, j$$

na Equação 4.13

$$\eta = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 \quad (4.14)$$

O que resulta em $\left(\frac{3+2-1}{2}\right) = 6$ equações, ou seja,

$$\eta_1 = \beta_1, \quad \eta_2 = \beta_2, \quad \eta_3 = \beta_3$$

$$\eta_{12} = \beta_1(1/2) + \beta_2(1/2) + \beta_{12}(1/4)$$

$$\eta_{13} = \beta_1(1/2) + \beta_3(1/2) + \beta_{13}(1/4)$$

$$\eta_{23} = \beta_2(1/2) + \beta_3(1/2) + \beta_{23}(1/4)$$

Resolvendo-se as seis equações simultaneamente (e isso é possível desde que o número de equações seja igual ao número de parâmetros desconhecidos), encontram-se as fórmulas para os parâmetros β_i e β_{ij} , $i, j = 1, 2$ e 3 , $i < j$ com

$$\beta_1 = \eta_1, \quad \beta_{12} = 4\eta_{12} - 2\eta_1 - 2\eta_2$$

$$\beta_2 = \eta_2, \quad \beta_{13} = 4\eta_{13} - 2\eta_1 - 2\eta_3 \quad (4.15)$$

$$\beta_3 = \eta_3, \quad \beta_{23} = 4\eta_{23} - 2\eta_2 - 2\eta_3$$

Os parâmetros β_i representam as respostas para os componentes puros, e β_{ij} são as misturas binárias envolvendo os componentes i e j com as respectivas respostas.

Para o caso geral de q componentes cujo modelo de 2º grau da Equação 4.10 contém $q(q+1)/2$ termos e as respostas são posicionadas nos pontos de uma rede simplex $\{q, 2\}$, as fórmulas para expressarem os parâmetros β_i e β_{ij} em termos das respostas η_i e η_{ij} são idênticas às das Equações 4.15, para q geral e $i, j, = 1, 2 \dots q, i < j$,

$$\beta_i = \eta_i, \quad \beta_{ij} = 4\eta_{ij} - 2(\eta_i + \eta_j) \quad (4.16)$$

Já para sistemas polinomiais de graus mais elevados, casos onde $m > 2$, as fórmulas podem ser derivadas de forma semelhante ao modelo de 2º grau.

4.7 – Estimativa de Parâmetros em Polinômios $\{q,m\}$

O conjunto de todos os valores possíveis numa dada situação é o que se chama em estatística de população. O objetivo de qualquer planejamento estatístico é obter conclusões sobre a população. Uma parte da população, que é selecionada para se fazer inferências sobre a mesma, é denominada de amostra. Se os parâmetros da população seguem uma distribuição normal, então as estimativas destes parâmetros possuem 95 % de probabilidade de estarem neste intervalo.

Da mesma forma, em uma análise de misturas, os valores a que se referem às estimativas são valores amostrais e não valores populacionais. Os estatísticos costumam empregar símbolos latinos para representar valores amostrais, reservando o alfabeto grego para parâmetros populacionais.

Para se determinar os valores β 's seria preciso um número infinito de experimentos. Obviamente o que se calcula, a partir de experiências de misturas, é apenas estimativa desses valores.

Os parâmetros em um polinômio $\{q,m\}$ são expressos como simples função das respostas nos pontos da rede simplex $\{q, m\}$. Assim, para se estimar os parâmetros em modelos usando valores de respostas observados na superfície triangular, os cálculos de b_i e b_{ij} estimam β_i e β_{ij} , respectivamente, sendo idênticos à Equação 4.16 com os valores observados substituídos para η_i e η_{ij} .

Para valores de respostas observadas em u -ésimos ensaios, $1 \leq u \leq N$ denotados por y_u , a forma é expressa por $y_u = \eta_u + \varepsilon_u$, onde os erros aleatórios (ε_u) para todo $u \leq 1 \leq N$, são distintos e identicamente distribuídos, assumindo ter média zero e variância (σ^2) em todas as combinações de níveis.

A notação usada para descrever as respostas observadas terá a mesma nomenclatura que foi usada para as respostas esperadas, sendo y_i para os componentes puros, e para os valores observados em misturas binárias pelos componentes i e j por y_{ij} , e assim, sucessivamente para misturas de mais componentes. Substituindo η_i e η_{ij} por y_i e y_{ij} respectivamente, na Equação 4.16 e deixando b_i e b_{ij} estimarem β_i e β_{ij} , chega-se a

$$b_i = y_i, \quad i=1,2,\dots,q$$

$$b_{ij} = 4y_{ij} - 2(y_i + y_j), \quad i,j = 1,2,\dots, q \quad i < j. \quad (4.17)$$

ou

$$\frac{b_i}{4} = y_{ij} - \frac{y_i + y_j}{2}$$

4.8 – Representação Matricial da Forma Polinomial Canônica

A representação do sistema de misturas de componentes por equações polinomiais canônicas torna-se difícil de compreendê-la quando envolve um maior número de variáveis para um grau maior que dois para o polinômio. Representá-la de forma matricial, torna-se bem mais simples, assim como resolvê-la por recursos computacionais.

Qualquer modelo polinomial pode ser representado por uma única equação matricial:

$$y = X \beta + e \quad (4.18)$$

sendo,

y – matriz das respostas observadas em função das misturas;

X – matriz das misturas feitas (variáveis controladas);

β - parâmetros do modelo a partir das respostas observadas;

e - erros aleatórios associados à determinação experimental das respostas y .

A representação matricial da Equação 4.18 tem grande vantagem de permanecer válida, em geral, não importa quantas sejam as observações ou os parâmetros do modelo, basta ampliar as matrizes apropriadamente.

Para uma determinada mistura x , sendo y_i , a resposta observada e \hat{y}_i a resposta prevista pela regressão do modelo, o resíduo experimental (e_i) em cada observação i deixado pelo modelo pode ser obtido pela diferença entre as respostas, ou seja:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (4.19)$$

A melhor equação de regressão (\hat{y}) é a que melhor se ajusta aos pontos do espaço experimental, ou seja, a que mais se aproxima dos pontos experimentais, deixando menos resíduos, já que é impossível passar por todos eles.

Em termos prático significa minimizar a distância global dos pontos em relação à reta, isto é, minimizar as diferenças entre $y_i - \hat{y}_i$. A maneira tradicional de se conseguir esse resultado é localizar a reta de tal forma que a soma dos quadrados dos resíduos seja mínima, razão pela qual esse método é chamado de ajuste por mínimos quadrados ou análise de regressão.

O resíduo descrito acima é o resíduo experimental, e claro, não podendo ser confundido com resíduo de rocha ornamental.

Conforme apresentado, o sistema matricial pode ser escrito da forma:

$$\hat{y} = Xb \quad (4.20)$$

Onde \hat{y} e b são as matrizes contendo respectivamente, os valores previstos pelo modelo para y e as estimativas dos parâmetros β .

4.9 – Cálculo dos Erros (e_i) e Estimativas dos Parâmetros $\beta(b)$

Considerando que as respostas y_i já são conhecidas, obtidas previamente, os resíduos experimentais irão depender apenas dos valores escolhidos para os b 's. No ajuste por mínimos quadrados, esses valores são aqueles que tornam o somatório $\sum e_i^2 = 0$ (BARROS NETO *et al.*, 2003).

Em geral, os somatórios serão realizados sobre o índice i , de $i = 1$ até $i = n$, o número total de observações.

Para que o valor de $\sum e_i^2$ seja mínimo, é preciso que suas derivadas em relação aos b 's se anulem (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978 e PIMENTEL e NETO, 1996).

Considerando para dedução os b 's como sendo b_0 e b_1 , temos:

$$\frac{\partial(\sum e_i^2)}{\partial(\sum b_0)} = 0 \quad (4.21a)$$

$$\frac{\partial(\sum e_i^2)}{\partial(\sum b_1)} = 0 \quad (4.21b)$$

Para tornar a derivação genérica, considera-se a variável independente como sendo X , e a equação de regressão torna-se $\hat{y}_i = b_0 + b_1 X_i$. Substituindo na Equação 4.19, elevando-se ao quadrado e fazendo o somatório, obtém - se:

$$\sum e_i^2 = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum (y_i - b_0 - b_1 X_i)^2 \quad (4.22)$$

Derivando e igualando a zero, encontram-se as expressões:

$$\frac{\partial(\sum e_i^2)}{\partial(\sum b_0)} = -2 \sum (y_i - b_0 - b_1 X_i) = 0 \quad (4.23a)$$

$$\frac{\partial(\sum e_i^2)}{\partial(\sum b_1)} = -2 \sum X_i (y_i - b_0 - b_1 X_i) = 0 \quad (4.23b)$$

Reordenando as Equações 4.23a e 4.23b e desenvolvendo os somatórios chega-se a um sistema de equações lineares em b_0 e b_1 , que são chamadas de equações normais indicadas abaixo.

$$nb_0 + b_1 \sum X_i = \sum y_i \quad (4.24a)$$

$$b_0 \sum X_i + b_1 \sum X_i^2 = \sum X_i y_i \quad (4.24b)$$

Isolando o termo b_0 na Equação 4.24a e substituindo-o na Equação 4.24b, tem-se:

$$b_0 = \frac{\sum y_i - b_1 \sum X_i}{n} \quad \text{ou} \quad b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{X} \quad \text{e,} \quad (4.25a)$$

$$\frac{\sum X_i \sum y_i}{n} + b_1 \left(\sum X_i^2 + \frac{(\sum X_i)^2}{n} \right) = \sum X_i y_i \quad (4.25b)$$

E daí, isolando-se o termo b_1 e colocando a equação resultante contendo os resíduos experimentais em torno das médias de X e y obtém-se:

$$b_1 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(y_i - \bar{y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (4.26)$$

Desta forma as estimativas dos parâmetros dos modelos matemáticos são determinados.

Considerando as equações normais 4.24a e 4.24b e as identidades (4.27a) e (4.27b), cujas deduções encontram-se suprimidas deste texto, pode-se calcular os parâmetros b_0 e b_1 de uma forma mais simplificada.

$$X'X = \begin{bmatrix} n & \sum X_i \\ \sum X_i & \sum X_i^2 \end{bmatrix} \quad (4.27a)$$

$$X' y = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum X_i y_i \end{bmatrix} \quad (4.27b)$$

Sendo assim, os parâmetros b_0 e b_1 são calculados resolvendo-se apenas uma equação matricial (Equação 4.28), o que pode ser facilmente comprovado escrevendo as matrizes por extenso.

$$X' X b = X' y \quad (4.28)$$

Para resolver a Equação 4.28 utiliza-se o artifício de pré multiplicá-la por $X' X$, isolando assim a matriz dos parâmetros b 's.

$$(X' X)^{-1} (X' X) b = (X' X)^{-1} X' y \quad (4.29a)$$

$$I b = (X' X)^{-1} X' y \quad (4.29b)$$

$$b = (X' X)^{-1} X' y \quad (4.29c)$$

A Equação 4.29c fornece, de forma mais direta, os valores dos parâmetros. Se as matrizes X e y forem ampliadas adequadamente, ter-se-á a solução geral para o ajuste de um modelo por mínimos quadrados, não importando quantas sejam as observações ou quantos parâmetros sejam necessários para caracterizar o modelo. Porém, para que esta solução exista é preciso que as seguintes restrições sejam respeitadas:

- A matriz $(X' X)^{-1}$ permite ser calculada; ou seja, ela não deve ser singular;
- Os modelos devem ser lineares nos parâmetros; ou seja, eles não podem conter termos como b_0^2 ou $b_0 b_1$. Esta restrição, no entanto, não é

tão severa, pois é possível escrever equações muito complexas e, ainda assim, lineares nos parâmetros.

CAPÍTULO 5 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 - Materiais

As argamassas convencionais geralmente têm como seus constituintes básicos o cimento, a areia e a cal hidratada. A proposta deste trabalho é a incorporação do resíduo de rocha ornamental em substituição da cal.

Neste capítulo, apresentam-se as características as matérias-primas utilizadas para a elaboração das argamassas investigadas.

5.1. - Areia

Foi utilizada areia natural do rio Paraíba do Sul por ser na prática a mais usualmente empregada no preparo de argamassas em Campos dos Goytacazes-RJ. O material caracterizado, conforme as recomendações da ABNT, possui módulo de finura de 2,65 g/cm³; massa específica aparente no estado solto de 1,39 g/cm³ e massa específica teórica de 2,65 g/cm³ (DÉSIR *et al.* 2005).

A areia usada na confecção das argamassas passou por secagem em estufa a de 105°C por 24 horas, a fim de que se retirasse a umidade inicial para se determinar a real quantidade de água a ser adicionada à mistura total.

Após a secagem foram adotadas, em partes iguais em massa, as frações granulométricas da areia normal, segundo os procedimentos de separação da NBR 7214.

A Tabela 5.1 mostra as frações granulométricas grossa, média grossa, média fina e fina usadas nos ensaios.

Tabela 5.1 – Frações Granulométricas Segundo a NBR 7214

Material Retido entre as Peneiras de Abertura Normal de	Denominação
2,4 mm e 1,2 mm	Grossa
1,2 mm e 0,6 mm	Média grossa
0,6 mm e 0,3 mm	Média fina
0,3 mm e 0,15 mm	Fina

5.1.2 - Cimento

Foi utilizado como aglomerante o cimento portland composto CP II E 32 da marca Votoran, por ser o mais utilizado na região de Campos dos Goytacazes-RJ, lote N°. L – 0092 – K – 06/215. Segundo o fabricante, este cimento está de acordo com a NBR 11578 – Cimento Portland Composto: Especificação. A Tabela 5.2 mostra características deste cimento.

Tabela 5.2 – Composição do CP II E 32 – Votoran. Dados do Fabricante.

Tipo	Sigla	Classe	Norma	Clínquer + Gesso	Calcáreo	Escória
II	CP II E	32	NBR 11578	56 a 94 %	0 a 10 %	6 a 34 %

5.1.3 – Resíduo de rocha

O resíduo utilizado é proveniente da região sul do Estado do Espírito Santo, mais especificamente da cidade de Cachoeiro de Itapemirim-ES. Foi coletado na empresa Marcel Mármore Comércio e Exportação LTDA., uma indústria de beneficiamento de granitos. Selecionou-se aproximadamente 400 kg de material, segundo procedimentos da NBR 10007/1987 - Amostragem de Resíduos Sólidos.

O resíduo foi coletado em um depósito provisório anexo à empresa, após passar por um filtro prensa – equipamento usado para retirar o excesso de água da lama abrasiva.

No laboratório, com o intuito de se retirar matéria orgânica tais como folhas e alguma outra vegetação, e também para homogeneização, o resíduo, foi peneirado em peneira ABNT Nº. 60 (peneira de arroz) e o material retido foi descartado. Após esta etapa o resíduo sofreu secagem em estufa a 105°C por um período de 24 horas, para retirada da umidade inicial assim como foi feito com a areia, e depois ser usado no preparo das argamassas.

5.2 – Métodos Utilizados

5.2.1 - Caracterização dos materiais

Antes de ser iniciado o planejamento experimental para composição de misturas em argamassas com o resíduo de rochas, foi necessário à determinação das características físicas, químicas e mineralógicas deste resíduo. Isto porque o conhecimento dessas propriedades determina a potencialidade de uso do material como aditivo mineral.

As análises química e mineralógica podem responder às questões sobre a possibilidade ou não de reatividade do material, bem como a existência ou não de risco e/ou restrição de seu emprego. Já as características físicas, tal como a distribuição granulométrica, pode definir a função do resíduo na argamassa (agregado, filler), assim como o teor de incorporação.

Os itens que se seguem apresentam a primeira parte do programa experimental, a caracterização do resíduo de rochas ornamentais.

5.2.1.1 - Espectroscopia de raios X

A determinação da composição química semiquantitativa do resíduo de rocha, em forma de óxidos, foi obtida por meio da técnica de análise química por fluorescência de raios X de energia dispersiva (“EDX”), em um equipamento Shimadzu EDX-700. A condição de ajuste é a de “vácuo dois canais” e as amostras foram analisadas sob forma de pó, com o auxílio de um porta-amostra. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV - UENF).

O resíduo passou por um processo de preparo de secagem em estufa a 105° C por um período de 24 horas. Após este período as amostras foram destorroadas em almofariz e moinho de bolas, e posteriormente por peneiramento na malha ABNT 200 (abertura de 0,075 mm). Parte deste pó é que foi analisada por EDX.

5.2.1.2 - Difração de raios X

A análise por difração de raios – X, com o objetivo de identificar as fases cristalinas do resíduo de rocha, foi realizada no difratômetro (Modelo Seifert URD65, Alemanha) do Laboratório de Ciências Físicas da UENF. Foi utilizada a linha k_{α} de Co ($\lambda = 1,78897 \text{ \AA}$) com filtro de Fe num feixe primário. O equipamento foi operado a 40 kV e 30 mA e a varredura (2θ de 6 a 70 °C), foi realizada na forma de passo a passo de 0,02° (2θ) por 4 segundos de acumulação.

A amostra estava na forma de pó (do mesmo pó usado na análise por EDX) depositado em lâmina de vidro com cavidade retangular.

Os picos difratados, características de fases cristalinas, foram identificados em θ (ângulo de Bragg), d (distancia interplanar) além da intensidade das contagens. Estes valores foram comparados com valores tabelados na base de dados de padrões de difrações (JCPDS – *Joint Comitee of Powder Diffraction Standards*) e os minerais e outras fases cristalinas presentes no resíduo de rocha form identificados.

5.2.1.3 – Características físicas: granulometria e densidade real dos grãos

As características físicas determinam o emprego do resíduo na mistura das argamassas, podendo ter a função de agregado miúdo ou *filler*.

A curva de distribuição granulométrica do resíduo foi determinada segundo as prescrições da NBR 7181/1984. A massa específica real dos grãos do resíduo de rocha foi determinada segundo a NBR 6508. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Solos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

5.2.2 - Resistência à compressão

A resposta experimental analisada neste trabalho, por meio do planejamento em rede simplex, foi a propriedade de resistência à compressão.

O procedimento de moldagem e cura dos corpos-de-prova seguiu às prescrições da NBR 13279/1995 – Argamassa para assentamento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão.

Foram utilizados 16 pontos experimentais, considerando que nem todos os pontos distribuídos pela região experimental foram usados para a montagem dos modelos, portanto, os pontos excedentes serviram de comprovação experimental para os modelos gerados numericamente.

Para cada ponto experimental foram feitas três repetições por ensaio, cada ensaio com quatro corpos-de-prova, totalizando 192 corpos-de-prova para cada área experimental. Adotou-se também três índices de consistência, e, conseqüentemente, foram geradas três áreas experimentais, cada uma com 192 corpos-de-prova.

No total, foram feitos 576 corpos-de-prova para ensaios de compressão axial.

5.2.3 - Modelagem numérica

5.2.3.1 - Modelos matemáticos

Foram adotadas quatro modelos numéricos para a determinação das superfícies de resposta, conforme a quantidade mínima de pontos necessários para a geração dos mesmos: modelo linear (3 pontos), modelo quadrático (6 pontos), modelo cúbico especial (7 pontos) e cúbico completo (10 pontos). As Figuras 5.2 (a, b, c e d) ilustram geometricamente os pontos para a obtenção de cada modelo.

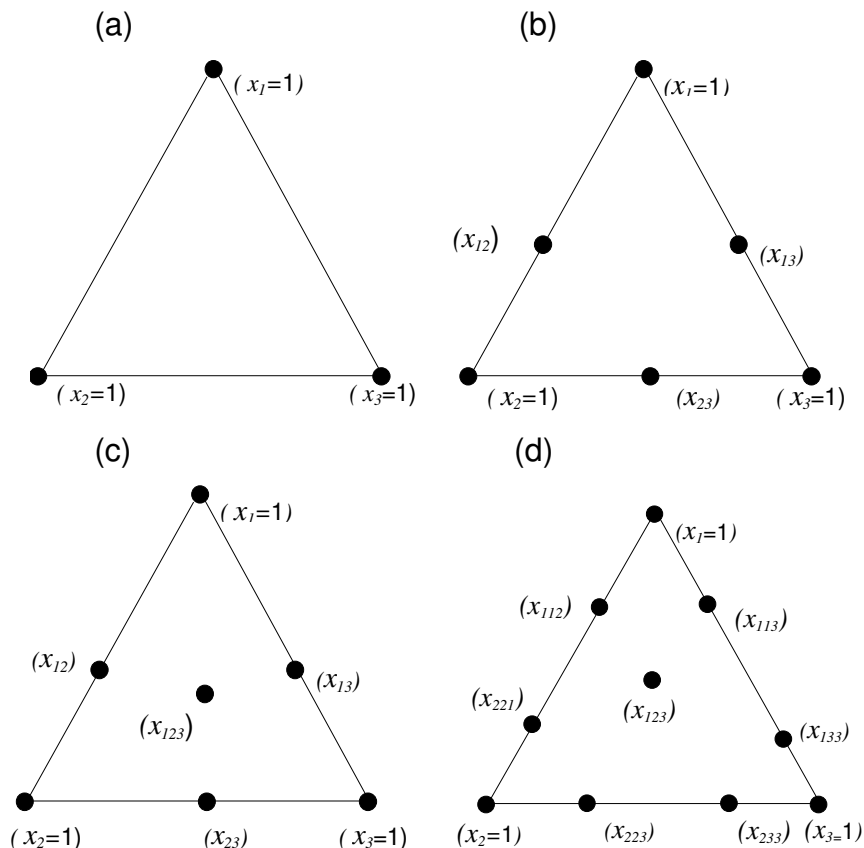


Figura 5.1 – Pontos para a Obtenção dos Modelos. (a) Linear; (b) Quadrático; (c) Cúbico Especial e (d) Cúbico Completo.

5.2.3.2 - Proporções

Para um simplex original, cuja soma dos componentes é a unidade, a superfície de resposta é definida entre os limites destes valores. No caso de 3 componentes ($q=3$), tem-se a superfície de resposta representada pela Figura 5.2:

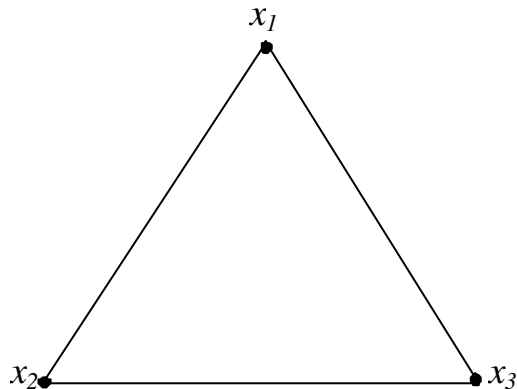


Figura 5.2 – Pontos que Delimitam a Superfície de Resposta

Porém, nem sempre é possível realizar experimentos com componentes puros (x_1, x_2, \dots, x_i), sendo necessário impor restrições nos conteúdos respectivos e, em decorrência, mudar os limites inferiores ou superiores de composição x_i que deixam de variar as proporções de 0 a 1 (Equação 4.2).

No caso de argamassas, não consideram-se os chamados componentes “puros”, pois é impossível formar uma argamassa constituída apenas de um único componente, seja ele resíduo, areia ou cimento.

Considerando a proposta desta dissertação, que é a incorporação do resíduo como aditivo mineral utilizando planejamento de experimentos, é necessária a presença dos três componentes juntos na mistura, pois uma argamassa constituída apenas de cimento e areia (x_1, x_2) ou cimento e resíduo (x_1, x_3) fugiria do contexto do trabalho.

Sendo assim, este trabalho não leva em conta as misturas binárias e os componentes puros como pontos experimentais.

5.2.3.3 - Pseudocomponentes

Há situações em que não é possível realizar experimentos com certas composições pois, por exemplo, não é possível se obter resposta do sistema investigado. Quando ocorrem essas restrições experimentais, é necessário ajustar o planejamento de misturas para as condições efetivas, reduzindo-se a escala inicial, mas garantindo-se que a mesma distribuição dos experimentos seja obedecida. Isso é feito utilizando-se os pseudocomponentes originais que delimitam uma sub-região de interesse do simplex, onde o planejamento experimental é aplicado e a modelagem é válida. Os pseudocomponentes são descritos por Cornell (1990).

Os pseudocomponentes (x'_i) definem as combinações dos componentes originais (x_i) e delimitam uma sub-região da superfície de resposta onde é possível realizar os experimentos de interesse. Desta forma, o somatório dos pseudocomponentes (x'_i)^s não é igual à unidade, ou seja

$$\sum_{i=1}^q x'_i = x'_1 + x'_2 + \dots + x'_q < 1,0 \quad (5.1)$$

Para ilustrar este conceito, considera-se um simplex ($q=3$) e uma restrição aleatória para delimitar uma sub-região de interesse.

Sejam as restrições:

$$x_1 \geq 0,35; \quad x_2 \geq 0,20 \quad \text{e} \quad x_3 \geq 0,15 \quad (5.2)$$

As restrições da Equação 5.2 mostram que o componente x_1 possui proporção sempre maior ou igual a 35 %, da mesma forma que x_2 e x_3 maior ou igual a 20 e 15 % respectivamente.

A soma da proporção dos componentes da região de interesse é feita considerando os limites inferiores impostos em (5.2) e assim tem-se:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 0,7 < 1,0 \quad (5.3)$$

Observa-se que na Equação 5.3, a soma dos três componentes é menor do que a unidade e, assim, não formaria uma mistura válida pela formulação do simplex. As restrições (x_i) listadas na Equação 5.2 correspondem a um fator de espaço de possíveis misturas, envolvendo os componentes 1, 2 e 3 que é representado no interior da Figura 5.3.

Colocando os limites inferiores (L -pseudocomponentes) somente nas proporções dos componentes, não se distorce a forma da sub-região, mantendo a forma de um simplex regular ou do triângulo equilátero de 3 componentes.

