



**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente**

Laércio Stolfo Maculan

**Avaliação do Desempenho de Argamassa de Revestimento com Resíduos de Construção
e Demolição Aplicando a Metodologia de Projeto Robusto**

**Passo Fundo
2009**

Laércio Stolfo Maculan

**Avaliação do Desempenho de Argamassa de Revestimento com Resíduos de
Construção e Demolição Aplicando a Metodologia de Projeto Robusto**

Orientador: Professor Pedro Domingos Marques Prietto, Dr.

Co-Orientadora: Professora Adriana Augustin Silveira, Dra.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, na área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Passo Fundo

2009

Laércio Stolfo Maculan

**Avaliação do Desempenho de Argamassa de Revestimento com Resíduos de
Construção e Demolição Aplicando a Metodologia de Projeto Robusto**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, na área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Passo Fundo, 20 de agosto de 2009.

Os membros componentes da Banca Examinadora abaixo aprovam a Dissertação.

Pedro Domingos Marques Prietto, Dr.
Orientador

Adriana Augustin Silveira, Dra.
Co-Orientadora

Ângela Borges Masuero, Dra.
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Aguida Gomes de Abreu, Dra.
UPF – Universidade de Passo Fundo

Antonio Thomé, Dr.
UPF – Universidade de Passo Fundo

Passo Fundo

2009

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial a meus pais Lírío e Lourdes e meus irmãos Leonardo, Lílian, Leonel e Lucas e todos aqueles que sempre apoiaram e incentivaram os meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Este momento me reporta a dois anos atrás quando decidi voltar aos estudos e retomar o sonho de realizar o mestrado. Maturana diz: “O conhecimento faz surgir um novo mundo”; realmente é difícil mensurar o crescimento pessoal desse curto período de tempo. Essa vitória é fruto de muito trabalho e de cooperação de muitas pessoas para que eu concluísse o trabalho.

Agradecimento especial a minha família. Meu Pai, por ser uma referência na busca e persistência de meus sonhos. Minha Mãe, pela constante presença, carinho e incentivo. Meus irmãos, por ajudarem das mais diversas formas, escutando muitas vezes divagações sobre reações, melhora da qualidade, etc.

Ao meu orientador professor Pedro Domingos Marques Prietto que soube focar o trabalho dentro das minhas expectativas, agradecê-lo ainda pelo afinho para com o trabalho, sempre presente em todos os momentos e principalmente pela amizade e encorajamento. Sobre tudo agradeço por ter acreditado no meu potencial.

A minha co-orientadora a professora Adriana Augustin Silveira, que não mediu esforços, sempre pronta a auxiliar no que fosse preciso, sua colaboração foi vital para alcançar o nível de trabalho que desejava. Os incentivos e amizade não serão esquecidos.

Não poderia deixar de mencionar as professoras Águida Gomes de Abreu e Luciana Marcondes Pandolfo, que auxiliaram, seja nas bancas, seja no dia a dia, sanando eventuais dúvidas e colaborando para qualificar o trabalho.

Aos funcionários do LABOMACC/UPF que durante o período dos ensaios, cerca de um ano, foram de uma gentileza e presteza; são momentos que guardarei com muito carinho. Ao laboratorista Leunir Laudimar Freitas um agradecimento especial, não somente pelo trabalho, mas principalmente por fazer além de suas tarefas sem pestanejar.

Aos bolsistas voluntários Mario e Guilherme, este por mais tempo, cuja ajuda foi de vital importância. Espero que um dia possa retribuir a ajuda.

Aos colegas e professores do mestrado e aos colegas Marcele Salles Martins, Juliano Cavalcanti e Rafael Lublo.

Aos meus sócios que ajudaram no que foi possível, entenderam os contratempos e dificuldades de um mestrado. Aos meus amigos próximos que ajudaram e entenderam minha falta em diversos momentos. Aos amigos distantes que procuram apoiar sempre.

A Universidade de Passo Fundo por ter me proporcionado uma bolsa de estudos e por ter possibilitado a execução de todo o trabalho.

RESUMO

A indústria da construção civil é responsável por grande parte dos resíduos gerados no planeta. A reciclagem e/ou reutilização do resíduo de construção e demolição é a maneira mais simples de utilização, justificada pelas próprias características dos resíduos. Entre as várias aplicações do RCD na indústria da construção civil, a utilização na confecção de argamassas para revestimento se destaca pelo potencial de utilização em larga escala e pela possibilidade de emprego no próprio local da geração do resíduo. Contudo, uma argamassa de RCD para revestimento deve atender aos mesmos requisitos de qualidade de uma argamassa convencional. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes composições de argamassas de revestimento com a incorporação de RCD sobre algumas propriedades no estado fresco e no estado endurecido. O planejamento experimental foi baseado na metodologia de projeto robusto. As variáveis investigadas e seus respectivos níveis foram: a relação Areia de RCD/Areia Total (0,25 a 0,75); relação Cimento/Aglomerante Total (0,3 a 0,7); porcentagem de cerâmica na Areia de RCD (25 a 75%) e consistência (240 a 280 mm). As variáveis de resposta foram: retenção de água e teor de ar incorporado (no estado fresco); resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência de aderência e fissuração (no estado endurecido), determinadas aos 28 dias. Os resultados obtidos para a variável de resposta teor de ar incorporado mostraram que a quantidade de cimento, a consistência, a quantidade de RCD e de material cerâmico presente no RCD tiveram influência sobre esta propriedade. Para níveis elevados de cimento ocorreu um aumento no teor de ar incorporado. No entanto, em níveis elevados de quantidade de RCD e de material cerâmico se obteve uma diminuição nesta variável de resposta. Para a variável de resposta retenção de água, o fator que teve influência mais significativa foi a quantidade de cal. Observou-se também um aumento na retenção de água com o aumento da quantidade de material cerâmico e da quantidade de RCD. Quanto as resistência à compressão, à tração na flexão e de aderência, concluiu-se que a quantidade de cimento foi o fator preponderante sobre os resultados. Porém, observou-se também que a quantidade de RCD e de material cerâmico no RCD apresentaram influência significativa na resistência de aderência. Na determinação do comprimento de fissura por metro quadrado de argamassa, foi verificada a influência significativa apenas da quantidade de cimento. Em níveis elevados deste fator a fissuração é bem menor se comparada aos níveis baixos do mesmo fator. A análise de otimização em conjunto com a metodologia de projeto robusto permitiu a determinação de uma condição ótima ou uma zona ótima, onde, em princípio, são obtidas argamassas com melhor desempenho global, satisfazendo as características de desempenho exigidas e melhorando a robustez do produto. O melhor traço obtido foi para a combinação com a relação Areia de RCD/Areia Total 0,59; a relação cimento/aglomerante 0,60; a relação Areia Cerâmica/Areia de RCD 0,625; e a Consistência de 250mm.

Palavras-chave: Resíduos na construção e demolição, Argamassas, Metodologia de projeto robusto.

ABSTRACT

The construction industry is responsible for much of the waste generated in the planet. Recycling and/or reusing construction and demolition waste (CDW) are the most practical way to use the characteristics of such materials. Among the various applications of the CDW in the construction industry, the use in the manufacturing of rendering mortars stands out for its potential use. However, a CDW mortar must meet the same quality requirements of a conventional mortar. This study aimed to evaluate the effect of different compositions of rendering mortars with the addition of CDW. The experimental approach used in this study was based on the methodology of robust design. The controlled variables and their ranges were: the CDW Sand/Total Sand ratio (0.25 to 0.75); the Cement/Total Binder ratio (0.3 to 0.7); the percentage of ceramic in the CDW sand (25 to 75%), and the consistency (240 to 280 mm). The response variables were: the water retention and the incorporated air content (in fresh state); the compression strength, the flexural tensile strength, adhesion strength and length of cracking (in hardened state), at 28 days of curing. The results obtained for the response variable incorporated air content showed that the amount of cement, the consistency, the amount of CDW, and the amount of ceramic material in the CDW had an influence on this property. For higher cement contents there was an increase in the incorporated air content. However, for high levels of both CDW and amount of ceramic material, a reduction in this variable was observed. For the response variable water retention, the factor that had the most significant influence was the amount of lime. Also, it was observed an increase in water retention by increasing the amount of ceramic material and the amount of CDW. Concerning the compressive strength, the flexural tensile strength, and the adhesion strength, it was concluded that the amount of cement was the main influence on the results. Also, it was observed that the amount of both CDW and ceramic material had a significant influence on the adhesion strength. Regarding the length of cracking per square meter of mortar, there was a significant influence only of the amount of cement. At higher levels of this factor there was much less cracking when compared to the low levels of the same factor. The optimization analysis in conjunction with the robust design methodology allowed the determination of an optimal condition or zone, where, in principle, mortars are obtained with better overall performance, satisfying the required performance and improving the robustness of the product. The best mixture proportion was obtained for the following combination: CDW Sand/Total Sand ratio of 0.59; Cement/Total Binder ratio of 0.60; percentage of ceramic in the CDW of 62.5%, and consistency of 250mm.

Key-words: Construction and demolition waste, Rendering mortars, Robustness, Robust design

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo de vida e qualidade de um produto.....	19
Figura 2: Composição média do entulho gerado na cidade de Ribeirão Preto.....	25
Figura 3: Diferentes alternativas de revestimento de vedações verticais: (a) emboço+reboco+pintura; (b) camada única+ pintura; (c) revestimento decorativo monocamada (RDM).....	30
Figura 4: Formas de ruptura ensaio de resistência de aderência em à tração para revestimentos de paredes e tetos.....	36
Figura 5: Evolução do índice de fissuração com a idade	39
Figura 6: Correlação entre o índice de fissuração e o teor de finos.....	39
Figura 7: Correlação entre os valores médios da resistência de aderência à tração e o teor de cimento.....	40
Figura 8: Evolução da resistência à compressão	46
Figura 9: Resistência à aderência	46
Figura 10: Resistência à aderência ao substrato.	52
Figura 11: Resultados obtidos por Corinaldesi e Moriconi (2008) na resistência à flexão.....	55
Figura 12: Resultados obtidos por Corinaldesi e Moriconi (2008) na resistência à compressão (MPa).....	55
Figura 13: Panorama geral das variáveis e fatores envolvidos no estudo de robustez.....	65
Figura 14: Projeto Composto Central: (a) três fatores; (b) dois fatores. Fonte: adaptado de Silveira (2003).	66
Figura 15: Fluxograma das etapas do programa da pesquisa.....	69
Figura 16: Britador de martelo	71
Figura 17: Agregados de RCD: (a) agregado de argamassa após a britagem; (b) agregado de cerâmica após a britagem; (c) agregado de argamassa após o peneiramento; (d) agregado de cerâmica após o peneiramento.....	72
Figura 18: Equipamentos e utensílios para a determinação do teor de ar incorporado.....	73
Figura 19: Equipamentos e utensílios para a realização do ensaio de retenção de água.....	74
Figura 20: Execução ensaio retenção de água.....	74
Figura 21: Misturador mecânico (argamassadeira).....	75
Figura 22: Formas prismáticas para moldagem dos corpos-de-prova.....	75
Figura 23: Ensaio de consistência.....	76
Figura 24: Adensamento dos corpos-de-prova.....	76
Figura 25: Marcação nos corpos-de-prova prismáticos.....	77
Figura 26: Prensa hidráulica.....	78
Figura 28: Determinação da resistência à compressão.....	79
Figura 29: Projeto dos painéis.....	80
Figura 30: Execução dos módulos dos painéis.....	80
Figura 31: Execução do chapisco e mestras nos painéis.....	81
Figura 32: Materiais empregados nas misturas.....	81

Figura 33 Execução do revestimento: (a) umedecimento do chapisco; (b) aplicação da argamassa; (c) sarrafeamento.	82
Figura 34: Painel marcado para medição das fissuras.	83
Figura 35: Ensaio para determinação da resistência de aderência: (a) execução das perfurações; (b) etapa de arrancamento.	84
Figura 36: Curvas granulométricas das areias utilizadas (ABNT, 2003).	86
Figura 37: Efeito do fator Areia de RCD/Areia Total sobre o teor de ar incorporado.	89
Figura 38: Efeito do fator Cimento/Aglomerante Total sobre o teor de ar incorporado.	90
Figura 39: Efeito do fator Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre o teor de ar incorporado.	90
Figura 40: Efeito do fator Consistência sobre o teor de ar incorporado.	91
Figura 41: Efeito da interação entre Cimento/Aglomerante total e Consistência sobre o teor de ar incorporado.	91
Figura 42: Linhas de contorno para Cimento/Aglomerante Total, Consistência e teor de ar incorporado.	92
Figura 43: Efeito do fator Areia de RCD/Areia Total sobre a retenção de água.	94
Figura 44: Efeito do fator Cimento/Aglomerante Total sobre a retenção de água.	95
Figura 45: Efeito do fator Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre a retenção de água.	95
Figura 46: Efeito da interação entre Areia de RCD/Areia Total e Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre a retenção de água.	96
Figura 47: Efeito da interação entre Areia de RCD/Areia Total e Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre a retenção de água.	96
Figura 48: Linhas de contorno para Areia de RCD/Areia Total, Areia Cerâmica/Areia de RCD e retenção de água.	97
Figura 49: Efeitos do fator Cimento/Aglomerante Total sobre a resistência à tração na flexão.	100
Figura 50: Efeito do fator Consistência sobre a resistência à tração na flexão.	101
Figura 51: Efeito da interação entre Cimento/Aglomerante Total e Consistência sobre a resistência à tração na flexão.	101
Figura 52: Linhas de contorno para Cimento/Aglomerante Total, Consistência e resistência à tração na flexão.	102
Figura 53: Efeito do fator Cimento/Aglomerante Total sobre a resistência à compressão.	104
Figura 54: Efeito do fator Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre a resistência à compressão.	104
Figura 55: Efeito do fator Consistência sobre a resistência à compressão.	105
Figura 56: Efeito da interação entre Cimento/Aglomerante Total e Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre a resistência à compressão.	106
Figura 57: Efeito da interação entre Areia Cerâmica/Areia de RCD e Consistência sobre a resistência à compressão.	106
Figura 58: Linhas de contorno para Cimento/Aglomerante Total, Areia Cerâmica/Areia de RCD e resistência à compressão.	107
Figura 59: Linhas de contorno para a Areia cerâmica/Areia de RCD e Consistência.	108
Figura 60: Formas de ruptura observadas após o ensaio de aderência à tração: (a) Ruptura na interface argamassa-substrato; (b) ruptura no substrato.	110
Figura 61: Painel traço 08.	110

Figura 62: Painel traço 18.	110
Figura 63: Efeito do fator Cimento/Aglomerante Total sobre o comprimento de fissuras por m ²	111
Figura 64: Efeito principal do fator Areia de RCD/Areia Total sobre a resistência de aderência à tração.	113
Figura 65: Efeito do fator Cimento/Aglomerante Total sobre a resistência de aderência à tração	114
Figura 66: Efeito do fator Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre a resistência de aderência à tração.	115
Figura 67: Efeito do fator Consistência sobre a resistência de aderência à tração.	115
Figura 68: Efeito da interação entre os fatores Areia de RCD/Areia Total e Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre a resistência de aderência à tração.	116
Figura 69: Efeito da interação entre os fatores Areia de RCD/Areia Total e Consistência sobre a resistência de aderência à tração.	117
Figura 70: Linhas de contorno para Areia de RCD/Areia Total, Areia Cerâmica/Areia de RCD e resistência de aderência à tração.	117
Figura 71: Linhas de contorno para Areia de RCD/Areia Total, Consistência e resistência de aderência à tração.	118
Figura 72: (a) Teor de ar incorporado x Resistência à tração na flexão; (b) Resistência à tração na flexão x Fator a/c; (c) Resistência à tração na flexão x Resistência à compressão; (d) Resistência à compressão x Fator a/c.....	120
Figura 73: (e) Quantidade de água x Teor de Finos; (f) Teor de Ar Incorporado x Teor de Finos; (g) Retenção de água x Teor de Finos; (h) Retenção de água x Fator a/c.....	121
Figura 74: (a) Comprimento de fissuras x Fator a/c painéis; (b) Comprimento de fissuras x Resistência aderência; (c) Resistência à compressão x Comprimento de fissuras; (d) Resistência à tração na flexão x Comprimento de fissuras.....	122
Figura 75: (e) Resistência de Aderência x Resistência à tração na flexão; (f) Resistência à compressão x Resistência aderência.	122
Figura 76: Efeitos principais dos fatores controlados sobre a propagação do erro: (a) Fator A (Areia de RCD/Areia total); (b) Fator B (Cimento/Aglomerante total); (c) Fator C (Areia Cerâmica/Areia de RCD); (d) Fator D (consistência).....	125
Figura 77: Gráfico de perturbação para POE (resistência de aderência à tração).	126
Figura 78: Efeitos de interação dos fatores A (Areia de RCD/Areia total) e C (Areia Cerâmica/Areia de RCD) sobre a propagação do erro.	127
Figura 79: Rampas para as variáveis de resposta e POE.....	128
Figura 80: Rampas para os fatores de controle.	129
Figura 81: Função de desejabilidade.....	129
Figura 82: Efeitos de interação dos fatores A (Areia de RCD/Areia total) e C (Areia Cerâmica/Areia de RCD) sobre a desejabilidade.	130
Figura 83: Otimização gráfica e definição da zona ótima.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados sobre a geração de resíduos de construção em algumas cidades brasileiras.	25
Tabela 2: Classificação das argamassas de revestimento extraído da NBR 13530 (1995)	28
Tabela 3: Espessuras admissíveis de revestimento interno e externo para parede.	30
Tabela 4: Limites de resistência de aderência à tração (Ra) para emboço e camada única.....	37
Tabela 5: Traços, caracterização dos agregados e ensaios utilizados por Passos (2008).....	39
Tabela 6: Propriedades investigadas por diversos autores	44
Tabela 7: Composição das misturas utilizadas para produção de argamassas.	45
Tabela 8: Distribuição granulométrica das misturas utilizadas na produção das argamassas.....	45
Tabela 9: Características das argamassas no estado fresco.	45
Tabela 10: Traços estudados e propriedades determinadas por Silva (1997).....	47
Tabela 11: Proporção das adições em volume e ensaios utilizados no trabalho de Levy (1997).....	47
Tabela 12: Composição do RCD.....	48
Tabela 13: Argamassas utilizadas e submetidas à caracterização indicada na última coluna.	48
Tabela 14: Resumo dos resultados obtidos na caracterização das argamassas no estado endurecido.	49
Tabela 15: Resumo dos resultados na avaliação de desempenho dos revestimentos.	49
Tabela 16: Composição das argamassas analisadas por Bavaresco (2001).....	51
Tabela 17: Relação entre traços em volume e massa das argamassas ensaiadas.....	51
Tabela 18: Resultados de Consistência e Resistência para dois traços.	51
Tabela 19: Resultados de Consistência e Resistência para dois traços.	52
Tabela 20: Caracterização dos agregados e traços utilizados por Corinaldesi e Moriconi (2008).....	55
Tabela 21: Variáveis de resposta para a avaliação do desempenho da argamassa de RCD no estado fresco.	61
Tabela 22: Variáveis de resposta para a avaliação do desempenho mecânico da argamassa de RCD no estado endurecido.	61
Tabela 23: Fatores controláveis investigados no programa experimental.....	63
Tabela 24: Fatores controláveis mantidos fixos no programa experimental.....	63
Tabela 25: Fatores investigados e seus níveis.	67
Tabela 26: Projeto composto central: delineamento experimental.....	67
Tabela 27: Ensaios de caracterização física dos agregados.....	71
Tabela 28: Ensaios de caracterização física dos aglomerantes.....	72
Tabela 29: Caracterização física dos materiais.	87
Tabela 30: Resultados dos ensaios de no estado fresco *.	88
Tabela 31: ANOVA para o teor de ar incorporado.	89
Tabela 32: Influência do teor de cimento no teor de ar incorporado.....	93
Tabela 33: Resultado da ANOVA para a retenção de água.	94
Tabela 34: Ensaios em corpos-de-prova prismáticos.	99

Tabela 35: Resultado da ANOVA para resistência à tração na flexão.....	100
Tabela 36: Resultado da ANOVA para resistência à compressão.....	103
Tabela 37: Valores de resistência à compressão encontrados na literatura.....	103
Tabela 38: Resultados dos ensaios em painéis.....	109
Tabela 39: Resultado da ANOVA para comprimento de fissuras por m ²	111
Tabela 40: Valores de comprimento de fissuras por m ² observados na literatura.....	112
Tabela 41: Resultado da ANOVA para resistência de aderência à tração.....	112
Tabela 42: Valores de Resistência de aderência à tração encontrados na literatura.....	113
Tabela 43: Valores de resistência de aderência à tração encontrados na literatura.....	114
Tabela 44: Fatores controláveis investigados no programa experimental.....	124
Tabela 45: Critérios de otimização.....	128

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2 PROBLEMA DA PESQUISA	17
1.3 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO	19
1.4 OBJETIVOS	21
1.4.1 Objetivo Geral	21
1.4.2 Objetivos Específicos	21
1.5 CONTEÚDO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2 REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1 O RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) E SUA UTILIZAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	23
2.2 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	28
2.2.1 Definições	28
2.2.2 Propriedades no estado fresco	31
2.2.3 Propriedades no estado endurecido	34
2.2.3.1 Resistência mecânica à compressão e à flexão	34
2.2.3.2 Aderência	34
2.2.3.3 Fissuração por Retração	37
2.2.4 Fatores que Afetam as Propriedades das Argamassas	40
2.2.4.1 Granulometria das Areias Constituintes das Argamassas	40
2.2.4.2 Base de Assentamento ou Substrato	41
2.2.4.3 Dosagem	41
2.2.4.4 Adição de Água na Argamassa	42
2.2.4.5 Cal hidratada	43
2.3 ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	43
3 PROGRAMA DA PESQUISA	59
3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	59
3.1.1 Visão Geral	59
3.1.2 Definição das Variáveis de Resposta e Ensaios Realizados	61
3.1.3 Identificação dos Fatores de Desempenho	61
3.1.4 Definição dos Fatores Controláveis	62
3.1.5 Definição dos Fatores de Ruído	63
3.1.6 Delineamento Experimental	64
3.1.7 Análise dos Resultados	68
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS	70

3.2.1 Agregados	70
3.2.1.1 Preparo dos Agregados.....	70
3.2.1.2 Caracterização dos Agregados	71
3.2.2 Aglomerantes	72
3.2.3 Água	73
3.3 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	73
3.3.1 Teor de Ar Incorporado.....	73
3.3.2 Retenção de Água	73
3.4 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO.....	73
3.4.1 Ensaios em Corpos-de-prova Prismáticos	74
3.4.1.1 Composição dos Agregados	74
3.4.1.2 Preparo das Argamassas, Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova.....	75
3.4.1.3 Determinação da Resistência à Tração na Flexão	77
3.4.2 Ensaios em Painéis.....	78
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	85
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS	86
4.2. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	87
4.2.1. Teor de Ar Incorporado.....	87
4.2.2 Retenção de Água	93
4.3 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO.....	98
4.3.1 Ensaios em Corpos-de-prova Prismáticos	98
4.3.1.1 Resistência à Tração na Flexão	98
4.3.1.2 Resistência à Compressão	103
4.3.2 Ensaios em Painéis.....	108
4.3.2.1 Comprimento de Fissuras.....	110
4.3.2.2 Resistência de Aderência à Tração.....	112
4.4 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE RESPOSTA	119
4.5 ANÁLISE DE ROBUSTEZ.....	123
4.6 ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO	126
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	132
5.1 CONCLUSÕES	132
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria da construção civil é composta por vários setores da economia e envolve as diversas etapas de execução dos mais variados tipos de obras de engenharia. A indústria da construção civil é atualmente responsável por cerca de 14% do PIB nacional (JOHN, 2000), gerando milhões de empregos, o que, por si só, demonstra a importância sócio-econômica do setor para a economia do país.

Os dados diferem de país para país, mas, situando rapidamente o problema, a indústria da construção civil e seus produtos consomem 40% da energia e dos recursos naturais e geram 40% dos resíduos produzidos por todo o conjunto das atividades humanas (SJÖSTRÖM, 1996). A indústria da construção civil pode ser classificada como um grande poluidor, sendo necessário muito trabalho e conscientização, bem como medidas viáveis e eficazes que modifiquem este cenário.

Entre a exploração dos recursos naturais e a obtenção do produto final, há a geração de uma enorme quantidade de resíduos, denominados genericamente de resíduos da construção e demolição (RCD). Ao mesmo tempo, o setor busca alternativas para o enfrentamento dessa questão, entre as quais podem ser destacadas: (a) a redução da geração do resíduo na fonte; (b) a reutilização do resíduo; (c) a reciclagem; (d) a incineração com recuperação de energia; (e) a disposição final em aterros apropriados (JOHN, 2000).

Reciclar e/ou reutilizar os resíduos da construção e demolição acarreta uma série de benefícios como a preservação dos recursos naturais, a geração de emprego e renda e o aumento da competitividade das empresas pela redução das perdas no canteiro de obra. A utilização de RCD é um assunto que, nos últimos anos, vem sendo abordado intensamente em uma série de trabalhos e em diferentes aplicações, tais como execução de bases e sub-bases

para pavimentação, confecção de blocos (pavimentação e alvenaria), produção de concretos e argamassas.

Entre as aplicações mencionadas, a utilização de RCD na confecção de argamassas para revestimento se destaca pelo potencial de utilização em larga escala e pela possibilidade de emprego no próprio local da geração do resíduo. Contudo, uma argamassa de RCD para revestimento deve atender aos mesmos requisitos de qualidade de uma argamassa convencional tais como: estanqueidade, conforto térmico, acústico e estético, resistência mecânica, resistência de aderência, resistência à fissuração, entre outros.

1.2 PROBLEMA DA PESQUISA

Entre os diferentes tipos de sistemas de revestimentos encontrados atualmente no mercado nacional, o sistema que utiliza argamassa de revestimento é o mais difundido. Por se tratar de uma mistura de materiais (cimento, cal, areia, aditivos, etc.) com inúmeras possibilidades de composições e formas de aplicação, diversos estudos vêm sendo realizados nos últimos anos, visando principalmente o desenvolvimento tecnológico nesta área, tanto no que se refere à composição e aplicação de materiais diversos quanto ao processo de produção (e.g. PINTO, 1986; SABATINI, 1990; LEVY, 1997; MIRANDA, 2000; COSTA, 2005; JADOVSKI, 2005; SALVADOR, 2005; MOURA, 2007; PARAVISI, 2008).

A obtenção de revestimentos em argamassa com boa qualidade depende de diversos aspectos envolvendo os materiais constituintes e as etapas de execução. Entre estes podem ser citados:

- a) os tipos e quantidade de aglomerantes, os quais alteram o comportamento físico, químico e mecânico dos revestimentos;
- b) os agregados e suas características, como granulometria, tamanho de grãos, forma dos grãos, teor de finos, material pulverulento, absorção, massa específica, massa aparente, possíveis ações pozolânicas, etc.;
- c) a utilização de aditivos, os quais abrem um leque de alternativas de especificações para as características das argamassas;
- d) a relação água/aglomerante, pois é o fator decisivo para o comportamento dos revestimentos;

e) os tipos de substrato, que podem ser blocos cerâmicos, blocos de concreto, concreto, concreto celular, etc, com características que diferem quanto à absorção, resistência, etc.;

f) o tratamento do substrato, que pode ser com ou sem chapisco, natural ou industrializado;

g) o projeto do revestimento e a mão-de-obra empregada, os quais constituem etapas importantes do processo, pois destes dependem a especificação do traço e a execução do revestimento (obtenção da trabalhabilidade, aplicação da argamassa, sarrafeamento, desempenamento e cura).

A possibilidade de utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) como um material alternativo aos agregados minerais na confecção de argamassas de revestimentos têm sido motivo de diversas teses e dissertações (PINTO, 1986; SABATINI, 1990; LEVY, 1997; MIRANDA, 2000; COSTA, 2005; JADOVSKI, 2005; SALVADOR, 2005; MOURA, 2007; PARAVISI, 2008). Os trabalhos realizados até o momento, contudo, tem revelado dificuldades na utilização deste material, as quais podem estar associadas em parte à variabilidade excessiva dos materiais que compõe o RCD, e, de outra parte, à variabilidade das propriedades finais da argamassa (retração e fissuração, por exemplo). Esta variabilidade excessiva tem sido associada a fatores cujo controle, embora possível em ambiente de laboratório, é muito difícil ou mesmo impossível de ser exercido em obra, durante o processo de fabricação e execução da argamassa. Estes fatores são usualmente conhecidos como fatores de ruído, em contraposição aos fatores de controle, os quais podem e ser manipulados durante o processo de fabricação do produto.

No caso específico da argamassa com incorporação de RCD, os principais fatores de ruído estão possivelmente relacionados à composição e características físicas do próprio RCD utilizado em substituição parcial ou total ao agregado convencional de origem mineral.

Neste contexto, portanto, a questão da pesquisa que se coloca inicialmente é a seguinte: como melhorar a qualidade final da argamassa com RCD, de forma que o produto final atenda às normas vigentes, a alguns requisitos mínimos de desempenho e à expectativa do consumidor? Ainda, é possível minimizar a variabilidade das características de qualidade de uma argamassa contendo resíduo da construção e demolição, melhorando a robustez do produto final?

O termo “robustez”, neste contexto, retém o mesmo significado cunhado no âmbito da Engenharia da Qualidade, isto é, um produto, um processo, ou mesmo um serviço, será

considerado robusto se apresentar estabilidade das suas propriedades funcionais e características de qualidade, frente às variações inerentes aos ambientes de fabricação e utilização (e.g. TAGUCHI, 1986; PHADKE, 1989). A robustez é, portanto, um importante parâmetro da qualidade, uma vez que o consumidor espera que todo o produto proporcione o desempenho esperado durante o tempo em que o mesmo é utilizado, sob todas as condições operacionais designadas. Desta forma, Taguchi (1986), um dos precursores na introdução do conceito de robustez no projeto e desenvolvimento de produtos industrializados, propõe que a qualidade deva ser entendida em termos da perda total que é repassada à sociedade devido às variações funcionais de produtos e processos e seus efeitos secundários prejudiciais. Este mesmo autor afirma, ainda, que é preciso definir um “ideal de qualidade”, o qual serve como *benchmark* para a avaliação da qualidade de um produto. Estes conceitos podem ser melhor observados na Figura 1, que representa o ciclo de vida de um produto, onde o custo ocorrido antes da saída do produto ao consumidor deve ser adicionado ao custo global de produção, assim como todo custo ocorrido após a saída do produto deve ser contabilizado como perda de qualidade.



Fonte: Adaptada de Phadke (1989).

Figura 1: Ciclo de vida e qualidade de um produto

1.3 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO

A Universidade de Passo Fundo e especificamente o Programa de Pós-graduação em Engenharia vem ao longo dos anos desenvolvendo diversos trabalhos tendo como pano de fundo o tema dos resíduos da construção e demolição (RCD), desde a geração e quantificação até a reutilização e/ou reciclagem.

Existem várias barreiras a serem vencidas quando se almeja à introdução no mercado de novos produtos contendo resíduos: legais e regulamentares, ambientais, culturais,

tecnológicas, econômicas e geográficas. Na indústria da construção civil, segundo John (2000), as dificuldades de introdução de novas tecnologias estão relacionadas às seguintes razões: (a) o baixo impacto da inovação tecnológica nos custos do empreendimento imobiliário; (b) a existência de normas prescritivas, que especificam a adoção de uma determinada solução específica e não de um desempenho; e (c) o histórico brasileiro recente de novas tecnologias que resultaram em desempenho insatisfatório.

Neste contexto, o presente trabalho pretende ser uma contribuição no sentido de estudar alternativas para utilização do RCD buscando a sua viabilidade técnica, econômica e ambiental. O conceito de robustez aplicado à produção de argamassas de revestimento com RCD também deve ser visto como uma contribuição à viabilização do emprego deste material, uma vez que, quando empregado nas fases de pesquisa e desenvolvimento, permite, em princípio, a obtenção de produtos otimizados, com maior qualidade global, com características médias dentro das especificações e variabilidade mínima, resultando, também, em menores custos globais, especialmente aqueles relacionados à manutenção e reparação durante a fase de utilização.

A metodologia de projeto robusto aplicada no presente trabalho e detalhada no capítulo 3 foi proposta inicialmente por Taguchi (TAGUCHI, 1986; PHADKE, 1989) e posteriormente desenvolvida por muitos outros autores (e.g. BORKOWSKI; LUCAS, 1997; BORROR; MONTGOMERY, 2000; BORROR et al., 2002, MYERS; MONTGOMERY, 2002). Nesta metodologia, a partir de um conjunto de ferramentas analíticas e experimentais, além do valor médio das características e qualidade do produto, são focadas as variabilidades transmitidas a estas características (robustez). No caso das argamassas de revestimento estas características de qualidade podem ser: a trabalhabilidade, a resistência à fissuração, à retração, as resistências à compressão, à tração, de aderência, entre outras.

Outra característica interessante desta metodologia é a discriminação de todos os fatores envolvidos na concepção do produto, pois é de grande relevância saber quais são os fatores e as interações entre os fatores de maior significância e quais destes fatores contribuem para perda da qualidade (maior variabilidade).

Finalmente, a aplicação de RCD em argamassas de revestimento se justifica na medida em que pode ser feita diretamente na obra, passando somente pelo processo de trituração e segregação, gerando economia no transporte deste resíduo, diminuição na porcentagem de

perda de materiais e, ainda, evitando ou minimizando a sua disposição irregular no meio ambiente.

1.4 OJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral, através de um estudo experimental em laboratório, avaliar o desempenho mecânico e a robustez de argamassas de revestimento com a incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD), isto é, visando à obtenção de um produto menos sensível às variações não controláveis inerentes ao processo de fabricação e ao ambiente de utilização do produto.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar a influência relativa dos diversos fatores de controle sobre algumas propriedades no estado fresco (retenção de água e teor de ar incorporado) e no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência de aderência e fissuração);
- Avaliar a influência da quantidade de agregado de RCD e da sua composição em algumas propriedades da argamassa de revestimento no estado fresco (retenção de água e teor de ar incorporado) e no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência de aderência e fissuração);
- Investigar a existência de uma condição para a argamassa com RCD, de forma a atender aos valores de especificação dos parâmetros de desempenho (característica da qualidade) e, simultaneamente, minimizar as respectivas variabilidades (robustez).

1.5 CONTEÚDO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além do presente capítulo, de introdução, a dissertação está estruturada em quatro capítulos:

No capítulo 2, apresenta-se a revisão da literatura sobre os assuntos pertinentes ao tema da pesquisa, como o resíduo de construção e demolição (RCD), o aproveitamento do RCD na

construção civil, as propriedades das argamassas de revestimento, trabalhos desenvolvidos sobre argamassas com RCD.

No capítulo 3, descrevem-se o planejamento experimental, a seleção, preparação e caracterização dos materiais e os ensaios realizados em corpo-de-prova e em painéis.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos, bem como sua análise e discussão.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões sobre o estudo e sugestões de possíveis trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentadas e discutidas, com base na bibliografia pesquisada, as principais definições sobre argamassas de revestimentos e suas propriedades no estado fresco e endurecido, bem como a geração, características e aproveitamento dos resíduos de construção e demolição na construção civil.

2.1 O RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) E SUA UTILIZAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A geração, classificação e reciclagem dos resíduos de construção e demolição já foram amplamente discutidos por diversos pesquisadores destacando-se os trabalhos de Pinto (1986), Zordan (1997), Leite (2001), Jadovski (2005). Portanto nos itens subsequentes serão apresentados algumas definições, conceitos e dados que são importantes para o presente trabalho.

De forma mais simplificada, o RCD (resíduo de construção e demolição) pode ser definido como um resíduo proveniente de construções, reparos, reformas, e demolições de estruturas e estradas.

Tchobanoglous et al. (1977 apud ZORDAN, 1997), definem o resíduo de construção como material proveniente de atividades da construção civil, devido à construção de edificações, reformas e reparos de residências individuais, edificações comerciais e outras estruturas. Definem, também, resíduos de demolição como todo material proveniente da destruição de construções e outras estruturas.

O agregado reciclado pode ser definido como um material granular, resultante de um processo industrial envolvendo o processamento de materiais inorgânicos, previamente e exclusivamente utilizados na construção, e aplicados novamente na construção (LEITE, 2001).

Os resíduos de construção e demolição são gerados em diferentes fases do empreendimento: fase de construção, fase de manutenção ou reformas e fase de demolição. A geração de resíduo durante a fase de construção é decorrência das perdas nos processos construtivos. Parte dessa perda permanece incorporada nas construções, sob a forma de componentes que acabam ficando superdimensionados (FORMOSO et al., 1998).

Em função do exposto anteriormente sabe-se que a composição do RCD é muito variada, pois se trata de uma combinação de produtos de diferentes origens e naturezas. Como exemplos, Pinto (1999) cita: (a) solos; (b) rochas; (c) concretos, armados ou não; (d) argamassas a base de cimento e cal; (e) metais; (f) madeiras; (g) plásticos diversos; (h) materiais betuminosos; (i) vidros; (j) gessos – pasta e placa; (k) tintas e adesivos; (l) restos de embalagens; (m) resíduos de cerâmica vermelha, como tijolos e telhas; (n) cerâmica branca, especialmente a de revestimento; (o) cimento-amianto; (p) produtos de limpeza de terrenos, entre outros, em proporções variáveis de acordo com a origem.

Os resíduos, independente da origem, devem ser classificados, do ponto de vista do risco ambiental, para que possam sofrer o correto destino e manuseio. No Brasil existe uma norma que trata da classificação dos resíduos sólidos, a NBR 10004 (ABNT, 2007) – “Resíduos sólidos – Classificação”. De acordo com esta norma os resíduos de construção e demolição podem ser classificados em resíduos da Classe IIb – inertes. Isto se deve ao fato deste resíduo possuir componentes minerais não poluentes e ser praticamente inerte quimicamente (LEVY, 1997).

A Resolução nº. 307, do Conselho Nacional do Meio Ambiente, de cinco de julho de 2002 (BRASIL, 2002), define diferentes classes de resíduos de construção e demolição (RCD). Os resíduos a serem utilizados no presente trabalho enquadram-se na classe A e são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de edificações; são compostos basicamente por componentes cerâmicos (tijolos, blocos) e argamassas produzidas nos canteiros de obras (BRASIL, 2002).

A classificação dos resíduos de construção e demolição, segundo a NBR-10004 (ABNT, 2007), é Classe IIb – inertes definidos como aqueles que, em ensaio de solubilidade após sete dias, a água solubilizada apresenta condições de potabilidade, exceto pela cor.

Leite (2001) salienta que a geração de resíduos de construção e demolição, segundo a Tabela 1, já possui números assustadores e a tendência mundial é que estes valores aumentem

ainda mais. Encontrar uma utilização para estes resíduos é mais que uma necessidade é uma obrigação.

Tabela 1: Dados sobre a geração de resíduos de construção em algumas cidades brasileiras.

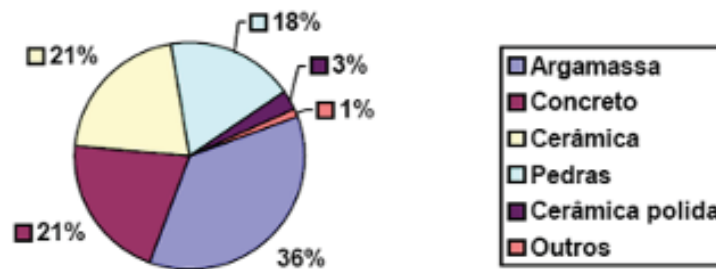
Localidade	População (milhões de habitantes) e Geração de entulho (t/dia)		% de entulho em relação ao resíduo sólido urbano
São Paulo(1)	15,0	5000	-
Porto Alegre(2)	1,20	350	-
Salvador(3) (6)	2,20	1700	37
Ribeirão Preto(1)	0,46	1043	67
São José do Rio Preto(5)	0,32	687	-
Jundiaí(5)	0,29	712	-
Santo André(4)	0,63	1013	58
Belo Horizonte(1)	2,01	1200	51
Vitória da Conquista(5)	0,24	310	-
São José dos Campos(1)	0,50	733	65

Fontes: (1) Construção (1996); (2) Costa (1998); (3) Vieira et al. (1998); (4) Lima e Tamai (1998); (5) Pinto (2000); (6) Carneiro et al. (2000)

Fonte: Leite (2001)

Com base nesta premissa, Pinto (2000 apud LEITE, 2001) enfatiza que o gerenciamento dos resíduos de construção e demolição no próprio local de sua geração representa uma importante ferramenta para que a indústria da construção assuma sua responsabilidade com o resíduo gerado no ambiente urbano. Esta atitude fará com que o resíduo seja confinado em grande parte dentro do seu local de origem, o que evita sua remoção para locais distantes, evitando despesas e problemas para os órgãos públicos responsáveis.

Segundo Zordan (1997), em estudo realizado na cidade de Ribeirão Preto, a média aproximada de material passível de ser utilizado como agregado reciclado é de 81%, o resíduo é composto por argamassa, concreto e cerâmico, conforme ilustrado na Figura 2.



Fonte: Zordan (1997).

Figura 2: Composição média do entulho gerado na cidade de Ribeirão Preto.

Na cidade de Passo Fundo, segundo estudo de Bernardes (2006), a geração de RCD chegou a uma estimativa de aproximadamente, 0,55 kg/hab/dia. Comparando-se com a estimativa de geração de resíduos sólidos urbanos, que é de 0,6 kg/hab/dia, pode-se afirmar que Passo Fundo-RS não está longe das estimativas médias brasileiras.

Para ilustrar a média nacional, a composição média do RCD depositados no aterro de Ipatinga, São Paulo, Brito Filho (1999) coloca que os resíduos tem a seguinte composição: solo 32%, cerâmicos 30%, argamassas 25%, concreto 8%, orgânicos 1% e outros 4%.

A reciclagem dos resíduos de construção e demolição não é uma atividade recente. Na Alemanha, em torno de 1860, foram produzidos artefatos de concreto de cimento Portland com agregados reciclados. Contudo, a utilização mais necessária e relevante deu-se após o fim da Segunda Guerra Mundial, quando toneladas de resíduos ficaram espalhadas pelas cidades da Alemanha. Diante da necessidade de reconstruir as cidades, que tiveram seus edifícios demolidos, e a carência de materiais de construção, a saída foi o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem dos resíduos de construção e demolição (LEITE, 2001).

A indústria da construção civil consome uma parcela grande dos recursos naturais explorados (14% a 50%, segundo SJÖSTRÖM, 1996) e, como consequência, gera uma quantidade imensa de resíduos. Por ano são produzindo na Alemanha cerca de 33 milhões de toneladas. Na Inglaterra, chega a 70 milhões de toneladas/ano e, na França, de 20 a 25 milhões. No oeste da Europa, a quantidade é cerca de 0,7 a 1 tonelada por habitante/ano, quase duas vezes a massa do resíduo sólido municipal.