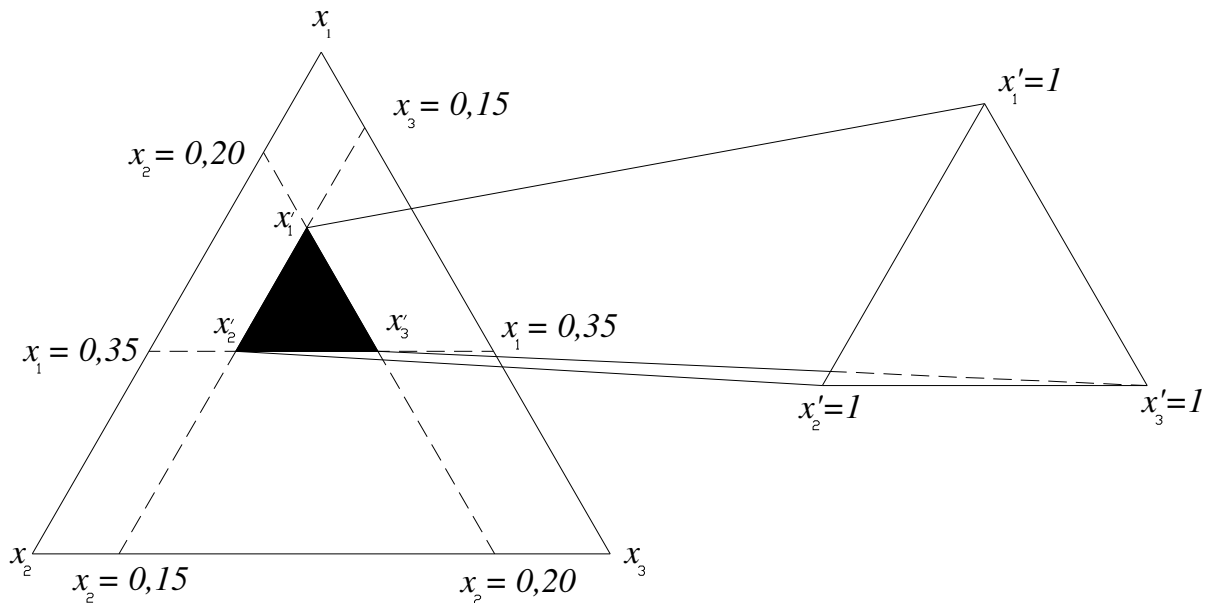


Figura 5.3 – Sub-região do Espaço Simplex

Para mostrar como os L -pseudocomponentes (L_i) são definidos em termos dos componentes originais, tem-se a condição geral em que o sistema consiste de q componentes e $L_i \geq 0$ denota os limites inferiores para os componentes i , $i = 1, 2, \dots, q$. Os limites inferiores restringidos na Equação 5.2 são expressos na forma geral:

$$0 \leq L_i \leq x_i, \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, q$$

onde alguns do L_i poderiam ser iguais a zero. Se subtrair dos limites inferiores L_i de x_i e dividir a diferença por $[1 - (\sum L_i)]$, então, os L -pseudocomponentes x'_i são definidos, usando a transformação linear da Equação 5.7:

$$x'_i = \frac{x_i - L_i}{1 - L} \quad (5.7)$$

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

Para ilustrar esta demonstração substituem-se as restrições mostradas na Equação 5.2. Então, $L = 0,35 + 0,20 + 0,15 = 0,70$ e, desse modo, os pseudocomponentes são:

$$x'_1 = \frac{x_1 - 0,35}{0,30}, \quad x'_2 = \frac{x_2 - 0,20}{0,30}, \quad x'_3 = \frac{x_3 - 0,15}{0,30} \quad (5.8)$$

Os L-pseudocomponentes mostrados na Equação 5.8 delimitam a sub-região bidimensional do simplex desde que $x'_1 + x'_2 + x'_3 = 1$. De forma genérica, as coordenadas $x'_i = 1, x'_j = 0, i \neq j$, dos vértices dos pseudocomponentes correspondem às coordenadas $x_i = L_i + (1 - L)x'_i, x_j = L_j, j \neq i$, nos componentes originais, que são:

$$\begin{aligned} (x'_1, x'_2, x'_3) &= (1, 0, 0) = (x_1, x_2, x_3) = (1 - L_2 - L_3, L_2, L_3) \\ &= (0, 1, 0) = (L_1, 1 - L_1 - L_3, L_3) \\ &= (0, 0, 1) = (L_1, L_2, 1 - L_1 - L_2) \end{aligned}$$

A construção dos modelos em um sistema de L-pseudocomponentes pode ser ilustrado como segue.

Para simplicidade, foi escolhido um polinômio de segundo-grau para uma superfície sobre a sub-região dos x'_i e um simplex $\{3,2\}$ no x'_i o qual foi observado os valores de resposta. Os pseudocomponentes $x'_i = 0, 1/2, 1$ são mostrados na Tabela 5.3.

Os componentes originais x_i correspondentes aos respectivos pseudocomponentes são obtidos a partir das Equações 5.8.

No caso da modelagem de misturas das proporções dos componentes das argamassas, consideram-se 3 componentes na mistura ($q=3$) sendo eles: areia, cimento e resíduo de rocha. Delimita-se então, uma sub-região do espaço simplex, com a presença dos 3 componentes presentes simultaneamente na mistura, para o estudo das respostas por meio dos pseudocomponentes.

Tabela 5.3 – Conversão dos L-pseudocomponentes em Componentes Originais.

Pseudocomponentes			Componentes Originais		
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3
1	0	0	0,65	0,20	0,15
0,5	0,5	0	0,50	0,35	0,15
0	1	0	0,35	0,50	0,15
0	0,5	0,5	0,35	0,35	0,30
0	0	1	0,35	0,20	0,45
0,5	0	0,5	0,50	0,20	0,30

A quantidade de água foi mantida constante para as misturas de mesmo índice de consistência. Isso se explica pelo fato da modelagem proposta considerar apenas três variáveis (cimento, areia e resíduo de rocha) e, fixando a quantidade de água, a mesma não é considerada como mais uma variável na formulação matemática.

Foram adotadas diferentes consistências, permitindo variar as restrições experimentais e assim, os pseudocomponentes.

5.2.3.4 - Restrições experimentais: determinação do índice de consistência das argamassas

O índice de consistência é determinado pela relação entre os componentes secos da argamassa, a quantidade de água e a trabalhabilidade exigida.

O teor de água para as argamassas foi determinado por meio do índice de consistência padrão, seguindo o procedimento da NBR 13276/1995.

A argamassadeira e a mesa de abatimento utilizadas para a mistura dos componentes e determinação da consistência são ilustradas pelas Figuras 5.4.e 5.5 respectivamente.

Adotou-se três intervalos de consistência: 255 ± 10 mm, 255 ± 20 mm e 255 ± 30 mm, onde foi mantida a homogeneidade das argamassas resultantes. Partindo-se deste princípio, pôde-se determinar as restrições experimentais e gerar as superfícies de resposta.



Figura 5.4 – Argamassadeira para Mistura dos Componentes das Argamassas



Figura 5.5 – Mesa de Abatimento para Ensaio de Consistência

Inicialmente considerou-se o índice de consistência padrão da NBR 13276/1995 de 255 ± 10 mm. Após esta etapa, os intervalos de consistência foram acrescidos de 10 em 10 mm, pois com o aumento do intervalo de consistência aumenta também a faixa de variação das misturas e com isso a região experimental.

A priori as composições da mistura em massa teriam pelo menos 10 % de cada material para a mesma consistência, e a quantidade de água na mistura mantida constante, com isso, a água não é considerada mais uma variável na mistura.

As restrições iniciais representadas por $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,10$ e $x_3 \geq 0,10$, sendo x_1 , x_2 e x_3 cimento, areia e resíduo, respectivamente, determinam a região experimental delimitada por seus respectivos pseudocomponentes (x'_1 , x'_2 e x'_3), são representados pela Figura 5.6.

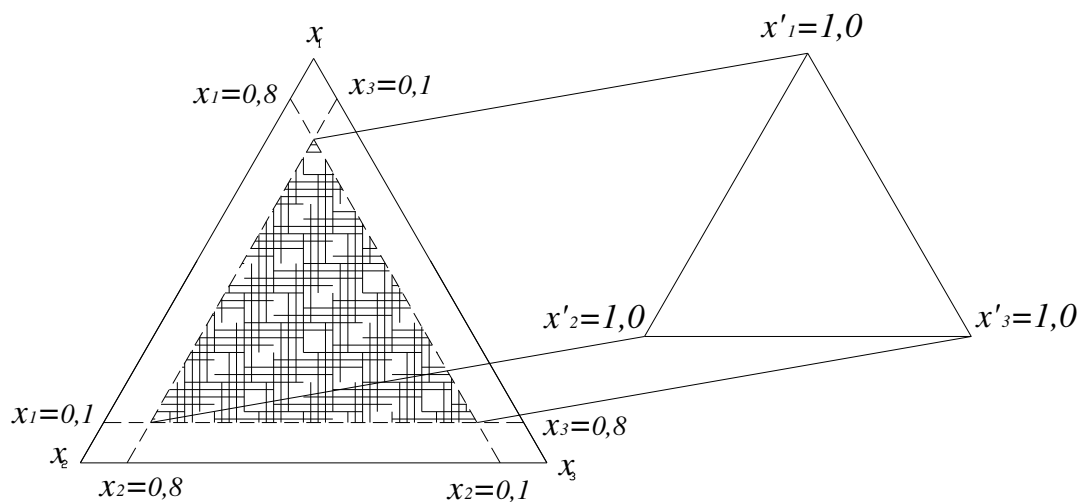


Figura 5.6 – Região Experimental Dada pelas Restrições Iniciais.

Em um primeiro momento, observou-se que para a mistura que possuía maior quantidade de resíduo, a quantidade de água necessária era muito maior que a requerida para a mistura mais rica em areia, como, por exemplo, considerando a consistência de 255 ± 10 mm e a restrição inicial $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,10$, $x_3 \geq 0,10$.

A mistura com o maior consumo de água é a que possui maior quantidade de resíduo, ou seja, onde as proporções de cimento, areia e resíduo são

respectivamente iguais a 10 %, 10 % e 80 % (ver pseudocomponentes). Fixou-se então, para este ponto, a consistência de 245 mm que é o limite inferior do intervalo de consistência adotada. Isto se explica porque quanto menor o diâmetro do troncocone no ensaio da mesa de abatimento (*flow table*) menor é a quantidade de água na mistura.

Determinada a menor quantidade de água para as condições deste ensaio preliminar, o próximo passo foi o de testar, para esta mesma quantidade de água, os outros pontos gerados pelas restrições iniciais. O que se observou foi que os outros pontos apresentaram consistência fluida, fora do intervalo de consistência adotado.

Sendo assim, a solução adotada foi a de aumentar gradativamente a porcentagem mínima de areia de 10 em 10 % até que fosse atingido o intervalo de consistência desejado.

A escolha de se variar a areia e não os outros componentes se explicam por dois motivos:

- Seria antieconômico e fora do contexto do trabalho o aumento da proporção mínima de cimento;
- Com o aumento do resíduo a mistura necessitaria de uma quantidade maior de água para se atingir a consistência desejada, pois o resíduo apresenta distribuição granulométrica muito mais fina que a areia normal utilizada. A intenção inicial era de diminuir a quantidade de água na mistura para que se tivessem três pontos experimentais dentro de um mesmo intervalo de consistência.

Com mudança de qualquer restrição experimental, no caso a proporção de areia, os outros componentes da mistura inevitavelmente mudam de composição, em termos de componentes originais (ver Item 5.2.3.3 – Pseudocomponentes).

5.2.3.5 - Programas *Surfer* e *Statistica*

Como ferramenta, para geração de gráficos, superfícies de resposta e também para ilustrar as curvas tipo “iso-resposta” dos modelos matemáticos, foi usado os softwares *Surfer Version 5.0* e o *Statistica*.

O *Surfer Version 5.0* da *Golden Software*, pelo método de mínima curvatura. O método de mínima curvatura é largamente utilizado nas ciências da Terra. A superfície interpolada gerada pelo método de mínima curvatura é análogo a uma delgada lâmina linearmente elástica, passando através de cada um dos valores com a mínima quantidade de curvatura. O método gera superfícies suaves, enquanto procura respeitar ao máximo os dados de entrada. Entretanto não é um método de interpolação exata (*Golden Software, Inc 809 14th Street, Golden, Colorado 80401*, apud Alexandre, 2000).

Utilizou-se também o software comercial *Statistica 6.0*, criado pela *Statsoft*, empregado especificamente para planejamento de experimentos. Foi aplicado o módulo *Experimental Design*, com a opção *Mixture design and triangular surfaces*, específico para misturas ternárias e geração de superfícies de resposta.

5.2.3.6 - Análise de variância

A análise dos *resíduos experimentais* é fundamental na avaliação do modelo adotado como também no seu ajuste. Um modelo que apresenta *resíduos experimentais* consideráveis é considerado inadequado para o sistema de variáveis em questão. O modelo ideal seria aquele que não apresente *resíduo experimental* algum, ou seja, as propriedades previstas numericamente são comprovadas experimentalmente.

A avaliação da eficiência de um modelo começa pela análise dos desvios das observações em relação à média global. A Figura 5.7 mostra como o desvio de um valor observado em relação à média de todas as observações ($y_i - \bar{y}_i$), pode ser decomposta em duas parcelas.

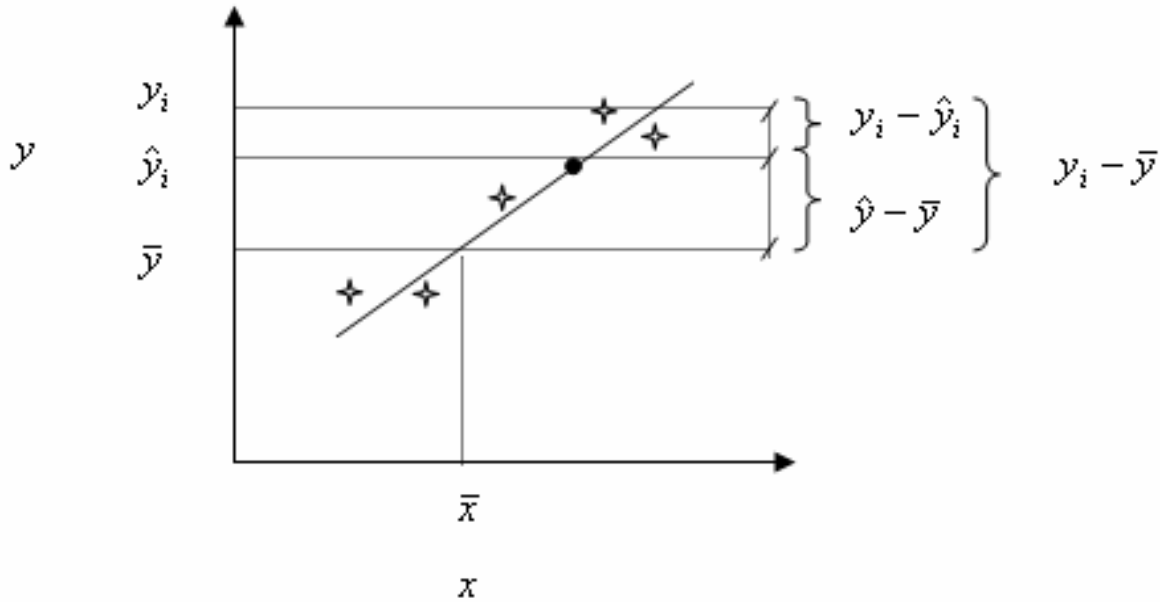


Figura 5.7 - Desvio em Relação à Média Global (Barros Neto, 2003).

$$(y_i - \bar{y}) = (\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i) \quad (5.9)$$

A primeira parcela da Equação 5.9, $(\hat{y}_i - \bar{y})$, representa o desvio da previsão feita pelo modelo para o ponto em questão, \hat{y}_i , em relação à média global, \bar{y} . Já a segunda parcela mostra a diferença entre o valor observado e o valor previsto $(y_i - \hat{y}_i)$. Se o modelo estiver bem ajustado, essa diferença deve ser pequena, levando os valores próximos para os desvios $(y_i - \bar{y})$ e $(\hat{y}_i - \bar{y})$. Isto significa que as previsões estão próximas das observações no espaço amostral e o modelo está bem ajustado aos valores reais.

Esta comparação de desvios pode ser colocada em termos quantitativos. Sendo assim eleva-se a Equação 5.9 ao quadrado e, em seguida, faz-se o somatório sobre todos os pontos, obtendo-se a Equação 5.10.

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum [(\hat{y}_i - \bar{y}) + \sum (y_i - \hat{y}_i)]^2 \quad (5.10)$$

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + 2\sum (\hat{y}_i - \bar{y})(y_i - \hat{y}_i) + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.11)$$

Considerando que o somatório dos produtos é igual a zero, obtém-se então a Equação 5.11, na forma:

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.12)$$

Essas somas de quadrados de desvios costumam ser chamadas de somas quadráticas (SQ) e com essa terminologia a Equação 5.12 pode ser lida como:

$$SQ_T = SQ_R + SQ_r \quad (5.13)$$

sendo

$$SQ_T = SQ_R + SQ_r;$$

SQ_T = Soma quadrática em torno da média;

SQ_R = Soma quadrática devida à regressão;

SQ_r = Soma quadrática residual.

O que quer dizer que uma parte da variação total das observações y_i , em torno da média, é descrita pela regressão, e o restante é devido aos *resíduos experimentais*. Logo, quanto maior for a fração descrita pela regressão, melhor será o ajuste do modelo, podendo ser quantificado pela relação seguinte:

$$R^2 = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / \sum (y_i - \hat{y}_i)$$

$$R^2 = SQ_R / SQ_T \quad (5.14)$$

O coeficiente R^2 é chamado de coeficiente de determinação do modelo. O maior valor possível de R^2 é 1, ou seja, só ocorrerá se não houver *resíduo* algum e, portanto, o modelo está bem adequado e toda a variação em torno da média é explicada pela regressão. Quanto mais perto o valor de R^2 estiver de 1, melhor terá sido o ajuste do modelo aos dados observados.

Cada soma quadrática tem associada a si um certo número de graus de liberdade, que indica quantos valores independentes envolvendo as n observações y_1, y_2, \dots, y_n são necessárias para determiná-la. Para a soma quadrática dos n desvios em relação à média, o número de graus de liberdade (ν) é $(n - 1)$ e não n , porque a soma dos desvios, $\Sigma(y_i - \bar{y})$, é nula, e isso consome um grau de liberdade.

A soma quadrática devido à regressão tem (SQ_R) o número de graus de liberdade igual ao número de parâmetros menos um, $\nu_R = (p - 1)$, onde p é o número de parâmetros do modelo.

O número de graus de liberdade da soma quadrática residual é a diferença entre o número de observações e o número de parâmetros, $\nu_r = (n - p)$.

Dividindo-se as somas quadráticas pelos respectivos números de graus de liberdade obtêm-se as chamadas médias quadráticas (MQ).

5.2.3.7 - Significância estatística da regressão

Admitindo que os erros sigam uma distribuição normal, pode-se por meio da análise de variância e das médias quadráticas, testar se a equação de regressão é estatisticamente significativa. Quando $\beta = 0$, não existe uma relação entre X e y e a razão entre as médias quadráticas MQ_R e MQ_r segue uma distribuição F (FISHER, 1970).

$$MQ_R/MQ_r \cong F_{\nu_1, \nu_2} \quad (5.15)$$

Sendo a Equação 5.15 válida apenas para $\beta = 0$, essa hipótese nula pode ser testada usando-se os valores efetivamente calculados de MQ_R/MQ_r , comparando-os com os valores de F_{ν_1, ν_2} no nível de confiança desejado.

Valores de $MQ_R/MQ_r > F_{\nu_1, \nu_2}$ significam que a possibilidade de $\beta = 0$ deve ser descartada. Isto significa que, caso exista uma evidência estatística suficiente de relação linear entre as variáveis X e y , pode acontecer que uma regressão, embora significativa do ponto de vista do teste F , não seja útil para realizar previsões, por cobrir uma faixa pequena dos fatores estudados. Sugeriram Box e Wetz (1973), que

uma regressão não seja apenas estatisticamente significativa, mas também útil para fins preditivos, o valor de MQ_R/MQ_r deve ser comparado com no mínimo quatro a cinco vezes o valor de F_{ν_1, ν_2} , onde

ν_1 = graus de liberdade da média quadrática, devido à regressão;

ν_2 = graus de liberdade da média quadrática residual;

n – número total de experimentos;

p – número de parâmetros;

N – Número de ensaios distintos.

5.2.3.8 - Falta de ajuste e erro puro

Quando se trata de observações repetidas, os valores estão sujeitos a erros aleatórios e qualquer que seja o modelo, ele não pode passar ao mesmo tempo por todas as observações, o que fatalmente deixará *resíduos experimentais* que poderão ser atribuídos em parte aos erros aleatórios (ALEXANDRE, 2000).

Nesse caso, o *resíduo experimental* total deixado pelo modelo poderá ser decomposto em duas partes: uma devido aos erros aleatórios, e outra devido à falta de ajuste do modelo. Os erros devido a falta de ajuste podem ser reduzidos com o aperfeiçoamento do modelo. Já a parte devido ao erro puro, não. A Equação 5.16 mostra a composição da soma quadrática dos *resíduos experimentais*.

$$SQ_r = SQ_{ep} + SQ_{faj}. \quad (5.16)$$

SQ_r – Soma quadrática dos *resíduos*;

SQ_{ep} – Soma quadrática devido ao erro puro;

SQ_{faj} – Soma quadrática devido a falta de ajuste.

O número de graus de liberdade da soma quadrática residual é a diferença entre o número total de valores observados e o número de parâmetros do modelo, $\nu_r = (n - p)$. Subtraindo-se os graus de liberdade correspondentes a SQ_{ep} , tem-se o

número relativo à falta de ajuste, $v_{aj} = (n - p) - (n - m) = (m - p)$. O número de graus de liberdade devido ao erro puro é $v_{ep} = (n - m)$, onde:

n = número total de observações;

m = número de níveis da variável independente;

p = número de parâmetros do modelo.

5.2.3.9 - Percentagem de variação explicada pela regressão

A percentagem de variação explicada pela regressão, isto é, a razão entre a soma quadrática devido a regressão, é a soma quadrática total SQ_R/SQ_T . Entretanto, esse valor não pode ser comparado com 100 %, por causa da contribuição referente ao erro puro (ALEXANDRE, 2000). Como não há modelo que consiga reproduzir a soma quadrática do erro puro, o valor máximo explicável é a diferença entre a soma quadrática total e a soma quadrática devido ao erro puro ($SQ_T - Sq_{ep}$), e é com esse valor que a variação efetivamente deve ser comparada.

As médias quadráticas são obtidas dividindo-se as somas quadráticas pelos respectivos graus de liberdade.

Um teste F da razão MQ_{faj}/MQ_{ep} servirá para avaliar se o modelo está ou não bem ajustado. Os valores de F são tabelados e facilmente encontrados em livros estatísticos, e são obtidos ao usarem-se os graus de liberdade como entrada em concordância com os respectivos níveis de segurança desejados.

As somas quadráticas, os graus de liberdade e as médias quadráticas são normalmente reunidos em uma tabela que é chamada de Tabela de Análise de Variância (ou ANOVA, um acrônimo de *Analysis of Variance*). A Tabela 5.4 mostra a forma geral desta apresentação (BARROS NETO, 2003).

Os estatísticos costumam empregar símbolos latinos para representar valores amostrais e o alfabeto grego para os parâmetros populacionais;

$$\hat{y} \rightarrow \hat{\eta};$$

$$\mu \rightarrow \bar{x};$$

\hat{y} → é uma convenção tipográfica para indicar que não se trata de um valor populacional e sim de uma estimativa.

\bar{x} → Refere-se à média amostral, e não à média populacional;

μ → Média populacional;

s^2 → Desvio padrão amostral;

σ^2 → Desvio padrão populacional;

y → Valores observados;

\hat{y} → Valores previstos pelo modelo;

\bar{y} → Valores médios observados.

Tabela 5.4 - Tabela de Análise de Variância (ANOVA).

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de graus de liberdade	Média Quadrática
Regressão	$SQ_R = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$p - 1$	$MQ_R = SQ_R / (p - 1)$
Resíduos	$SQ_r = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_i - \hat{y}_i)^2$	$n - p$	$MQ_r = SQ_r / (n - p)$
Falta de Ajuste	$SQ_{faj} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$	$m - p$	$MQ_{faj} = SQ_{faj} / (m - p)$
Erro Puro	$SQ_{ep} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$n - m$	$MQ_{ep} = SQ_{ep} / (n - m)$
Total	$SQ_T = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$n - 1$	

Varição explicada (%): SQ_R / SQ_T

Máxima de variação explicável (%): $(SQ_T - SQ_{ep}) / SQ_T$

5.2.3.10 - Intervalos de confiança

Ao montar-se um modelo, deve-se admitir que cada observação y_i é constituída de uma parte sistemática $\beta_0 + \beta_i X_i$. e de uma parte aleatória ε_i . Se o

modelo estiver correto, isto é, se a relação entre y e X for representada pela sua parte sistemática, então, ao se determinar um grande número de respostas repetidas relacionadas ao mesmo valor de X_i , observar-se-á a distribuição dos valores de y_i em torno do valor $\beta_0 + \beta_i X_i$. Esse valor, portanto, nada mais é que a média dos valores observados no ponto X_i . Mesmo ao admitir que o valor esteja correto, a flutuação das respostas introduzirá incertezas na determinação dos parâmetros do modelo. Num certo valor X_i os erros em y_i se distribuirão com certa variância, que em princípio variará com X_i . No entanto, é preciso anuir que essa variância é constante e igual a certo valor σ^2 ao longo de toda faixa estudada. Aceitando-se ainda que os erros correspondentes às observações realizadas em valores diferentes da variável independente não são correlacionados isto é, admitindo-se que a covariância $(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$, se $i \neq j$. Como a única parte de y_i aleatória é o erro ε_i , dessa hipótese decorre que a variância é $(y_i) = \sigma^2$ e a covariância $(y_i, y_j) = 0$, se $i \neq j$. Como última suposição ainda sobre os erros, admitir-se-á que eles seguem uma distribuição normal.

Essas hipóteses podem ser resumidas nas expressões.

$$y_i \cong N(\beta_0 + \beta_i X_i, \sigma^2) \text{ e } Cov(y_i, y_j) = 0 \quad (5.17)$$

Como se admitiu que os erros se distribuem normalmente, para testar a significância dos valores estimados para b , pode-se empregar a distribuição de *Student* (W.S. Gosset, químico que usava este pseudônimo para assinar seus trabalhos) ou distribuição t, usando-se a Equação 5.18.

$$b \neq t_{n-p} \times (\text{erro padrão de } b) \quad (5.18)$$

onde

b – parâmetro;

t_{n-p} – Distribuição t com n-p graus de liberdade;

n – número total de observações;

p – número de parâmetros do modelo.

Os critérios de *Student* são fundamentados na distribuição normal ou gaussiana de probabilidades de ocorrência de erros, adotando a média amostral em lugar da média populacional ou global de outros critérios estatísticos.

CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 – Caracterização das Matérias-Primas

6.1.1 – Composição química

A Tabela 6.1 apresenta a composição química semiquantitativa do resíduo de rocha ornamental, obtidas através da espectroscopia de raios X por dispersão de energia. Ao analisar essa tabela, observa-se que o teor de sílica (SiO_2) é superior a 62 % e o de alumina (Al_2O_3) é de aproximadamente 16 %. Pode-se concluir que o resíduo proveniente dessas rochas é ácido (rochas silicatadas), na maioria das vezes granitos e gnaisses, contendo minerais como o quartzo, feldspatos e micas (muscovita e biotita).

Os teores de CaO (4,61 %) e Fe_2O_3 (6,97 %) são devido, principalmente, aos constituintes do próprio resíduo, assim como da adição de granalha e óxido de cálcio como lubrificante e abrasivo no processo de serragem do granito.

Tabela 6.1 – Composição Química do Resíduo em Forma de Óxidos.

Composição Química do Resíduo	
Óxido	Teor (% em massa)
SiO ₂	62,212
Al ₂ O ₃	16,035
K ₂ O	7,934
Fe ₂ O ₃	6,972
CaO	4,612
SO ₃	1,510
TiO ₂	0,564
MnO	0,099
ZrO ₂	0,027
SrO	0,019
ZnO	0,016

6.1.2 – Granulometria e massa específica real dos grãos do resíduo

Observa-se pelo gráfico da Figura 6.1, que o resíduo apresenta cerca de 90 % de material passante na peneira ABNT N^o. 200 (abertura de 0,075 mm). O resíduo é classificado como um silte-areno-argiloso (71 % de fração silte, 17 % de fração areia e 12 % de fração argila) segundo a NBR 6502. Avaliando os resultados e os comparando com Xavier (2001, 2006), nota-se que a fração silte é predominante neste tipo de resíduo. Considera-se então, que o resíduo de rocha usado neste trabalho, comporta-se como filler na constituição das argamassas.

A massa específica real dos grãos do resíduo, determinada segundo a NBR 6508, foi de 3,01 g/cm³. Este valor, ligeiramente superior aos resultados obtidos por Xavier (2003, 2006) e Moura *et al.* (2002), que foram de 2,72 e 2,84 g/cm³ respectivamente, pode ser explicado pelo fato de o resíduo analisado conter uma quantidade maior de granalha, que é uma liga metálica com massa específica maior. Este fato é comprovado avaliando-se a composição química obtida por Xavier (2006) e Moura *et al.* (2002) que são, respectivamente, de 3,49 % e 4,30 % de Fe₂O₃, menores que os 6,97 % obtidos nesta pesquisa.

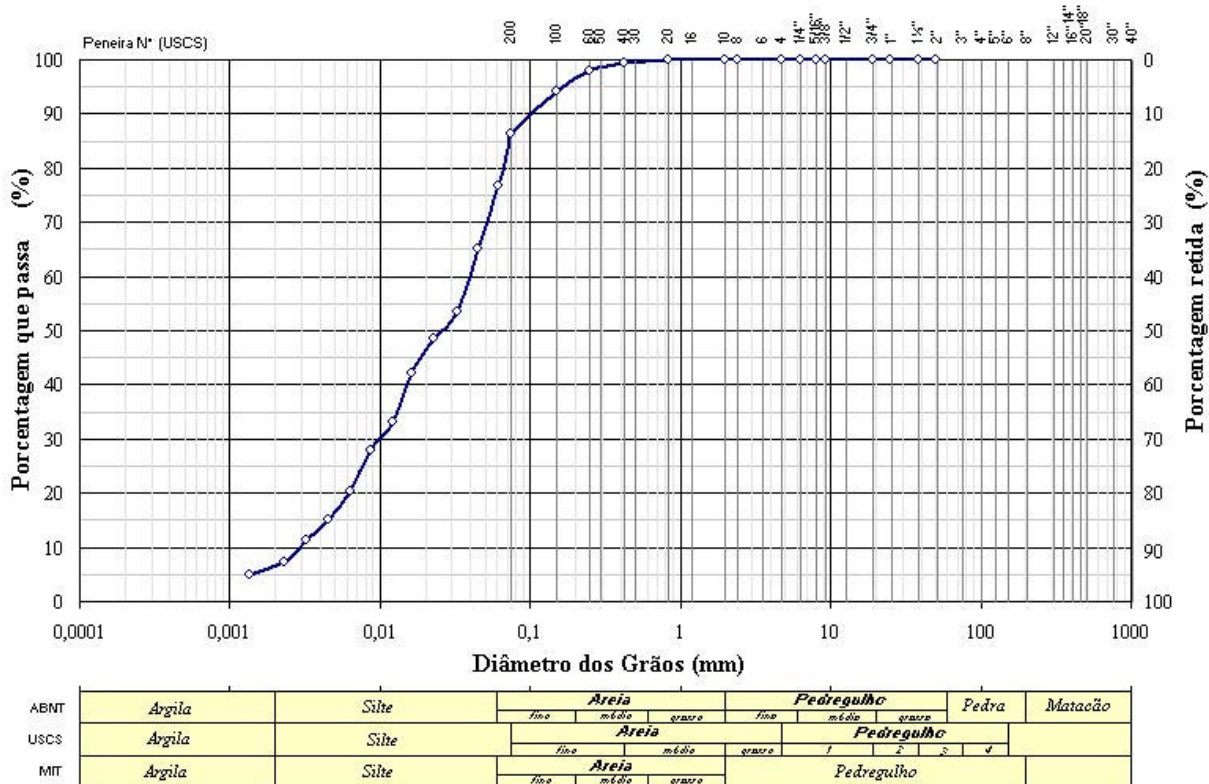


Figura 6.1 – Curvas de Distribuição Granulométrica do Resíduo

6.1.3 – Identificação das fases cristalinas

O difratograma de raios X da amostra de resíduo do granito estudado é mostrado na Figura. 6.2. Verificam-se picos de difração característicos das fases cristalinas referentes ao quartzo (sílica - SiO_2), microclina (feldspato potássico - KAlSi_3O_8), albita (feldspato sódico - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), cordierita ($\text{Mg}_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5)\text{O}_{18}$) e ilita/mica.

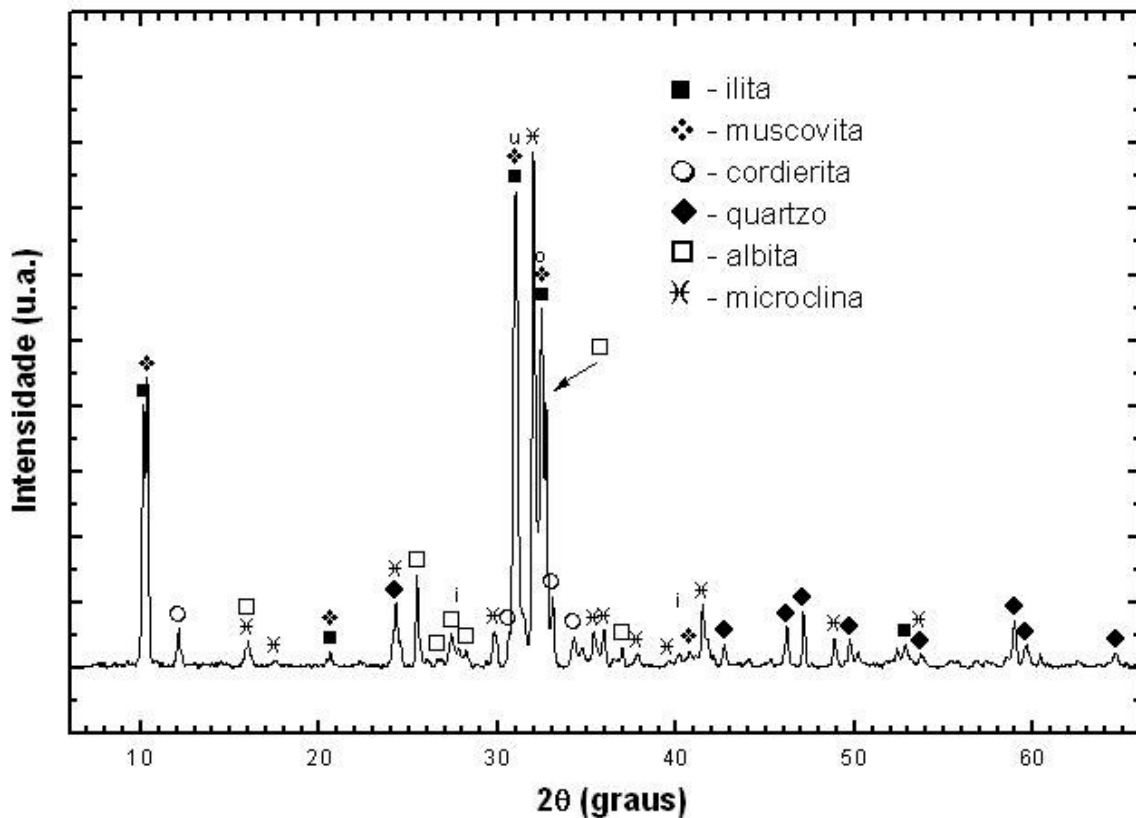


Figura 6.2 - Difratoograma de raios X do resíduo de granito

6.2 – Limites de Consistência

Os limites de consistência adotados nas misturas foram determinados seguindo os procedimentos descritos no Item 5.2.3.4.

Inicialmente considerou-se o índice de consistência padrão recomendado pela NBR 13276 que é de 255 ± 10 mm. Em seguida, com o intuito de aumentar a região experimental, foram estipulados intervalos de variação da consistência maiores, de 255 ± 20 mm e 255 ± 30 mm. As Tabelas 6.2 a 6.19 mostram os ensaios de consistência para determinação dos componentes sólidos e do teor de água, atingindo, conseqüentemente, as restrições experimentais.

No total, para esta fase do programa experimental, foram feitos 54 ensaios de consistência, não contando os ensaios cujos intervalos de consistência excederam aos limites estipulados inicialmente.

Ressalta-se que os componentes cimento, areia e resíduo de rocha são representados por x_1 , x_2 e x_3 , respectivamente, e, aplicando-se a Equação 5.7 com as respectivas restrições tem-se:

➤ **Determinação das restrições experimentais para os limites de consistência 255 ± 10 mm**

Tabela 6.2 – 1º Experimento: 1ª Restrição: $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,10$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,80	0,10	0,10	1	0,13	0,13	1200	150	150	312
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	Fluido
0	0	1	0,10	0,10	0,80	1	1	8	150	150	1200	245
Água (g)							410					
% Água/Sólidos							27,33					

Tabela 6.3 – 2º Experimento: 2ª Restrição: $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,20$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,70	0,20	0,10	1	0,29	0,14	1050	300	150	318
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	Fluido
0	0	1	0,10	0,20	0,70	1	2	7	150	300	1050	245
Água (g)							380					
% Água/Sólidos							25,33					

Tabela 6.4 – 3º Experimento: 3ª Restrição: $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,30$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,60	0,30	0,10	1	0,5	0,17	900	450	150	322
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	Fluido
0	0	1	0,10	0,30	0,60	1	3	6	150	450	900	245
Água (g)							350					
% Água/Sólidos							23,33					

Tabela 6.5 – 4º Experimento: 4ª Restrição: $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,40$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,50	0,40	0,10	1	0,8	0,20	750	600	150	325,5
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	Fluido
0	0	1	0,10	0,40	0,50	1	4	5	150	600	750	245
Água (g)							310					
% Água/Sólidos							20,66					

Tabela 6.6 – 5º Experimento: 5ª Restrição: $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,50$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,40	0,50	0,10	1	1,25	0,25	600	750	150	305
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	315
0	0	1	0,10	0,50	0,40	1	5	4	150	750	600	245
Água (g)							280					
% Água/Sólidos							18,66					

Tabela 6.7 – 6º Experimento: 6ª Restrição: $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,60$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,30	0,60	0,10	1	1,20	0,33	450	900	150	290
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	260
0	0	1	0,10	0,60	0,30	1	6	3	150	900	450	245
Água (g)							245					
% Água/Sólidos							16,33					

Tabela 6.8 – 7º Experimento: 7ª Restrição: $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,70$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,20	0,70	0,10	1	3,5	0,50	450	900	150	265
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	250
0	0	1	0,10	0,70	0,20	1	7	2	150	900	450	245
Água (g)							220					
% Água/Sólidos							14,66					

Analisando a Tabela 6.8, a última da seqüência de ensaios para a consistência de 255 ± 10 mm, observa-se que os traços que representam os pseudocomponentes estão compreendidos no intervalo de consistência adotado, sendo assim, a restrição experimental é de:

$$x_1 > 0,1 ; x_2 > 0,7 \text{ e } x_3 > 0,1$$

Ou seja, as restrições nas proporções são: cimento ≥ 10 %, areia ≥ 70 % e resíduo ≥ 10 % em massa. A região experimental para a consistência adotada, delimitada pelas restrições, é mostrada na área em negrito da Figura 6.3.

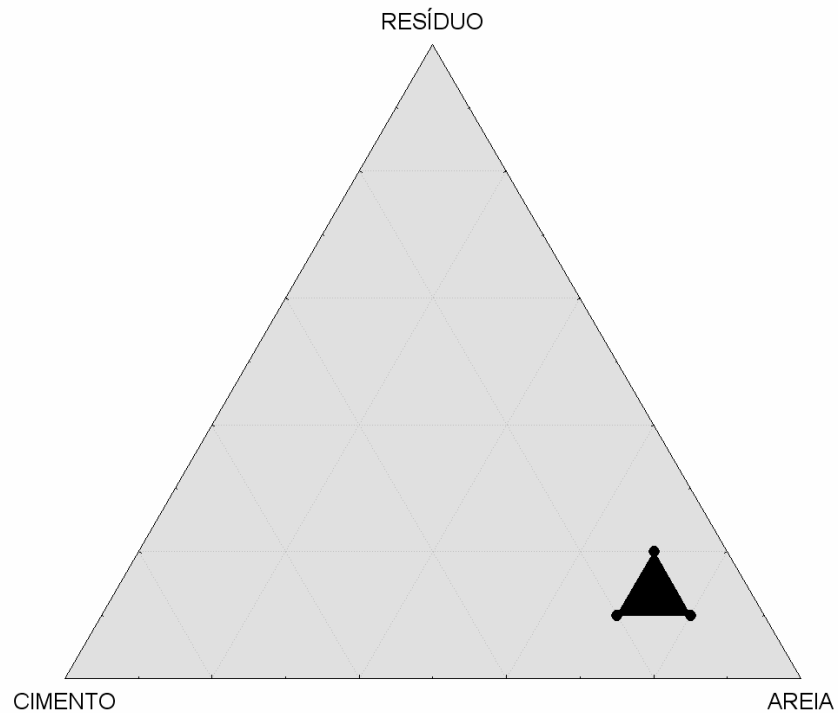


Figura 6.3 – Região em Negrito Delimitada pelos Pseudocomponentes para Consistência de 255 ± 10 mm.

Nota-se também que neste caso a maior incorporação de resíduo foi de 20 % da massa total seca da mistura, onde a argamassa possui uma relação (água/sólidos) de 14,67 %, para a o teor de água de 220 g.

➤ **Determinação das restrições experimentais para os limites de consistência de 255 ± 20 mm**

Nesta etapa, mudou-se a faixa de variação da consistência, com o intuito de aumentar a região experimental e, com isso, aumentar o teor de incorporação de resíduo e a amplitude de composição das misturas.

Tabela 6.9 – 1º Experimento: 1ª Restrição $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,10$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,80	0,10	0,10	1	0,13	0,13	1200	150	150	307,5
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	Fluido
0	0	1	0,10	0,10	0,80	1	1	8	150	150	1200	235
Água (g)							395					
% Água/Sólidos							26,33					

Tabela 6.10 – 2º Experimento: 2ª Restrição $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,20$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,70	0,20	0,10	1	0,29	0,14	1050	300	150	312,5
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	Fluido
0	0	1	0,10	0,20	0,70	1	2	7	150	300	1050	235
Água (g)							360					
% Água/Sólidos							24,00					

Tabela 6.11 – 3º Experimento: 3ª Restrição $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,30$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,60	0,30	0,10	1	0,5	0,17	900	450	150	310
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	Fluido
0	0	1	0,10	0,30	0,60	1	3	6	150	450	900	235
Água (g)							325					
% Água/Sólidos							21,66					

Tabela 6.12 – 4º Experimento: 4ª Restrição $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,40$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,50	0,40	0,10	1	0,8	0,20	750	600	150	310
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	Fluido
0	0	1	0,10	0,40	0,50	1	4	5	150	600	750	235
Água (g)							290					
% Água/Sólidos							19,33					

Tabela 6.13 – 5º Experimento: 5ª Restrição $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,50$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,40	0,50	0,10	1	1,25	0,25	600	750	150	297,5
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	302,5
0	0	1	0,10	0,50	0,40	1	5	4	150	750	600	235
Água (g)							260					
% Água/Sólidos							17,33					

Tabela 6.14 – 6º Experimento: 6ª Restrição $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,60$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,30	0,60	0,10	1	2	0,33	450	900	150	275
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	247,5
0	0	1	0,10	0,60	0,30	1	6	3	150	900	450	235
Água (g)							235					
% Água/Sólidos							15,67					

Com os dados da Tabela 6.14 pode-se concluir que as restrições experimentais para a consistência de 255 ± 20 mm são de:

$$x_1 > 0,1; \quad x_2 > 0,6 \text{ e } x_3 > 0,1$$

Com essas restrições a incorporação máxima de resíduo é de 30 % da massa total seca da mistura, aumentando em mais 10 % a incorporação de resíduo em relação ao limite de consistência de 255 ± 10 mm. As proporções são: cimento ≥ 10 %, areia ≥ 60 % e resíduo ≥ 10 % em massa e a região experimental para estas restrições é mostrada na área em negrito da Figura 6.4.

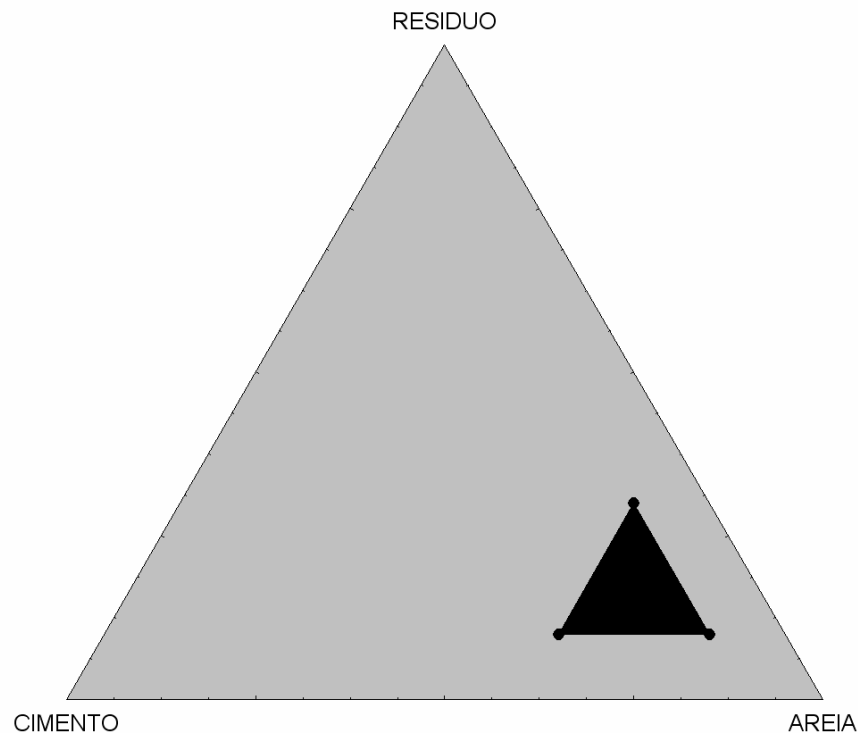


Figura 6.4 - Região em Negrito Delimitada pelos Pseudocomponentes para Consistência de 255 ± 20 mm..

A argamassa possui uma razão (água/sólidos) = 15,67 %, para o teor de água de 235 g. Nota-se que o aumento do intervalo de consistência e também da porcentagem máxima de resíduo, faz com que seja necessário o aumento da quantidade de água total na mistura. Observa-se ainda, pela Figura 6.4 que a região

experimental teve um aumento em relação à área experimental de consistência de 255 ± 10 mm

➤ **Determinação das restrições experimentais para os limites de consistência de 255 ± 30 mm**

Como descrito no item anterior, adotou-se a consistência de 255 ± 30 mm.

Tabela 6.15 – 1º Experimento: 1ª Restrição $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,10$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,80	0,10	0,10	1	0,13	0,13	1200	150	150	295
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	Fluido
0	0	1	0,10	0,10	0,80	1	1	8	150	150	1200	225
Água (g)							385					
% Água/Sólidos							25,67					

Tabela 6.16 – 2º Experimento: 2ª Restrição $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,20$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,70	0,20	0,10	1	0,29	0,14	1050	300	150	290
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	Fluido
0	0	1	0,10	0,20	0,70	1	2	7	150	300	1050	225
Água (g)							345					
% Água/Sólidos							23,00					

Tabela 6.17 – 3º Experimento: 3ª Restrição $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,30$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,60	0,30	0,10	1	0,5	0,17	900	450	150	305
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	335
0	0	1	0,10	0,30	0,60	1	3	6	150	450	900	225
Água (g)							305					
% Água/Sólidos							20,33					

Tabela 6.18 – 4º Experimento: 4ª Restrição $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,40$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,50	0,40	0,10	1	0,8	0,20	750	600	150	305
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	335
0	0	1	0,10	0,40	0,50	1	4	5	150	600	750	225
Água (g)							285					
% Água/Sólidos							19,00					

Tabela 6.19 – 5º Experimento: 5ª Restrição $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,50$ e $x_3 \geq 0,10$

Pseudocomponentes			Componentes Originais			Traço			Traço em Massa (g)			Consistência (mm)
x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	
1	0	0	0,40	0,50	0,10	1	1,25	0,25	600	750	150	285
0	1	0	0,10	0,80	0,10	1	8	1	150	1200	150	275
0	0	1	0,10	0,50	0,40	1	5	4	150	750	600	225
Água (g)							250					
% Água/Sólidos							16,67					

A Tabela 6.19 mostra que, para a consistência de 255 ± 30 mm, tem-se as seguintes restrições experimentais:

$$x_1 > 0,1; \quad x_2 > 0,5 \quad \text{e} \quad x_3 > 0,1$$

A Figura 6.5 representa a área experimental (em negrito) para esta consistência e, destacando-se o aumento da região experimental.

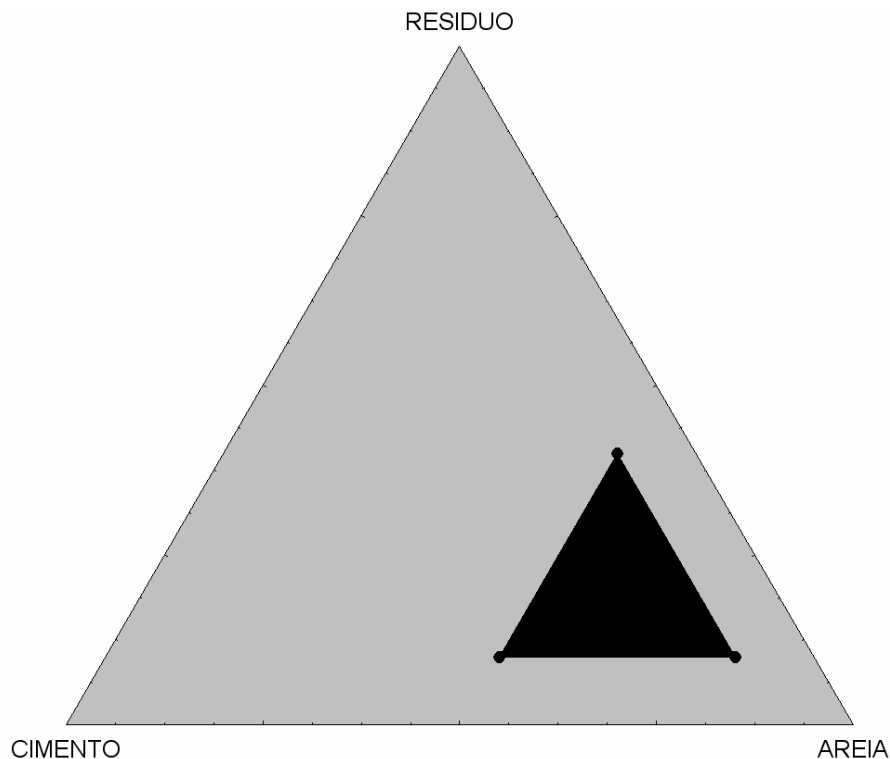


Figura 6.5 - Região em Negrito Delimitada pelos Pseudocomponentes para Consistência de 255 ± 30 mm

As restrições nas proporções são: cimento ≥ 10 %, areia ≥ 60 % e resíduo ≥ 10 % em massa e a incorporação máxima de resíduo, nesse caso, é de 40 % da massa total seca da mistura, com composição de (água/sólidos) = 16,67 %, para a o teor de água de 250 g.

6.3 – Determinação das Restrições Experimentais

Determinado os limites de consistência, as restrições experimentais e os limites máximos e mínimos dos componentes das argamassas são:

- Consistência de 255 ± 10 mm: $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,70$ e $x_3 \geq 0,10$

$$0,10 \leq x_1 \leq 0,20; 0,70 \leq x_2 \leq 0,80 \text{ e } 0,10 \leq x_3 \leq 0,20$$

- Consistência de 255 ± 20 mm: $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,60$ e $x_3 \geq 0,10$

$$0,10 \leq x_1 \leq 0,30; 0,60 \leq x_2 \leq 0,80 \text{ e } 0,10 \leq x_3 \leq 0,30$$

- Consistência de 255 ± 30 mm: $x_1 \geq 0,10$; $x_2 \geq 0,50$ e $x_3 \geq 0,10$

$$0,10 \leq x_1 \leq 0,40; 0,50 \leq x_2 \leq 0,80 \text{ e } 0,10 \leq x_3 \leq 0,40$$

6.4 – Análise dos Modelos

A modelagem de misturas consiste em ajustar um modelo matemático polinomial a uma superfície de resposta obtida segundo um planejamento estatístico de misturas ou planejamento experimental específico.