O desperdício e as perdas de material no canteiro de obra são temas frequentemente abordados em trabalhos acadêmicos. No Brasil, estudo de Pinto (1999) estimou que nas grandes cidades brasileiras as atividades de canteiro de obra são responsáveis por aproximadamente 50% dos resíduos de construção, enquanto que a atividade de demolição e manutenção é responsável pela outra metade. Nos EUA, estima-se que apenas 8% dos resíduos de construção sejam provenientes de construção, e que 33% provêm de demolições não residenciais.

Uma grande variedade de componentes contribui para a formação dos resíduos. A proporção desses materiais em diferentes amostras, conforme Vieira (2004) apresenta grande variabilidade e heterogeneidade. Esse é um dos motivos pelos qual a utilização de agregados reciclados ainda é tão tímida; a natureza variável deste material dificulta o seu aproveitamento pela indústria.

A agenda 21 da construção civil apresenta algumas metas que são de suma importância: minimizar o consumo de recursos, maximizar a reutilização de recursos, utilizar recursos renováveis ou recicláveis, proteger o meio ambiente, criar um ambiente saudável e não tóxico, buscar a qualidade no ambiente construído.

As questões sobre a reciclagem de resíduos devem ser encaradas como questões de multidisciplinaridade, pois requerem alguns cuidados: caracterização física e química e da microestrutura, incluindo risco ambiental, a busca de possíveis utilizações dentro da construção civil considerando suas características, desenvolvimento de diferentes aplicações, incluindo seu processo de produção, com base na ciência dos materiais, análise do risco ambiental do novo produto, incluindo contaminação do lenço freático, do ar interno e dos trabalhadores que manejam o produto, análise do desempenho de diferentes necessidades dos usuários para cada aplicação específica, abordagem desde o desenvolvimento do produto, passando pela produção até a utilização, avaliando o risco a saúde de trabalhadores e usuários, análise da viabilidade econômica, transferência de tecnologia.

É interessante observar que uma parcela significativa dos materiais que a construção consome são agregados para pavimentos, concretos, argamassas e elementos de alvenaria, cuja produção é eminentemente regional (MATTOS; WAGNER, 1999).

A utilização de agregado reciclado na produção de argamassas apresenta outras vantagens, dentre as quais se podem citar: a diminuição dos impactos gerados pela disposição incorreta do RCD, como enchentes e assoreamento de rios e córregos, a preservação das reservas naturais, devido à substituição de matéria-prima convencional por material reciclado, além da otimização do uso de aterros, em função da conseqüente diminuição de resíduos descartados (CARNEIRO et al., 2000).

Os requisitos de desempenho são qualitativos definidos, a partir da função específica que o elemento ou o componente ocupa na edificação. Os critérios de desempenho, geralmente, representam à avaliação quantitativa dos requisitos, isto é, são os valores que devem ser alcançados nos ensaios específicos e que permitem verificar se as condições pré-estabelecidas foram atendidas (HELENE; SOUZA, 1988).

Para incentivar à reciclagem dos resíduos da construção, o governo inglês lançou em 1995 a sua diretiva “Making Waste Work”, uma estratégia para o gerenciamento sustentável de resíduos, que tem como um dos objetivos: (a) fazer o melhor uso do lixo que nossa sociedade

produz; (b) reduzir a quantidade de resíduo; (c) reduzir o risco de poluição imediata e futura pela deposição dos resíduos (DESAI, 1998).

Segundo trabalho realizado por John (2000), o consumo de recursos naturais na construção civil em determinada região depende de fatores como: a) taxa de resíduos gerados; b) vida útil ou taxa de reposição das estruturas construídas; c) necessidades de manutenção, inclusive as manutenções que visam corrigirem falhas construtivas; d) perdas incorporadas nos edifícios; e) da tecnologia empregada.

A restrição à reciclagem dos resíduos da construção, a diminuição da resistência dos concretos reciclados está sendo alvo de muitas discussões. É perfeitamente comum encontrar resultados cujas misturas obtenham valores abaixo dos de referência. Limbachiya (2000 apud LEVY, 2001), afirma que o decréscimo da resistência nos concretos com agregados reciclados se dá, principalmente, devido à alteração da relação entre água e cimento (a/c).

2.2 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

2.2.1 Definições

As argamassas de revestimento são utilizadas como um dos componentes do sistema de vedação vertical, interna e externa, na maioria das edificações no Brasil.

A NBR 7200 (ABNT, 1982) define argamassa como uma mistura de aglomerantes e agregados minerais com água, possuindo capacidade de endurecimento e resistência. De acordo com a combinação dos materiais utilizados as argamassas de revestimento podem ser classificadas conforme a natureza, tipo e número de aglomerantes empregados na mistura NBR 13530 (ABNT, 1995). A Tabela 2 apresenta a classificação das argamassas de revestimento em função dos parâmetros anteriormente citados.

Tabela 2: Classificação das argamassas de revestimento extraído da NBR 13530 (1995)

Natureza do aglomerante	Aglomerante aéreo
	Aglomerante hidráulico
Tipo de aglomerante	Argamassa de Cal
	Argamassa de Cimento
	Argamassa de Cal e Cimento
Número de Aglomerante	Argamassa simples
	Argamassa mista

Fonte: NBR 13530 (ABNT, 1995).

De acordo com Salvador (2005) uma argamassa pode ser definida como um material composto por duas frações: uma ativa (aglomerante) e outra inerte (agregado) que compõem

uma curva de distribuição granulométrica. No presente trabalho adotou-se a princípio o cimento e a cal como frações ativas e os agregados miúdos natural e de RCD como frações inertes.

Segundo Bauer e Sousa (2005), a escolha dos materiais constituintes de uma argamassa de revestimento é de extrema importância para o seu desempenho final. Há, atualmente, no mercado, inúmeros componentes para execução destas argamassas, como: cimentos, cales, aditivos (incorporadores de ar, retentores de água, poliméricos), fibras sintéticas, e novas concepções de agregados com dimensões e granulometrias específicas para cada aplicação.

A complexidade dos sistemas de revestimento argamassados quanto à composição, funções, desempenho, materiais e metodologias construtivas, contraposta à significativa deficiência normativa e técnico-científica, tornam a atividade de especificação, projeto e controle de qualidade deste sistema, uma atividade de grande especificidade. Os parâmetros de definição, avaliação e controle, no estágio atual, são ainda muito incipientes e, muitas vezes, insuficientes para as necessidades do dia-a-dia na execução dos revestimentos. Vários trabalhos têm demonstrado esta dificuldade e apontado soluções que podem ser tomadas em diferentes etapas do processo (SELMO, 1986; SABATINI 1990; COSTA, 2005; SALVADOR, 2005; COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO DE PORTO ALEGRE, 2005; MOURA, 2007; PARAVISI, 2008).

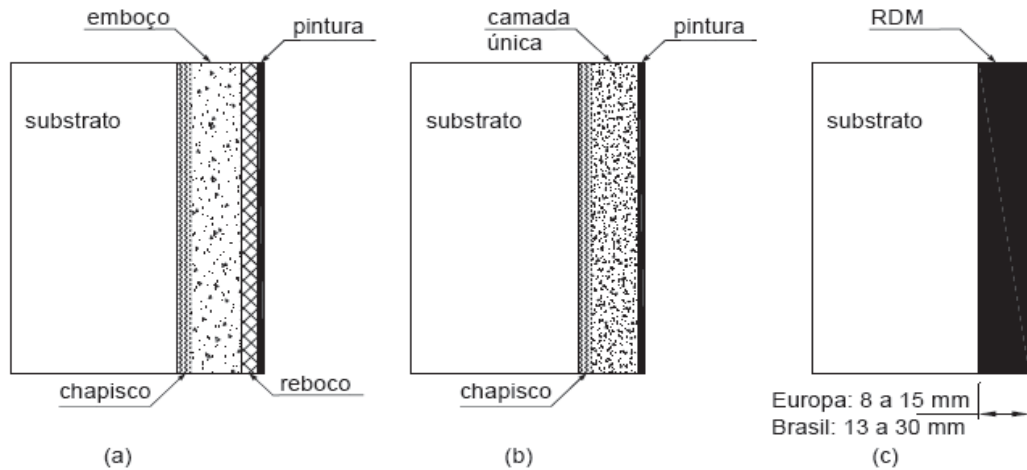
As argamassas de revestimento são utilizadas para revestir paredes, muros e tetos, os quais geralmente, recebem acabamentos como pintura, revestimentos cerâmicos, laminados, etc. (CARASEK, 2007).

O revestimento de argamassa pode ser constituído por várias camadas com características e funções específicas, conforme ilustra a Figura 3.

Os componentes dos revestimentos de argamassa segundo a NBR 13749 (ABNT, 1996) podem ser constituídos por uma ou mais camadas, ou seja: emboço, reboco, e camada única. Além destas camadas, pode ser necessária, dependendo do substrato, uma camada de preparação, o chapisco que tem função de regularizá-lo. A Tabela 3 indica as espessuras admissíveis para as camadas que compõe os revestimentos.

Os requisitos de um revestimento de argamassa estão associados à sua contribuição para a estanqueidade à água das fachadas, no caso dos revestimentos externos; para o conforto térmico e acústico no ambiente construído, para a segurança ao fogo da envoltória e para um bom aspecto da edificação. Para a escolha de um revestimento em argamassa Carneiro e

Cincotto (1995), especificam que é preciso estabelecer alguns critérios, com base nos seguintes grupos de propriedades: resistência mecânica, impermeabilidade e aderência à base.



Fonte: Isaia, 2007

Figura 3: Diferentes alternativas de revestimento de vedações verticais: (a) emboço+reboco+pintura; (b) camada única+ pintura; (c) revestimento decorativo monocamada (RDM).

Tabela 3: Espessuras admissíveis de revestimento interno e externo para parede.

Sistema de revestimento	Parede a revestir	
	Interna	Externa
Emboço (mm)	5 a 20	15 a 25
Emboço e Reboco (mm)	10 a 30	20 a 30
Camada única	5 a 30	15 a 30

Fonte: NBR 13749 (ABNT, 1996)

Os revestimentos de argamassa têm em geral as seguintes funções (SABATINI, 1990):

- proteger as vedações e a estrutura contra a ação de agentes agressivos e, por consequência evitar a degradação precoce das mesmas, aumentando a durabilidade e reduzindo os custos de manutenção;
- auxiliar as vedações a cumprir com as suas funções, tais como: isolamento termo-acústico, estanqueidade à água e aos gases e segurança ao fogo;
- funções estéticas, de acabamento e aquelas relacionadas com a valorização da construção ou determinação do padrão do edifício.

Para satisfazer estas funções de acordo com CARASEK (2007), algumas propriedades tornam-se essenciais para as argamassas de revestimento, a saber: (a) trabalhabilidade (especialmente consistência, plasticidade e adesão inicial); (b) retração; (c) aderência; (d)

permeabilidade à água; (e) resistência mecânica, principalmente a superficial; (f) capacidade de absorver deformações.

Existe uma relação direta entre as propriedades no estado fresco e no estado endurecido, ou seja, o desempenho de uma argamassa no estado endurecido pode ser diretamente afetado pela variação das suas propriedades no estado fresco.

A trabalhabilidade, por exemplo, é a propriedade que irá garantir não só as condições de execução, como também o adequado desempenho do revestimento em serviço. Se a argamassa não possuir trabalhabilidade satisfatória e não garantir a sua correta aplicação (manual ou mecânica) pode haver prejuízo ao desempenho do revestimento, uma vez que várias propriedades da argamassa no estado endurecido serão afetadas pelas condições de aplicação (estado fresco), como por exemplo, a aderência. Carasek (2007) salienta que outra propriedade importante associada à trabalhabilidade, é a adesão inicial, ou seja, a capacidade de união da argamassa no estado fresco ao substrato (alvenaria, por exemplo). Ao ser lançada à parede, a argamassa deve se fixar imediatamente à superfície sem escorrer ou desprender, permitindo manipulações que visam espalhá-la e acomodá-la.

A mesma autora comenta que a propriedade fundamental no estado endurecido é a aderência, sem a qual o revestimento de argamassa não atenderá a nenhuma de suas funções. A aderência é a propriedade que permite ao revestimento de argamassa absorver tensões normais ou tangenciais na superfície de interface do substrato.

Algumas destas propriedades, no estado fresco e endurecido, por se tratarem de propriedades essenciais ao desempenho de argamassas de revestimento interno e externo, e que são o enfoque do presente trabalho, serão discutidas brevemente nos itens subseqüentes.

2.2.2 Propriedades no estado fresco

2.2.2.1 Trabalhabilidade, Consistência e Plasticidade

A trabalhabilidade consiste na facilidade com que a argamassa pode ser trabalhada. Apesar do termo sugerir à maneira como as argamassas se comportam ou trabalham na prática, independente do tipo de aplicação (manual ou mecânica), esta propriedade é bastante complexa e resultante de uma conjunção de outras propriedades tais como: plasticidade, retenção de água, coesão, consistência e tixotropia. Pode-se ainda acrescentar outras propriedades tais como tempo de pega, adesão inicial e exsudação. Para argamassas de

revestimento, a trabalhabilidade traduz-se em uma adequada adesão ao substrato e a facilidade de acabamento superficial.

A trabalhabilidade, segundo Filomeno (1993), é a mais importante propriedade da argamassa no estado plástico. A argamassa que no estado plástico não possuir propriedades satisfatórias, não terá alta qualidade no estado endurecido. O mesmo autor comenta que a subjetividade da trabalhabilidade se deve: (a) componente físicos, consistência; (b) propriedades intrínsecas da mistura fresca, (c) relação com a mobilidade da massa e a coesão entre os elementos constituintes, (d) propriedades dos substratos; (e) habilidade do pedreiro.

A adequação da trabalhabilidade à prática ou técnica de execução do revestimento é ajustada através da consistência da argamassa (seca, plástica ou fluida), alterando a quantidade de água de amassamento utilizada na confecção da mesma.

De acordo com o documento MR 3-17 da RILEM (1982), a definição de trabalhabilidade das argamassas baseia-se nas propriedades reológicas da consistência e da plasticidade. Assim como consistência pode ser definida como “a propriedade da argamassa pela qual esta tende a resistir à deformação”, isto é, a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação das cargas; a plasticidade pode ser definida como a propriedade pela qual, a argamassa tende a reter a deformação, após a redução do esforço de deformação.

Alguns aspectos interferem nesta propriedade como os materiais constituintes da argamassa e seu proporcionamento. Segundo Laureta e Monteverde (1984 apud MIRANDA, 2000) outro parâmetro que pode ser usado como, controle da plasticidade é a dos finos total plastificantes, que inclui todos os materiais finos, partículas inferior a 75 µm partículas essas que podem contribuir para a plasticidade das argamassas, neste caso devemos somar a quantidade de cimento, cal e do agregado miúdo,

2.2.2.2 Retenção de água

A retenção de água pode ser definida como a capacidade da argamassa em reter a água de amassamento quando em contato com uma superfície absorvente, ou a capacidade da argamassa no estado fresco em manter sua consistência quando submetida a solicitações que provocam perda de água de amassamento seja por evaporação, sucção ou absorção por uma superfície.

Segundo Selmo (1989 apud TRISTÃO, 1995), no estado fresco, em argamassas de revestimento a retenção de água interfere no tempo disponível de aplicação, regularização e desempenho da argamassa. No estado endurecido a retenção de água afeta as condições de hidratação do cimento e a carbonatação da cal que são os responsáveis pela evolução do endurecimento da argamassa. Como a retenção interfere na velocidade de evaporação da água de amassamento, pode influir na retração por secagem.

Détriché e Maso (1986 apud PEREIRA, 2007) citam como fatores intervenientes na retenção de água das argamassas, sujeitas à perda de água por evaporação: as condições climáticas para a cura, as quais regulam o equilíbrio higrotérmico; a natureza física da mistura (proporção de aglomerantes e finura da fração de finos) o que determina a característica inicial dos microporos; a natureza química da mistura (especialmente dos aglomerantes, que será responsável pela cinética da evolução da rede de capilares); e a espessura das camadas de revestimento.

Pereira (2007) em seu trabalho explica que quanto maior for a espessura das camadas de revestimento, maior será a capacidade de retenção. A presença de partículas finas melhora a retenção de água de misturas (argamassas e pastas). O aumento do teor de finos não só aumenta a área total de contato das partículas sólidas com a água, fazendo com que haja maior quantidade de ligações entre dois componentes da mistura, como também diminui os espaços a serem percorridos pela água, dificultando sua remoção. Dessa forma, na comparação de misturas de relação aglomerante/agregado diferentes, à medida que diminui o teor de finos, maior será a perda de água por secagem ao longo do tempo.

Tristão e Machado. (2003) em acordo com outros pesquisadores (Bastos 2001; Cincotto et al., 1995; Green et al., 1999 e Groot, 1993) ressalta que a presença de partículas finas melhora a retenção de água de misturas como argamassas e pastas. Também conclui que a grande capacidade de retenção de água nas argamassas mistas de cal e cimento favorece significativamente a hidratação do cimento.

Os limites estabelecidos para retenção de água pela NBR 13281 (ABNT, 2005) classificam a retenção como alta se for maior que 90%, e como normal, se estiver compreendida no intervalo de 80% a 90%.

2.2.3 Propriedades no estado endurecido

2.2.3.1 Resistência mecânica à compressão e à flexão

As argamassas devem apresentar resistência mecânica suficiente para, suportar as movimentações da base, o que pode ocorrer por recalque ou por variação dimensional, por umedecimento e secagem ou por dilatação e contração do revestimento, devido às variações de temperatura (TRISTÃO, 1995). O autor comenta ainda que, embora a resistência mecânica das argamassas não represente uma propriedade fundamental como é para o concreto, sua determinação é justificada, pois, está relacionada com a capacidade de deformação das argamassas e que interferem na durabilidade dos revestimentos.

A propriedade de resistência mecânica de um revestimento de argamassa pode ser avaliada pela massa volumétrica aparente (MVA), pela fissuração e pela evolução da resistência com o tempo. Segundo o *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*, quanto menor a incorporação de ar maior será a MVA da argamassa de revestimento, tendo por consequência maior resistência mecânica e maior módulo de deformação.

Quanto a capacidade de deformação dos revestimentos, o *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* argumenta que devem apresentar uma boa capacidade de deformação, para que se deformem sem ocorrência de fissuras ou que as mesmas sejam representadas por microfissuras que não comprometam a aderência, a estanqueidade e a durabilidade dos revestimentos. Esta capacidade de deformação do revestimento endurecido é caracterizada pelo módulo de deformação, o qual será tanto maior quanto mais rígido for o revestimento.

Nas argamassas mistas o cimento é o responsável pela resistência mecânica apesar de, que se utilizado em excesso, pode gerar elevada retração, aumentando o risco de fissuração. Por outro lado, argamassas pobres de aglomerantes têm baixa trabalhabilidade, pouca coesão, além de desagregarem facilmente (BOLORINO; CINCOTTO, 1999).

2.2.3.2 Aderência

De acordo com Sabatini (1990) a aderência de uma argamassa pode ser definida como a propriedade que possibilita à camada de revestimento resistir às tensões normais (tração) e tangenciais (cisalhamento) atuantes na interface com a base. A aderência resulta da combinação das seguintes características da interface revestimento / base de aplicação ou substrato:

- a) resistência de aderência à tração;
- b) resistência de aderência ao cisalhamento;
- c) extensão de aderência, que se define pela relação entre a área de contato efetivo e a área total da base a ser revestida.

Martinelli (1989) diz que a aderência deve ser analisada quanto à sua resistência, isto é, capacidade mecânica de resistir a esforços normais de cisalhamento, e também quanto à extensão de aderência que é definida pela relação entre a área de contato efetivo e a área da base a ser revestida.

Paes e Gonçalves (2005) expressam que a relação de aderência nos sistemas de revestimento em argamassa é possível se diferenciar todo o processo de desenvolvimento da propriedade em três fases complementares: (a) Adesão inicial, aderida ao substrato momentaneamente; (b) Adesão, enrijecimento da argamassa ocorrendo durante o período de tempo onde é esperado o sarrafeamento e (c) Aderência, inicia perda de água por evaporação e por sucção para substrato durante o processo de corte e sarrafeamento.

Em trabalho realizado por Cincotto et al. (1995), a referida autora comenta que a “aderência é significativamente influenciada pelas condições da base, como a porosidade e absorção de água, resistência mecânica, textura superficial e pelas próprias condições de execução” onde se exige um assentamento homogêneo sem descontinuidades excessivas.

A aderência é influenciada pelas características e condições do substrato tais como: textura superficial, porosidade, absorção de água e resistência mecânica. Além disso, outros fatores como tipo de aglomerante, granulometria dos agregados, adesão inicial, retenção de água, consistência, teor de ar incorporado, mão de obra e condições ambientais exercem influência importante sobre o fenômeno (JOHN et al., 1994 apud SALVADOR, 2007).

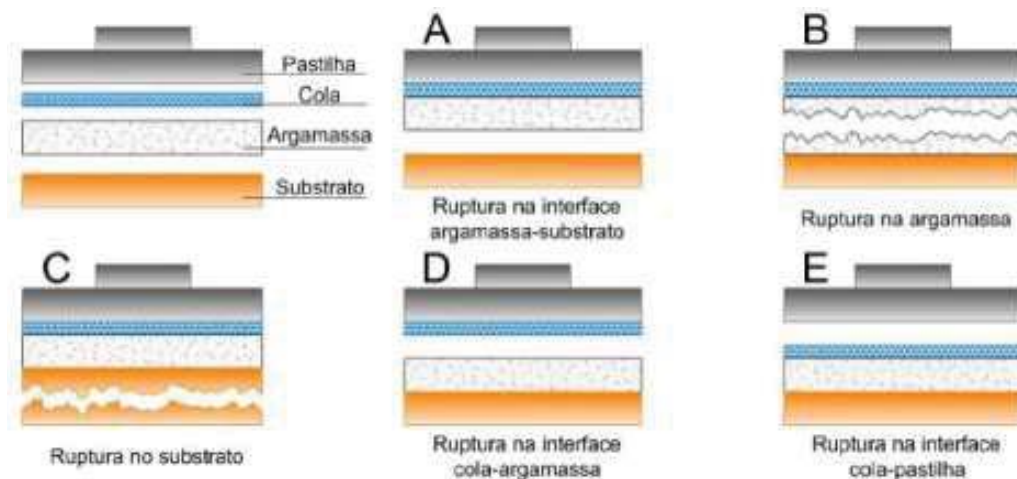
De acordo com Carasek (2007) e Sabatini (1990) a aderência da argamassa endurecida ao substrato é um fenômeno essencialmente mecânico, devido basicamente, à penetração da pasta aglomerante ou da própria argamassa nos poros ou entre as rugosidade da base de aplicação.

A avaliação da capacidade de aderência de revestimentos é feita usualmente através de ensaios de arrancamento por tração de corpos-de-prova fixados ao revestimento e cortados transversalmente a estes. Através deste ensaio preconizado pela NBR 13528 (ABNT, 1995), obtém-se o valor de resistência de aderência à tração, porém além do valor de resistência de

aderência é importante observar-se também a forma como ocorre a ruptura na interface substrato/revestimento.

A NBR 13528 (ABNT, 1995), que descreve o método de ensaio de resistência de aderência à tração para revestimentos de paredes e tetos, salienta que em um ensaio como esse, diferentes processos são evidenciados: ao romper na interface argamassa-substrato, mede-se a real grandeza da aderência; do contrário, ocorrem falhas por coesão dos materiais utilizados, evidenciando que a resistência de aderência verdadeira é maior do que aquela medida, a NBR 13528 (ABNT, 1995) classifica as interfaces segundo a Figura 4.

Portanto além do valor obtido para a resistência de aderência à tração, outro aspecto que deve ser levado em conta é a forma de ruptura. De acordo com Carasek (2005) esta informação chega a ser mais importante que o valor encontrado na propriedade. É válido salientar que os diferentes tipos de ruptura segundo Carasek et. al. (2006) que podem ocorrer durante a realização dos ensaios, evidenciam processos diferentes, ao romper na interface argamassa-substrato mensura-se a real grandeza da aderência, caso contrário, as falhas são oriundas da falta de coesão dos materiais, significando que a resistência de aderência é maior do que o valor medido.



Fonte: NBR 13528 (ABNT, 1995).

Figura 4: Formas de ruptura ensaio de resistência de aderência em à tração para revestimentos de paredes e tetos.

A NBR 13749 (ABNT, 1996) determina limites de resistência de aderência à tração (R_a) dos sistemas à base de argamassas, a seguir a Tabela 4 apresenta os valores referência.

Tabela 4: Limites de resistência de aderência à tração (Ra) para emboço e camada única.

Local	Acabamento	Ra (MPa)
Interna	Base para pintura ou para camada de reboco	0,20
Externa	Base para revestimento cerâmico ou laminado	0,30
	Base para pintura ou para reboco	0,30
	Base para revestimento cerâmico	0,30
Teto	Base para pintura ou base para reboco	0,20

Fonte: NBR 13749 (ABNT, 1996).

2.2.3.3 Fissuração por Retração

A fissuração de revestimentos é um fenômeno complexo, pois pode ter origem tanto nas características do projeto arquitetônico e detalhamento construtivo de fachadas, nos materiais ou proporcionamento das argamassas, como em outros fatores associados à técnica de execução do serviço ou ainda ao tipo de acabamento final e prazos de manutenção pelos usuários, sendo que há muito que se evoluir para o estabelecimento de parâmetros tecnológicos efetivos e de controle prioritário, intrínsecos ou não aos revestimentos (MIRANDA, 2000).

Nas primeiras idades do revestimento, tão logo a argamassa é aplicada, por efeito de sucção inicia-se um processo de movimentação de nata e da água de amassamento para a base. Pode ocorrer também a perda de umidade para o meio ambiente em função das condições de vento, temperatura e umidade relativa. A perda da umidade desencadeia um movimento de retração, gerando tensões internas de tração. O revestimento pode ou não ter capacidade de resistir a essas movimentações, o que regula o grau de fissuração nas primeiras idades. As fissuras de retração de secagem apresentam configuração geralmente poliédrica e unidirecional, regularmente espaçadas (SABATINI, 1990). O autor salienta, no entanto que a fissuração é função de vários fatores tais como: teor e natureza dos aglomerantes; teor e natureza dos agregados; capacidade de absorção de água da base e técnica de execução.

Segundo Bastos (2001 apud SALVADOR 2005), a retração livre de argamassas mistas ocorre nas primeiras 24 horas de cura. A retração que ocorre ainda com argamassas no estado fresco (antes da pega) é devida à saída de água de amassamento e é chamada de retração plástica. Medidas eficazes de cura podem evitar o aparecimento de fissuras superficiais geradas por esse mecanismo, pois, com isso, evita-se a saída de água e a retração. Com a continuidade das reações de hidratação e endurecimento a argamassa sofre retração quando mantida em locais com umidade relativa inferior a 100%. Essa retração resulta da remoção da água adsorvida nos produtos de hidratação, durante o processo de secagem (conhecida como retração por secagem ou retração hidráulica). O autor ainda ressalta que para uma argamassa

mista a retração é função da idade, ou seja, a maior parcela da retração acontece nos primeiros 7 dias de idade, e que continua a uma taxa menor, pelo menos, até 28 dias.

A NBR 13749 (ABNT, 1996) conceitua os tipos de fissuras em revestimentos: (a) Fissuras mapeadas: podem se formar por retração da argamassa, por excesso de finos no traço, quer sejam de aglomerantes, quer sejam agregados, ou por excesso de desempenamento. “Em geral apresentam-se em forma de mapa”. (b) Fissuras geométricas: “quando acompanham o contorno do componente da base, podem ser devidas à retração da argamassa de assentamento. Fissuras na vertical podem ser devidas à retração higrotérmica do componente, interfaces de base constituídas de materiais diferentes, locais onde deveriam ter sido previstas juntas de dilatação”.

Conforme citado por Miranda (2000), em acordo com outros pesquisadores (SABATINI, 2001, SALVADOR 2005, CARASEK 2007, entre outros) os principais fatores que influenciam a fissuração são: técnicas de execução, restrição do substrato à retração e propriedades do revestimento, dosagem das argamassas, natureza dos materiais constituintes e detalhamento construtivo e condições de exposição do revestimento. Porém de acordo com o programa experimental realizado pelo referido autor, para argamassas confeccionadas com RCD a dosagem e mais especificamente o teor de finos (teor total de finos < 75 um), principalmente para RCD, composto basicamente por argamassa moída, este fator foi o mais significativo na fissuração das diferentes argamassas avaliadas.

Com o objetivo de avaliar a influencia dos diversos fatores sobre a fissuração e argamassas de revestimento, Passos et al. (2008) realizaram estudo em argamassas mistas com agregados miúdos naturais. Avaliando diferentes traços de argamassas, aplicadas em três painéis de alvenaria (1,80 m x 1,20 m), em ambiente controlado. O revestimento de camada única foi executado em ambas as faces da alvenaria, sem molhar o chapisco, “chapando-se” a argamassa com colher de pedreiro, sarrafeada com régua de alumínio e desempenada com desempenadeira de madeira. Como resultado obteve-se seis painéis de 1,50 m x 1,00 m com aproximadamente 2 cm de espessura, que foram avaliados na idade de 28 dias. A Tabela 5 apresenta os traços e resultados obtidos neste estudo.

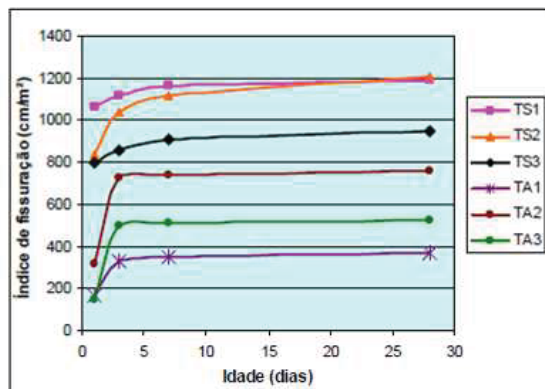
Segundo os autores o índice de fissuração evolui de forma crescente com a idade bem como houve uma relação direta entre o índice de fissuração e o aumento do teor de finos, conforme pode ser observado nas Figuras 5 e 6. Este fato pode estar relacionado ao aumento da retração plástica, que foi potencializada pela granulometria uniforme do agregado miúdo,

cimento com elevada finura e clima quente e seco. Observou-se que nos três primeiros dias de idade a fissuração foi mais acentuada devido à baixa resistência à tração da argamassa.

Tabela 5: Traços, caracterização dos agregados e ensaios utilizados por Passos (2008)

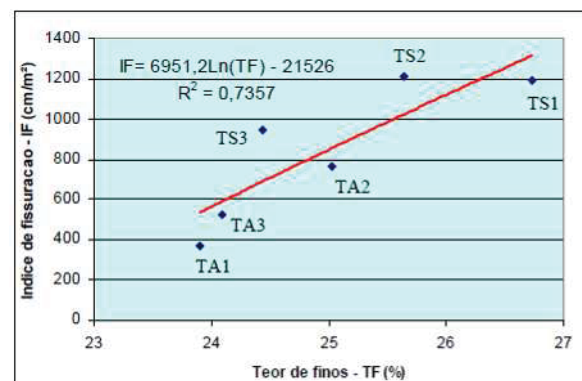
Propriedades		TS1	TS2	TS3	TA1	TA2	TA3
Traço unitário em massa	Cimento	1	1	1	1	1	1
	Cal	1,49	3,12	4,27	0,77	1,17	1,34
	Areia	6,09	10,15	13,70	5,40	5,98	6,75
	Água	2,15	3,53	4,82	1,62	1,94	2,15
Teor de finos (%)		26,7	25,6	24,4	23,9	25,0	24,1
Consistência espalhamento (mm)		192	182	193	154	190	200
Retenção de água (%)		85	85	83	85	82	82
Índice de fissuração (cm/m ²)		1190	1211	948	373	763	527
Resistência de aderência à tração (MPa)		0,19	0,10	0,06	0,25	0,22	0,15
Resistência à compressão (MPa)		1,78	1,22	1,11	5,83	3,94	2,96
Resistência tração na flexão (MPa)		1,03	0,29	0,19	2,69	1,82	1,46
Consumo de cimento (kg/m ³)		170,6	96,2	63,8	191,5	175,3	157,3

Fonte: Passos et al. (2008).



Fonte: Passos et al. (2008).

Figura 5: Evolução do índice de fissuração com a idade

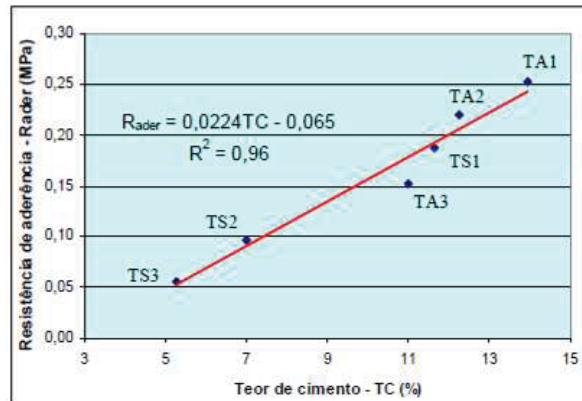


Fonte: Passos et al. (2008).

Figura 6: Correlação entre o índice de fissuração e o teor de finos

O crescimento da fissuração com o teor de finos pode ser explicado pela elevada retração por secagem, provocada pelo aumento da demanda de água, para uma mesma trabalhabilidade, em função do aumento da área específica decorrente dos elevados teores de finos (CARASEK, 2007 apud PASSOS et al., 2008). Outro fator relevante para a elevada fissuração foi o clima quente e seco que predominou no período de tempo de execução e avaliação deste estudo (28 dias). As temperaturas médias ficaram em torno de 32°C e a umidade relativa abaixo dos 20%.

No mesmo trabalho verificou-se que a resistência de aderência à tração é diretamente proporcional ao teor de cimento conforme Figura 7, fato este que pode ser explicado pela ancoragem promovida pelo intertravamento no interior dos poros do substrato, também comprovado por Carasek (1996), Pereira et al. (1999) e Passos et al. (2008).



Fonte: Passos et al. (2008).

Figura 7: Correlação entre os valores médios da resistência de aderência à tração e o teor de cimento.

2.2.4 Fatores que Afetam as Propriedades das Argamassas

2.2.4.1 Granulometria das Areias Constituintes das Argamassas

A granulometria segundo Landi (1987 apud BAVARESCO, 2001) é quem regula a água de amassamento das argamassas. A fração granulométrica do agregado miúdo abaixo da peneira ABNT 0,075 mm é denominada de material pulverulento e, desde que não esteja presente em excesso, pode contribuir para melhorar a trabalhabilidade das argamassas. O mesmo autor diz que os finos de natureza argilosa são poderosos plastificantes, mas quando em excesso, necessita de grande quantidade de água de amassamento, o que pode provocar fissuras por retração na secagem do revestimento.

A ASTM 897-83 não recomenda que sejam utilizados agregados miúdos em argamassas de revestimentos, que apresentem mais de 25% em peso, de material retido entre as peneiras de abertura 0,30 e 0,15 mm, e que o agregado não tenha mais de 50%, em peso, retido entre duas peneiras consecutivas.

Em uma análise comparativa em diversas normas Selmo (1986), mostra que todas as especificações fixam valor máximo para teor de materiais pulverulentos em torno de 5%, bem como para o teor de matéria orgânica, que são avaliados pelo método colorimétrico.

Détriché e Maso (1986 apud PEREIRA, 2007) coloca que a presença de partículas finas melhora a retenção de água de misturas como argamassas e pastas. O aumento do teor de finos não só aumenta a área total de contato das partículas sólidas com a água, fazendo com que haja maior quantidade de ligações entre dois componentes da mistura, como também diminui os espaços a serem percorridos pela água, dificultando sua remoção. Dessa forma, na

comparação de misturas de relação aglomerante/agregado diferentes, à medida que diminui o teor de finos, maior será a perda de água por secagem ao longo do tempo.

2.2.4.2 Base de Assentamento ou Substrato

O tipo de base é um dos fatores que influencia em várias características das argamassas, na dissertação de Miranda (2000) foi tomada uma serie de cuidados para que o tipo de base contribuísse o mínimo possível, os painéis foram construídos em alvenaria de blocos de concreto, em área interna e abrigada de chuva. A argamassa de assentamento foi composta de cimento, cal e areia no traço 1:2:9 em volume úmido. Esperou-se até dois meses para aplicar o chapisco e iniciar o revestimento dos pórticos, com o objetivo de evitar qualquer influência de retração por secagem da alvenaria.

As dificuldades enfrentam e justificativas para utilização no chapisco segundo foram baseados nos trabalhos de Morais e Selmo (1999) observou-se que quando a argamassa era aplicada sobre bloco de concreto com chapisco, o revestimento produzido apresentava menos fissuras do que quando aplicado sobre o substrato sem chapisco. Pelos resultados obtidos pode-se observar que o chapisco assegurou um melhor desempenho do revestimento, diminuindo o número de fissuras, possivelmente por propiciar uma maior área de contato e uma melhor distribuição das tensões internas atuantes no revestimento, desde a sua aplicação.

2.2.4.3 Dosagem

A dosagem de argamassas para aplicação como revestimentos verticais deve ser feita objetivando a produção de argamassas trabalháveis enquanto frescas e que, depois de aplicadas, produzam revestimentos com bom desempenho, principalmente, quanto à aderência ao substrato e resistência à fissuração. No caso de revestimentos externos, é importante considerar também a permeabilidade do revestimento e a sua resistência a variações cíclicas de temperatura e umidade.

Em trabalho realizado por Miranda (2000) o critério de dosagem dos entulhos nas argamassas seguiu a proposta de Selmo e Bucher (1990), pela qual o teor total de finos $< 75 \mu\text{m}$, em argamassas anidras, pode ser considerado como parâmetro de controle da sua trabalhabilidade no estado fresco e da retração por secagem livre. As argamassas usadas na execução dos revestimentos tiveram traço fixo em 1:9, cimento: agregado total, variando-se o

teor total de finos < 75 µm em 18%, 25% e 32% e sem areia com teor de 46% e 40%, que corresponde respectivamente em porcentagem de resíduo a 10%, 40% e 70% e sem areia 100%.

O princípio para a composição de dosagem de uma argamassa com base na curva granulométrica segundo Carneiro e Cincotto (1999) baseia-se na tecnologia de concreto trabalhada por Füller em 1907, a partir de experimentos empíricos de dosagem, mostrou praticamente que para uma mesma porcentagem de cimento num dado volume de concreto, havia certa distribuição de tamanhos de grão do agregado que dava maior resistência de ruptura, e no lançamento a melhor trabalhabilidade; concluindo que a distribuição granulométrica influencia na compactidade da mistura, pois observou que quanto maior for a compactidade maior é a resistência mecânica. Os agregados bem graduados, quando misturados com cimento, produzem concretos com grande compactidade e resistência mecânica. Agregados com melhor graduação requerem menor quantidade de cimento, em torno de 12% a menos.

2.2.2.4 Adição de Água na Argamassa

A relação entre água e aglomerante é de grande importância para as características que se espera de um revestimento de argamassa. Segundo Bauer e Souza (2005), a complementação de água na argamassa de revestimento, feita pelos pedreiros após a mistura e antes da aplicação, é uma prática bastante comum nas obras. Isto ocorre devido a três situações basicamente:

(a) Produção de grandes volumes de argamassas: argamassas aplicadas por períodos maiores que duas horas podem apresentar perda de água por evaporação, hidratação do cimento.

(b) Utilização da sobra do sarrafeamento: pode gerar perda da resistência mecânica e de aderência, provocar intensa fissuração e pode ter entrado em pega.

(c) Ter uma trabalhabilidade adequada: chamado de “ajuste de água”, no geral incorreções na granulometria, na dosagem ou nos materiais, buscando condições mínimas de aplicabilidade.

Em trabalho realizado por Miranda (2000), as argamassas foram definidas de modo a proporcionar-lhes um índice de consistência de 285 +/- 15 mm, pela NBR 13276 (ABNT,

2005), devido à absorção de água dos entulhos, indicam-se também os valores corrigidos de água.

2.2.4.5 Cal hidratada

John (2003) diz que assim como a presença de partículas mais finas com maior afinidade com a água favorece a retenção de água, as cales possuem os mais altos teores de partículas abaixo de 1µm e também de retenção de água.

O mesmo autor coloca que, já a influência da adição de cal na aderência dos de revestimentos, é assunto mais complexo, posto que depende de propriedades da base, como absorção e rugosidade, de propriedades da argamassa e das condições de adensamento que a argamassa atinge durante a projeção.

Somente a aplicação de conceitos de ciência de materiais, combinando química, microestrutura, com reologia e mecânica da fratura, combinados com uma maior padronização de variáveis experimentais relevantes como energia de lançamento, poderão esclarecer pontos ainda obscuros no longo prazo.

2.3 ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Tratando-se de argamassas de revestimento, um dos maiores problemas enfrentados é conseguir reduzir a variabilidade das propriedades destas argamassas quando se utiliza RCD. Tal fato deve-se principalmente, pela heterogeneidade do agregado reciclado. Este material pode sofrer grandes variações de composição e de distribuição granulométrica, produzindo assim argamassas com ampla variação de desempenho. Também pelo fato deste material ser mais susceptível a apresentar contaminantes, em comparação aos agregados naturais, torna-se necessário que haja um controle maior para sua utilização. No entanto, diversos trabalhos tem sido executados com o objetivo de analisar a influência desta variabilidade nas propriedades no estado fresco, no estado endurecido e na durabilidade das argamassas de revestimentos produzidas com RCD.

No Brasil já foram desenvolvidos trabalhos sobre a utilização de agregados reciclados em argamassas, entre os quais destacam-se os trabalhos de Pinto (1986), Silva (1997), Levy (1997), Miranda (2000), Santana et. al. (2001), Bavaresco (2001), Alves e Do Ó (2005) e

Pereira (2007). De uma forma geral estes trabalhos evidenciam que as propriedades mecânicas como resistência à compressão, tração e aderência bem como o módulo de elasticidade e a dureza são incrementadas em argamassas com agregado reciclado. Na Tabela 6 apresentam-se de forma resumida as propriedades investigadas por diversos pesquisadores no Brasil.

Nos itens subseqüentes serão abordados alguns dos resultados obtidos em trabalhos encontrados na bibliografia pesquisada no que diz respeito a algumas propriedades no estado fresco e principalmente no que diz respeito às propriedades mecânicas de resistência à compressão, tração, flexão e resistência de aderência.

Tabela 6: Propriedades investigadas por diversos autores

Propriedades analisadas	Autores
Absorção por capilaridade Método do cachimbo	Miranda (2000).
Consistência	Levy (1995); Silva (1997); Miranda (2000); Bavaresco (2001).
Consumo de Cimento	Levy (1995); Silva (1997); Miranda (2000); Bavaresco (2001)
Consumo de Cal	Silva (1997).
Controle da fissuração em função da idade	Miranda (2000)
Densidade de massa e teor de ar aprisionado	Miranda (2000); Bararesco (2001)
Massa específica	Silva (1997); Bavaresco (2001);
Módulo de elasticidade	Miranda (2000)
Relação a/c	Levy (1995); Miranda (2000); Bavaresco (2001)
Resistência Aderência	Levy (1995); Miranda (2000); Bavaresco (2001).
Resistência à Compressão	Levy (1995); Silva (1997); Levy (1997) Miranda (2000); Bavaresco (2001).
Resistência à Tração	Miranda (2000); Bavaresco (2001)
Resistência ao choque térmico, método do IPT	Miranda (2000)
Retenção de água	Levy (1995); Levy (1997); Bavaresco (2001).
Retração por secagem	Miranda (2000)
Teor de Ar incorporado	Silva (1997); Miranda (2000); Bavaresco (2001); Alves e Do Ó (2005); Pereira (2007).
Teor de Finos	Miranda (2000); Bavaresco (2001); Alves e Do Ó (2005).