Após o uso do modelo matemático para a determinação do comportamento da propriedade de interesse das argamassas para os diferentes tipos de traços gerados numericamente, o próximo passo dado foi realizar uma análise do modelo por meio de uma comprovação experimental.

A diferença encontrada entre o modelo numérico e os resultados comprovados experimentalmente é denominada pela literatura específica de resíduo experimental (CORNELL, 1990 e BARROS NETO *et al.*, 2003). Para não confundir

esse resíduo com o resíduo de rocha ornamental, neste trabalho, sempre aparecerá por extenso (resíduo experimental) ou representado pela letra *e*.

Foram utilizados quatro modelos numéricos para a determinação das superfícies de respostas, conforme a quantidade mínima de pontos para a geração dos mesmos: Modelo Linear (3 pontos), Modelo Quadrático (6 pontos), Modelo Cúbico Especial (7 pontos) e Modelo Cúbico Completo (10 pontos).

Ainda foram adotados diferentes tipos de superfície de resposta, gerada por meio das restrições experimentais, conforme os diferentes intervalos de consistência usados: 255 ± 10 mm; 255 ± 20 mm e 255 ± 30 mm.

A resposta experimental analisada na modelagem numérica foi a resistência à compressão segundo a NBR 13279.

6.4.1 – Consistência de 255 ± 10 mm

A área experimental gerada por meio da imposição da consistência de 255 ± 10 mm é determinada pelos limites inferiores da mistura. Considerando que as proporções de cimento, areia e resíduo são representadas por x_1 , x_2 e x_3 respectivamente. Conforme exposto no Item 6.2, com a consistência obtida pela mesa de abatimento (*flow table*), temos as seguintes restrições experimentais:

$$x_1 \geq 0,10; \quad x_2 \geq 0,70 \text{ e } x_3 \geq 0,10 \quad (6.1)$$

A soma da proporção dos componentes da região de interesse é feita considerando os limites inferiores impostos (*L*) em (6.2) e assim temos:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 0,9 < 1,0 \quad (6.2)$$

De posse das restrições, segue-se o cálculo dos componentes originais da mistura, que é feito aplicando a Equação 5.7.

Temos então que $L = 0,10 + 0,70 + 0,10 = 0,90$ e, desse modo, os pseudocomponentes são calculados por meio das Equações 6.3:

$$x'_1 = \frac{x_1 - 0,10}{0,10}, \quad x'_2 = \frac{x_2 - 0,70}{0,10}, \quad x'_3 = \frac{x_3 - 0,10}{0,10} \quad (6.3)$$

Fazendo as substituições necessárias, chega-se à composição das misturas. A composição das misturas, os componentes originais e as respostas são listados na Tabela 6.20.

Tabela 6.20 – Composição das Misturas para a Consistência de 255 ± 10 mm.

Respostas	Composição dos Pseudocomponentes			Componentes Originais		
	x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3
y'_1	1	0	0	0,20	0,70	0,10
y'_2	0	1	0	0,10	0,80	0,10
y'_3	0	0	1	0,10	0,70	0,20
y'_{12}	1/2	1/2	0	0,15	0,75	0,10
y'_{13}	1/2	0	1/2	0,15	0,70	0,15
y'_{23}	0	1/2	1/2	0,10	0,75	0,15
y'_{123}	1/3	1/3	1/3	0,13	0,73	0,13
y'_{112}	2/3	1/3	0	0,17	0,73	0,10
y'_{122}	1/3	2/3	0	0,13	0,77	0,10
y'_{223}	0	2/3	1/3	0,10	0,77	0,13
y'_{233}	0	1/3	2/3	0,10	0,73	0,17
y'_{113}	2/3	0	1/3	0,17	0,70	0,13
y'_{133}	1/3	0	2/3	0,13	0,70	0,17
y'_{1123}	2/3	1/6	1/6	0,17	0,72	0,12
y'_{1223}	1/6	2/3	1/6	0,12	0,77	0,12
y'_{1233}	1/6	1/6	2/3	0,12	0,72	0,17

Ao analisar a Tabela 6.20, observa-se que ela determina dezesseis pontos experimentais, ou seja, pontos de respostas obtidos no programa experimental, contudo, nem todos esses pontos foram usados para a elaboração dos modelos, de modo que os excedentes foram usados para a comprovação dos modelos avaliados.

Destaca-se também que o somatório dos pseudocomponentes (x'_i) foi sempre igual à unidade, para compatibilizar com a metodologia da modelagem simplex.

6.4.1.1 – Modelo linear

Para a formulação do modelo linear são necessários, pelo menos, três pontos experimentais. Em cada ponto do modelo foram feitas três repetições, a fim de que se tivesse uma maior representatividade dos resultados. Os pontos do modelo são os mostrados na Tabela 6.21:

Tabela 6.21 – Pontos Experimentais do Modelo Linear.

Pontos	Componentes Originais		
	x_1	x_2	x_3
y'_1	0,20	0,70	0,10
y'_2	0,10	0,80	0,10
y'_3	0,10	0,70	0,20

Sendo assim, a Equação 6.4, representa todos os pontos da região experimental estimados pelo modelo linear.

$$\hat{y} = b_1x'_1 + b_2x'_2 + b_3x'_3 \quad (6.4)$$

Onde:

\hat{y} = resposta estimada pelo modelo;

b_i = parâmetros do modelo;

x'_i = proporção de matéria-prima utilizada na mistura – pseudocomponentes.

Após os cálculos dos coeficientes por meio da Equação 4.29, obtém-se a Equação 6.5 do modelo linear, que estima as respostas na superfície conforme se

variam as proporções dos componentes da argamassa para área experimental delimitada pelos pseudocomponentes de consistência de 255 ± 10 mm.

$$\hat{y} = 20,42 x'_1 + 5,71 x'_2 + 6,58 x'_3 \quad (6.5)$$

➤ Intervalos de confiança

Admitindo-se que os erros se distribuem normalmente, empregou-se, então, a distribuição de *Student* para testar a significância dos parâmetros (b_i 's) do modelo ao nível de 95 % de confiança (Equação 5.18).

$$b \pm t_{n-p} \times (\text{erro padrão})$$

Onde:

$n = 9$ ensaios

$$t_6 = 2,447$$

$p = 3$ parâmetros

erro padrão dos parâmetros = 0,258

Tabela 6.22 – Intervalos de Confiança dos Parâmetros do Modelo Linear.

Parâmetros		Intervalo de Confiança	
b_1	20,42	19,78	21,05
b_2	5,71	5,07	6,34
b_3	6,58	5,95	7,21

A Tabela 6.22 mostra que os parâmetros do modelo linear pertencem aos intervalos de confiança, e os mesmos são significativos, pois os limites dos intervalos de confiança têm sinais iguais, ou seja, não há evidência estatística de que algum parâmetro seja zero.

A Figura 6.6 representa o diagrama de Pareto, que comprova graficamente a significância dos parâmetros do modelo linear. Os valores vistos ao lado dos

retângulos são relativos ao teste t , de forma que os efeitos que se encontrarem ao lado direito da linha de $p = 0,05$ de probabilidade são significativos.

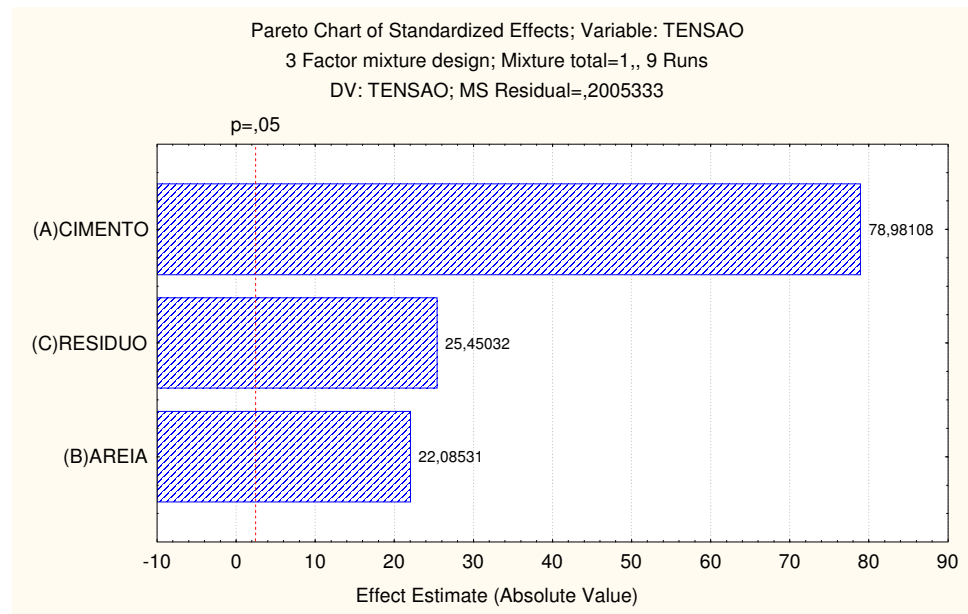


Figura 6.6 - Significância Estatística dos Parâmetros do Modelo Linear.

➤ Análise do modelo

Após a obtenção da Equação 6.5 do modelo linear, que foi calculada com apenas três pontos, foi feita a comprovação do modelo em mais sete pontos (misturas) distribuídos pela região experimental, que foram elaborados anteriormente no programa de ensaios. A Tabela 6.23 mostra o resultado de dez respostas obtidas pelo modelo linear (\hat{y}) e dez valores médios de observações, em triplicata, obtidas nos ensaios (\bar{y}).

Tabela 6.23 - Valores Previstos pelo Modelo Linear e Valores Médios de Observações Feitas em Ensaios de Resistência à Compressão

Misturas	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	x_{1123}	x_{1223}	x_{1233}
\hat{y}	20,42	5,71	6,58	13,06	13,50	6,14	10,90	15,66	8,31	8,74
\bar{y}	20,42	5,71	6,58	10,66	13,50	6,35	9,45	17,29	8,20	9,67

Considerando a diferença evidente entre os resultados obtidos pelo modelo linear (\hat{y}) e os resultados obtidos experimentalmente (\bar{y}), foi feita uma análise estatística por meio do método dos mínimos quadrados ou análise de regressão de variância (ANOVA), considerando dez pontos experimentais, com três repetições cada um, no interior da superfície de resposta em questão. A Tabela 6.24 lista os resultados obtidos.

Tabela 6.24 - ANOVA do Modelo Linear, para Consistência de 255 ± 10 mm.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	614,94	2	307,47
Resíduos Experimentais	34,97	27	1,29
Falta de ajuste	30,94	7	4,42
Erro puro	4,03	20	0,20
Total	649,91	29	22,41

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 94,62 \%$

% máxima de variação explicável: $(SQ_T - SQ_{ep})/SQ_T = 99,38 \%$

O coeficiente R^2 representa o ajuste do modelo aos resultados reais, que é a razão entre as somas quadráticas devido à regressão e a soma quadrática total.

No caso do modelo em análise, a percentagem de variação explicada pela regressão é de 94,62 %. Esse valor, entretanto, não é comparado a 100 %, por causa da contribuição devido ao erro puro. Desse modo, como a percentagem da máxima variação explicável é igual a 99,38 %, pode-se concluir que a % máxima explicada pela regressão é alta.

➤ Critério de Fisher

Admitindo-se que a equação de regressão gerada pelo modelo linear possui um bom ajuste, aplica-se então o Critério de Fisher (teste F), considerando que os erros sigam uma distribuição normal (Capítulo 4). As médias quadráticas podem ser usadas para testar se a equação de regressão é estatisticamente significativa.

Adotando-se 95 % de probabilidade pelo critério de Fisher, tem-se para $F_{2,27} = 3,35$.

$$MQ_R/MQ_r > 5.F_{2,27}$$

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} = 238,35 > 16,75$$

Uma comparação entre esses dois valores pelo teste F , indica uma regressão altamente significativa, pois quanto maior a razão $\frac{MQ_R}{MQ_r}$, maior a evidência estatística da regressão com os resultados obtidos até aqui (ver Item 5.2.3.7).

➤ Falta de ajuste e erro puro

Como postulado no Capítulo 5, valores altos da razão $\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}}$ significam falta de ajuste e valores de $\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}} < F_{v_1, v_2}$ indicam que o modelo está bem ajustado às observações. Onde, v_1 e v_2 são os números de graus de liberdade da soma quadrática devido à falta de ajuste e do erro puro, respectivamente:

$$v_1 = m - p \qquad v_2 = n - m$$

Sendo m o número de ensaios distintos, p o número de parâmetros do modelo e n o número total de experimentos. Para o nível de confiança de 95 % o valor de $F_{7,20} = 2,51$

$$\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}} = 7,67 > 2,51$$

O que indica que o modelo tem falta de ajuste, apesar de a razão $\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}}$ ser considerada baixa, o modelo não está bem ajustado aos experimentos. Porém, a

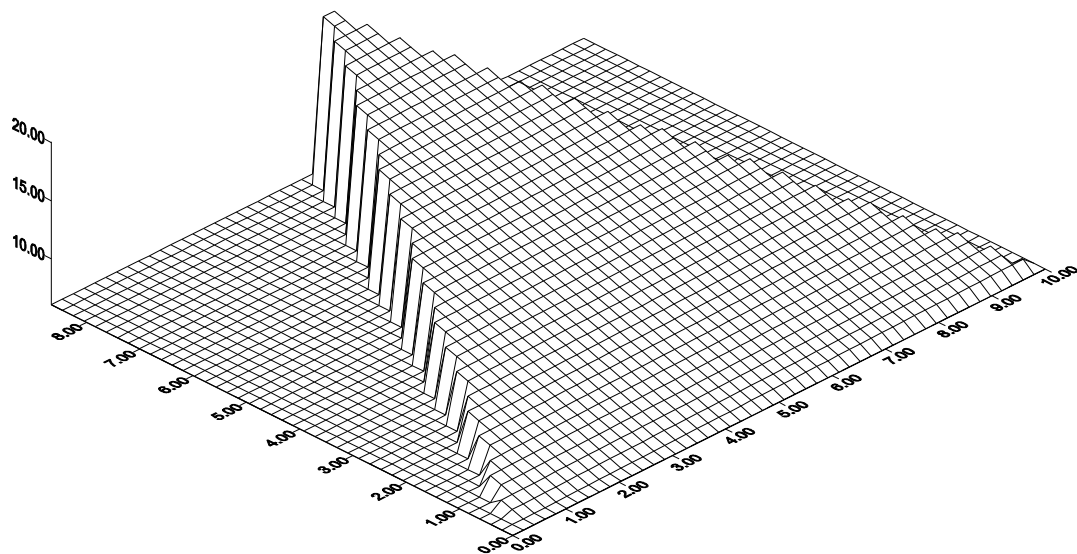
falta de ajuste observada neste modelo não é fator decisivo para sua eliminação, pois o problema em questão trata de modelagens empíricas aplicadas em produtos naturais de composição muito diversificada, com o agravante de se tratar de misturas ternárias envolvendo pseudocomponentes.

Sendo assim, a avaliação da eficiência de um modelo deve ser sempre comparada com modelos com grau maior, onde o critério de decisão vai depender da precisão das respostas e do nível de dificuldade necessária para obtê-las.

➤ **Superfície de resposta**

As superfícies de respostas geradas pelo modelo linear e os pontos de ensaios são representados na Figura 6.7. Os pseudocomponentes x'_1 , x'_2 e x'_3 representam os pontos necessários para o cálculo do modelo linear.

(a)



(b)

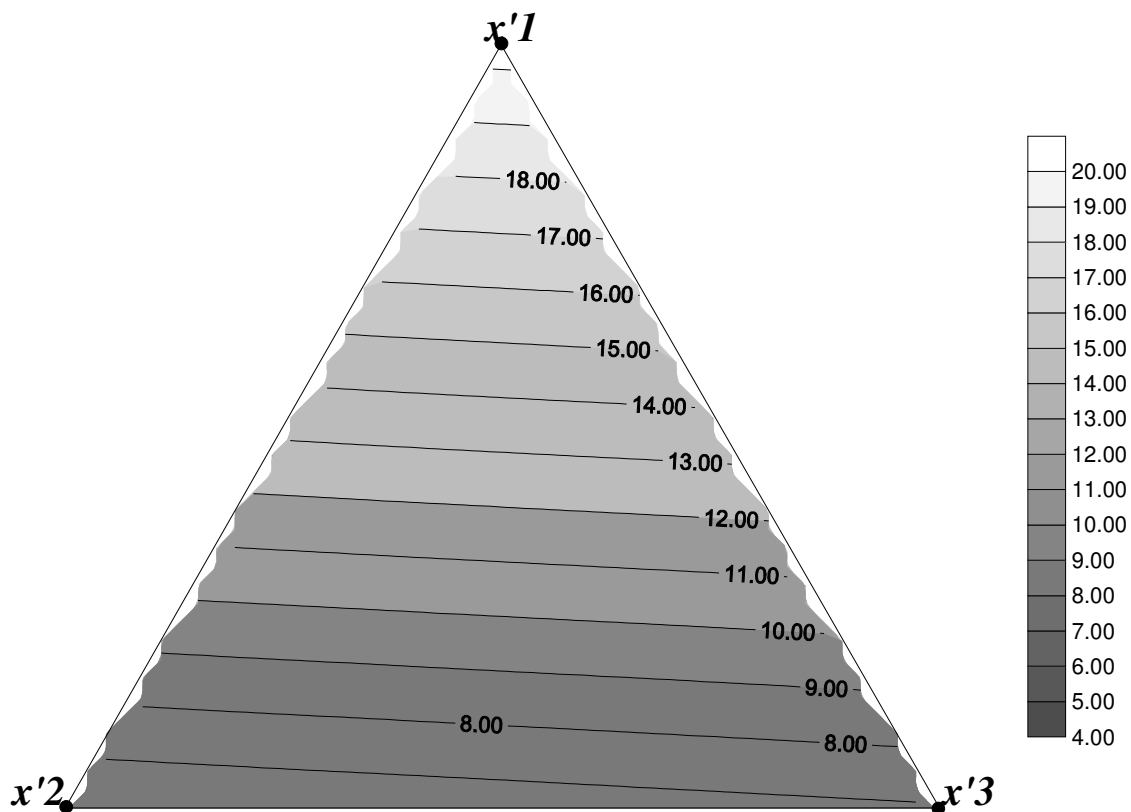


Figura 6.7 – Superfície de Resposta (a) e Curvas Tipo “Iso-resposta” do Modelo Linear para Resistência à Compressão (MPa) para a Região Experimental de Consistência de 255 ± 10 mm (b).

6.4.1.2 – Modelo quadrático

O modelo quadrático considera, além dos três pontos já usados no modelo linear, outros três pontos na superfície de resposta. Os seis pseudocomponentes que delimitam a região experimental para o modelo são listados na Tabela 6.25.

Tabela 6.25 - Pontos Experimentais do Modelo Quadrático

Pontos	Componentes Originais		
	x_1	x_2	x_3
y'_1	0,20	0,70	0,10
y'_2	0,10	0,80	0,10
y'_3	0,10	0,70	0,20
y'_{12}	0,15	0,75	0,10
y'_{13}	0,15	0,70	0,15
y'_{23}	0,10	0,75	0,15

A Equação 6.6 representa o modelo quadrático, onde além dos três parâmetros (b_i 's) do modelo linear, esta equação possui mais três parâmetros (b_{ij} 's) das misturas binárias (em termos de *pseudocomponentes*). Após o cálculo dos parâmetros, a Equação 6.7 estima as respostas desta região experimental.

$$\hat{y} = b_1 x'_1 + b_2 x'_2 + b_3 x'_3 + b_{12} x'_1 x'_2 + b_{13} x'_1 x'_3 + b_{23} x'_2 x'_3 \quad (6.6)$$

$$\hat{y} = 20,42 x'_1 + 5,71 x'_2 + 6,58 x'_3 - 9,59 x'_1 x'_2 + 0,02 x'_1 x'_3 + 0,81 x'_2 x'_3 \quad (6.7)$$

➤ Intervalos de confiança

$$b \pm t_{n-p} \times (\text{erro padrão})$$

Onde:

n= 18 ensaios

$$t_{12} = 2,179$$

p= 6 parâmetros

erro padrão dos parâmetros b_i 's = 0,285

erro padrão dos parâmetros b_{ij} 's = 1,394

Os intervalos de confiança dos parâmetros do modelo quadrático são mostrados na Tabela 6.26.

Tabela 6.26 – Intervalos de Confiança dos Parâmetros do Modelo Quadrático.

Parâmetros	Intervalo de Confiança		
b_1	20,42	19,79	21,04
b_2	5,71	5,09	6,33
b_3	6,58	5,96	7,20
b_{12}	-9,59	-12,63	-6,55
b_{13}	0,02	-3,02	3,05
b_{23}	0,81	-2,23	3,84

Nota-se que os parâmetros b_{13} e b_{23} estão em intervalos que vão de negativos a positivos; isso significa que há 95 % de probabilidade de que o verdadeiro valor dos parâmetros esteja compreendido nestes intervalos. Os dois limites têm sinais contrários e, como nenhum dos valores num intervalo de confiança é mais provável do que o outro, pode ser que o verdadeiro valor destes parâmetros seja zero, isso quer dizer que não há evidência suficiente para mantê-lo no modelo (Barros Neto, 2003).

Este fato também pode ser observado pelo diagrama de Pareto para este modelo – Figura 6.8.

Uma evidência clara para a não representatividade dos parâmetros b_{13} e b_{23} , é que seus valores possuem ordem de grandeza muito menor que os demais parâmetros do modelo, fazendo com que seus efeitos sobre a resposta final \hat{y} sejam considerados desprezíveis.

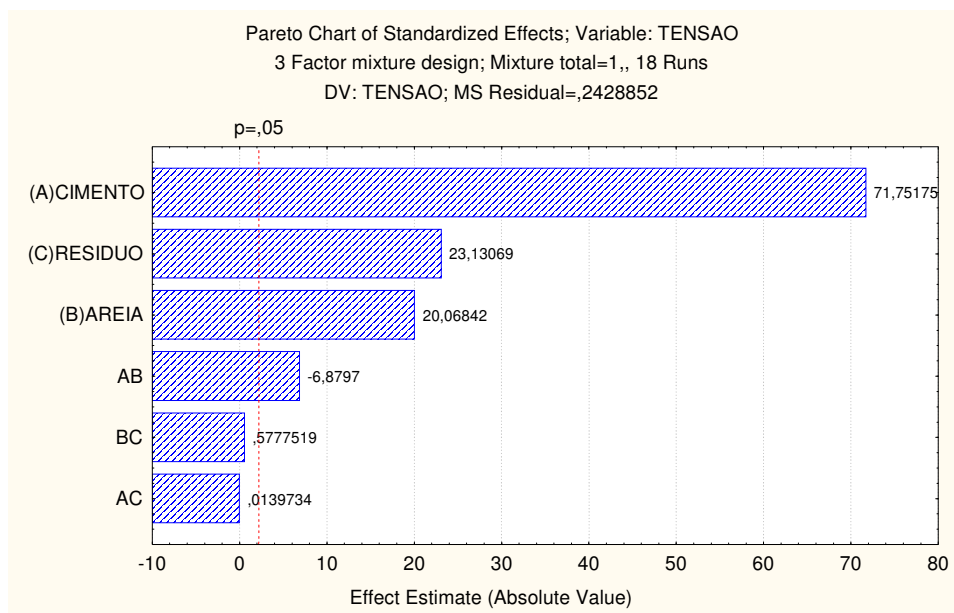


Figura 6.8 – Significância Estatística dos Parâmetros do Modelo Quadrático.

Sendo assim, a Equação 6.8 representa o modelo quadrático, modificado pela exclusão dos parâmetros não significativos, os termos estatisticamente fora do intervalo de confiança.

$$\hat{y}^* = 20,42 x'_1 + 5,71 x'_2 + 6,58 x'_3 - 9,59 x'_1 x'_2 \quad (6.8)$$

➤ Análise do modelo

Para a comprovação de sua eficácia foram testados, além dos pontos necessários para a geração do modelo, mais quatro pontos dentro da região experimental. Os resultados e a análise encontram-se na Tabela 6.27 e 6.28 respectivamente.

Tabela 6.27 - Valores Obtidos pelo Modelo Quadrático e Valores Médios de Observações Feitas em Ensaios de Resistência à Compressão

Misturas	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	x_{1123}	x_{1223}	x_{1233}
\hat{y}	20,42	5,71	6,58	10,67	13,50	6,34	9,93	14,62	7,33	8,57
\hat{y}^*	20,41	5,78	6,64	10,67	13,52	6,21	9,86	14,59	7,28	8,52
\bar{y}	20,42	5,71	6,58	10,67	13,50	6,35	9,44	17,29	8,20	9,67

Tabela 6.28 - ANOVA do Modelo Quadrático, para Consistência de 255 ± 10 mm.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade.	Média Quadrática
Regressão	624,16	3	208,05
Resíduos Experimentais	25,75	26	0,99
Falta de ajuste	21,71	6	3,62
Erro puro	4,04	20	0,20
Total	649,91	29	22,41

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 96,04$ %

% máxima de variação explicável: $(SQ_T - SQ_{ep})/SQ_T = 99,38$ %

Analisando a Tabela 6.28 observa-se que o coeficiente R^2 do modelo quadrático é de 96,04 % que é comparado à máxima variação explicável de 99,38 %. Neste caso, a percentagem de variação explicada pela regressão do modelo que é ligeiramente maior que 94,62 % do modelo linear, o que evidencia o maior ajuste do modelo quadrático. Segue-se então ao critério de Fisher para testar a eficácia do modelo quadrático frente ao linear.

➤ Critério de Fisher

Adotando-se 95 % de confiança pelo critério de Fisher, tem-se para $F_{3,26}=2,98$

$$MQ_R/MQ_r > 5.F_{3, 26}$$

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} = 210,15 > 14,90$$

A razão $\frac{MQ_R}{MQ_r}$ é muito maior que o produto $5.F_{3, 26}$, portando maior a evidência estatística da regressão com os resultados obtidos até aqui.