Levy (1995) trabalhou com argamassas produzidas com RCD, para avaliar de que forma os vários componentes dos resíduos de construção e demolição contribuem para o desempenho dos revestimentos tanto no estado fresco como no estado endurecido. Na Tabela 7 está apresentada a porcentagem de entulho utilizada para confecção das argamassas, e na Tabela 8 está apresentada a distribuição granulométrica das misturas.

Tabela 7: Composição das misturas utilizadas para produção de argamassas.

Materiais Misturas	Blocos Cerâmicos	Argamassas c/ resíduo Cerâmicos	Bloco concreto	Argamassas s/ resíduo cerâmico	Traço em volume com areia úmida	Traço em massa de materiais secos
M1	100%	-	-	-	1:2,87:8,47	1:2,81:8,16
M2	67%	33%	-	-	1:2,70:8,47	1:2,88:8,16
M3	50%	50%	-	-	1:2,57:8,47	1:2,91:8,16
M4	33%	67%	-	-	1:2,47:8,47	1:2,95:8,16
M5	-	100%	-	-	1:2,34:8,47	1:3,00:8,16
M6	-	-	100%	-	1:1,377:7,27	1:1,49:7,00
M7	-	-	67%	33%	1:3,57:7,27	1:4,66:7,00
M8	-	-	50%	50%	1:3,52:7,27	1:4,56:7,00

Fonte: Levy (1995)

O cimento utilizado no estudo foi o Portland CP II E – 32 e as argamassas foram produzidas sem a utilização de cal, as argamassas deveriam manter a consistência entre 150 a 310 mm. Algumas propriedades estão descritas na Tabela 9.

Levy (1995) destaca alguns resultados que estabelecem a influência do material cerâmico nas propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas estudadas. O autor ressalta que as misturas M1 a M4 compostas por material cerâmico, apresentaram retenções de água superiores quando comparados com as misturas M5 a M8 as quais não contém este material.

Tabela 8: Distribuição granulométrica das misturas utilizadas na produção das argamassas.

Método ensaio	NBR 7251/82 Massa Unitária (kg/m3)	NBR 7217/82 – Distribuição Granulométrica (% retidas nas peneiras #)							
		4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	Ø máx.	m.f.
M1	1.125	3	8	20	40	60	82	4,8	2,13
M2	1.226	3	9	21	42	62	81	4,8	2,18
M3	1.302	4	9	21	42	62	83	4,8	2,20
M4	1.374	4	10	20	43	63	83	4,8	2,23
M5	1.472	4	8	18	41	63	83	4,8	2,14
M6	1.498	1	12	29	44	57	73	4,8	2,16
M7	1.497	2	10	24	41	58	77	4,8	2,12
M8	1.489	2	10	23	40	58	78	4,8	2,11
AREIA	1.440	3	5	12	39	73	97	2,4	2,30

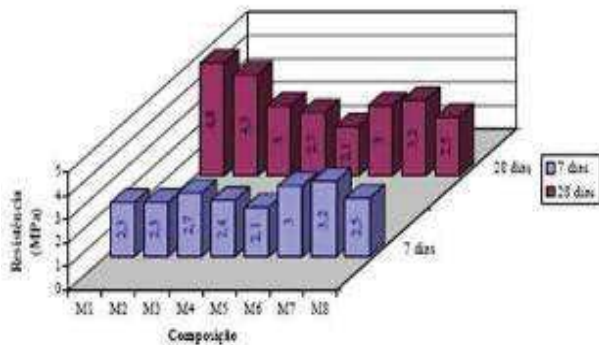
Fonte: Levy (1995).

Tabela 9: Características das argamassas no estado fresco.

Misturas	Consistência das argamassas (± 10mm)	Consumo de Cimento (Kg/m3)	Relação Água/cimento (Kg/Kg)	Retenção de Água (%)	Massa unitária Específica (Kg/m3)
M1	276,0	132	2,39	66,0	1.898
M2	225,6	135	2,04	82,0	1.902
M3	273,5	134	2,18	69,0	1.903
M4	276,5	134	2,18	65,0	1.908
M5	300,7	133	2,18	45,0	1.902
M6	318,4	134	2,18	44,0	2.023
M7	300,1	133	2,13	46,0	1.975
M8	205,2	132	1,87	47,0	1.905

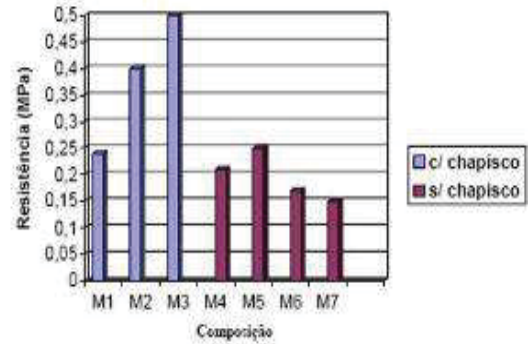
Fonte: Levy (1995).

Da mesma forma esta influência se repete nas propriedades resistência à compressão e aderência estudadas pelo referido autor. A Figura 8 apresenta a evolução das resistências à compressão e na Figura 9 a resistência de aderência à tração, que foram obtidas com as 8 (oito) misturas analisadas aos 28 dias de idade.



Fonte: Levy (1995)

Figura 8: Evolução da resistência à compressão



Fonte: Levy (1995)

Figura 9: Resistência à aderência

De acordo com as Figuras 8 e 9, Levy (1995) conclui que as argamassas produzidas com material cerâmico apresentaram desempenho superior às argamassas produzidas sem material cerâmico, ficando evidente a influência dos materiais cerâmicos reciclados na capacidade de retenção de água e no aumento da resistência à compressão.

Silva (1997) realizou um trabalho com argamassas produzidas com 40% de RCD e 60% de areia natural. Concluiu que a introdução do RCD obtido por restos de concreto, argamassas e blocos cerâmicos em substituição de parte da areia natural, não apresentaram alterações desfavoráveis quanto à resistência mecânica à compressão. O desempenho das argamassas produzidas com RCD assemelha-se ao das argamassas tradicionais, com uso de cal ou adições. A Tabela 10 mostra um resumo dos traços e dos resultados do estudo.

Levy (1997) estudou a influência que o RCD finamente moído, com elevado teor de materiais pulverulentos exercem em algumas propriedades das argamassas. Para tanto foram produzidas 8 (oito) argamassas diferentes, utilizando-se cimento, RCD moído e areia lavada. O agregado de RCD utilizado foi composto por cerâmica, moída e argamassa moída, sendo que os mesmos foram preparados em laboratório, triturando-se argamassas endurecidas e blocos cerâmicos. O cimento utilizado na preparação das argamassas foi o cimento Portland CP II E – 32.

Tabela 10: Traços estudados e propriedades determinadas por Silva (1997)

Tipo	Traços Unitários (em massa)						Consistência (mm)	Massa Espec. (kg/dm ³)	Teor Ar (%)	Consumo Cim. (Kg/m ³)	Consumo Cal (Kg/m ³)	Resist. Comp. (MPa)	
	Cimento	Areia	Cal	RCD	Arenoso	Água						7 dias	28 dias
1	1	7,43	0,36	-	-	1,64	265	2,05	3,1	196	71	3,3	5,6
2	1	4,46	0,36	2,97	-	1,70	258	1,80	7,5	171	62	1,3	5,3
3	1	2,68	-	1,79	4,26	1,96	270	2,02	1,5	178	-	3,6	5,0

1 – Emboço como base para revestimento
 2 – Emboço como base para revestimento
 3 – Emboço como base para revestimento cerâmico, traço com uso de 40% de entulho reciclado em relação a areia.

Fonte: Silva (1997)

A proporção dos materiais utilizados no referido trabalho, bem como os resultados obtidos nas propriedades avaliadas estão apresentados na Tabela 11.

Conforme os trabalhos anteriormente citados e analisando-se os resultados obtidos por Levy (1997) observa-se que há a influência da quantidade de materiais cerâmicos nas propriedades resistência à compressão e resistência à tração.

Tabela 11: Proporção das adições em volume e ensaios utilizados no trabalho de Levy (1997)

Misturas produzidas	Materiais cerâmicos				Argamassas endurecidas			
C	100%				0%			
Ca	66%				34%			
A	0%				100%			
cA	34%				66%			

Traço	Traço 1:1,5:6				Traço 1:3:8			
	Consumo Cimento (kg/m ³)	Retenção de água (%)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Consumo cimento (kg/m ³)	Retenção de água (%)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)
C	157,1	40	6,8	0,24	109	46	3,3	0,09
Ca	157,9	55	5,3	0,20	107,5	48	3,1	0,09
Ca	152,0	40	3,9	0,15	106,2	42	2,8	1,10
A	156,3	38	2,7	0,10	103,1	41	1,2	0,07

Fonte: Levy (1997)

Através dos resultados apresentados anteriormente e corroborados pelo trabalho de Levy (1997) o ganho na resistência à compressão e tração das argamassas de RCD pode estar associado ao efeito pozolânico da fração fina do material cerâmico assim como devido a presença de partículas de aglomerantes ainda não inertizadas.

Miranda (2000) estudou argamassas produzidas com entulho reciclado, todas as argamassas utilizadas como revestimento foram compostas de cimento: RCD: areia fina de

rio. O entulho participa como parte de agregado total no traço e, como isso, há um aumento na relação entulho/areia à medida que se aumenta o teor total de finos < 75 µm. O cimento utilizado foi o CP II E- 32, a composição granulométrica e mineralógica do entulho, para que fosse possível analisar a influência do teor de cada tipo de entulho, o entulho reciclado, conforme a Tabela 12, teve origem na moagem separada de blocos cerâmicos, de concreto e argamassa de cimento, cal e areia no traço 1 : 2 : 9 (em volume, areia úmida).

Tabela 12: Composição do RCD

Tipo e nº de Identificação	Materiais constituintes, % em massa seca		
	Blocos cerâmicos	Argamassa	Bloco de concreto
T1	75	25	0
T2	55	45	0
T3	35	65	0
T4	0	100	0
T5	0	65	35
T6	0	45	55
T7	0	25	75

Fonte: Miranda (2000).

Quanto à escolha das composições Miranda (2000), teve como critério as composições que mais se aproximam daquelas geradas por alvenarias demolidas, foram selecionadas T2 e T6 para representar a variação no canteiro de obra e T4 para simular o predomínio de argamassa no resíduo. O traço escolhido foi 1:9, pois segundo o autor não apresenta pulverulência excessiva e por ser o que se aproximou mais do traço de referência (cimento, cal e areia, 1:2:9 em volume úmido) quanto ao consumo de cimento por m³ de argamassa. A Tabela 13 representa como foram variados o teor de finos < 75µm em 18%, 25% e 32%.

Tabela 13: Argamassas utilizadas e submetidas à caracterização indicada na última coluna.

Teor total de finos < 75 µm (%)	Tipo de Composição	Traço (massa seca) Cim. : RCD : areia	Caracterização
18	T2	1 : 1,1 : 7,9	Propriedades intrínsecas das argamassas e de desempenho dos revestimentos
	T4	1 : 1,3 : 7,7	
	T6	1 : 1,4 : 7,6	
25	T2	1 : 3,1 : 5,9	
	T4	1 : 3,7 : 5,3	
	T6	1 : 3,8 : 5,2	
32	T2	1 : 5,0 : 4,0	
	T4	1 : 6,2 : 2,8	
	T6	1 : 6,3 : 2,7	
24	Mista	1 : 1,0 : 7,7	Propriedades intrínsecas das argamassas
46	E2	1 : 9,0 : 0,0	
40	E4	1 : 9,0 : 0,0	
40	E6	1 : 9,0 : 0,0	

Fonte: Miranda (2000).

Quanto aos ensaios realizados pode-se conferir na Tabela 14 as médias obtidas quanto à resistência à tração e à compressão, constatar que o acréscimo de RCD, condiciona um aumento de resistência das argamassas.

Tabela 14: Resumo dos resultados obtidos na caracterização das argamassas no estado endurecido.

Argamassas	Consumo de cimento (kg.m ³)	Teor ar incorporado (%)	Retenção de água (%)	Valores médios	
				Resistência à tração (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
18% T2	152	5,18	89,1	0,87	2,43
18% T4	153	3,61	87,8	0,92	2,46
18% T6	152	5,92	88,4	0,89	2,57
25% T2	157	6,46	87,9	0,94	2,94
25% T4	155	5,87	90,7	0,85	2,56
25% T6	159	7,13	90,2	1,04	3,29
32% T2	159	6,32	92,8	1,29	4,71
32% T4	158	5,24	86,6	0,97	3,20
32% T6	162	7,22	88,6	1,32	4,33
E2	156	7,23	92,4	1,75	7,39
E4	155	4,09	92,2	1,11	3,71
E6	167	7,13	92,8	1,74	7,44
Mista	155	2,27	92,6	0,74	1,55

Fonte: Miranda (2000).

Os resultados obtidos por Miranda no estado endurecido quanto à resistência à tração na flexão, resistência à compressão e resistência de aderência podem ser observados segundo a Tabela 15.

Tabela 15: Resumo dos resultados na avaliação de desempenho dos revestimentos.

Argamassa	Consistência (mm)	Relação a/c total (kg/kg)	Rel. a/c Corrigida (kg/kg)	Resist. à Tração (MPa)	Resist. à Compressão *(MPa)	Resist. de Aderência À tração (MPa)**
18% T2	267	2,66	2,54	0,48	1,48	0,29
18% T4	260	2,63	2,58	0,57	1,43	0,34
18% T6	260	2,57	2,57	0,63	1,60	0,37
25% T2	270	2,46	2,23	0,70	1,84	0,50
25% T4	278	2,50	2,43	0,48	1,85	0,42
25% T6	273	2,28	2,20	0,88	2,12	0,35
32% T2	280	2,46	2,10	0,95	2,57	0,41
32% T4	287	2,30	2,22	0,68	1,88	0,47
32% T6	-	2,03	1,92	-	-	0,42
Mista	290	2,50	2,46	0,45	1,37	0,39

* Resultados para a cura em câmara seca, 20 °C e 50% de umidade relativa.

** Resultados obtidos na idade de 28 dias.

Fonte: Miranda (2000).

O trabalho de Miranda (2000) agrega questões importantes em relação a diferentes propriedades das argamassas produzidas com RCD, das quais destacam-se:

- Quanto ao consumo de água a natureza do RCD também influenciou no consumo de água total das argamassas quando essas continham entulhos com elevada absorção de água, como no caso de blocos cerâmicos. Nesses casos, fez-se necessário corrigir o valor da relação água/cimento e de água/materiais secos em função do teor de entulho cerâmico na argamassa e da sua absorção de água total;

- Quanto ao teor de RCD utilizado, a substituição de 10% do agregado por entulho, não causou influência nas propriedades analisadas, independente da composição do entulho. Já nas argamassas compostas por 100% de entulho devido a grande concentração de finos, resultou no surgimento maior de fissuras;
- Quanto à dosagem das argamassas, a relação água/cimento pode ter causado influência no surgimento de fissuras. Recomenda-se não ultrapassar o teor de 25% de finos totais, isto é aproximadamente a substituição de agregado por 40% de RCD, que se mostrou um valor crítico para iniciar as fissuras por secagem do revestimento de argamassa mista e suficiente para se obter boa trabalhabilidade;
- Quanto às propriedades das argamassas, talvez seja necessário que as propriedades sejam definidas em conjunto, de forma que a tensão capilar existente no revestimento, no limite da deformação que induz, seja ainda menor que a resistência à tração da argamassa, para não fissurar o revestimento;
- Quanto à influência do choque térmico, o qual mostrou causar influência significativa no surgimento de fissuras. Porém, essa influência ocorreu de formas diferentes, de acordo com as propriedades do revestimento. Em relação à resistência de aderência à tração, para a temperatura superficial do revestimento entre 20° C e 80° C, não se observou perdas nessas propriedades com o número de ciclos adotados;
- Quanto à técnica de execução a influência do tempo de execução do sarrafeamento e do desempenamento no surgimento de fissuras foi secundária. O chapisco mostrou-se útil na redução da quantidade de fissuras, chegando às vezes a impedir totalmente seu surgimento, o que provavelmente ocorreu devido ao aumento da resistência de aderência ao cisalhamento do revestimento.

Bavaresco (2001) realizou um estudo com RCD dividido em duas composições: AGR-I (composto por material cerâmico) e AGR-II (composto por material cimentante). O estudo teve como objetivo usar o RCD como agregado miúdo para produção de argamassas. Utilizou-se 3 agregados diferentes que foram obtidos através de misturas com areia do IPT. Depois de misturados para compor os agregados miúdos das argamassas, permaneceram submersos em água por 24 (vinte quatro) horas, em bandeja, com capacidade suficiente para acomodar a quantidade de agregado mais a água de saturação, necessárias para confeccionar as argamassas.

Na Tabela 16, são apresentadas as composições das argamassas analisadas por Bavaresco (2001).

Tabela 16: Composição das argamassas analisadas por Bavaresco (2001)

Amostra	Composições (%)				
	AGR I	IPT	NATURAL	AGR II	IPT
1	100				
2	50	50			
3	70	30			
4				100	
5				50	50
6				70	30
7		100			
8			100		

Fonte: Bavaresco (2001)

O cimento utilizado na pesquisa foi o Cimento Portland Composto por *filler* – CPII F – 32 e a Cal Hidratada CH II. Os traços empregados representam os normalmente usados em obra: 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9 (cimento : cal : areia). A Tabela 17 apresenta os traços em volumes e massa das argamassas ensaiadas.

Tabela 17: Relação entre traços em volume e massa das argamassas ensaiadas

Agregado	Composição (%)	Traço em volume (Cimento : Cal : Agregado)	
		1 : 1 : 6	1 : 2 : 9
AGR I	100	1 : 0,6085 : 5,8191	1 : 1,2171 : 8,7287
	70	1 : 0,6085 : 6,2461	1 : 1,2171 : 9,3691
	50	1 : 0,6085 : 6,5307	1 : 1,2171 : 9,7960
AGR II	100	1 : 0,6085 : 6,3245	1 : 1,2171 : 9,4868
	70	1 : 0,6085 : 6,5999	1 : 1,2171 : 9,8998
	50	1 : 0,6085 : 6,7834	1 : 1,2171 : 10,1751
NATURAL		1 : 0,6085 : 6,7653	1 : 1,2171 : 10,1480
IPT		1 : 0,6085 : 7,2423	1 : 1,2171 : 10,8634

Fonte: Bavaresco (2001)

Na Tabela 18 são apresentados os resultados de teor de ar incorporado, resistência à compressão e retenção de água obtidos por Bavaresco (2001).

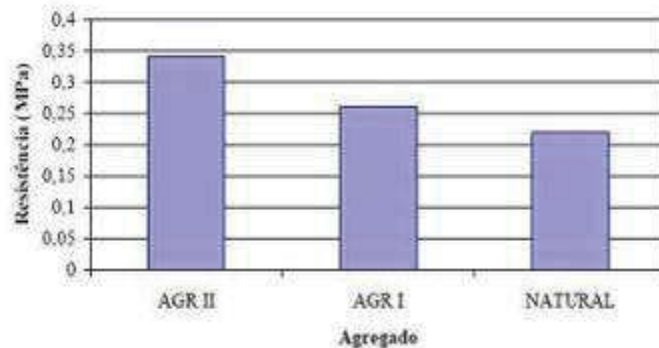
Tabela 18: Resultados de Consistência e Resistência para dois traços.

Componente	Traço 1:1:6				Traço 1:2:9			
	Consistência (mm)	Teor de ar incorporado (%)	Resist. à compressão 28 dias	Retenção de água (%)	Consistência (mm)	Teor de ar incorporado (%)	Resist. à compressão 28 dias	Retenção de água (%)
AGR I 100%	232,30	1	9,42	98	234,10	1	4,88	99
AGR I 70%	240,00	2	8,44	97	233,60	2	4,06	96
AGR I 50%	238,10	2	7,66	97	228,00	3	3,47	97
AGR II 100%	239,00	1	4,69	97	230,40	2	2,16	97
AGR II 70%	227,90	2	6,38	96	230,20	3	2,18	97
AGR II 50%	235,00	2	4,74	96	235,00	3	2,25	96
NATURAL	230,40	2	2,45	-	234,60	5	2,43	-
IPT	234,60	3	5,29	-	235,50	4	2,15	-

Fonte: Bavaresco (2001)

O referido autor também observou um aumento na resistência à compressão com o aumento da quantidade de material cerâmico na composição do RCD.

Ao analisar a aderência da argamassa ao substrato no caso deste trabalho, alvenaria de tijolos cerâmicos, Bavaresco (2001) justifica os melhores resultados, segundo a Figura 10 e a Tabela 19, obtidos com as argamassas produzidas com RCD. Segundo o referido autor o aumento na resistência de aderência pode estar relacionado ao fato das argamassas com RCD apresentarem maiores consumos de água. Segundo o autor, como as argamassas foram aplicadas em paredes secas, a sucção da água pelo tijolo promove penetração das argamassas nos poros o que contribui para aumentar a resistência de aderência.



Fonte: Bavaresco (2001)

Figura 10: Resistência à aderência ao substrato.

Tabela 19: Resultados de Consistência e Resistência para dois traços.

Componente	Traço 1:2:9		Traço 1:1:6	
	Consumo de cimento (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resist. Aderência (Mpa)
AGR I 100%	173,58	225,80	026	
AGR I 70%	163,99	241,90	-	
AGR I 50%	158,16	233,44	-	
AGR II 100%	162,34	239,50	0,34	
AGR II 70%	156,80	231,47	-	
AGR II 50%	153,32	226,40	-	
NATURAL	153,66	226,90	0,22	
IPT	145,26	214,67	-	

Fonte: Bavaresco (2001)

Outro fato que pode ter contribuído, para o aumento da resistência de aderência, para as argamassas produzidas com RCD, refere-se ao maior consumo de cal destas argamassas produzindo maiores quantidades de carbonatos de cálcio. As argamassas produzidas com entulho reciclado apresentaram boa retenção de água e isto segundo Pinto (1986) aumenta a resistência à aderência.

Alguns pesquisadores como: Pinto, 1986; Levy (1997) e Leite (2001) indicam que o acréscimo obtido nas propriedades mecânicas, pode estar associado a um efeito pozolânico,

da parcela cimentícia do RCD, ou a um efeito *filler* proveniente do excesso de finos principalmente dos materiais cerâmicos.

Em um dos primeiros trabalhos realizados sobre a influência do RCD nas propriedades mecânicas de argamassas, Pinto (1986) afirma que o RCD possui um potencial pozolânico crescente conforme se incrementa o teor de resíduos cerâmicos em sua composição. Aumentando assim a resistência à compressão. Este fato pode estar relacionado, segundo o autor, a três fatores:

- a possibilidade da ação de núcleos de cristalização, pela presença de partículas de cimento anteriormente hidratadas,
- a reação pozolânica dos resíduos em presença da cal,
- a uma maior velocidade de carbonatação existente na argamassa com RCD, em função da sua maior porosidade.

Leite (2001) em trabalho que avalia a influência de agregados graúdos e miúdos reciclados na confecção de concretos esclarece a atividade pozolânica que pode ser exercida pelos materiais cerâmicos. De acordo com a autora as argilas calcinadas pertencentes ao grupo das pozolanas artificiais podem ser obtidas em qualquer lugar e assim apresentam alto potencial de utilização para produção de argamassas e concretos. No seu processo de produção, as pozolanas artificiais são obtidas com a criação da instabilidade da estrutura interna dos minerais argilosos pela ação de temperaturas que variam entre 500 e 900 °C. Este procedimento ajuda a aumentar a porosidade das partículas e assim, sua superfície ativa. Entretanto, a temperatura de queima das argilas deve ser inferior à de fusão. Os materiais cerâmicos utilizados na construção civil são produzidos exatamente com temperaturas de queima que variam dentro desta faixa. Desta forma, podem possuir uma estrutura cristalina tal que apresente certa atividade pozolânica em presença do hidróxido de cálcio e dos demais produtos provenientes da hidratação do cimento Portland quando finamente moídos.

Em face da possibilidade de reatividade pozolânica dos materiais cerâmicos, acredita-se que agregados reciclados com altos teores deste material na sua composição possam contribuir para a melhoria da resistência à compressão de concretos ou argamassas recicladas, principalmente em idades mais avançadas (LIMA, 1999). Levy (1997) afirma que as argilas calcinadas em temperaturas não muito elevadas, os tijolos e blocos cerâmicos de 2º linha representam os materiais cerâmicos com maior grau de pozolanicidade.

Leite (2001) ainda salienta que existem duas teorias sobre a reatividade dos materiais cerâmicos em forma de blocos e tijolos. Uma relaciona as propriedades pozolânicas dos tijolos com uma fase vítrea solúvel que reage com o Ca(OH)_2 , formando C-S-H. Esta fase vítrea só pode ser encontrada em tijolos cerâmicos queimados a temperaturas acima de 950 °C. A segunda diz que apenas os tijolos queimados a baixas temperaturas é que podem apresentar esta reatividade.

Hamassaki et al. (1996 apud LEITE, 2001), estudaram 8 traços diferentes de argamassa incorporando resíduos de blocos cerâmicos, tijolos e blocos de concreto separadamente e avaliaram, além de propriedades mecânicas das argamassas produzidas, o índice de atividade pozolânica dos materiais. Os autores realizaram o ensaio de Chapelle modificado no qual os resultados são expressos em termos de quantidade de CaO consumidos pela amostra. O material é considerado pozolânico quando apresenta um índice de consumo mínimo de 330 mg de CaO/g da amostra. Nos resultados obtidos pelos autores nenhum dos materiais utilizados neste estudo apresentaram índice de consumo de CaO pelo menos igual a 330 mg CaO/g. Isto significa que nenhum dos materiais pode ser classificado como uma pozolana. Entretanto, fica claro através dos resultados que os materiais cerâmicos consomem mais CaO que o bloco de concreto, como era de se esperar. Os autores sugerem que, em vista destes resultados, pode haver uma influência pozolânica dos materiais cerâmicos sobre o desempenho mecânico das argamassas produzidas, ainda que pequena.

Levy (1997) também realizou estudo da atividade pozolânica dos materiais utilizados em seu trabalho de dissertação através do mesmo método usado por Hamassaki et al. (1996). Diferente dos resultados encontrados por Hamassaki et al. (1996), Levy (1997) encontrou reatividade pozolânica nos materiais utilizados em sua pesquisa.

Em recente trabalho Corinaldesi e Moriconi (2008) avaliam três tipos diferentes de agregados na composição de argamassas de revestimento compostos por: resto de concreto classe de resistência de 50 a 55 MPa (Agregado CONC), resto de tijolos cerâmicos de resistência mecânica de 11 MPa (Agregado BRI) e resíduo proveniente de usina de reciclagem com 72% de concreto, 25% de alvenaria e 3% de betume (Agregado REC). A caracterização dos agregados está descrita conforme a Tabela 20. A proporção de material utilizada no trabalho e a relação entre aglomerante e agregado foi de 1:3.

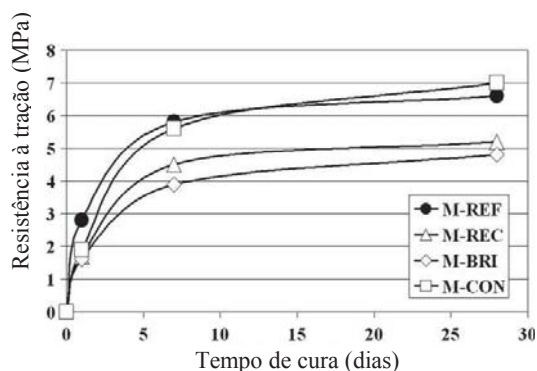
Os resultados obtidos na determinação da resistência à flexão e a compressão são apresentados nas Figuras 11 e 12.

Contrariamente aos outros trabalhos discutidos anteriormente, os autores encontraram uma diminuição na resistência à compressão e à flexão nas argamassas compostas com material cerâmico (M-BRI e M-REC). Conforme os autores os resultados demonstram que as argamassas contendo as diferentes composições de agregados reciclados apresentaram perda de resistência à compressão e à flexão quando comparadas com o traço de referência, contendo apenas agregado natural. Tal fato segundo os autores deveu-se a baixa densidade dos agregados reciclados utilizados bem como a e alta absorção de água excluindo o possível efeito pozolânico do material cerâmico. Os maiores valores de resistência à compressão e à flexão foram obtidos nas argamassas em que se utilizaram os agregados REF (areia natural) e CONC (resto de concreto).

Tabela 20: Caracterização dos agregados e traços utilizados por Corinaldesi e Moriconi (2008)

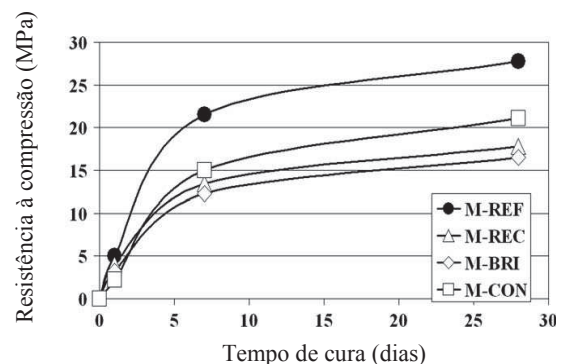
Agregados	REF	REC	BRI	COM
Volume (Kg/m ³)	2,59	2,29	2,06	2,38
Absorção de água (%)	3,10	8,80	16,20	7,10
Fração passante na 150 µm (%)	10	8	20	10
Misturas				
Água/Cimento	0,60	0,78	0,91	0,71
Água	270	350	410	320
Cimento	450	450	450	450
A.N	1350	-	-	-
Reciclado misturado	-	1350	-	-
Reciclado cerâmico	-	-	1350	-
Reciclado concreto	-	-	-	1350

Fonte: Corinaldesi e Moriconi (2008)



Fonte: Corinaldesi e Moriconi (2008).

Figura 11: Resultados obtidos por Corinaldesi e Moriconi (2008) na resistência à flexão



Fonte: Corinaldesi e Moriconi (2008).

Figura 12: Resultados obtidos por Corinaldesi e Moriconi (2008) na resistência à compressão (MPa).

Os resultados encontrados por Corinaldesi e Moriconi (2008) são considerados contraditórios em relação à influência pozolânica de materiais cerâmicos existentes na composição dos resíduos de RCD.

Foi constatado por Camargo (1995) que a argamassa produzida com material reciclado, tem excelente resistência ao arrancamento e um módulo de elasticidade maior do que as argamassas tradicionais. Segundo o autor estes resultados devem-se ao fato de que estas argamassas apresentarem muita retenção de água, devido a presença especialmente do material cerâmico, que colabora no processo de hidratação do cimento e conseqüente diminuição da retração e do surgimento de fissuras ao longo do tempo.

Comparando-se os trabalhos anteriormente analisados é possível dizer apenas que o efeito pozolânico do material cerâmico está relacionado ao tipo e quantidade de material que está sendo utilizado, sendo necessário um estudo criterioso em cada caso.

Diversos autores salientam que há grande influência dos agregado reciclados nas propriedades das argamassas no estado fresco principalmente na retenção de água e na consistência, e que se refletem posteriormente nas propriedades do estado endurecido (LEVY, 1997; MIRANDA, 2000, SILVA et al. 2007, entre outros). Esta influência é associada a natureza e proporção dos materiais que podem compor o RCD (cerâmica, argamassa, concreto, etc..)

Miranda (2000) afirma que o consumo de água total das argamassas aumenta com a proporção do agregado reciclado utilizado na confecção das argamassas. Além disto o referido autor também constatou que a natureza do agregado reciclado, principalmente aqueles que continham maior proporção de materiais cerâmicos (blocos cerâmicos) demandou um aumento significativo no consumo de água sendo necessário corrigir o valor da relação a/c e de água /materiais secos.

Leite (2001) salienta que mesmo para os agregados miúdos naturais normalmente utilizados na confecção de concretos e argamassas, o efeito da absorção de água não é considerado, uma vez que os valores de taxa de absorção variam de 1 a 2,5 % e o processo se dá de forma mais lenta devido à baixa porosidade destes materiais. Entretanto, quando se utiliza agregados mais porosos, como é o caso dos agregados reciclados, cuidados devem ser tomados para minimizar os efeitos de absorção. No referido trabalho a autora encontrou uma taxa de absorção de água média de 8,6% do agregado miúdo reciclado (com 26% de material cerâmico) utilizado na confecção dos concretos analisados. As curvas de absorção dos

agregados reciclados demonstraram que tanto a fração miúda quanto a graúda absorvem, em 30 minutos de ensaio, mais de 50 % do total de água absorvido em 24 horas de ensaio, e a absorção é tanto mais rápida quanto menor for a dimensão das partículas de agregado.

Devido a este fato alguns autores salientam que há necessidade de compensar esta elevada absorção de água, molhando o agregado antes da produção de argamassas e concretos, para que não haja diminuição excessiva da água livre das misturas de concreto produzidas com agregados reciclados, fato este que comprometeria as propriedades no estado fresco e no estado endurecido.

Em trabalho realizado por Silva et al. (2007) foram analisadas diversas propriedades de argamassas de revestimento, entre elas a retenção de água e a absorção de água, com incorporação de agregados reciclados contendo 5% de resíduos de cerâmica vermelha I(5) e 10% de resíduos de cerâmica vermelha I(10) comparativamente a argamassas com areia natural I(0).

A avaliação experimental das propriedades analisadas seguiu três diferentes vertentes: a adição de finos reciclados, a redução do teor de cimento (com simultânea adição de finos) e substituição da areia por material reciclado, em toda a sua curva granulométrica.

Analisando os resultados obtidos pelos autores verifica-se de uma forma geral que a incorporação de finos de cerâmica vermelha, em argamassas analisadas implica numa melhoria geral do comportamento quanto à absorção de água e retenção de água.

Ao mesmo tempo que o material cerâmico demanda uma maior quantidade de água de amassamento, a retenção de água é melhorada com a presença destes materiais. Os autores constataram que a argamassa I(10) retém mais (cerca de 18%) de água do que a argamassa convencional, o que leva a crer que aproveita melhor a água de amassamento para a hidratação do cimento e conseqüentemente um aumento na resistência à compressão e resistência de aderência.

Carasek (2007) comenta que a retenção de água é uma propriedade que está relacionada a capacidade da argamassa ainda fresca manter a sua trabalhabilidade em função do tempo. Além disto esta propriedade é de extrema importância quando a argamassa é aplicada sobre substratos com alta sucção de água ou condições climáticas desfavoráveis.

Após o endurecimento as argamassas dependem, em grande parte de uma adequada retenção de água para que as reações químicas de endurecimento dos aglomerantes se efetuem

de maneira apropriada não afetando algumas propriedades no estado endurecido, como por exemplo a aderência, no caso das argamassas de revestimento.

Analisando os trabalhos realizados pelos pesquisadores anteriormente citados observa-se que a retenção de água não apresenta uma tendência de comportamento bem definida, nem com a natureza do entulho, nem com o aumento do teor de finos. Já a ausência dos finos implica em menor trabalhabilidade e menor retenção de água.

A perda da consistência em função do tempo, em argamassas com agregados reciclados, também foi observada por alguns pesquisadores como nos trabalhos de Miranda (2000) e Santana et. al. (2001).

De acordo com Miranda (2000) a perda da consistência em função do tempo para as argamassas com agregados reciclados, apresentou tendência a diminuir ou permanecer constante à medida que se aumentava o teor de finos, possivelmente pelo fato dos finos dos agregados reciclados atuarem como retentores de água.

Pinto (1986) observou em ensaio de absorção de água por imersão em argamassas no estado endurecido, uma maior absorção dos traços com agregados reciclados miúdos, possivelmente pela maior porosidade destes materiais, principalmente nos traços contendo materiais cerâmicos.

Outra propriedade que é influenciada pela incorporação de agregados reciclados é a retração por secagem. Conforme Hamassaki (1996 apud JADOVSKI, 2005) argamassas produzidas com agregados reciclados apresentam maior retração que pode levar a fissuração. Segundo o referido autor este ocorre quando há presença excessiva de finos no agregado reciclado.

Miranda (2000) detectou os maiores valores de retração em argamassas com maiores teores totais de finos (menores que 75 μ m). Porém segundo o referido autor a aplicação do chapisco, como preparação do substrato, mostrou-se eficiente na redução da quantidade de fissuras, chegando às vezes a impedir o seu aparecimento. No entanto o autor ressalta que o aumento do teor total de finos aumentou a resistência de aderência ao cisalhamento do revestimento, o que pode também ter contribuído para a diminuição do aparecimento de fissuras.

3 PROGRAMA DA PESQUISA

Neste capítulo são apresentados e detalhados todos os aspectos referentes à estratégia da pesquisa, isto é, o planejamento experimental adotado, as técnicas de análise empregadas, os materiais utilizados e os ensaios realizados.

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental adotado está centrado na Metodologia do Projeto Robusto (e.g. TAGUCHI, 1986; PHADKE, 1989; BORKOWSKI; LUCAS, 1997; BORROR; MONTGOMERY, 2000; BORROR et al., 2002, MYERS; MONTGOMERY, 2002), cuja abordagem é utilizada, no presente trabalho, em conjunto com outras ferramentas de planejamento e avaliação de experimentos, tais como a metodologia de superfícies de resposta (MSR) e a otimização multi-variável.

3.1.1 Visão Geral

A metodologia do projeto robusto (MPR), inicialmente proposta por Taguchi (1986), tem como principal objetivo melhorar a qualidade de um processo ou produto, no caso a argamassa de revestimento, através da redução da variabilidade das suas principais características de desempenho mecânico, sem, no entanto, se preocupar em remover as causas desta variabilidade. Ao invés, a redução da variabilidade é buscada através do ajuste dos fatores de controle do desempenho (no caso de argamassas, através de ajustes no traço).

O foco deste tipo de estudo está, portanto, na avaliação dos chamados efeitos de dispersão (variância ou desvio-padrão da variável de resposta), de forma complementar à avaliação convencional dos efeitos de localização, os quais, por sua vez, se referem à avaliação das médias das variáveis de resposta. Em outras palavras, o objetivo de um estudo de robustez é

otimizar a resposta média de uma variável de desempenho (variável de resposta) de um determinado produto ou processo, minimizando, ao mesmo tempo, a variabilidade associada a esta variável.

A abordagem utilizada no presente trabalho foi aquela sugerida por Myers e Montgomery (2002), a qual compreendeu as seguintes oito etapas, detalhadas nos itens subseqüentes:

(1) Definição das Variáveis de Resposta: escolha das variáveis a serem medidas e avaliadas durante o programa experimental, representativas das principais características de desempenho de argamassas de revestimento, tanto no estado fresco como no estado endurecido, e definição dos ensaios a serem realizados;

(2) Identificação dos Fatores de Desempenho: identificação preliminar de todos os fatores que de alguma maneira estão ou podem estar presentes no processo de produção de argamassas de revestimento;

(3) Definição dos Fatores Controláveis ou de Controle: fatores que efetivamente podem ser manipulados (fatores investigados) ou mantidos fixos durante o processo de produção da argamassa de revestimento em laboratório;

(4) Definição dos Fatores de Ruído: fatores não controláveis, responsáveis por grande parte da variabilidade das características finais da argamassa de revestimento;

(5) Delineamento Experimental: definição do arranjo experimental, incluindo o número de níveis dos fatores de controle, a faixa de variação e os valores dos níveis, o número de repetições e a ordem de coleta dos dados;

(6) Análise dos Efeitos de Localização: nesta etapa, é realizada a avaliação dos efeitos principais e de interações entre fatores de controle sobre as diferentes variáveis de resposta, através da aplicação de ferramentas estatísticas como a análise de variância (ANOVA), a análise de correlação, a análise de regressão linear e a construção de superfícies de resposta;

(7) Análise dos Efeitos de Dispersão (Análise de Robustez): nesta etapa, a partir da manipulação matemática das superfícies de resposta obtidas na etapa anterior, é analisada a variabilidade transmitida (propagação do erro) às variáveis de resposta pelos fatores de ruído ou por flutuações nos fatores de controle;

(8) Análise de Otimização: nesta etapa, é investigada a existência de uma região ótima dentro do espaço experimental, na qual são simultaneamente satisfeitas as especificações

nominais das principais características de desempenho das argamassas de revestimento, com a menor variabilidade possível.

3.1.2 Definição das Variáveis de Resposta e Ensaios Realizados

As características de desempenho da argamassa de revestimento com incorporação de RCD foram avaliadas tanto no estado fresco, como endurecido, sendo que para a avaliação no estado endurecido, foram realizados ensaios sobre diferentes tipos de unidades experimentais: corpos-de-prova prismáticos de argamassa e painéis de alvenaria revestidos com argamassa.

As Tabelas 21 e 22 apresentam um sumário das variáveis de resposta avaliadas durante o programa experimental, respectivamente para os estados fresco e endurecido, bem como indicam os procedimentos metodológicos adotados.

Tabela 21: Variáveis de resposta para a avaliação do desempenho da argamassa de RCD no estado fresco.

Variáveis de resposta	Procedimento metodológico
Teor de Incorporação de Ar	NBR 13278 (ABNT, 2005)
Retenção de Água	NBR 13277 (ABNT, 1995)

Tabela 22: Variáveis de resposta para a avaliação do desempenho mecânico da argamassa de RCD no estado endurecido.

Variáveis de resposta	Unidade experimental	Procedimento metodológico
Resistência à Compressão Simples	Corpos-de-prova de Argamassa	NBR 13279 (ABNT, 2005)
Resistência à Tração na Flexão	Corpos-de-prova de Argamassa	NBR 13279 (ABNT, 2005)
Resistência de Aderência	Painéis de Alvenaria	NBR 13528 (ABNT, 1995)
Comprimento de Fissura	Painéis de Alvenaria	Adaptado de Thomaz (1989)

3.1.3 Identificação dos Fatores de Desempenho

Com base na revisão de literatura apresentada no capítulo anterior, os principais fatores que interferem de alguma forma no processo de produção de argamassas de revestimento e, por conseqüência, nas características de desempenho do produto final são os seguintes: (a) origens e características dos agregados e aglomerantes empregados, incluindo a composição do RCD; (b) tipo e tratamento da base ou substrato de aplicação; (c) traço, isto é, a proporção entre aglomerantes, agregados e água; (d) utilização de adições e aditivos; (e) técnica de preparação e aplicação da argamassa; (f) tempo de mistura; (g) tempo, forma e condições ambientais de cura; (h) equipamentos utilizados; (i) qualificação da mão-de-obra; (j) tipo de misturador.