➤ **Falta de ajuste e erro puro**

$$v_1 = m - p$$

$$v_2 = n - m$$

$$v_1 = 4$$

$$v_2 = 20$$

Sendo m o número de ensaios distintos, p o número de parâmetros do modelo e n o número total de experimentos. Para o nível de confiança de 95 % o valor de $F_{4,20} = 2,87$

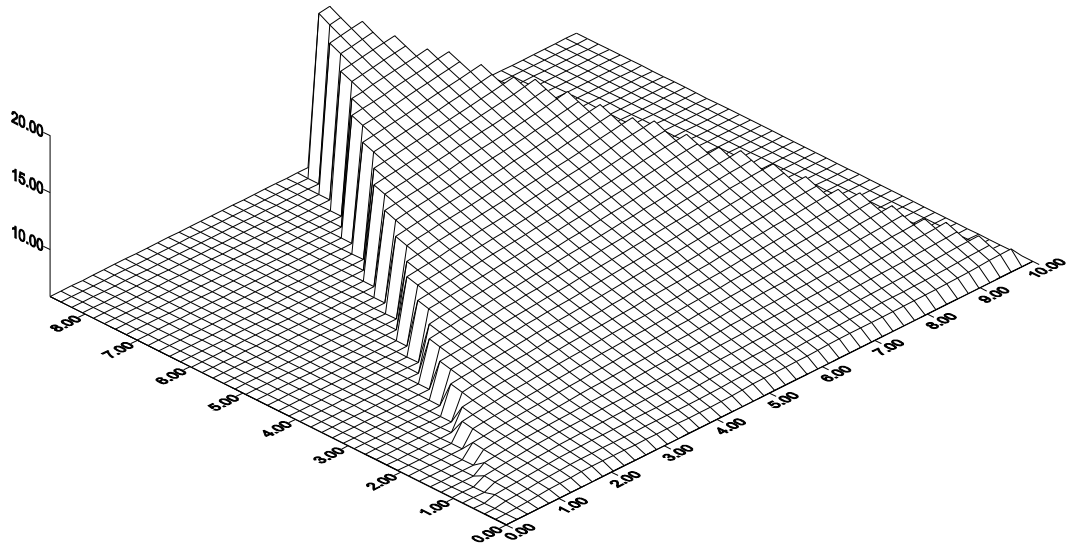
$$\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}} = 5,39 > 2,87$$

O modelo quadrático mostrou-se um pouco melhor do que o linear, apresentando menor falta de ajuste. Com a razão de $\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}} = 5,39 > 2,87$ já se pode considerar o modelo quadrático bem ajustado. Segue-se uma nova análise a fim de que se consiga um modelo cada vez mais detalhado para o caso em questão.

➤ **Superfície de resposta**

As superfícies de respostas geradas pelo modelo quadrático (\hat{y}^*), assim como os pontos usados em sua formulação, são representados na Figura 6.9.

(a)



(b)

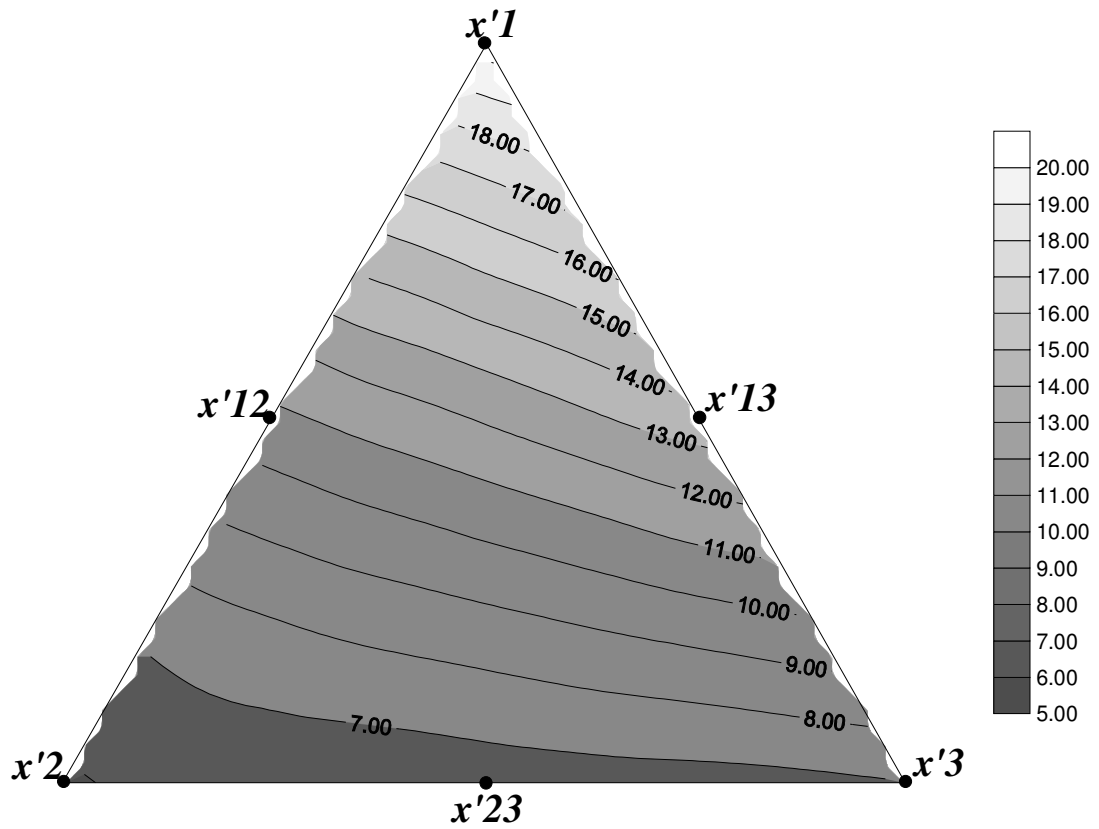


Figura 6.9 – Superfície de Resposta (a) e Curvas Tipo “Iso-resposta” do Modelo Quadrático para Resistência à Compressão (MPa) da Região Experimental de Consistência 255 ± 10 mm (b)

6.4.1.3 – Modelo cúbico especial

O modelo cúbico especial considera, além dos pontos usados nos modelos linear e quadrático, mais um ponto no centróide da região triangular experimental, totalizando sete pontos. Os sete pseudocomponentes do modelo estão representados na Tabela 6.29.

Tabela 6.29 - Pontos Experimentais para o Modelo Cúbico Especial.

Pontos	Componentes Originais		
	x_1	x_2	x_3
y'_1	0,20	0,70	0,10
y'_2	0,10	0,80	0,10
y'_3	0,10	0,70	0,20
y'_{12}	0,15	0,75	0,10
y'_{13}	0,15	0,70	0,15
y'_{23}	0,10	0,75	0,15
y'_{123}	0,13	0,73	0,13

A Equação 6.9 representa o modelo cúbico especial que possui o termo b_{123} no centróide da região experimental, e com o cálculo dos parâmetros, as respostas deste modelo são estimadas pela Equação 6.10.

$$\hat{y} = b_1 x'_1 + b_2 x'_2 + b_3 x'_3 + b_{12} x'_1 x'_2 + b_{13} x'_1 x'_3 + b_{23} x'_2 x'_3 + b_{123} x'_1 x'_2 x'_3 \quad (6.9)$$

$$\hat{y} = 20,42 x'_1 + 5,71 x'_2 + 6,58 x'_3 - 9,59 x'_1 x'_2 + 0,02 x'_1 x'_3 + 0,81 x'_2 x'_3 - 13,12 x'_1 x'_2 x'_3 \quad (6.10)$$

➤ Intervalos de confiança

$$b \pm t_{n-p} \times (\text{erro padrão})$$

Onde:

n= 21 ensaios

$$t_{14} = 2,145$$

$p = 7$ parâmetros

erro padrão dos parâmetros b_i 's = 0,272

erro padrão dos parâmetros b_{ij} 's = 1,330

erro padrão dos parâmetros b_{ijk} 's = 9,358

Tabela 6.30 – Intervalos de Confiança dos Parâmetros do Modelo Cúbico Especial.

Parâmetros		Intervalo de Confiança	
b_1	20,42	19,83	20,99
b_2	5,71	5,13	6,29
b_3	6,58	5,99	7,16
b_{12}	-9,59	-12,44	-6,74
b_{13}	0,02	-2,83	2,87
b_{23}	0,81	-2,05	3,65
b_{123}	-13,12	-33,19	6,95

A Tabela 6.30 indica que o modelo cúbico especial (7 pontos) não se aplica neste caso, pois conforme a análise da significância dos parâmetros, verifica-se que os termos b_{13} , b_{23} e b_{123} não são significantes ao nível de 95 % de probabilidade e, portanto, devem ser retirados do modelo em análise.

Isto pode ser comprovado no diagrama de Pareto - Figura 6.10.

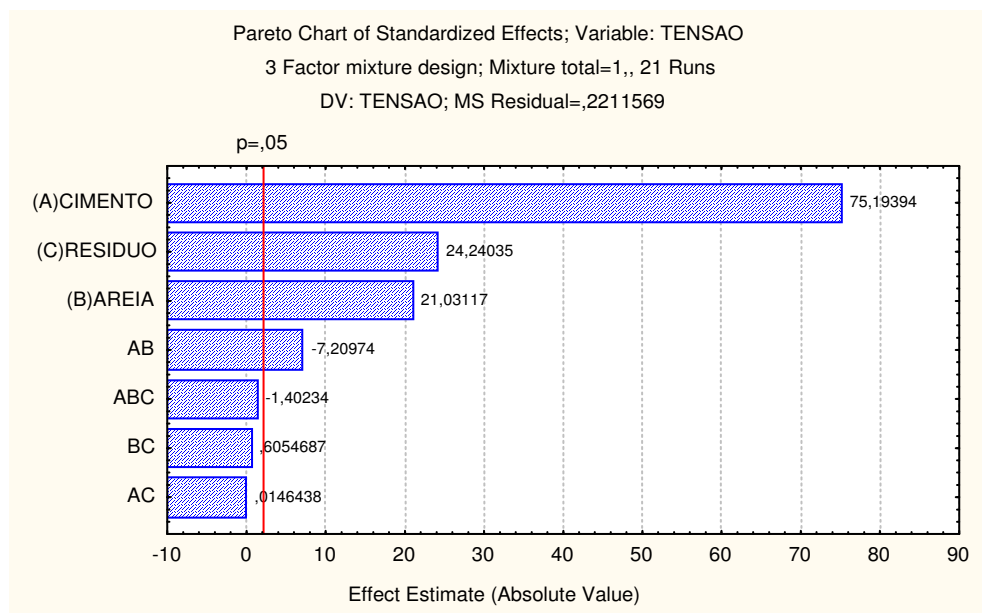


Figura 6.10 — Significância Estatística dos Parâmetros do Modelo Cúbico Especial.

Deve-se então passar para um outro modelo que seja estatisticamente significativo, pois os termos eliminados da Equação 6.10 a transformam na Equação 6.8, que se trata da análise do modelo quadrático modificado, já realizado anteriormente. O próximo modelo testado neste trabalho é o modelo cúbico completo.

6.4.1.4 – Modelo cúbico completo

Seguindo a mesma lógica da montagem dos outros modelos gerados até o momento, neste trabalho, o modelo cúbico completo possui mais três termos em sua formulação, sendo necessárias dez misturas para a elaboração do mesmo.

Os pseudocomponentes são mostrados na Tabela 6.31.

Tabela 6.31 - Pontos Experimentais do Modelo Cúbico Completo.

Pontos	Componentes Originais		
	x_1	x_2	x_3
y'_1	0,20	0,70	0,10
y'_2	0,10	0,80	0,10
y'_3	0,10	0,70	0,20
y'_{123}	0,13	0,73	0,13
y'_{112}	0,17	0,73	0,10
y'_{122}	0,13	0,77	0,10
y'_{223}	0,10	0,77	0,13
y'_{233}	0,10	0,73	0,17
y'_{113}	0,17	0,70	0,13
y'_{133}	0,13	0,70	0,17

Equações do modelo cúbico completo e com seus parâmetros são indicadas nas Equações 6.11 e 6.12, respectivamente.

$$\hat{y} = b_1 x'_1 + b_2 x'_2 + b_3 x'_3 + b_{12} x'_1 x'_2 + b_{13} x'_1 x'_3 + b_{23} x'_2 x'_3 + b_{123} x'_1 x'_2 x'_3 + d_{112} x'_1 x'_2 (x'_1 - x'_2) + d_{113} x'_1 x'_3 (x'_1 - x'_3) + d_{223} x'_2 x'_3 (x'_2 - x'_3) \quad (6.11)$$

$$\hat{y} = 20,42 x'_1 + 5,71 x'_2 + 6,58 x'_3 - 4,89 x'_1 x'_2 - 7,28 x'_1 x'_3 - 3,55 x'_2 x'_3 + 7,72 x'_1 x'_2 x'_3 - 0,97 x'_1 x'_2 (x'_1 - x'_2) - 6,00 x'_1 x'_3 (x'_1 - x'_3) - 2,99 x'_2 x'_3 (x'_2 - x'_3) \quad (6.12)$$

➤ Intervalos de confiança

$$b \pm t_{n-p} \times (\text{erro padrão})$$

Onde:

$n = 30$ ensaios

$$t_{20} = 2,086$$

$p = 10$ parâmetros

erro padrão dos parâmetros b_i 's = 0,216

erro padrão dos parâmetros b_{ij} 's = 0,974

erro padrão dos parâmetros b_{ijk} = 7,056

erro padrão dos parâmetros d_{ijk} = 2,177

Tabela 6.32 – Intervalos de Confiança dos Parâmetros do Modelo Cúbico Completo.

Parâmetros		Intervalo de Confiança	
b_1	20,42	19,96	20,87
b_2	5,71	5,26	6,16
b_3	6,58	6,13	7,03
b_{12}	-4,89	-6,92	-2,85
b_{13}	-7,28	-9,31	-5,24
b_{23}	-3,55	-5,58	-1,51
b_{123}	7,72	-7,00	22,43
d_{112}	-0,97	-5,51	3,57
d_{113}	-6,00	-10,54	-1,46
d_{223}	-2,99	-7,54	1,55

Os intervalos de confiança dos parâmetros do modelo cúbico completo, vistos na Tabela 6.32 e ilustrados na Figura 6.11, indicam que os parâmetros b_{123} , d_{112} e d_{223} estão entre intervalos positivos e negativos e, pelo mesmo motivo do modelo cúbico especial, devem ser retirados da análise.

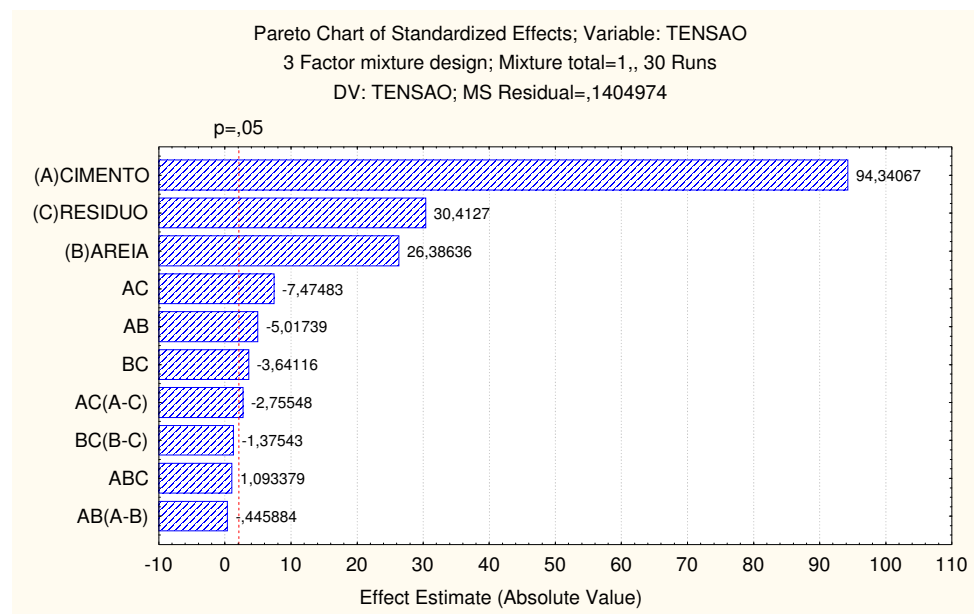


Figura 6.11 - Significância Estatística para os Parâmetros do Modelo Cúbico Completo.

Deste modo a Equação 6.13 representa o modelo cúbico completo, que daqui por diante não considera os termos estatisticamente fora do intervalo de confiança.

$$\hat{y}^* = 20,35 x'_1 + 5,63 x'_2 + 6,61 x'_3 - 4,36 x'_1 x'_2 - 7,00 x'_1 x'_3 - 3,23 x'_2 x'_3 - 5,79 x'_1 x'_3 (x'_1 - x'_3) \quad (6.13)$$

➤ Análise do modelo

Para a comprovação do modelo foram analisados mais três pontos dentro da região experimental, sendo que os pontos de teste não foram usados para a confecção da Equação 6.13. Nas Tabelas 6.34 e 6.35, respectivamente, estão expostos os resultados experimentais, tanto da equação original do modelo, quanto da modificada, e a ANOVA.

Tabela 6.33 – Valores Previstos pelo Modelo Cúbico Completo e Valores Médios de Observações Feitas em Ensaios de Resistência à Compressão.

Misturas	x_1	x_2	x_3	x_{112}	x_{122}	x_{113}	x_{133}	x_{223}	x_{233}	x_{123}	x_{1123}	x_{1223}	x_{1233}
\hat{y}	20,42	5,71	6,58	14,35	9,59	13,74	10,02	4,99	5,72	9,44	13,96	7,19	8,04
\hat{y}^*	20,35	5,63	6,62	14,47	9,57	13,79	10,07	5,24	5,57	9,24	13,94	7,21	7,80
\bar{y}	20,42	5,71	6,58	14,35	9,59	13,74	10,02	4,99	5,72	9,44	17,29	8,20	9,67

Destaca-se que os resultados gerados pelo modelo inicial (\hat{y}) são sensivelmente melhores que o modelo modificado (\hat{y}^*) quando comparados à média dos experimentos (\bar{y}), porém ainda torna-se necessária a sua eliminação em virtude da não confiabilidade estatística de seus coeficientes para representar toda a região experimental.

Segue-se a análise de variância dos experimentos.

Tabela 6.34 – ANOVA do Modelo Cúbico Completo Modificado, para Consistência de 255 ± 10 mm.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	774,63	6	129,10
Resíduos Experimentais	37,11	32	1,16
Falta de ajuste	33,36	6	5,56
Erro puro	3,74	26	0,14
Total	811,74	38	21,36

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 95,42$ %

% máxima de variação explicável: $(SQ_T - SQ_{ep})/SQ_T = 99,54$ %

Com os dados da Tabela 6.34 observa-se que o coeficiente R^2 do modelo cúbico completo é de 95,42 % que é comparado à máxima variação explicável de 99,54 %. Isto significa que a equação de regressão (Equação 6.13) está bem ajustada aos valores reais obtidos.

➤ Critério de Fisher

Com 95 % de confiança pelo critério de Fisher, tem-se para $F_{6,32} = 2,42$.

$$MQ_R/MQ_r > 5.F_{6,32}$$

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} = 111,29 > 12,21$$

A razão $\frac{MQ_R}{MQ_r}$ é muito maior que o produto $5.F_{6,32}$ indicando uma regressão altamente significativa.

➤ **Falta de ajuste e erro puro**

$$v_1 = m - p \qquad v_2 = n - m$$

Em que m é o número de ensaios distintos, p o número de parâmetros do modelo e n o número total de experimentos. Para o nível de confiança de 95 % o valor de $F_{6,26} = 2,47$

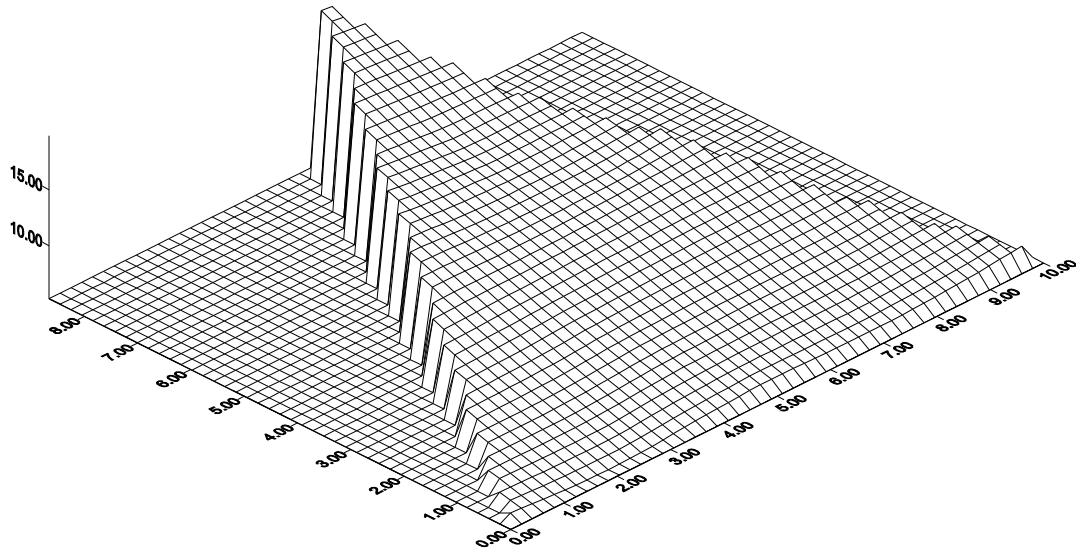
$$\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}} = 39,71 > 2,47$$

O modelo cúbico completo apresenta falta de ajuste superior aos modelos linear e quadrático.

➤ **Superfície de resposta**

As superfícies de respostas geradas pelo modelo cúbico completo (\hat{y}^*) e seus respectivos pontos experimentais são representados na Figura 6.12.

(a)



(b)

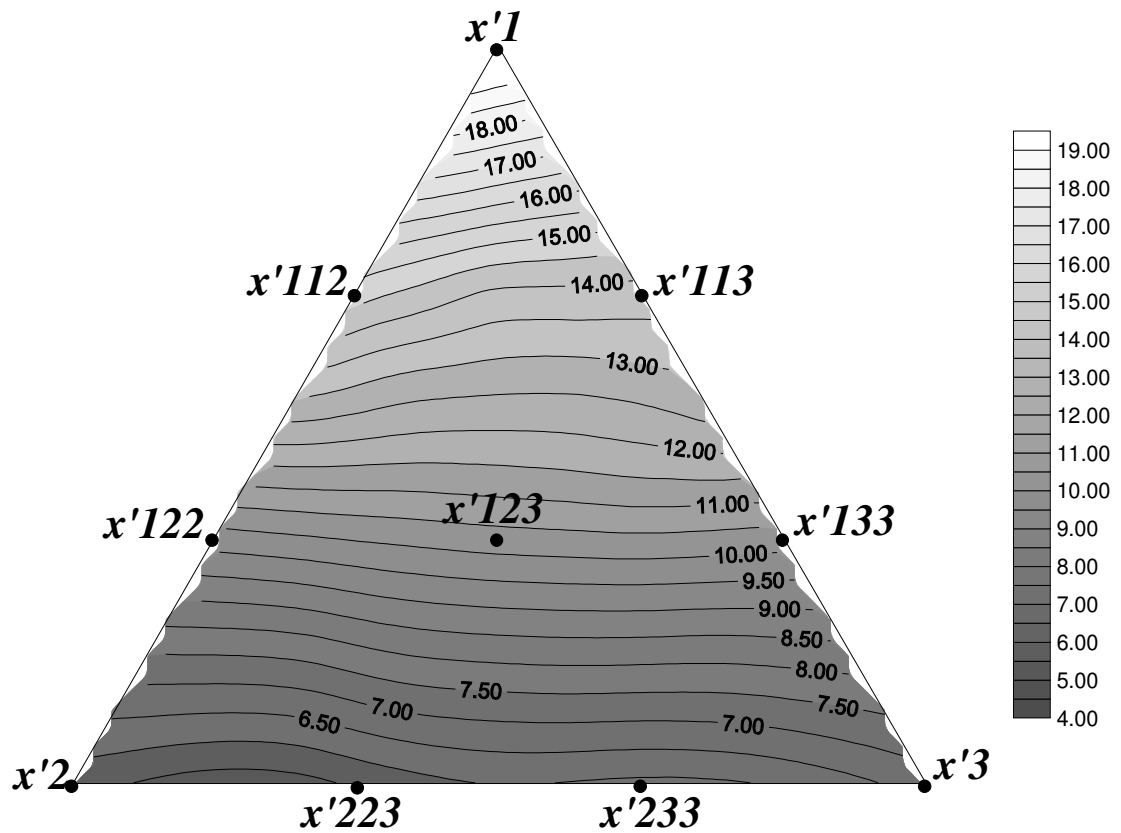


Figura 6.12 – Superfície de Resposta (a) e Curvas Tipo “Iso-resposta” do Modelo Cúbico Completo para Resistência à Compressão (MPa) da Região Experimental de Consistência 255 ± 10 mm (b).

6.4.1.5 – Comparativo entre modelos para consistência de 255 ± 10 mm

Para que se tenha uma estimativa geral dos erros gerados pelos modelos calculados para as misturas de consistência de 255 ± 10 mm, a Tabela 6.35 mostra os valores médios de todos os pontos experimentais (\bar{y}) usados neste trabalho e, também, as estimativas (\hat{y}) dos modelos matemáticos.

Tabela 6.35 – Comparação entre os Valores Médios Observados (\bar{y}) e os Valores Previstos pelos Modelos (\hat{y} , \hat{y}^*).

Composição das Misturas			\bar{y}	\hat{y}	\hat{y}^*	\hat{y}	\hat{y}^*
x'_1	x'_2	x'_3	Observado	Linear	Quadrático	Cúbico Especial	Cúbico Completo
1	0	0	20,42	20,42	20,41	20,42	20,35
0	1	0	5,71	5,71	5,78	5,71	5,63
0	0	1	6,58	6,58	6,64	6,58	6,62
1/2	1/2	0	10,67	13,06	10,67	10,67	12,56
1/2	0	1/2	13,50	13,50	13,52	10,50	12,57
0	1/2	1/2	6,35	6,14	6,21	6,35	5,78
1/3	1/3	1/3	9,44	10,90	9,86	9,44	10,12
2/3	1/3	0	14,36	15,51	13,37	13,38	14,85
1/3	2/3	0	9,60	10,61	8,50	8,48	9,57
0	2/3	1/3	4,99	6,00	6,07	6,18	5,24
0	1/3	2/3	5,72	6,29	6,35	6,47	5,57
2/3	0	1/3	13,74	15,80	15,82	15,81	13,79
1/3	0	2/3	10,02	11,19	11,23	11,19	10,07
2/3	1/6	1/6	17,29	15,66	14,50	14,37	13,94
1/6	2/3	1/6	8,20	8,31	7,28	7,08	7,21
1/6	1/6	2/3	9,67	8,74	8,52	8,32	7,81
Soma dos Resíduos Experimentais Deixados Pelos Modelos ¹			$\sum e$	13,70	12,67	15,67	11,48
Média dos Resíduos Experimentais			\bar{e}	0,86	0,79	3,03	0,71

¹ Valores que excedem aos do cálculo dos modelos.

Analisando-se a Tabela 6.35 conclui-se que, para a consistência de 255 ± 10 mm o modelo cúbico completo se ajusta melhor aos resultados experimentais, o que permite estimar respostas estatisticamente mais precisas, para região delimitada por seus pseudocomponentes, reduzindo os resíduos experimentais.

6.4.2 – Consistência de 255 ± 20 mm

Seguindo a mesma seqüência de cálculo apresentada para a consistência de 255 ± 10 mm, parte-se agora para uma nova região experimental delimitada por misturas com intervalo de consistência maior, cujas restrições experimentais são as seguintes:

$$x_1 \geq 0,10 ; x_2 \geq 0,60 \text{ e } x_3 \geq 0,10 \quad (6.14)$$

Sendo $L = 0,10 + 0,60 + 0,10 = 0,80$; os pseudocomponentes são calculados por meio das Equações 6.15:

$$x'_1 = \frac{x_1 - 0,10}{0,20}, \quad x'_2 = \frac{x_2 - 0,60}{0,20}, \quad x'_3 = \frac{x_3 - 0,10}{0,20} \quad (6.15)$$

Substituindo os L – pseudocomponentes, obtém-se a Tabela 6.36 que mostra a composição das misturas para a consistência de 255 ± 20 mm.

Com o aumento do intervalo de consistência da argamassa, a mistura admite a adição de mais finos (filler), e com isso, a adição de material de menor granulometria aumenta a proporção máxima de resíduo de rocha de 20 para 30 %.

Para facilitar a compreensão do leitor, e mantendo a mesma estrutura das análises anteriores, os Itens 6.4.2.1 a 6.4.2.4 trazem de forma sucinta a construção dos modelos matemáticos, por meio de tabelas que mostram os pontos e as equações de cada modelo, as previsões do modelo e a comparação com os valores reais, bem como a análise estatística das respostas para a consistência de 255 ± 20 mm.

Tabela 6.36 – Composição das Misturas para a Consistência de 255 ± 20 mm.

Respostas	Composição dos Pseudocomponentes			Componentes Originais		
	x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3
y'_1	1	0	0	0,30	0,60	0,10
y'_2	0	1	0	0,10	0,80	0,10
y'_3	0	0	1	0,10	0,60	0,30
y'_{12}	1/2	1/2	0	0,20	0,70	0,10
y'_{13}	1/2	0	1/2	0,20	0,60	0,20
y'_{23}	0	1/2	1/2	0,10	0,70	0,20
y'_{123}	1/3	1/3	1/3	0,17	0,67	0,17
y'_{112}	2/3	1/3	0	0,23	0,67	0,10
y'_{122}	1/3	2/3	0	0,17	0,73	0,10
y'_{223}	0	2/3	1/3	0,10	0,73	0,17
y'_{233}	0	1/3	2/3	0,10	0,67	0,23
y'_{113}	2/3	0	1/3	0,23	0,60	0,17
y'_{133}	1/3	0	2/3	0,17	0,60	0,23
y'_{1123}	2/3	1/6	1/6	0,23	0,63	0,13
y'_{1223}	1/6	2/3	1/6	0,13	0,73	0,13
y'_{1233}	1/6	1/6	2/3	0,13	0,63	0,23

6.4.2.1 – Modelo linear

Tabela 6.37 – Pontos Experimentais do Modelo Linear.

Pontos	Componentes Originais		
	x_1	x_2	x_3
y'_1	0,30	0,60	0,10
y'_2	0,10	0,80	0,10
y'_3	0,10	0,60	0,30

$$\hat{y} = 37,71 x'_1 + 6,65 x'_2 + 9,63 x'_3 \quad (6.16)$$

Tabela 6.38 – Valores Calculados pelo Modelo Linear e Valores Médios de Observações Feitas em Ensaios de Resistência à Compressão.

Misturas	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	x_{1123}	x_{1223}	x_{1233}
\hat{y}	37,71	6,65	9,63	22,18	23,67	8,14	18,00	27,86	12,32	13,82
\bar{y}	37,71	6,65	9,63	22,79	22,47	7,05	6,70	26,66	8,81	10,99

Tabela 6.39 - ANOVA do Modelo Linear, para Consistência de 255 ± 20 mm.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	2805,16	2	1402,58
Resíduos Experimentais	345,72	27	12,80
Falta de ajuste	328,16	7	46,88
Erro puro	17,56	20	0,88
Total	3150,89	29	108,65

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 89,02$ %

% máxima de variação explicável: $(SQ_T - SQ_{ep})/SQ_T = 99,44$ %

➤ **Critério de Fisher**

$$F_{2,27} = 3,35$$

$$MQ_R/MQ_r > 5.F_{2,27}$$

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} = 109,57 > 16,75$$

➤ **Falta de ajuste e erro puro**

$$F_{7,20} = 2,51$$

$$\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}} = 53,27 > 2,51$$

6.4.2.2 – Modelo quadrático

Tabela 6.40 – Pontos Experimentais do Modelo Quadrático.

Pontos	Componentes Originais		
	x_1	x_2	x_3
y'_1	0,30	0,60	0,10
y'_2	0,10	0,80	0,10
y'_3	0,10	0,60	0,30
y'_{12}	0,20	0,70	0,10
y'_{13}	0,20	0,60	0,20
y'_{23}	0,10	0,70	0,20

A Equação 6.17 do modelo quadrático possui todos os parâmetros b_{ij} fora dos intervalos de confiança e, ao serem retirados da equação original, descaracteriza a equação quadrática. Somente a título de informação, o modelo quadrático será posteriormente comparado com os outros modelos, pois existe incerteza estatística em seus parâmetros.

$$\hat{y} = 37,71 x'_1 + 6,65 x'_2 + 9,63 x'_3 + 2,44 x'_1 x'_2 - 4,83 x'_1 x'_3 - 4,37 x'_2 x'_3 \quad (6.17)$$

6.4.2.3 - Modelo cúbico especial

Tabela 6.41 – Pontos Experimentais do Modelo Cúbico Especial.

Pontos	Componentes Originais		
	x_1	x_2	x_3
y'_1	0,30	0,60	0,10
y'_2	0,10	0,80	0,10
y'_3	0,10	0,60	0,30
y'_{12}	0,20	0,70	0,10
y'_{13}	0,20	0,60	0,20
y'_{23}	0,10	0,70	0,20
y'_{123}	0,17	0,67	0,17

$$\hat{y} = 37,71x'_1 + 6,65x'_2 + 9,63x'_3 + 2,44x'_1x'_2 - 4,83x'_1x'_3 - 4,37x'_2x'_3 - 284,80x'_1x'_2x'_3 \quad (6.18)$$

Considerando apenas os termos significativos do modelo em questão, obtém-se a equação 6.19 que representa o modelo cúbico especial modificado.

$$\hat{y}^* = 37,71x'_1 + 6,65x'_2 + 9,63x'_3 - 284,80x'_1x'_2x'_3 \quad (6.19)$$

Tabela 6.42 – Valores Obtidos pelo Modelo Cúbico Especial (original e modificado) e Valores Médios Observados em Ensaios de Resistência à Compressão

Misturas	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	x_{1123}	x_{1223}	x_{1233}
\hat{y}	37,71	6,65	9,63	22,79	20,47	7,05	6,70	22,19	6,70	7,59
\hat{y}^*	37,64	6,62	8,88	22,13	23,26	7,75	6,70	22,17	6,66	7,79
\bar{y}	37,71	6,65	9,63	22,79	22,47	7,05	6,70	26,66	8,81	10,99

Tabela 6.43 – ANOVA do Modelo Cúbico Especial Modificado, para Consistência de 255 ± 20 mm.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	3068,52	3	1022,84
Resíduos Experimentais	82,37	26	3,17
Falta de ajuste	64,80	6	10,80
Erro puro	17,56	20	0,88
Total	3150,89	29	108,65

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 97,38\%$

% máxima de variação explicável: $(SQ_T - SQ_{ep})/SQ_T = 99,44\%$

➤ **Critério de Fisher**

$$F_{3,26} = 2,98$$

$$MQ_R/MQ_T > 5. F_{3,26}$$

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} = 322,66 > 14,90$$

Pelo teste F ao nível de 95 % de probabilidade, conclui-se que o modelo cúbico especial apresenta bom ajuste aos dados experimentais.

➤ **Falta de ajuste e erro puro**

$$F_{6,20} = 2,60$$

$$\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}} = 12,27 > 2,60$$

A razão $\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}}$ comparada ao valor de $F_{6,20}$ mostra que o modelo em questão apresenta uma pequena falta de ajuste.

6.4.2.4 – Modelo cúbico completo

Tabela 6.44 – Pontos Experimentais do Modelo Cúbico Completo.

Pontos	Componentes Originais		
	x_1	x_2	x_3
y'_1	0,30	0,60	0,10
y'_2	0,10	0,80	0,10
y'_3	0,10	0,60	0,30
y'_{123}	0,17	0,67	0,17
y'_{112}	0,23	0,67	0,10
y'_{122}	0,17	0,73	0,10
y'_{223}	0,10	0,73	0,17
y'_{233}	0,10	0,67	0,23
y'_{113}	0,23	0,60	0,17
y'_{133}	0,17	0,60	0,23

$$\hat{y} = 37,71 x'_1 + 6,65 x'_2 + 9,63 x'_3 - 6,38 x'_1 x'_2 - 10,04 x'_1 x'_3 - 5,51 x'_2 x'_3 - 239,27 x'_1 x'_2 x'_3 - 13,59 x'_1 x'_2 (x'_1 - x'_2) - 16,01 x'_1 x'_3 (x'_1 - x'_3) + 4,22 x'_2 x'_3 (x'_2 - x'_3) \quad (6.20)$$

Considerando apenas os termos significativos tem-se o modelo cúbico completo modificado – Equação 6.21.

$$\hat{y}^* = 37,71 x'_1 + 6,65 x'_2 + 9,63 x'_3 - 6,38 x'_1 x'_2 - 10,04 x'_1 x'_3 - 5,51 x'_2 x'_3 - 239,27 x'_1 x'_2 x'_3 - 13,59 x'_1 x'_2 (x'_1 - x'_2) - 16,01 x'_1 x'_3 (x'_1 - x'_3) \quad (6.21)$$

Tabela 6.45 – Valores Obtidos pelo Modelo Cúbico Completo (original e modificado) e Valores Médios Observados em Ensaios de Resistência à Compressão.

Misturas	x_1	x_2	x_3	x_{112}	x_{122}	x_{113}	x_{133}	x_{223}	x_{233}	x_{123}	x_{1123}	x_{1223}	x_{1233}
\hat{y}	37,71	6,65	9,63	24,93	16,59	24,94	17,95	6,73	7,10	6,70	19,80	7,28	8,13
\hat{y}^*	37,71	6,74	9,54	24,93	16,59	24,94	17,95	6,45	7,38	6,70	19,80	7,06	8,35
\bar{y}	37,71	6,65	9,63	24,93	16,59	24,94	17,95	6,73	7,10	6,70	26,66	8,81	10,99

Tabela 6.46 - ANOVA do Modelo Cúbico Especial Modificado, para Consistência de 255 ± 20 mm.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	3521,59	8	440,20
Resíduos Experimentais	113,02	30	3,77
Falta de ajuste	92,83	4	23,20
Erro puro	20,19	26	0,77
Total	3634,61	38	95,65

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 96,90$ %

% máxima de variação explicável: $(SQ_T - SQ_{ep})/SQ_T = 99,44$ %

➤ **Critério de Fisher**

$$F_{8,30} = 2,27$$

$$MQ_R/MQ_r > 5 \cdot F_{8,30}$$

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} = 116,76 > 11,35$$

➤ **Falta de ajuste e erro puro**

$$F_{4,26} = 2,74$$

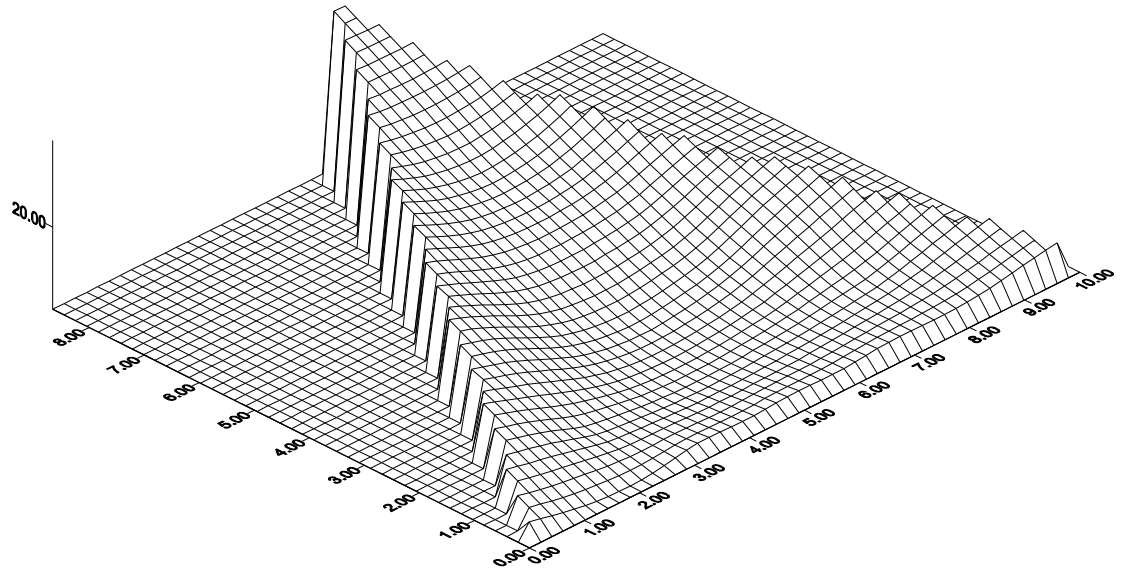
$$\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}} = 26,23 > 2,74$$

O modelo cúbico completo apresenta um falta de ajuste ligeiramente maior que o modelo cúbico especial.

➤ **Superfície de resposta**

A Figura 6.13 representa a superfície de resposta para este modelo cúbico completo.

(a)



(b)

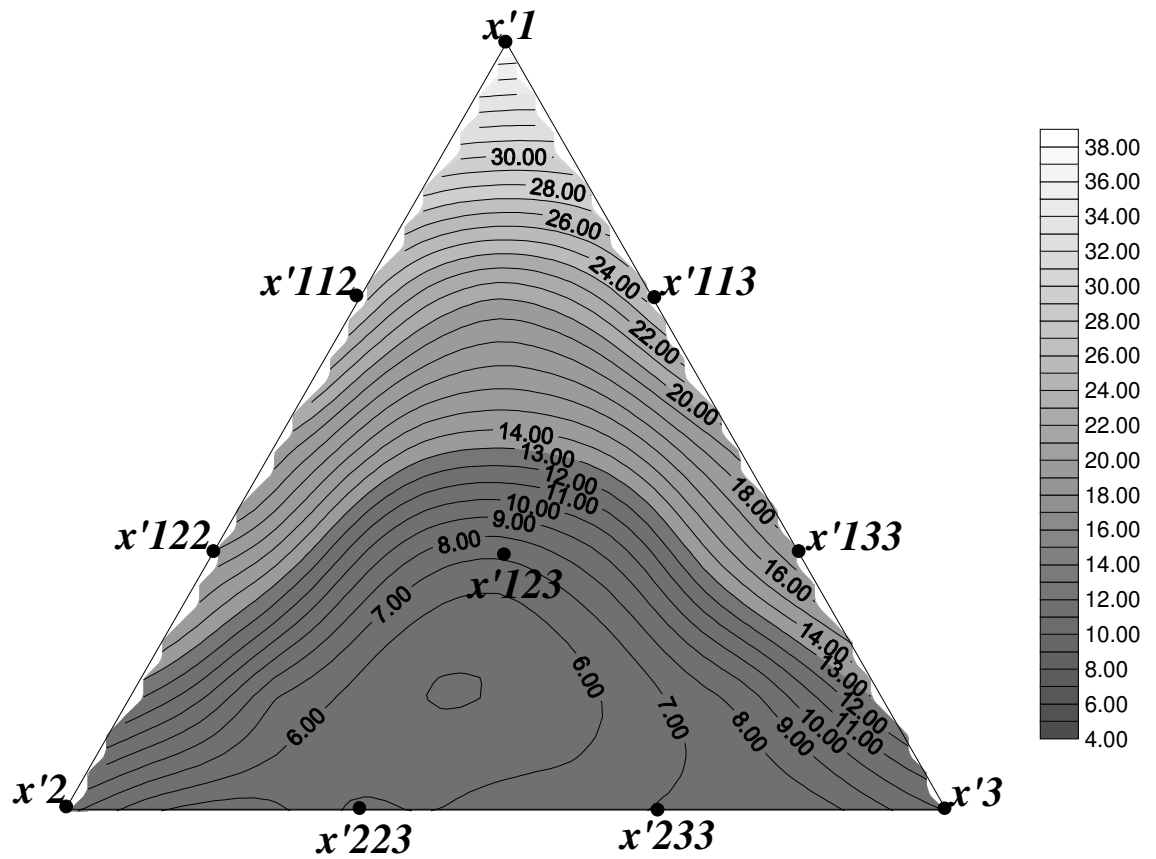


Figura 6.13 – Superfície de Resposta (a) e Curvas Tipo “Iso-resposta” do Modelo Cúbico Completo para Resistência à Compressão (MPa) da Região Experimental de Consistência de 255 ± 20 mm (b).

6.4.2.5 – Comparativo entre modelos para consistência de 255 ± 20 mm

A Tabela 6.47 mostra os valores médios de todos os pontos experimentais (\bar{y}), as estimativas (\hat{y}) dos modelos matemáticos e dos modelos matemáticos modificados (\hat{y}^*).

Tabela 6.47 – Comparação entre os Valores Médios Observados (\bar{y}) e os Valores Previstos pelos Modelos (\hat{y}).

Composição das Misturas			\bar{y}	\hat{y}	\hat{y}	\hat{y}^*	\hat{y}
x'_1	x'_2	x'_3	Observado	Linear	Quadrático	Cúbico Especial	Cúbico Completo
1	0	0	37,71	37,71	37,71	37,64	37,71
0	1	0	6,65	6,65	6,65	6,62	6,74
0	0	1	9,63	9,63	9,63	8,88	9,54
1/2	1/2	0	22,79	22,18	22,79	22,13	20,58
1/2	0	1/2	22,47	23,67	22,47	23,26	20,17
0	1/2	1/2	7,05	8,14	7,05	7,75	6,76
1/3	1/3	1/3	6,70	18,00	17,24	6,70	6,70
2/3	1/3	0	24,93	27,36	27,90	27,30	24,93
1/3	2/3	0	16,59	17,00	17,54	16,96	16,59
0	2/3	1/3	6,73	7,64	6,67	7,37	6,45
0	1/3	2/3	7,10	8,64	6,66	8,13	7,38
2/3	0	1/3	24,94	28,35	27,28	28,06	24,93
1/3	0	2/3	17,95	19,00	17,92	18,47	17,95
2/3	1/6	1/6	26,66	27,86	27,47	22,17	19,80
1/6	2/3	1/6	8,81	12,32	11,97	6,66	7,06
1/6	1/6	2/3	10,99	13,82	12,86	7,79	8,35
Soma dos Resíduos Experimentais Deixados pelos Modelos ²			Σe	31,52	23,20	20,90	16,80
Média dos Resíduos Experimentais			\bar{e}	1,97	1,45	1,31	1,05

² Valores que não entraram no cálculo do modelo

Comparando os valores da média dos resíduos experimentais dos modelos matemáticos juntamente com a análise de variância e os testes estatísticos, conclui-se que, para as argamassas de consistência de 255 ± 20 mm, o modelo cúbico completo é o que melhor se ajusta aos resultados reais.

6.4.3 – Consistência de 255 ± 30 mm

Seguem-se os resultados obtidos para a superfície de resposta de consistência de 255 ± 30 mm. Com a imposição desta consistência têm-se as seguintes restrições experimentais:

$$x_1 \geq 0,10 ; x_2 \geq 0,60 \text{ e } x_3 \geq 0,10 \quad (6.22)$$

Sendo $L = 0,10 + 0,60 + 0,10 = 0,80$; os pseudocomponentes são calculados por meio das Equações 6.23:

$$x'_1 = \frac{x_1 - 0,10}{0,20}, \quad x'_2 = \frac{x_2 - 0,60}{0,20}, \quad x'_3 = \frac{x_3 - 0,10}{0,20} \quad (6.23)$$

Substituindo os L – pseudocomponentes obtem-se a Tabela 6.48, que mostra a composição das misturas para a consistência de 255 ± 30 mm.

Com o aumento do intervalo de consistência da argamassa, a mistura admite a adição de mais finos, e com isso, a proporção máxima de resíduo de rocha na mistura aumenta de 30 para 40 %.

Mantendo-se a mesma estrutura das análises anteriores, os Itens 6.4.3.1 a 6.4.3.4 mostram os resultados obtidos pela construção dos modelos matemáticos da região experimental de consistência de 255 ± 30 mm.

Tabela 6.48 – Composição das Misturas para a Consistência de 255 ± 30 mm.

Respostas	Composição dos Pseudocomponentes			Componentes Originais		
	x'_1	x'_2	x'_3	x_1	x_2	x_3
y'_1	1	0	0	0,40	0,50	0,10
y'_2	0	1	0	0,10	0,80	0,10
y'_3	0	0	1	0,10	0,50	0,40
y'_{12}	1/2	1/2	0	0,25	0,65	0,10
y'_{13}	1/2	0	1/2	0,25	0,50	0,25
y'_{23}	0	1/2	1/2	0,10	0,65	0,25
y'_{123}	1/3	1/3	1/3	0,20	0,60	0,20
y'_{112}	2/3	1/3	0	0,30	0,60	0,10
y'_{122}	1/3	2/3	0	0,20	0,70	0,10
y'_{223}	0	2/3	1/3	0,10	0,70	0,20
y'_{233}	0	1/3	2/3	0,10	0,60	0,30
y'_{113}	2/3	0	1/3	0,30	0,50	0,20
y'_{133}	1/3	0	2/3	0,20	0,50	0,30
y'_{1123}	2/3	1/6	1/6	0,30	0,55	0,15
y'_{1223}	1/6	2/3	1/6	0,15	0,70	0,15
y'_{1233}	1/6	1/6	2/3	0,15	0,55	0,30

6.4.3.1 – Modelo linear

Tabela 6.49 – Pontos Experimentais do Modelo Linear.

Pontos	Componentes Originais		
	x_1	x_2	x_3
y'_1	0,40	0,50	0,10
y'_2	0,10	0,80	0,10
y'_3	0,10	0,50	0,40

$$\hat{y} = 39,07 x'_1 + 6,55 x'_2 + 9,22 x'_3 \quad (6.24)$$

Tabela 6.50 – Valores Previstos pelo Modelo Linear e Valores Médios Observados em Ensaios de Resistência à Compressão.

Misturas	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	x_{1123}	x_{1223}	x_{1233}
\hat{y}	39,07	6,55	9,22	22,81	24,14	7,89	18,28	28,67	12,42	13,75
\bar{y}	39,07	6,56	9,22	26,18	8,08	30,14	29,82	39,64	17,35	23,12

Tabela 6.51 - ANOVA do Modelo Linear, para Consistência de 255 ± 30 mm.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	1587,94	2	793,97
Resíduos Experimentais	2557,13	27	94,71
Falta de ajuste	2483,73	7	354,82
Erro puro	73,40	20	3,67
Total	4145,07	29	142,93

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 38,31$ %

% máxima de variação explicável: $(SQ_T - SQ_{ep})/SQ_T = 98,23$ %

➤ **Crítério de Fisher**

$$F_{2,27} = 3,35$$

$$MQ_R/MQ_r > 5.F_{2,27}$$

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} = 8,38 < 16,75$$

➤ **Falta de ajuste e erro puro**

$$F_{7,20} = 2,51$$

$$\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}} = 96,68 > 2,51$$

A porcentagem máxima de variação explicada (R^2) é de apenas 38,31 %, que é comparada à máxima variação explicável de 98,23 %. Pelo Critério de Fisher (teste F), o modelo linear não possui um bom ajuste, além de apresentar falta de ajuste evidente.

Conclui-se que a equação de regressão do modelo linear (6.24) para a consistência 255 ± 30 mm, não possui correlação aos dados experimentais e, por isso, deve ser desconsiderada da análise.

6.4.3.2 – Modelo quadrático

Tabela 6.52 – Pontos Experimentais do Modelo Quadrático.

Pontos	Componentes Originais		
	x_1	x_2	x_3
y'_1	0,40	0,50	0,10
y'_2	0,10	0,80	0,10
y'_3	0,10	0,50	0,40
y'_{12}	0,25	0,65	0,10
y'_{13}	0,25	0,50	0,25
y'_{23}	0,10	0,65	0,25

$$\hat{y} = 39,07 x'_1 + 6,56 x'_2 + 9,22 x'_3 + 13,47 x'_1 x'_2 - 64,25 x'_1 x'_3 + 88,99 x'_2 x'_3 \quad (6.17)$$

Tabela 6.53 – Valores Previstos pelo Modelo Quadrático e Valores Médios Observados em Ensaios de Resistência à Compressão.

Misturas	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	x_{1123}	x_{1223}	x_{1233}
\hat{y}	39,07	6,56	9,22	26,18	8,08	30,14	22,52	25,50	22,02	16,87
\bar{y}	39,07	6,56	9,22	26,18	8,08	30,14	29,82	39,64	17,35	23,12

Tabela 6.54 – ANOVA do Modelo Quadrático, para Consistência de 255 ± 30 mm.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	3478,02	5	695,60
Resíduos Experimentais	667,05	24	27,79
Falta de ajuste	593,64	4	148,41
Erro puro	73,40	20	3,67
Total	4145,07	29	142,93

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 83,90$ %

% máxima de variação explicável: $(SQ_T - SQ_{ep})/SQ_T = 98,23$ %

➤ **Critério de Fisher**

$$F_{5,24} = 2,62$$

$$MQ_R/MQ_r > 5 F_{5,24}$$

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} = 25,03 > 13,10$$

➤ **Falta de ajuste e erro puro**

$$F_{4,20} = 2,87$$

$$\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}} = 40,44 > 2,62$$

O coeficiente (R^2) é de 83,90 %, que é comparado à máxima variação explicável de 98,23 %, o modelo quadrático possui um bom ajuste pelo teste F , mas apresenta falta de ajuste evidente. A equação de regressão do modelo quadrático (6.17) se comporta muito melhor que o modelo linear.