Estes fatores, com vistas à produção experimental da argamassa de RCD em laboratório, podem ser inicialmente classificados em duas categorias: (1) fatores de controle ou controláveis, os quais são propositalmente manipulados (fatores investigados), ou mantidos fixos durante o estudo experimental; e (2) fatores de ruído ou não controláveis, cuja variação embora possa ser minimizada, é inevitável.

Deve-se salientar, contudo, que um fator controlável em situação de laboratório, nem sempre o é em situação de obra (exemplos notórios no caso em estudo são a composição do RCD e as condições de cura), uma vez que flutuações em torno de um valor nominal especificado de um fator de controle sempre ocorrerão, com potenciais reflexos na variabilidade das características de desempenho do produto final. Quanto menos sensível o produto se mostrar diante destas flutuações nos fatores de controle ou diante dos fatores de ruído, maior será a sua robustez.

3.1.4 Definição dos Fatores Controláveis

As Tabelas 23 e 24 apresentam os fatores controláveis definidos na presente pesquisa, separando-os em fatores investigados e fatores mantidos fixos, respectivamente. Nestas tabelas são também apresentadas as faixas para os níveis dos fatores investigados e as especificações estabelecidas para os fatores fixos.

Como fatores investigados, foram definidos fatores que refletissem as proporções entre os diferentes elementos constituintes do traço da argamassa, considerados como os principais fatores de controle do desempenho da argamassa. Para o correto entendimento dos fatores apresentados na Tabela 23, as seguintes definições são necessárias, válidas no contexto da presente pesquisa:

- Areia de RCD: agregado miúdo preparado em laboratório constituído em proporções variadas de agregado proveniente de resíduos cerâmicos (areia de cerâmica – AC) e de agregado proveniente de resíduos de argamassa (areia de argamassa – AA);
- Areia total: agregado constituído em proporções variadas por areia de RCD e areia natural de origem mineral;
- Aglomerante total: aglomerante constituído em proporções variadas por cimento Portland e cal hidratada.

As faixas de variação destes fatores foram definidas de forma a produzir um espaço experimental suficientemente abrangente, ao mesmo tempo em que produzissem traços exequíveis tanto em condições controladas de laboratório como em obra. Já as especificações para os fatores fixos procuraram reproduzir condições usualmente utilizadas na prática laboratorial ou ainda representar condições reais de obra.

Tabela 23: Fatores controláveis investigados no programa experimental.

Fatores investigados	Níveis
A: Relação Areia de RCD/Areia Total*	0,25 a 0,75
B: Relação Cimento/Aglomerante Total**	0,3 a 0,7
C: % de Cerâmica na Areia de RCD	25 a 75
D: Consistência da Mistura (mm)	240 a 280

* Areia Total = Areia Natural + Areia de RCD

** Aglomerante Total = Cimento + Cal

Tabela 24: Fatores controláveis mantidos fixos no programa experimental.

Fatores mantidos fixos	Especificação
Composição do Agregado de RCD	Resíduos Cerâmicos + Resíduos de Argamassa
Relação Aglomerante Total/Areia (volume)	1:3
Granulometria da Areia	Dentro da faixa utilizável
Tempo de Cura	28 dias
Tipo de Cimento	CP-II-F 32
Tipo de Cal	CH-III
Superfície de Aplicação (Painéis)	Bloco cerâmico com chapisco
Mão-de-obra (Painéis)	Pedreiro
Condições de Cura (Temperatura e Umidade Relativa)	Fixas para os ensaios em corpos-de-prova (câmara úmida) e monitoradas para os ensaios em painéis
Método de Preparação da Argamassa	Mecanizado, em argamassadeira para os ensaios em corpos-de-prova, e em betoneira para os ensaios em painéis.

A opção pelo tratamento dos painéis de alvenaria com chapisco, além de ser uma técnica usualmente empregada regionalmente, baseou-se em estudos realizados por Selmo (1989), que demonstram que a fissuração é muito menor quando usado o chapisco.

3.1.5 Definição dos Fatores de Ruído

Os fatores considerados como não controláveis durante a realização do programa experimental são descritos a seguir:

a) Condições ambientais de cura dos painéis

As condições ambientais de temperatura e umidade relativa foram monitoradas durante o experimento e o seu efeito eventual minimizado através da aleatorização da ordem de construção painéis e de realização dos ensaios.

b) Granulometria do agregado

As composições granulométricas do agregado natural e dos componentes do agregado de RCD (resíduos cerâmicos e resíduos de argamassa) são diferentes entre si, o que resulta em misturas de agregados também com composições granulométricas distintas. No presente estudo não foram feitos ajustes nas curvas granulométricas, porém, ensaios preliminares demonstraram que todas as curvas granulométricas se encontram dentro da zona utilizável definida na norma NBR NM-248 (ABNT, 2003).

c) Tempo de mistura da argamassa

No presente estudo, um dos fatores de controle foi a consistência da argamassa, medida segundo a NBR 13276 (ABNT, 2005), e cuja obtenção demandou sucessivos ajustes. Logo, o tempo de mistura para as argamassas produzidas, tanto em argamassadeira como em betoneira, foi variável.

d) Flutuações nos Fatores de Controle

A flutuação inerente ao ajuste dos fatores de controle aos valores nominais especificados também deve ser considerada como um fator de ruído, contribuindo para o erro experimental e a variabilidade das respostas. No laboratório, os efeitos destas flutuações podem ser minimizados a partir da adoção de procedimentos experimentais rigorosos. Porém, em situação de obra, estas flutuações podem adquirir grande importância e afetar as propriedades finais da argamassa de forma muito significativa. Como exemplo, pode-se citar a consistência da argamassa, cujo ajuste manual, e a composição extremamente variável do RCD, em razão de apresentarem diferentes origens (construtoras, particulares, etc.). O desafio é, portanto, desenvolver um produto menos suscetível a todas estas flutuações e variabilidades, ou seja, um produto mais robusto, que permita a sua utilização na construção civil de maneira segura e confiável.

A Figura 13, a seguir, apresenta um resumo das variáveis e fatores envolvidos no presente estudo.

3.1.6 Delineamento Experimental

Um estudo experimental de robustez usualmente envolve um número razoável de fatores. No presente trabalho os fatores investigados foram limitados a quatro fatores (ver Tabela 23): A: Areia de RCD/Areia total, B: Cimento/Aglomerante total, C: Porcentagem de cerâmica na

areia de RCD e D: Consistência. Como a abordagem proposta demandava a modelagem matemática dos resultados e a construção de superfícies de resposta, relacionando os fatores investigados ao conjunto de variáveis de resposta (ver Tabelas 21 e 22), optou-se por um arranjo experimental do tipo composto central (e.g. MYERS; MONTGOMERY, 2002), o qual permite a avaliação de efeitos principais e de interações, bem como propicia o ajuste de modelos de primeira ou de segunda ordem (lineares ou quadráticos). Este arranjo foi utilizado para todos os ensaios realizados, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

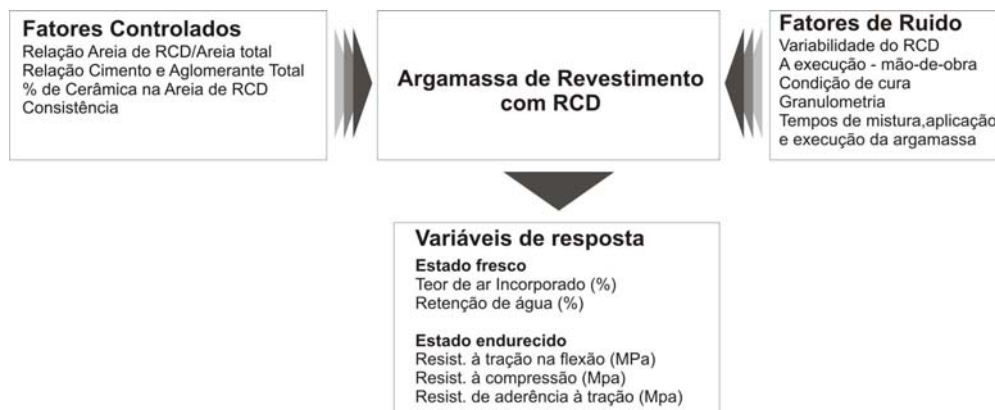


Figura 13: Panorama geral das variáveis e fatores envolvidos no estudo de robustez.

O projeto composto central se caracteriza por incluir três tipos distintos de pontos experimentais: 2^k pontos cúbicos ou fatoriais, $2k$ pontos axiais e nc pontos centrais, onde k é o número de fatores investigados e nc é o número de repetições do ponto central. A Figura 14 ilustra estes conceitos para projetos com dois ($k = 2$) e três fatores ($k = 3$). Como pode ser observado, neste tipo de arranjo as repetições ocorrem somente no ponto central, de maneira a permitir a determinação direta do erro experimental e a avaliação da qualidade e estabilidade do experimento realizado. No presente estudo, foram realizadas 7 observações do ponto central ($nc = 7$).

Quando comparado com um arranjo alternativo, o projeto fatorial 3^k (três níveis para cada um dos fatores investigados), o qual permite o ajuste de modelos de até terceira ordem, o projeto composto central é mais eficiente, pois necessita de um número bem menor de combinações ou tratamentos a serem testados (31 ensaios contra 162 do projeto 3^k com duas repetições).

Outra característica importante do projeto composto central é a sua “rotabilidade”, isto é, a propriedade que resulta em estimativas (produzidas pelo modelo matemático ajustado) com

igual variância para pontos no espaço experimental equidistantes em relação ao ponto central. Esta propriedade é função da distância especificada entre os pontos axiais e o ponto central, a qual é usualmente estabelecida, em termos codificados, como sendo igual a \sqrt{k} , onde k é o número de fatores envolvidos no experimento (MYERS; MONTGOMERY, 2002). Maiores detalhes sobre este delineamento experimental podem ser encontrados em Montgomery (2001) ou Myers e Montgomery (2002).

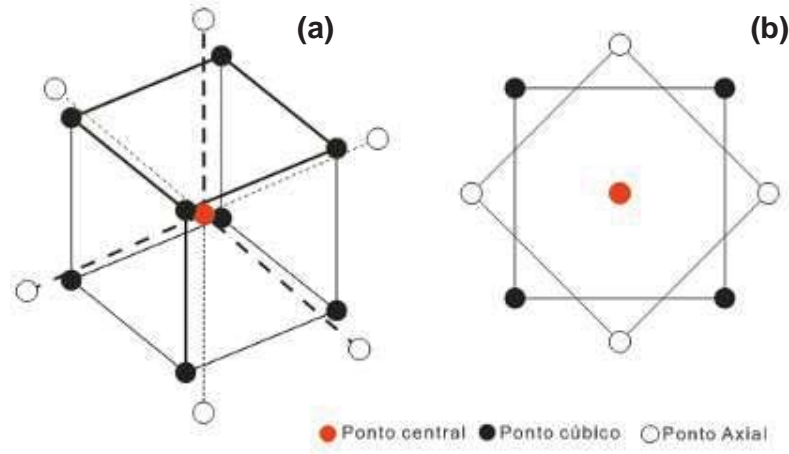


Figura 14: Projeto Composto Central: (a) três fatores; (b) dois fatores. Fonte: adaptado de Silveira (2003).

A Figura 14 mostra que neste tipo de arranjo experimental, cada fator é testado a cinco níveis diferentes, dois correspondentes a pontos fatoriais, dois a pontos axiais e um nível correspondente ao ponto central, embora nem todas as combinações entre níveis sejam testadas. A Tabela 25 mostra os níveis estabelecidos para os quatro fatores investigados na presente pesquisa, distribuídos nas faixas de variação definidas na Tabela 23. Nesta tabela são também apresentados os valores codificados para os níveis: 0 para os pontos centrais, 1 e -1 para os pontos fatoriais e 2 e -2 para os pontos axiais. A codificação é fundamental à realização da análise estatística e modelagem dos resultados, pois normaliza os valores em uma mesma escala adimensional, permitindo comparações diretas entre os resultados das análises, como, por exemplo, entre os coeficientes das equações de regressão.

A Tabela 26 apresenta as 31 combinações ou tratamentos resultantes do delineamento experimental, sendo que destes 25 correspondem a misturas ou traços diferentes e 6 são repetições do tratamento referente ao ponto central. Nesta tabela, além das combinações, listadas segundo uma ordem padrão, é apresentada a ordem de execução ou de obtenção dos dados, o que reflete o procedimento de aleatorização experimental utilizado, como forma de

tratamento dos fatores de ruído e diluição do erro experimental. Também estão apresentados nesta tabela, para referência, os traços unitários em massa correspondentes aos 25 tratamentos testados.

Tabela 25: Fatores investigados e seus níveis.

Fator	Níveis codificados e naturais				
	-2	-1	0	1	2
A: Areia de RCD/Areia total	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750
B: Cimento/Aglomerante total	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700
C: % de cerâmica na areia de RCD	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750
D: Consistência (mm)	240	250	260	270	280

Tabela 26: Projeto composto central: delineamento experimental.

Ordem padrão	Ordem de execução	Tipo de ponto (*)	Areia de rcd/ areia total	Cimento/aglomerante total	% de cerâmica na areia de rcd	Consistência (mm)	Traço unitário (cimento:cal:areia) Volume material seco
1	12	1	0,375	0,400	0,375	250	1 : 1,5 : 7,5
2	22	1	0,625	0,400	0,375	250	1 : 1,5 : 7,5
3	24	1	0,375	0,600	0,375	250	1 : 0,7 : 5,0
4	20	1	0,625	0,600	0,375	250	1 : 0,7 : 5,0
5	14	1	0,375	0,400	0,625	250	1 : 1,5 : 7,5
6	17	1	0,625	0,400	0,625	250	1 : 1,5 : 7,5
7	13	1	0,375	0,600	0,625	250	1 : 0,7 : 5,0
8	10	1	0,625	0,600	0,625	250	1 : 0,7 : 5,0
9	26	1	0,375	0,400	0,375	270	1 : 1,5 : 7,5
10	11	1	0,625	0,400	0,375	270	1 : 1,5 : 7,5
11	19	1	0,375	0,600	0,375	270	1 : 0,7 : 5,0
12	25	1	0,625	0,600	0,375	270	1 : 0,7 : 5,0
13	7	1	0,375	0,400	0,625	270	1 : 1,5 : 7,5
14	4	1	0,625	0,400	0,625	270	1 : 1,5 : 7,5
15	18	1	0,375	0,600	0,625	270	1 : 0,7 : 5,0
16	5	1	0,625	0,600	0,625	270	1 : 0,7 : 5,0
17	29	-1	0,250	0,500	0,500	260	1 : 1,0 : 6,0
18	28	-1	0,750	0,500	0,500	260	1 : 1,0 : 6,0
19	3	-1	0,500	0,300	0,500	260	1 : 2,3 : 10,0
20	6	-1	0,500	0,700	0,500	260	1 : 0,4 : 4,3
21	27	-1	0,500	0,500	0,250	260	1 : 1,0 : 6,0
22	21	-1	0,500	0,500	0,750	260	1 : 1,0 : 6,0
23	8	-1	0,500	0,500	0,500	240	1 : 1,0 : 6,0
24	15	-1	0,500	0,500	0,500	280	1 : 1,0 : 6,0
25	1	0	0,500	0,500	0,500	260	1 : 1,0 : 6,0
26	30	0	0,500	0,500	0,500	260	1 : 1,0 : 6,0
27	16	0	0,500	0,500	0,500	260	1 : 1,0 : 6,0
28	9	0	0,500	0,500	0,500	260	1 : 1,0 : 6,0
29	23	0	0,500	0,500	0,500	260	1 : 1,0 : 6,0
30	2	0	0,500	0,500	0,500	260	1 : 1,0 : 6,0
31	31	0	0,500	0,500	0,500	260	1 : 1,0 : 6,0

(*) Ponto Fatorial (1); Ponto Central (0); Ponto Axial (-1)

Cabe mais uma vez ressaltar que o mesmo delineamento, conforme apresentado na Tabela 26, foi aplicado a cada uma das seis variáveis de resposta avaliadas no trabalho (ver Tabelas 21 e 22), quer seja no estado fresco ou no estado endurecido, o que resultou em um número total de 186 ensaios realizados, sem contabilizar os ensaios de caracterização dos materiais individuais e das misturas de agregados.

3.1.7 Análise dos Resultados

Para cada variável de resposta, além da análise gráfica qualitativa, foi realizada a análise de variância (ANOVA), para verificar a significância estatística dos efeitos dos fatores individuais e das interações entre eles. Esta análise foi complementada por uma análise de correlação entre pares de variáveis de resposta. A partir da identificação dos efeitos significativos, foi realizada a análise de regressão linear com o intuito de modelar matematicamente as superfícies de resposta, as quais relacionam cada variável de resposta com os fatores investigados.

A análise de robustez foi realizada a partir da manipulação matemática das superfícies de resposta, o que resultou na determinação de uma outra variável de resposta denominada propagação do erro – POE (MYERS; MONTGOMERY, 2002; WHITCOMB; ANDERSON, 1996), definida como o desvio padrão transmitido a uma variável de resposta por flutuações ocorridas em torno dos valores nominais dos fatores de controle ou por variações dos fatores de ruído. Se f representa uma superfície de resposta que relaciona a estimativa média (valor esperado) \hat{y} de uma dada variável de resposta y , com i fatores de controle x_i e j fatores de ruído z_j , a transmissão do erro (POE) é dada pela raiz quadrada da variância $\sigma_{\hat{y}}^2$ associada à variável de resposta, cujo valor pode ser calculado pela expressão:

$$\sigma_{\hat{y}}^2 = \sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 + \sum_j \left(\frac{\partial f}{\partial z_j} \right)^2 \sigma_{z_j}^2 + \sigma_{residual}^2 \quad \text{Eq. (1)}$$

Nesta equação, $\sigma_{residual}^2$ é a variância atribuída ao erro aleatório, que pode ser estimada pela média quadrada do erro calculada na análise de variância, enquanto $\sigma_{x_i}^2$ e $\sigma_{z_j}^2$ são variâncias resultantes das variações ou flutuações nos fatores x_i e z_j , as quais podem ser experimentalmente determinadas ou estimadas.

No presente trabalho optou-se por realizar a análise de robustez somente para as características de desempenho avaliadas nos ensaios em painéis de alvenaria, por melhor representarem a qualidade do produto final.

A análise de otimização teve como objetivo investigar a existência de uma região dentro do espaço experimental em que simultaneamente as especificações para o produto são alcançadas e a transmissão do erro é minimizada, e foi realizada a partir da utilização de algoritmos gráficos ou numéricos com o auxílio de programas computacionais específicos.

A Figura 15 apresenta, na forma de fluxograma, um resumo das etapas do programa da pesquisa descritas nos itens anteriores.

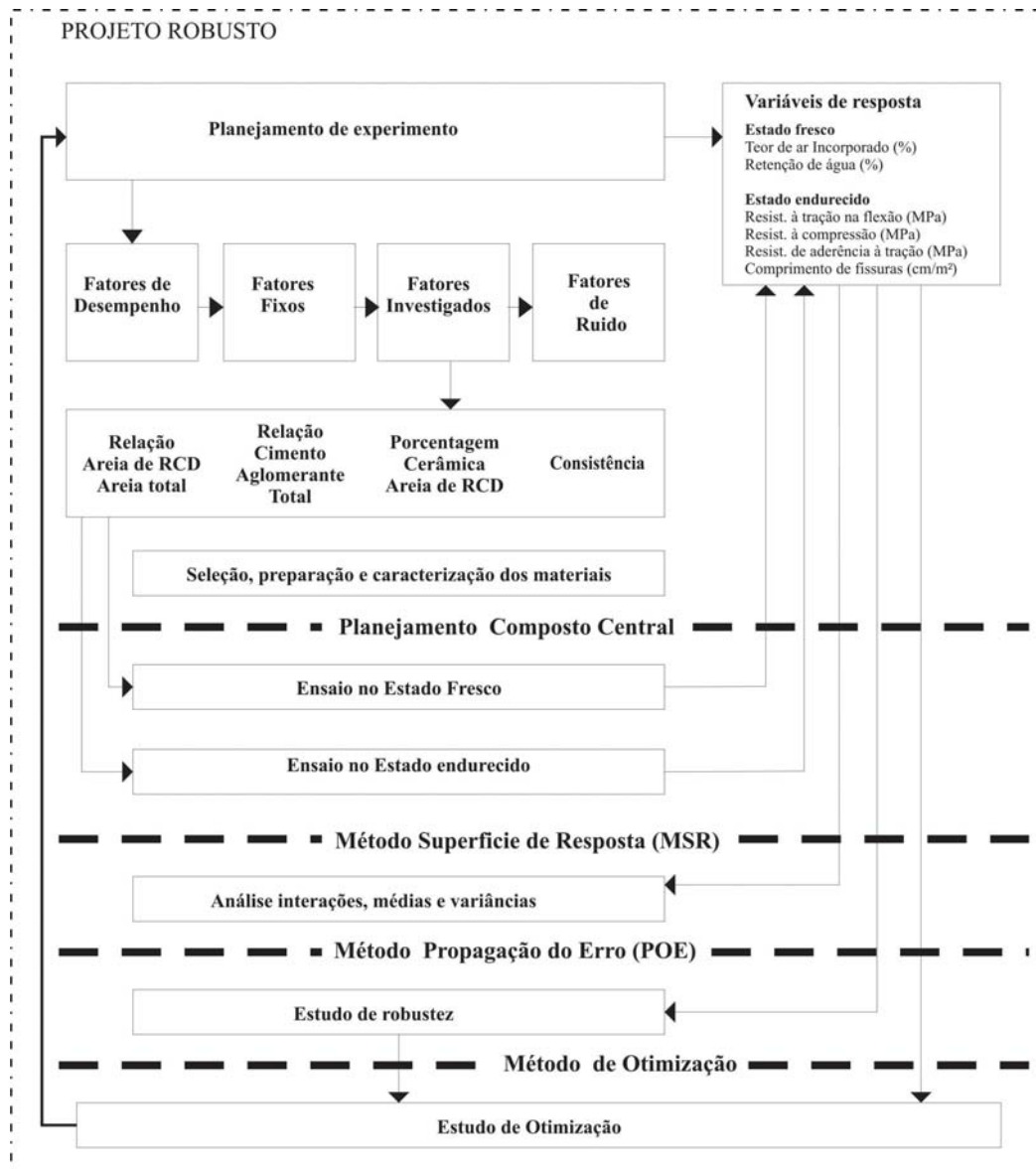


Figura 15: Fluxograma das etapas do programa da pesquisa.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais selecionados (agregados natural e de RCD, cimento e cal) foram caracterizados segundo as normas técnicas vigentes para verificar a sua aptidão para o emprego em argamassas de revestimentos.