6.4.3.3 - Modelo cúbico especial

Tabela 6.55 – Pontos experimentais do Modelo Cúbico Especial.

Pontos	Componentes Originais		
	x_1	x_2	x_3
y'_1	0,40	0,50	0,10
y'_2	0,10	0,80	0,10
y'_3	0,10	0,50	0,40
y'_{12}	0,25	0,65	0,10
y'_{13}	0,25	0,50	0,25
y'_{23}	0,10	0,65	0,25
y'_{123}	0,20	0,60	0,20

$$\hat{y} = 39,07 x'_1 + 6,55 x'_2 + 9,22 x'_3 + 13,47 x'_1 x'_2 - 64,25 x'_1 x'_3 - 88,99 x'_2 x'_3 + 196,92 x'_1 x'_2 x'_3 \quad (6.18)$$

Tabela 6.56 – Valores Previstos pelo Modelo Cúbico Especial e Valores Médios Observados em Ensaios de Resistência à Compressão.

Misturas	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	x_{1123}	x_{1223}	x_{1233}
\hat{y}	39,07	6,56	9,22	26,18	8,08	30,14	29,82	29,15	25,66	20,52
\bar{y}	39,07	6,56	9,22	26,18	8,08	30,14	29,82	39,64	17,35	23,12

Tabela 6.57 – ANOVA do Modelo Cúbico Especial, para Consistência de 255 ± 30 mm.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	3621,89	6	603,65
Resíduos Experimentais	523,17	23	22,65
Falta de ajuste	449,77	3	149,92
Erro puro	73,40	20	3,67
Total	4145,07	29	142,93

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 87,38 \%$

% máxima de variação explicável: $(SQ_T - SQ_{ep})/SQ_T = 98,23 \%$

➤ **Critério de Fisher**

$$F_{6,23} = 2,53$$

$$MQ_R/MQ_r > 5 F_{6,23}$$

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} = 26,65 > 12,65$$

➤ **Falta de ajuste e erro puro**

$$F_{3,20} = 3,10$$

$$\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}} = 40,85 > 3,10$$

O modelo cúbico especial apresenta coeficiente (R^2) é de 87,38 %, um pouco melhor que o modelo quadrático, além de possuir ajuste pelo teste F , mas assim como o modelo quadrático, apresenta falta de ajuste evidente.

6.4.3.4 – Modelo cúbico completo

Tabela 6.58 – Pontos Experimentais do Modelo Cúbico Completo.

Pontos	Componentes Originais		
	x_1	x_2	x_3
y'_1	0,40	0,50	0,10
y'_2	0,10	0,80	0,10
y'_3	0,10	0,50	0,40
y'_{123}	0,20	0,60	0,20
y'_{112}	0,30	0,60	0,10
y'_{122}	0,20	0,70	0,10
y'_{223}	0,10	0,70	0,20
y'_{233}	0,10	0,60	0,30
y'_{113}	0,30	0,50	0,20
y'_{133}	0,20	0,50	0,30

$$\hat{y} = 39,07 x'_1 + 6,65 x'_2 + 9,22 x'_3 + 63,95 x'_1 x'_2 + 31,37 x'_1 x'_3 + 8,08 x'_2 x'_3 + 1,33 x'_1 x'_2(x'_1 - x'_2) + 67,35 x'_1 x'_3(x'_1 - x'_3) + 20,95 x'_1 x'_3(x'_1 - x'_3) + 20,33 x'_1 x'_2 x'_3 \quad (6.19)$$

Considerando apenas os termos significativos temos o modelo cúbico completo modificado – Equação 6.20.

$$\hat{y}^* = 39,45x'_1 + 8,04x'_2 + 9,35x'_3 + 60,55x'_1x'_2 + 31,01x'_1x'_3 + 69,81 x'_1 x'_2(x'_1 - x'_2) \quad (6.20)$$

Tabela 6.59 – Valores Previstos pelo Modelo Cúbico Completo (original e modificado) e Valores Médios de Observações Feitas em Ensaios de Resistência à Compressão.

Misturas	x_1	x_2	x_3	x_{112}	x_{122}	x_{113}	x_{133}	x_{223}	x_{233}	x_{123}	x_{1123}	x_{1223}	x_{1233}
\hat{y}	39,07	6,56	9,22	47,43	26,62	37,64	24,59	10,75	8,62	29,82	44,42	18,70	17,64
\hat{y}^*	39,45	8,04	9,35	47,61	26,79	36,30	26,27	8,47	8,91	29,11	43,25	17,20	19,27
\bar{y}	39,07	6,56	9,22	47,43	26,62	37,64	24,59	10,75	8,62	29,82	39,64	17,35	23,12

Tabela 6.60- ANOVA para o Modelo Cúbico Completo, para Consistência de 255 ± 30 mm.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	6560,45	5	1312,09
Resíduos Experimentais	352,26	33	10,67
Falta de ajuste	105,57	7	15,08
Erro puro	246,69	26	9,49
Total	6912,71	38	181,91

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 94,90$ %

% máxima de variação explicável: $(SQ_T - SQ_{ep})/SQ_T = 96,43$ %

➤ **Critério de Fisher**

$$F_{5,33} = 2,53$$

$$MQ_R/MQ_r > 5. F_{5,33}$$

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} = 122,97 > 12,65$$

➤ **Falta de ajuste e erro puro**

$$F_{7,26} = 2,39$$

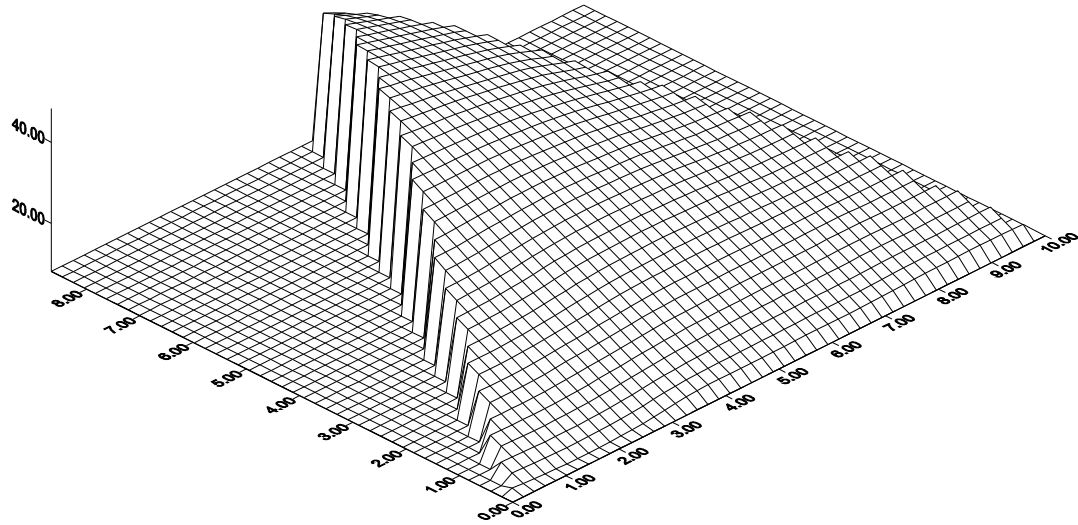
$$\frac{MQ_{fa}}{MQ_{ep}} = 1,59 < 2,39$$

O modelo cúbico completo possui um bom ajuste e não apresenta falta de ajuste pelo teste F , ao nível de 95 % de probabilidade, dentre as análises feitas para a consistência de 255 ± 30 mm.

➤ **Superfície de Resposta**

A Figura 6.14 representa a superfície de resposta para este modelo completo para a consistência de 255 ± 30 mm.

(a)



(b)

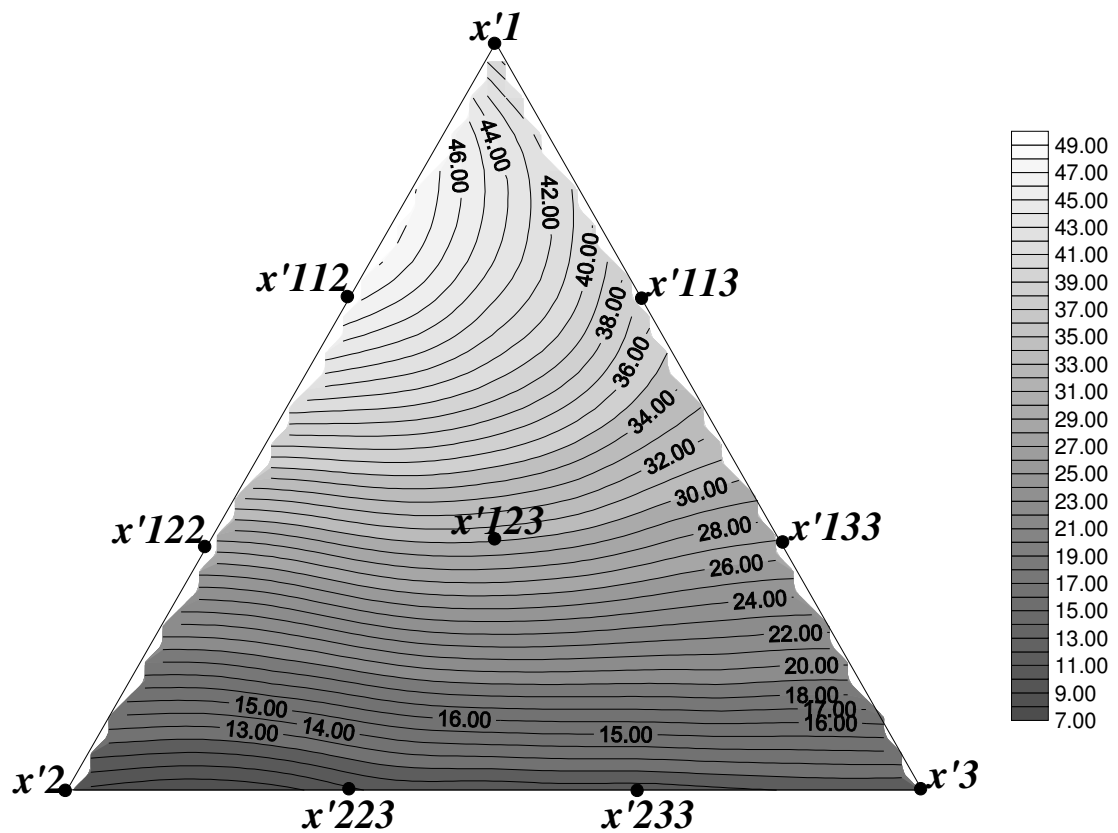


Figura 6.14 – Superfície de Resposta (a) e Curvas Tipo “Iso-resposta” do Modelo Cúbico Completo para Resistência à Compressão (MPa) da Região Experimental de Consistência 255 ± 30 mm (b).

6.4.3.5 – Comparativo entre modelos para consistência de 255 ± 30 mm

A Tabela 6.61 mostra os valores médios de todos os pontos experimentais (\bar{y}), as estimativas (\hat{y}) dos modelos matemáticos e dos modelos matemáticos modificados (\hat{y}^*).

Tabela 6.61 – Comparação entre os Valores Médios Observados (\bar{y}) e os Valores Previstos pelos Modelos (\hat{y}).

Composição das Misturas			\bar{y}	\hat{y}	\hat{y}	\hat{y}	\hat{y}^*
x'_1	x'_2	x'_3	Observado	Linear	Quadrático	Cúbico Especial	Cúbico Completo
1	0	0	39,07	39,07	39,07	39,07	39,45
0	1	0	6,56	6,56	6,56	6,56	8,03
0	0	1	9,22	9,22	9,22	9,22	9,35
1/2	1/2	0	26,18	22,81	26,18	26,18	38,88
1/2	0	1/2	8,08	24,14	8,08	8,08	32,15
0	1/2	1/2	30,14	7,89	30,14	30,14	8,69
1/3	1/3	1/3	29,82	18,28	22,52	29,82	29,12
2/3	1/3	0	47,43	28,23	31,22	31,22	47,60
1/3	2/3	0	26,62	17,39	20,39	20,38	26,79
0	2/3	1/3	10,75	7,44	27,22	27,22	8,47
0	1/3	2/3	8,62	8,33	28,10	28,10	8,91
2/3	0	1/3	37,64	29,11	14,84	14,84	36,30
1/3	0	2/3	24,59	19,17	4,89	4,89	26,27
2/3	1/6	1/6	39,64	28,67	25,50	29,14	43,25
1/6	2/3	1/6	17,35	12,42	22,02	25,66	17,20
1/6	1/6	2/3	23,12	13,75	16,87	20,52	19,27
Soma dos Resíduos Experimentais Deixados Pelos Modelos ³			$\sum e$	124,47	133,25	122,31	74,44
Média dos Resíduos Experimentais			\bar{e}	7,78	8,33	7,64	4,65

³ Valores que não entraram no cálculo do modelo

Analisando os resultados dos valores da média dos resíduos experimentais dos modelos matemáticos, juntamente com a análise de variância e os testes estatísticos, conclui-se que, para as argamassas de consistência de 255 ± 30 mm, o modelo cúbico completo é o que melhor se ajusta aos resultados reais.

Nota-se que, das três regiões experimentais, a de consistência de 255 ± 30 mm foi a que acumulou mais resíduos experimentais; isso se explica pelo fato do aumento da superfície de resposta, que aumenta o número de possíveis respostas experimentais.

6.5 – Obtenção de Traços com base em Superfícies de Respostas

Para um ponto aleatório (P), representado na Figura 6.15, numa superfície de resposta triangular, para o qual deseja-se definir a composição da mistura em termos de seus componentes individuais (x_1 , x_2 e x_3).

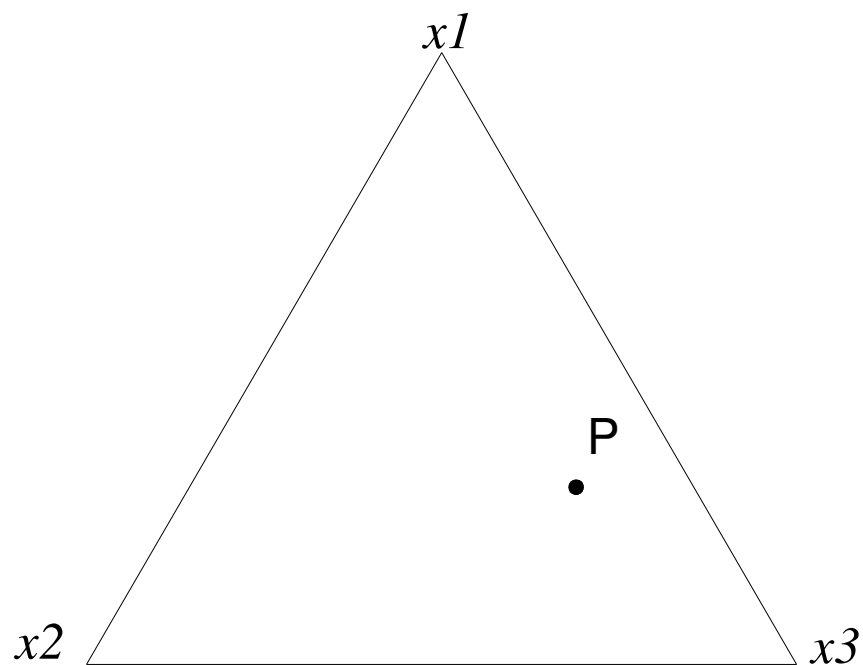


Figura 6.15 – Representação de um Ponto Aleatório em uma Superfície de Resposta.

Traça-se uma bissetriz por cada um dos vértices do triângulo (Figura 6.16). Essas linhas representam a variação da porcentagem dos componentes na mistura, que vai de 0 a 100 %.

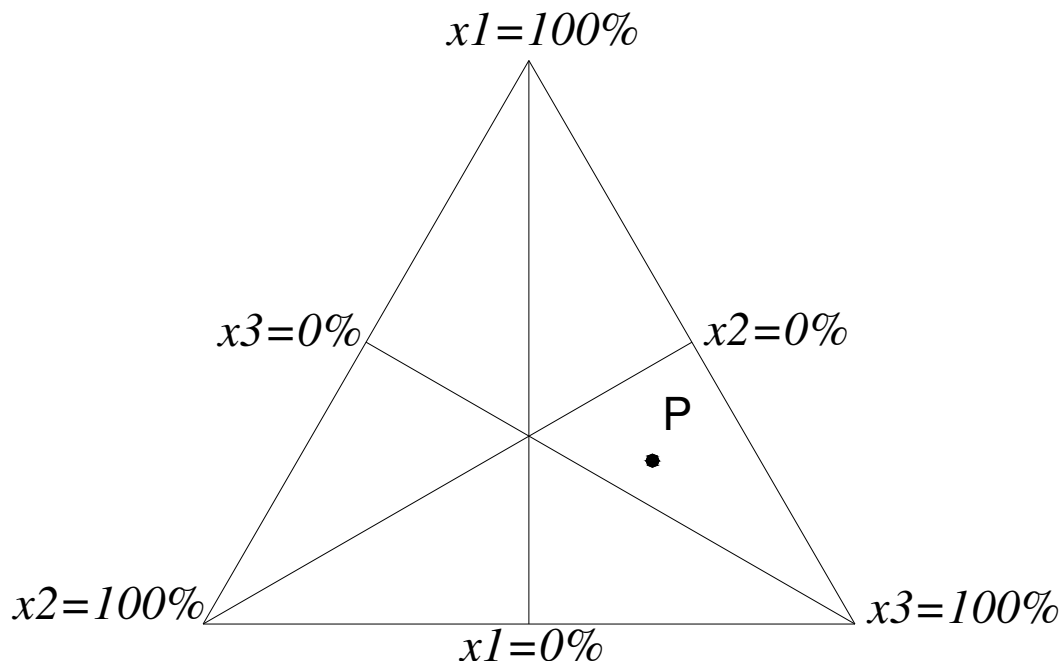


Figura 6.16 – Determinação da Composição da Mistura no Ponto P – Construção das Bissetrizes.

Sabe-se, com base na teoria da superfície de resposta simplex, que a superfície de resposta para três componentes é um triângulo equilátero. Sendo assim, o próximo passo a ser dado é a construção de três linhas paralelas aos lados do triângulo, passando pelo ponto P. A intersecção dessas linhas com as bissetrizes, relativas às proporções de cada um dos componentes, define a composição da mistura total, que no somatório final deve ser de 100 %.

A Figura 6.17 mostra a construção geométrica para a obtenção da composição da mistura P. Lembrando-se da Equação 4.2, onde destaca que o somatório dos componentes deve ser igual à unidade, ou seja, $x_1 + x_2 + x_3 = 1$.

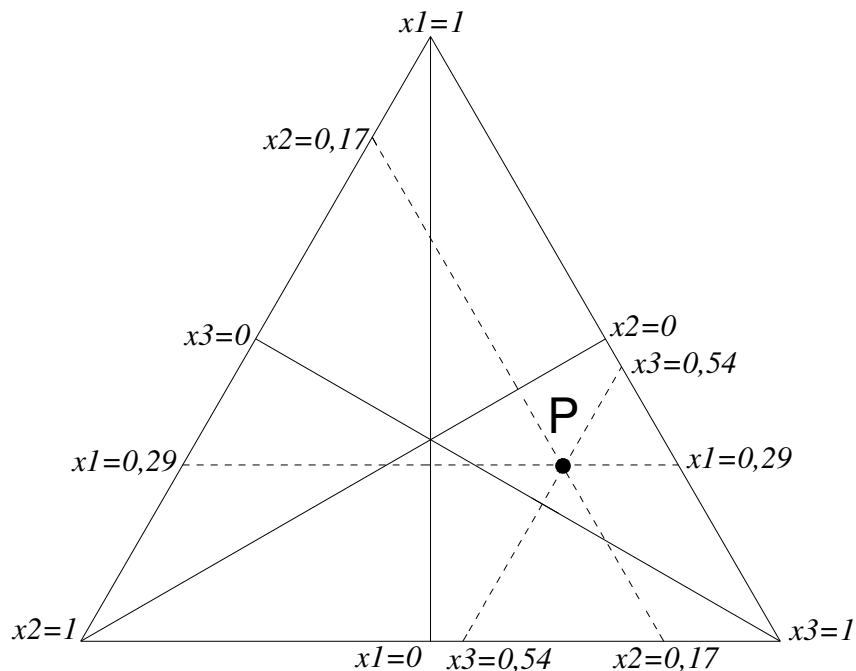


Figura 6.17 - Construção Geométrica para a Obtenção da Composição da Mistura P.

Para o ponto em questão, que foi locado de forma aleatória, temos a seguinte composição:

29 % do componente x_1

54 % do componente x_2

17 % do componente x_3

Ou seja, o ponto P possui um traço de 1 : 1,86 : 0,58.

6.5.1 – Exemplo de traços para as superfícies de resposta geradas no planejamento experimental

Para as superfícies de respostas geradas anteriormente no programa experimental, mostram-se alguns pontos com diferentes misturas, porém com o mesmo comportamento mecânico. Os pontos destacados na Figura 6.18 foram selecionados ao acaso sobre as curvas de iso-resposta. Considera-se na descrição geométrica, os pseudocomponentes que delimitam a área experimental:

- Modelo cúbico completo: consistência de 255 ± 10 mm

$$x_1 \geq 0,10, x_2 \geq 0,70, x_3 \geq 0,10$$

$$0,10 \leq x_1 \leq 0,20; 0,70 \leq x_2 \leq 0,80 \text{ e } 0,10 \leq x_3 \leq 0,20$$

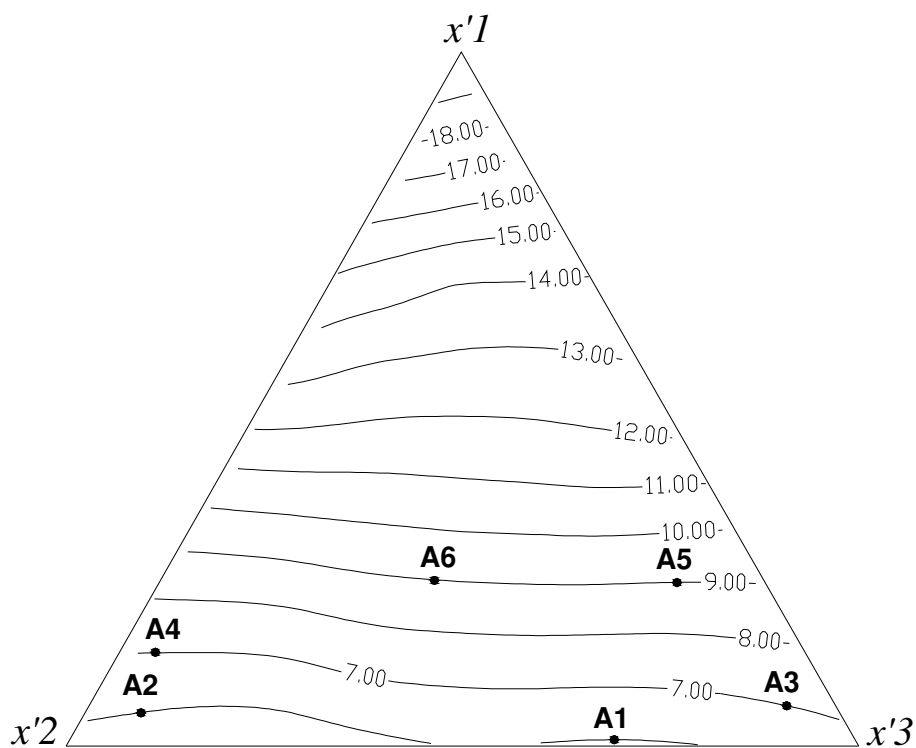


Figura 6.18 – Pontos selecionados na superfície de resposta 255 ± 10 mm.

A composição das misturas dos pontos em destaque na Figura 6.17 foram obtidas conforme o item 6.5. Considerando a modelagem de misturas abordada neste trabalho, que é feita em termos de pseudocomponentes, a composição de misturas deve ser convertida em termos de componentes originais, por meio das

Equação 5.7:
$$x'_i = \frac{x_i - L_i}{1 - L}$$

Tabela 6.62 – Alguns Traços Sob a Superfície de Resposta 255 ± 10 mm.

Pontos	Proporção dos Componentes (%)			Traço em Massa			a/c*	Resistência à Compressão (MPa)
	Cimento	Areia	Resíduo	Cimento	Areia	Resíduo		
A1	10,10	73,03	16,87	1	7,23	1,67	1,45	6,0
A2	10,49	78,81	10,70	1	7,52	1,02	1,41	6,0
A3	10,60	70,61	18,79	1	6,66	1,77	1,38	7,0
A4	11,37	78,20	10,44	1	6,88	0,92	1,29	7,0
A5	12,37	71,12	16,53	1	5,75	1,34	1,18	9,0
A6	12,39	73,45	14,15	1	5,92	1,14	1,18	9,0
Água (g)					440			
% Água/Sólidos					14,66			
*Relação água/cimento								

Nota-se, na Tabela 6.62, que os traços A1 e A2 possuem teores de resíduo diferentes, porém com a mesma resistência. Destacam-se os traços A5 e A6 por terem teores de cimento relativamente iguais, e proporções de resíduos diferentes, mas mantendo a mesma resistência.

A Tabela 6.63 mostra outro comparativo entre os traços, evidenciando os consumo de cada cosntituente da argamassa.

A Tabela 6.63 comprova a diferença entre os traços considerando os diferentes consumos de cimento e agregados e os respectivos valores de resistencia.

Tabela 6.63 – Consumo dos Constituintes de Alguns Traços Sob a Superfície de Resposta 255 ± 10 mm.

Pontos	Consumo (g)			Massa Areia+Resíduo (g)	Massa Cimento+Resíduo (g)	a/c*	Resistência à Compressão (MPa)
	Cimento	Areia	Resíduo				
A1	303,45	2194,14	506,85	2700,99	810,30	1,45	6,0
A2	312,06	2344,44	318,30	2662,75	630,36	1,41	6,0
A3	318,84	2123,90	565,19	2689,09	884,03	1,38	7,0
A4	341,09	2345,90	313,19	2659,09	654,27	1,29	7,0
A5	372,88	2143,84	498,28	2642,12	871,16	1,18	9,0
A6	372,88	2210,50	425,85	2636,35	798,73	1,18	9,0
Água (g)				440			
% Água/Sólidos				14,66			
*Relação água/cimento							

- Modelo cúbico completo: consistência de 255 ± 20 mm

Consistência de 255 ± 20 mm: $x_1 \geq 0,10$, $x_2 \geq 0,60$, $x_3 \geq 0,10$

$$0,10 \leq x_1 \leq 0,30; 0,60 \leq x_2 \leq 0,80 \text{ e } 0,10 \leq x_3 \leq 0,30$$

A Figura 6.19 ilustra 6 pontos hipotéticos para identificar as respectivas proporções dos componentes envolvidos, bem como avaliar o comportamento da superfície de resposta. Em seguida as Tabelas 6.64 e 6.65 trazem os comparativos dos traços e dos consumos dos constituintes cimento, areia e resíduo.

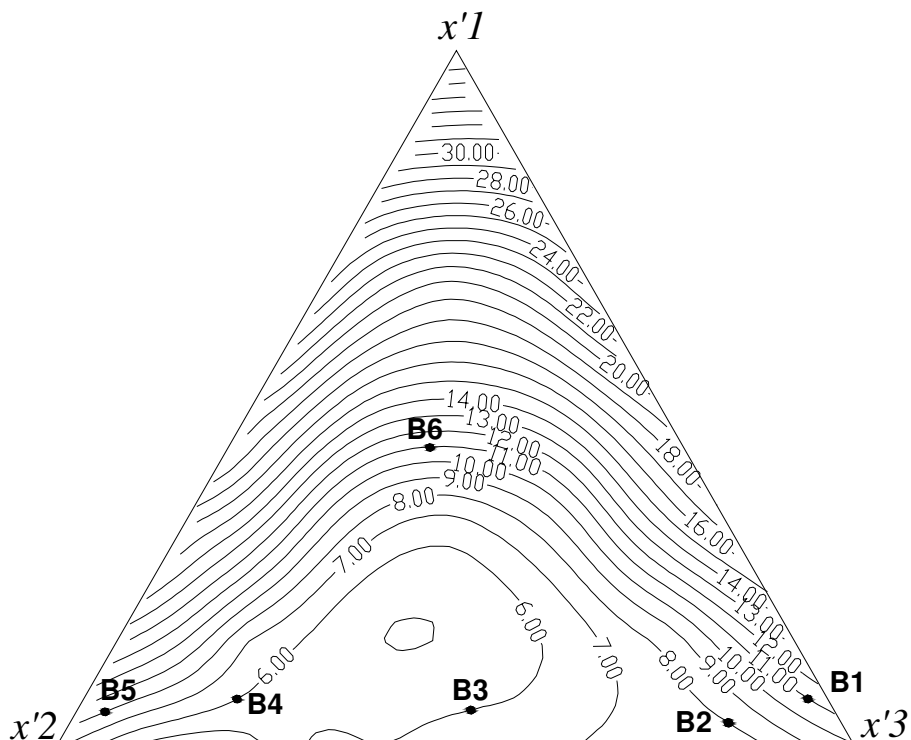


Figura 6.19 - Pontos selecionados sob a Superfície de Resposta 255 ± 20 mm.

Tabela 6.64 – Alguns Traços sob a Superfície de Resposta 255 ± 20 mm.

Pontos	Proporção dos Componentes (%)			Traço em Massa			a/c	Resistência à Compressão (MPa)
	Cimento	Areia	Resíduo	Cimento	Areia	Resíduo		
B1	11,38	60,47	28,23	1	5,31	2,48	1,37	11,0
B2	10,54	76,63	12,84	1	7,27	1,22	1,48	8,0
B3	10,87	76,63	12,84	1	7,05	1,18	1,44	6,0
B4	11,18	74,96	13,85	1	6,70	1,24	1,40	6,0
B5	10,81	78,45	10,73	1	7,26	0,99	1,45	8,0
B6	18,48	66,24	15,27	1	3,58	0,83	0,84	11,0
Água (g)					470			
% Água/Sólidos					15,60			
*Relação água/cimento								

Tabela 6.65 – Consumo dos Constituintes de Alguns Traços Sob a Superfície de Resposta 255 ± 20 mm.

Pontos	Consumo (g)			Massa	Massa	a/c*	Resistência à Compressão (MPa)
	Cimento	Areia	Resíduo	Areia+Resíduo (g)	Cimento+Resíduo (g)		
B1	343,07	1822,95	851,03	2673,98	1194,10	1,37	11,0
B2	317,57	2308,84	386,87	2695,71	704,43	1,48	8,0
B3	326,39	2300,94	385,54	2686,48	711,93	1,44	6,0
B4	335,71	2250,91	415,89	2666,80	751,60	1,40	6,0
B5	324,14	2352,32	321,74	2674,06	645,88	1,45	8,0
B6	559,52	2005,57	462,33	2467,90	1021,86	0,84	11,0
Água (g)				470			
% Água/Sólidos				15,60			
*Relação água/cimento							

Analisando-se as Tabelas 6.64 e 6.65, nota-se a grande diferença entre os traços B1 e B6. Ambos os traços possuem a mesma resistência a compressão, porém, ressalta-se o maior consumo de cimento do ponto B6 em relação ao B1, além é claro, do traço B1 possuir quase o dobro de resíduo em sua composição quando comparado ao B6. Nota-se que para uma mesma resposta experimental (resistência à compressão) existem várias misturas possíveis, sendo que a escolha dos traços devem levar em consideração aspectos econômicos (redução do consumo de cimento) e ambientais (consumo de areia e resíduo de rocha), conforme a resistência requerida.

- Modelo cúbico completo: consistência de 255 ± 30 mm

$$x_1 \geq 0,10, x_2 \geq 0,50, x_3 \geq 0,10$$

$$0,10 \leq x_1 \leq 0,40; 0,50 \leq x_2 \leq 0,80 \text{ e } 0,10 \leq x_3 \leq 0,40$$

A Figura 6.20 mostra, para a superfície de resposta de 255 ± 30 mm, 6 pontos hipotéticos para as respectivas misturas e suas respostas experimentais.

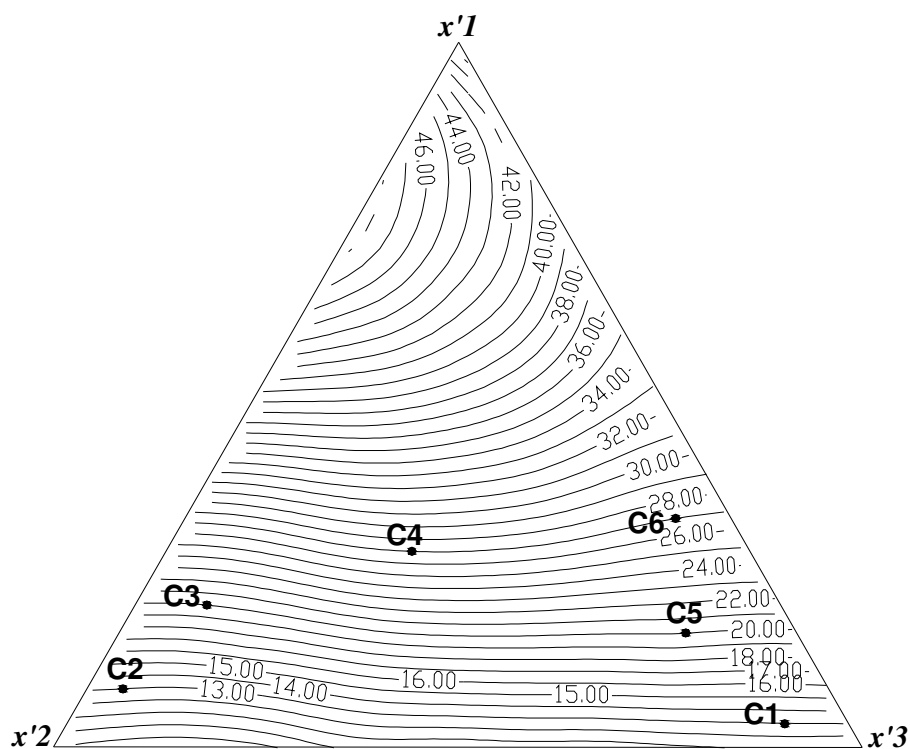


Figura 6.20 - Pontos selecionados sob a superfície de resposta 255 ± 30 mm

Tabela 6.66 – Alguns Traços sob a Superfície de Resposta 255 ± 30 mm.

Pontos	Proporção dos Componentes (%)			Traço em Massa			a/c	Resistência à Compressão (MPa)
	Cimento	Areia	Resíduo	Cimento	Areia	Resíduo		
C1	13,39	52,36	34,25	1	3,91	2,56	1,24	13,0
C2	12,48	76,20	11,32	1	6,11	0,91	1,33	13,0
C3	16,07	71,27	12,66	1	4,44	0,79	1,04	20,0
C4	18,39	62,49	19,11	1	3,40	1,04	0,91	27,0
C5	14,90	66,13	18,98	1	4,44	1,27	1,12	20,0
C6	19,80	52,05	28,16	1	2,63	1,42	0,84	27,0
Água (g)					500			
% Água/Sólidos					16,6			
*Relação água/cimento								

Tabela 6.67 – Consumo dos Constituintes de Alguns Traços Sob a Superfície de Resposta 255 ± 30 mm.

Pontos	Consumo (g)			Massa	Massa	a/c*	Resistência à Compressão (MPa)
	Cimento	Areia	Resíduo	Areia+Resíduo (g)	Cimento+Resíduo (g)		
C1	403,23	1576,77	1031,40	2608,17	1434,63	1,24	13,0
C2	375,94	2295,40	341,00	2636,40	716,94	1,33	13,0
C3	480,77	2132,20	378,75	2510,95	859,52	1,04	20,0
C4	549,45	1867,06	570,96	2438,02	1120,41	0,91	27,0
C5	446,43	1981,36	568,67	2550,04	1015,10	1,12	20,0
C6	595,24	1564,75	846,56	2411,32	1441,80	0,84	27,0
Água (g)				500			
% Água/Sólidos				16,66			
*Relação água/cimento							

Seguindo a mesma análise, as Tabelas 6.66 e 6.67 mostram que os traços C1 e C2 possuem a mesma resistência com a proporção de resíduo variando cerca de três vezes de um para o outro. Escolhendo-se o primeiro traço significa uma economia de matéria-prima natural, devido a menor utilização de areia, e também, torna-se uma atitude ecologicamente correta por eliminar resíduos do meio ambiente.

As superfícies geradas neste trabalho devem ser usadas para determinar todas as respostas e as suas respectivas composições de mistura entre cimento, areia e resíduo de rocha, usando-se os procedimentos demonstrados no Item 6.5. Esta ferramenta tem a função de otimizar as misturas para a resposta de interesse, resposta esta que se encontra nas curvas de iso-resposta.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 – Considerações Finais

Ressalta-se que, apesar do apelo ambiental, por propor uma forma de reaproveitamento de resíduos sólidos industriais, este trabalho fundamentou-se numa pesquisa científica e tecnológica, para que se tenha um estudo de incorporação de resíduo de rocha ornamental com faixas de variação de misturas mais abrangentes e de forma otimizada.

Também considera-se uma conotação social, pois quando se busca uma alternativa para reciclar um resíduo, minimizando o impacto por ele causado, contribui-se para a preservação do meio ambiente e, indiretamente, para o bem estar social. Propõe-se desenvolver um produto final, de uso maciço na construção civil, que pode vir a ter baixo custo e contribuir para a redução dos custos de construções populares, facilitando a difusão de programas de moradias populares.

Quanto ao aspecto tecnológico, levam-se em consideração as implicações técnicas de um produto de possível comercialização, procurando atender as exigências normativas vigentes no país.

O aspecto científico fundamenta-se na compreensão dos fenômenos e variações nas propriedades e características do produto, derivados da incorporação do resíduo de rochas ornamentais em sua constituição, por meio de um processo racional de misturas. O planejamento de experimentos para misturas pela rede simplex é uma das ferramentas disponíveis para um estudo sistemático de formulações da argamassa, permitindo ainda, um melhor conhecimento das interações entre os componentes da mistura e a avaliação das respostas de interesse, no caso a resistência à compressão.

Os resultados obtidos no planejamento de misturas mostram que para as três regiões experimentais propostas, o modelo cúbico completo foi o que mais se ajustou aos resultados reais, e conclui-se que este é estatisticamente o melhor modelo matemático e que deve ser usado para estimar a resistência à compressão e otimizar as misturas.

É importante destacar que os modelos só se aplicam às áreas experimentais determinadas pelo planejamento, não cabendo aqui extrapolações ou outras composições de misturas que estejam fora dessas regiões.

Nota-se nos resultados obtidos, em ambas as consistências, que à medida que se aumenta a proporção do resíduo na mistura em relação à proporção areia, cresce a resistência à compressão das argamassas, tornando viável a incorporação do resíduo conforme o comportamento mecânico requisitado.

A análise das superfícies de respostas para cada consistência comprova que para uma mesma resistência existem inúmeros traços possíveis com mesmo comportamento mecânico, ou seja, as curvas de iso-resposta delimitam faixas onde a propriedade analisada apresenta o mesmo comportamento, independente da composição das misturas (proporções dos componentes: cimento, areia e resíduo).

Cada ponto distinto de cada superfície de resposta corresponde a um único traço, porém, vários traços podem apresentar a mesma resposta experimental, obviamente se estiverem dispostos entre as mesmas curvas de iso-resposta, levando à escolha do traço ser feita com base na composição da mistura que proporcionar maior economia para a resistência a compressão esperada.

O resíduo de rocha ornamental se mostra então, como uma alternativa para economia de matéria-prima na fabricação de argamassas, sendo que atualmente é um rejeito industrial sem valor econômico específico.

7.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Ao fim desta pesquisa, algumas sugestões são apresentadas perante os resultados obtidos:

- Utilização de modelagens numéricas para otimização de outras propriedades, tais como: teor de ar incorporado, retenção de água, absorção de água, resistência à aderência, etc.;
- Estudos de durabilidade para as argamassas com resíduo, tanto em escala real quanto em laboratório;
- Utilização do resíduo de rocha ornamental na fabricação de argamassas em escala industrial, além de elaborar procedimentos para o controle tecnológico destes materiais;

CAPÍTULO 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afonso, W. M. (2005). Caracterização de Resíduo de Corte de Rochas na Produção de Argamassas. Dissertação (Mestrado)-Campos dos Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

Alavedra, P.; Dominguez, J.; Gonzalo, E. et al (1997). La construction sostenible. El estado da la Cuestion”. *Informes de la Construction*, v.49, nº 451, p. 41-47.

Alexandre, J. (2000). Análise da Matéria-Prima e Composição de Massa Utilizada em Cerâmica Vermelha. Dissertação (Doutorado) – Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais - ABIROCHAS (2003). A Força do Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento no Brasil.

Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais - ABIROCHAS. (2005). “Balanço das exportações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento em 2004 – novo recorde histórico de crescimento”, (<http://www.abirochas.com.br/br/index.html>) em 01/2006.

- Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. (2004). Concreto: Uma receita de bolo; http://www.abcp.org.br/basico_sobre_cimento/concreto.shtml em 01/2006.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1982). Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária - Método de ensaio - NBR 7251. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1983). Agregados para concreto – Especificação - NBR 7211. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1996). Cimento Portland – determinação da resistência à compressão - NBR 7215. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1987). Amostragem de Resíduo NBR 10.007. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1987). Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica - NBR 9778. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1987). Lixiviação de Resíduo – Procedimento - NBR 10.005. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1987). Resíduo Sólido – Classificação - NBR 10004. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1987). Solubilização de Resíduo – Procedimento - NBR 10.006. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.(1995). Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção da absorção de água por capilaridade - NBR 9779. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1995). Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação do teor de água para a obtenção do índice de consistência padrão - NBR 13276. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1995). Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão - NBR 13279. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1995). Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água - NBR 13277. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1995). Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado - NBR 13278. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1995). Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração - NBR 13528. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2001). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos - NBR 13281. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1984). Solo – Análise Granulométrica - NBR 7181. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1996). Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação - NBR 13749. Rio de Janeiro.

- Banco do Brasil. (2000). *Sinopse Setorial - Rochas Ornamentais: mármore e granito. Brasília*, nº 44.
- Barros Neto, B., Spacino, I., S., Bruns, R., E. (2003). *Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na indústria – 2ª ed.* - Campinas-SP: Editora da UNICAMP.
- Batista Leite, M (2001). Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição Dissertação (Doutorado) – Porto Alegre-RS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS.
- Bauer, E. Santos, C. C. N., Moraes, D. M., Pereira, C. H. A. F. (2005). Avaliação da consistência das argamassas industrializadas projetadas utilizando o método vane. *e-Mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil* Vol. 2, n. 1, p. 54-63, Maio.
- Box, G. E. P., Hunter, W. G. E Hunter, J. S. (1978). *Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis and model building.* New York, Wiley.
- Calmon, J.L., et al. (1997). Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. In: *Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, Salvador-BA: ANTAC, p. 64-75.
- Castelo, A. M., Garcia, F (2007). PAC traz a dinâmica de crescimento para o mercado interno e torna a economia menos vulnerável a flutuações internacionais. *Conjuntura a Construção*, p. 18.
- Chiodi, C.F. (2001). Situação e Perspectivas Brasileiras no Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento. *I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais*, Salvador –BA.

- Chiodi, C.F.– Kistemann & Chiodi Assessoria e Projetos, para a ABIROCHAS
http://www.ivolution.com.br/news/upload_pdf/4155/Exporta_Janeiro.pdf, em
23/03/2007.
- Cordeiro, G. C., Vaillant, J. M. M., Désir, J. M. (2001). Resíduo cerâmico como aditivo mineral em concreto. Ibracon. *IV Seminário de desenvolvimento sustentável na construção civil – materiais reciclados e suas aplicações*. São Paulo.
- Cornell, J. A. (1990). *Experiments With Mixtures: Designs, Models, and The Analysis of Mixtures Data* - 2nd ed.
- Coscione, A. R., Andrade, J. C., May, G. M. (2005). “O Modelamento Estatístico de Misturas: Experimento Tutorial Usando Voltametria de Redissolução Anódica” *Química Nova*, Vol. 28, 1116-1122.
- Désir, J. M., Dias, D. P., Rocha, C.A.A., Dantas, D. F. (2005). Avaliação da Contribuição da Atividade Pozolânica do Resíduo de Tijolo Moído na Resistência de Argamassas. *Conferência Interamericana sobre Materiais e Tecnologias não-convencionais na Construção Ecológica e Sustentável*. Rio de Janeiro.
- Felleberg, G. (1980). Introdução aos problemas de poluição ambiental. São Paulo, EPU/Springer/EDUSP.
- Ferreira, M.L.S. (2000). Proposta de um Sistema Alternativo de Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos Domiciliares, Executada Por Catadores (Carrinheiros) Na Cidade De Cianorte – Paraná. Dissertação (Mestrado)-Florianópolis-SC, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC.
- FJP (2007). Déficit Habitacional no Brasil 2005. Fundação João Pinheiro, Belo Horizonte, abril de 2007.

- Flohr L, Brentano D. M., Pinto C.R.S.C, Machado V. G., Matias W. G. (2005). Classificação de Resíduos Sólidos Industriais com Base em Testes Ecotoxicológicos Utilizando *Daphnia Magna*: Uma Alternativa. *Biotemas*, 18 (2): 7 – 18.
- Galdamez E Carpinetti, (2004).Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos no Processo de Injeção Plástica. *Gestão e Produção* v.11, n.1, p. 121-134 jan/abril.
- Gonçalves, J. P. (2000). Utilização do Resíduo de Corte de Granito (RCG) Para a Produção de Concretos. Dissertação (Mestrado) – Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-NORIE/UFRGS.
- Guerreiro, H. J. P. (2000). *Exploração Subterrânea de Mármore – Aspectos Geotécnicos*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Porto Alegre Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico. Portugal – Lisboa.
- IEL (1996). Mercado Internacional de Rochas Ornamentais – Relatório Final. Instituto Euvaldo Lodi – IEL/FIEC/COMISA.
- INETI (2001). Guia Técnico – Sector de Pedra Natural. Instituto Nacional de Pedra Natural – INETI. Lisboa – Portugal.
- Inforochas (2006). Informativo do Cetemag, Sicoob Credirochas e Sindirochas. Centro de Tratamento de Resíduos de Nova Venécia-ES. *Inforochas*, n.11, out., p.15,.
- John, V. M. (1996). Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. Workshop sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção. São Paulo. PCC-USP. Apud Gonçalves (2000).

- John, V. M. A. (1998). Construção e o Meio Ambiente. (<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>), em 01/2004.
- Lima Filho, V. X., et al. Determinação de parâmetros para a racionalização do processamento de rochas graníticas por abrasão. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, 15. São Paulo. Anais.
- Martins Neto (1999), A. A. A. Aspectos De Desempenho Da Argamassa Dosada em Central. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994. 573p.
- Menezes R. R., Neves G. A., Ferreira H. C. (2002). O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, n.2, p.303-313.
- Montgomery, D. C. (1997). Design and analysis of experiments, 4 th edition. New York, Wiley.
- Myers, R. H. E Montgomery, D. C. (1995). Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. . New York, Wiley.
- Moreira, J. M. S., Manhães, J. P. V. T., Holanda J. N. F. (2005). Reaproveitamento de resíduo de rocha ornamental proveniente do Noroeste Fluminense em cerâmica vermelha. *Cerâmica* 51, 180-186.
- Moura, W. A., Gonçalves, J. P., Leite, R. S. (2002). Utilização do Resíduo de Corte de Mármore e Granito em Argamassas de Revestimento e Confecção de Lajotas para Piso. *Sitientibus*, Feira de Santana, n.26, p.49-61, jan/jun.

- Moya, M.M. E Suslick, S.B. Avaliação preliminar do setor de rochas ornamentais no Brasil. *XXXVII Congresso Brasileiro de Geologia*. São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, 1992.
- Neves G.; Patricio, S. M. R; Ferreira, H. C; Silva, M. C. (1999) Utilização de resíduos da serragem de granitos para a confecção de tijolos cerâmicos. In: *Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 43., Florianópolis-SC.
- Niquel, C. ABNT Modificada, Normas para Classificação de Resíduos. *Química e Derivados*, ed. QD. nº 5, p. 5 – 8, 2004.
- Oliveira, M. J. E., Mattos, J. T., Assis, C. S. (2001). Resíduos de concreto: classe III versus classe II. *Ibracon: IV Seminário de desenvolvimento sustentável na construção civil – materiais reciclados e suas aplicações*. São Paulo.
- Oliveira S. D. (2003). Ajudando Dona Nina a Fazer a Melhor Vitamina - Projeto de Experimento Envolvendo Mistura: Um Exemplo Didático. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá.
- Penttalla, V. (1997). Concrete and Sustainable Development. *ACI Materials Journal*. V.94. Nº 5. Set/Out. USA. apud Gonçalves, J. P. (2000).
- Petruci, E. G. R (1998). *Concreto de Cimento Portland* – 13. ed – São Paulo: Globo.
- Pimentel, M. F. E Neto, B. B. (1996) Calibração: uma revisão para químicos analíticos. *Química nova* 19, p. 305-325, 328-332.
- Pinto, T. P. P. (1997). Resultados de Gestão Diferenciada. *Téchine*, n.31, nov/dez., p.31-34.

- Rede Rochas (2004). Grupo para melhoria do setor de rochas ornamentais de Cachoeiro de Itapemirim. Plano de Desenvolvimento do APL de Rochas Ornamentais de Cachoeiro de Itapemirim.
- Reschke, J. S. (2005). Avaliação da utilização de escória granulada de fundição como substituição de parte do cimento em concreto. *e-Mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil* Vol. 2, n. 1, p. 78-91, Maio 2005.
- Rocha, J.C., John, V.M. (2003). "Utilização de Resíduos na Construção Habitacional". Coletânea Habitare – vol. 4.
- Scheffé, H. (1958). Experiments with mixtures. *Journal of the Royal Statistical Society*, B, vol. 20, p 344-306. apud Cornell 1990.
- Selmo, S. M. S., Nakamura, E. H., Miranda, L.F.R., Medeiros, M. H. F. Silva, C. ^o (2002). Propriedades e especificações de argamassas industrializadas de múltiplo uso. EPUSP. São Paulo.
- Sena, M. M., Collins, C. H., Collins, K. E. (2001). Aplicação de Métodos Quimiométricos na Especificação de Cr(VI) em Solução Aquosa. *Química Nova*, Vol. 24, No. 3, 331-338.
- Sijöström, C. Durability and sustainable use of building materials. 8p. 1997.
- Silva, S. A. C. (1998). *Caracterização do resíduo da serragem de blocos de granito. Estudo do potencial de aplicação na fabricação de argamassas de assentamentos e de tijolos de solo-cimento*. Dissertação (Mestrado) – Vitória-ES. Universidade Federal do Espírito Santo-UFES.
- Sindirochas (2004) - O Sindicato da Indústria de Rochas Ornamentais, Cal e Calcários do Estado do Espírito Santo. Dados Estatísticos de Exportação. 2004.

- Souto, K. M., Neves G. A, Ferreira H. C., Silva M. C.(2001). Anais do 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Florianópolis, SC p. 701-712.
- Spínola, V. (2003). Liderança nacional do Estado do Espírito Santo. Rochas Ornamentais em Arranjo Produtivo.
- Valdecir, A. Q., Cincotto, M. A. (2000). *Optimization of calculation method for dermination of composition of hardened mortars of Portland cement and hydrated lime made in laboratory. Construction and Building Materials* 20 (2006) p. 1069 – 1078.
- Vale, E. (1997). Estudo econômico sobre rochas ornamentais: mercado internacional de rochas ornamentais. Fortaleza, Federação das Indústrias do Ceará, IEL (CE).
- Villaschi, A. F., Sabadini, M. S. (2000) Arranjo Produtivo de Rochas Ornamentais (mármore e granito) no estado do Espírito Santo. Estudos Empíricos – Nota Técnica 15. Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – IE/UFRJ.
- Xavier, G. C. (2001) *Utilização de resíduos da serragem do mármore e granito na confecção de peças cerâmicas vermelhas*. Dissertação (Mestrado). – Campos dos Goytacazes-RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.
- Xavier, G. C. (2006) *Resistência, alterabilidade e durabilidade de peças cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduo de granito*. Dissertação (Doutorado) – Campos dos Goytacazes-RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.