3.2.1 Agregados

3.2.1.1 Preparo dos Agregados

a) Agregado de RCD (ARCD)

O agregado de resíduos da construção e demolição foi preparado em laboratório a partir da mistura seca, nas proporções indicadas no planejamento experimental, de duas partes: uma parte constituída por resíduos cerâmicos, denominada agregado de cerâmica (AC), e uma outra parte constituída por resíduos de argamassa, denominada agregado de argamassa (AA). A preparação do agregado de cerâmica e do agregado de argamassa é descrita em detalhes nos itens subseqüentes.

b) Agregado de Argamassa (AA)

O preparo foi feito a partir da execução de uma argamassa de cimento, cal e areia, com traço 1:2:9 em volume, utilizada areia úmida, curada em temperatura ambiente por 28 dias. Foram utilizados cimento CP II-F, cal hidratada CH-III e areia natural de origem mineral, passada na peneira de abertura 4,8 mm. A relação água-aglomerante foi controlada pela consistência fixada em 260+/- 10 mm. Posteriormente, o material foi triturado em um britador de martelo (ver Figura 16), passado na peneira de abertura 2,4mm, e acondicionado em sacos plásticos para evitar variações de umidade.

c) Agregado de Cerâmica (AC)

Para o preparo do agregado foram utilizados blocos cerâmicos adquiridos no comércio varejista do município de Passo Fundo/RS, os quais foram submetidos a dois processos sucessivos. Primeiro, os blocos foram reduzidos manualmente a dimensões adequadas à trituração em um britador de martelo, desenvolvido especificamente para a realização da presente pesquisa (ver Figura 16). O material resultante foi passado na peneira de abertura 2,4 mm e acondicionado em sacos plásticos para evitar variações de umidade.

d) Agregado Natural (AN)

O agregado natural (AN), de origem sedimentar, foi adquirido junto ao comércio varejista do município de Passo Fundo/RS. O agregado foi inicialmente seco em estufa a temperatura de 105° para posterior peneiramento na peneira de abertura 2,4mm e armazenamento em sacos plásticos de modo a evitar variações de umidade.

A Figura 17 ilustra os agregados de argamassa (AA) e de cerâmica (AC) utilizados na composição do agregado de RCD (ARCD), após a britagem e após o peneiramento.



Figura 16: Britador de martelo

3.2.1.2 Caracterização dos Agregados

A caracterização física dos agregados, natural e de RCD, cujos resultados são apresentados no capítulo 4, foi realizada em acordo com as normas técnicas vigentes, conforme indica a Tabela 27.

Tabela 27: Ensaio de caracterização física dos agregados.

Características	Método	Referência	Repetições
Composição granulométrica	NBR NM 248	ABNT, 2003	3
Diâmetro máximo	NBR NM 248	ABNT, 2003	3
Massa específica	NBR 6508	ABNT, 1984	3
Material Pulverulento	NBR NM 46	ABNT, 2003	3
Absorção	NBR NM 30	ABNT, 2001	3
Massa Unitária Solta	NBR NM 45	ABNT, 2006	3

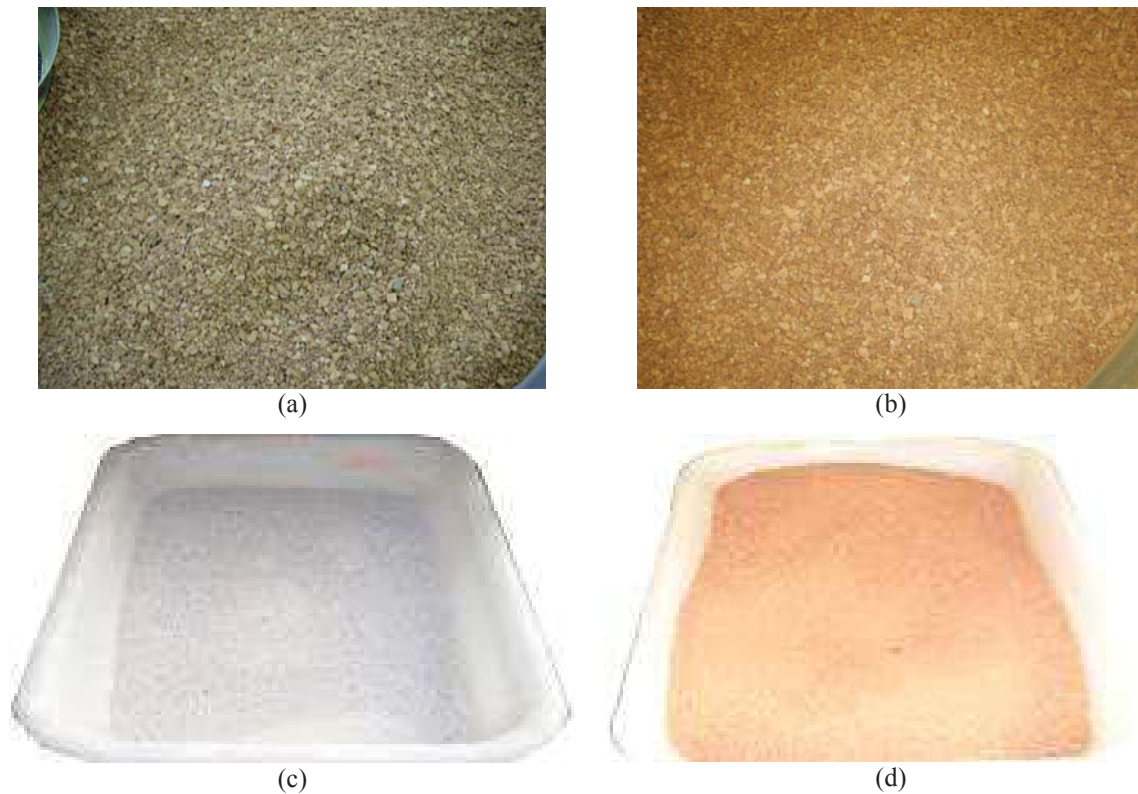


Figura 17: Agregados de RCD: (a) agregado de argamassa após a britagem; (b) agregado de cerâmica após a britagem; (c) agregado de argamassa após o peneiramento; (d) agregado de cerâmica após o peneiramento.

3.2.2 Aglomerantes

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP II-F, de acordo com a classificação da norma NBR 5735 (ABNT, 1991), disponível no mercado de Passo Fundo/RS e adquirido junto ao comércio varejista.

A Cal hidratada CH-III, para o presente trabalho, foi analisada e verificada suas características segundo NBR 7175 (ABNT, 2003), foi adquirida no mercado de Passo Fundo/RS, no comércio varejista.

A caracterização física dos aglomerantes, cimento e cal, cujos resultados são apresentados no capítulo 4, foi realizada em acordo com as normas técnicas vigentes, conforme indica a Tabela 28.

Tabela 28: Ensaio de caracterização física dos aglomerantes.

Características	Método	Referência	Repetições
Massa específica	NBR 6508	ABNT, 1984	3
Massa Unitária Solta	NBR NM 45	ABNT, 2006	3

3.2.3 Água

Foi utilizada água da rede de abastecimento em todos os procedimentos experimentais, exceção feita àqueles procedimentos em que o método de ensaio requeria o emprego de água destilada ou deionizada.

3.3 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

No estado fresco foram avaliados o teor de ar incorporado e a retenção de água, conforme os métodos descritos nos itens subseqüentes.

3.3.1 Teor de Ar Incorporado

O ensaio foi realizado segundo a NBR 13278 (ABNT, 2005), com três repetições para cada amostra. Os equipamentos e utensílios utilizados no ensaio são mostrados na Figura 18.



Figura 18: Equipamentos e utensílios para a determinação do teor de ar incorporado.

3.3.2 Retenção de Água

O ensaio foi realizado segundo a NBR 13277 (ABNT, 1995), com a utilização dos equipamentos e utensílios mostrados nas Figuras 19 e 20.

3.4 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios no estado endurecido seguiram o delineamento experimental descrito no item 3.1.6, e foram realizados em duas etapas sucessivas: na primeira etapa, foram executados ensaios em corpos-de-prova prismáticos, nos quais foram avaliadas a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão; na segunda etapa, foram realizados ensaios em painéis de

alvenaria, em que foram avaliados o comprimento de fissuração e a resistência de aderência à tração.



Figura 19: Equipamentos e utensílios para a realização do ensaio de retenção de água.



Figura 20: Execução ensaio retenção de água.

3.4.1 Ensaios em Corpos-de-prova Prismáticos

A etapa de ensaios em corpos-de-prova prismáticos foi subdividida em quatro fases distintas.

3.4.1.1 Composição dos Agregados

Para cada tratamento ou traço listado na Tabela 26, as quantidades de cada fração de agregado foram calculadas, pesadas, misturadas, homogeneizadas e acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados, para posterior preparo da argamassa.

3.4.1.2 Preparo das Argamassas, Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova

O preparo das argamassas seguiu a ordem de execução apresentada na Tabela 26, e foi feito com o auxílio de um misturador mecânico (argamassadeira) com capacidade para 5 litros, conforme ilustra a Figura 21.

A quantidade de água foi ajustada de forma a se obter os valores de consistência preestabelecidos no planejamento experimental. O controle da consistência foi realizado conforme preconiza a NBR 13276 (ABNT, 2005), com uma precisão de ± 2 mm, conforme ilustra a Figura 23.

Previamente à moldagem, as fôrmas prismáticas com dimensões de 40mm x 40mm x 160mm, mostradas na Figura 22, receberam internamente uma fina película de óleo desmoldante, para evitar danos aos corpos-de-prova no momento da desmoldagem.



Figura 21: Misturador mecânico (argamassadeira)

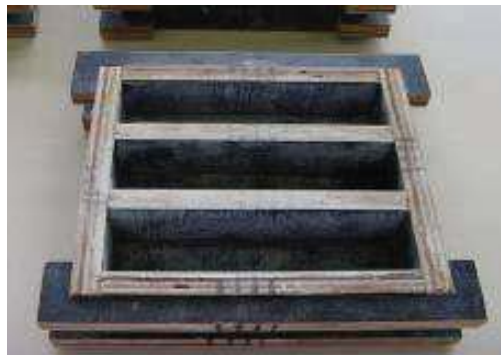


Figura 22: Formas prismáticas para moldagem dos corpos-de-prova



Figura 23: Ensaio de consistência.

A moldagem dos corpos-de-prova foi feita em triplicata para cada traço, seguindo os procedimentos descritos na NBR 13279 (ABNT, 2005). O adensamento foi realizado com o auxílio da mesa de consistência, através da aplicação de vibração mecânica, como ilustra a Figura 24.



Figura 24: Adensamento dos corpos-de-prova.

A desmoldagem ocorreu após 24 horas da moldagem, seguindo o que preconiza a NBR 13279 (ABNT, 2005). Na seqüência, os corpos-de-prova foram curados em ambiente de laboratório por um período de 28 dias, antes de serem submetidos aos ensaios de resistência.

3.4.1.3 Determinação da Resistência à Tração na Flexão

Após a cura, os corpos-de-prova foram medidos, marcados no seu terço médio, de acordo com a NBR 12142 (ABNT, 1991), conforme ilustra a figura 25, e ensaiados conforme prescreve a NBR 13279 (ABNT, 2005) para determinação da resistência à tração na flexão. A prensa hidráulica utilizada, localizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade de Passo Fundo (LABOMACC/UPF), mensurada através de célula de carga, marca CPL, com de capacidade de medição de 1200 KN ou 120 toneladas. A Figura 26 mostra a prensa utilizada no programa experimental.

A resistência à tração na flexão foi então determinada conforme determina a NBR 13279 (ABNT, 2005) e ilustra a Figura 27.



Figura 25: Marcação nos corpos-de-prova prismáticos

3.4.1.4 Determinação da Resistência à Compressão

A resistência à compressão foi determinada, conforme prescreve a NBR 13279 (ABNT, 2005) e ilustra a Figura 28, em triplicata, utilizando-se uma das metades de cada corpo-de-prova rompido no ensaio de resistência à tração na flexão.



Figura 26: Prensa hidráulica



Figura 27: Determinação da resistência à tração na flexão.

3.4.2 Ensaio em Painéis

Os ensaios em painéis seguiram o delineamento experimental detalhado no item 3.1.6 e na Tabela 26. Esta etapa foi subdividida em quatro fases sucessivas.



Figura 28: Determinação da resistência à compressão.

3.4.2.1 Projeto e Execução dos Painéis

Foram projetados e construídos três módulos de painéis em formato “H”, conforme ilustra a Figura 29, de forma a otimizar tanto a área de aplicação das argamassas nos painéis como e a área de trabalho no LABOMACC/UPF.

Assim, o conjunto (A, B e C na Figura 29) é composto por três painéis de alvenaria para aplicação das argamassas, totalizando 36 panos de revestimento. As dimensões dos painéis foram projetadas para permitir a movimentação do material, do profissional pedreiro e boa amplitude de movimentos. Para tanto, cada painel conforme a Figura 29 tem as seguintes medidas de 1,50 x 1,50m em planta, por 1,30m de altura.

Para o levantamento da alvenaria foram utilizados blocos cerâmicos de seis furos, os quais foram adquiridos junto ao comércio varejista do município de Passo Fundo. O assentamento dos blocos, foi executado por um único profissional pedreiro, utilizando argamassa de cimento CII E 32, cal CH-III e areia média, no traço 1:2:9, em volume, com areia úmida, a quantidade de água foi controlada, para se obter a argamassa trabalhável, conforme ilustra a Figura 30. A alvenaria curou por um período de 30 dias, antes da execução de um chapisco de cimento CII E 32 e areia média, com traço 1:3 (cimento e areia natural), seguindo as

especificações da NBR 13528 (ABNT, 1995). Aproximadamente 15 dias depois, foram executadas as mestras, conforme mostra a Figura 31, com argamassa no traço 1:2:9 (cimento, cal e areia natural), ficando os painéis aptos a receberem o revestimento.

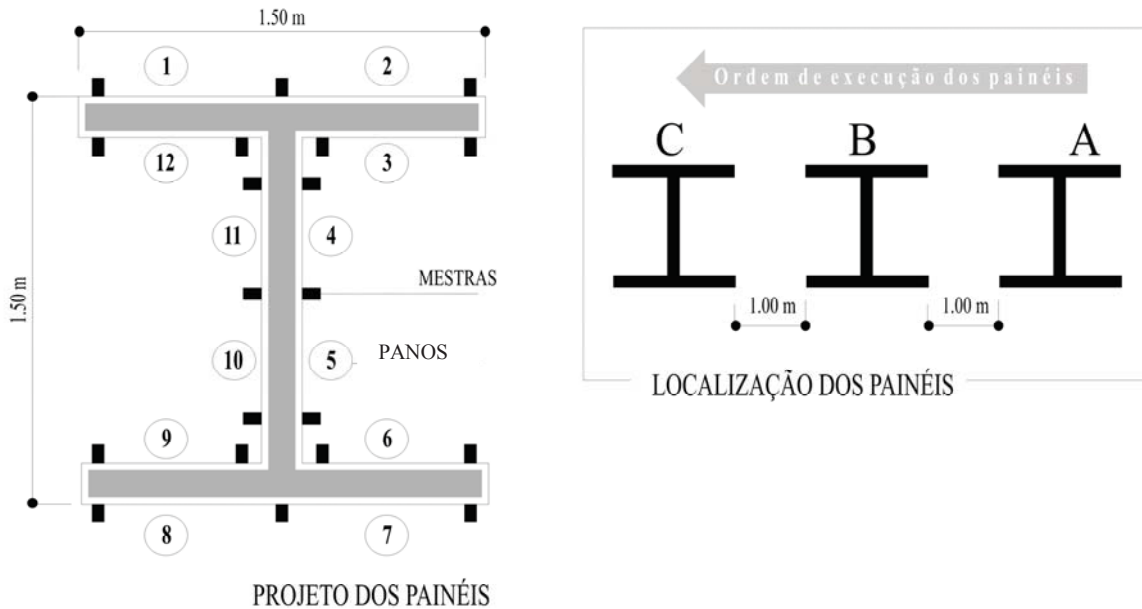


Figura 29: Projeto dos painéis.



Figura 30: Execução dos módulos dos painéis.

3.4.2.2 Composição dos Agregados, Preparo das Argamassas e Execução dos Revestimentos

A composição do agregado foi realizada seguindo os mesmos procedimentos já descritos no item 3.5.1.1, adequando as quantidades ao volume estimado de argamassa para o revestimento do painel.

A preparação das argamassas, ilustrada na Figura 32, foi feita a partir da mistura inicial dos materiais secos (agregados e aglomerantes) em uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros, e a posterior adição de água de forma a se obter os valores de

consistência preestabelecidos no planejamento experimental. O controle da consistência foi realizado conforme preconiza a NBR 13276 (ABNT, 2005), com uma precisão de $\pm 2\text{mm}$.



Figura 31: Execução do chapisco e mestras nos painéis.



Figura 32: Materiais empregados nas misturas.

Na etapa de execução do revestimento, mostrada na Figura 33, o chapisco foi previamente molhado, para que a argamassa não perdesse água para o substrato, seguido da aplicação da argamassa e do sarrafeamento, executado no chamado “tempo ótimo”. Em nenhum dos traços foi executado o desempenamento. Cada painel foi revestido em uma área útil de $0,47\text{m}^2$, com um consumo aproximado de 33 litros de argamassa.

O tempo de cura foi de 28-30 dias contado a partir da execução do revestimento, período em que os painéis ficaram expostos às condições ambientais do LABOMACC/UPF. A execução dos revestimentos ocorreu no período de 10 a 26/02/2009.

3.4.2.3 Determinação do Comprimento da Fissura

A avaliação da fissuração dos revestimentos foi realizada, para todas as argamassas produzidas, em termos do comprimento linear das fissuras visíveis por metro quadrado de painel revestido. O ensaio foi executado baseado nos procedimentos descritos em Thomaz (1989), Miranda (2000) e Passos et al. (2008).

O primeiro passo foi marcar nos painéis as fissuras visíveis, para, em seguida, fotografá-las em alta resolução. A medição do comprimento total das fissuras foi feita com o auxílio de software para manipulação de imagens. A medição das fissuras ocorreu após 28 dias da execução dos revestimentos. A Figura 34 ilustra a marcação das fissuras visíveis em um painel típico.



Figura 33 Execução do revestimento: (a) umedecimento do chapisco; (b) aplicação da argamassa; (c) sarrafeamento.



Figura 34: Painel marcado para medição das fissuras.

3.4.2.3 Determinação da Resistência de Aderência à Tração

A determinação da resistência de aderência à tração dos revestimentos foi executada segundo preconiza a NBR 13528 (ABNT, 1995), aos 28 dias de cura, conforme ilustra a Figura 35. Foram realizados seis perfurações em cada painel, com espaçamento mínimo de 100mm entre elas. Para a execução das perfurações, cuja profundidade deveria atravessar o revestimento até atingir a alvenaria, foi utilizada uma perfuratriz de alta rotação dotada de serra copo, com diâmetro nominal de 100mm (não sendo diâmetro adotado pela norma). Neste estágio, tomou-se o cuidado de não localizar as perfurações sobre fissuras. Na seqüência, sobre as perfurações executadas, pastilhas metálicas, com diâmetro de 100 mm, foram fixadas com SIKADUR® 32, um adesivo estrutural à base de resina epóxi, de média viscosidade, bicomponente, e tempo de pega recomendado pelo fabricante de 24 horas.

Para o arrancamento, realizado 24 horas após a fixação das pastilhas, foi utilizado um aparelho de operação manual, mostrado na Figura 35b, no qual a carga é aplicada por meio do acionamento de uma bomba hidráulica. As características principais do equipamento são: capacidade máxima de 1500Kgf; resolução do display de 1,0 Kgf e função de armazenamento da última leitura.



(a)



(b)

Figura 35: Ensaio para determinação da resistência de aderência: (a) execução das perfurações; (b) etapa de arrancamento.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos através dos ensaios laboratoriais referente à caracterização dos materiais utilizados e ao desempenho das argamassas produzidas.

São apresentados resultados no estado fresco e no estado endurecido em corpos-de-prova prismáticos e em painéis.

Para cada uma das variáveis de resposta é apresentada a análise de variância (ANOVA) para a avaliação da significância estatística dos efeitos principais dos quatro fatores controlados: A (Areia de RCD/Areia Total), B (Cimento/Aglomerante Total), C (Areia de Cerâmica/Areia de RCD) e D (Consistência), bem como das interações entre estes fatores.

A análise estatística partiu da aplicação de um modelo quadrático, o qual foi sendo reduzido através da retirada dos termos não significativos, a fim de se obter o refinamento do modelo. Os termos não significativos, segundo a análise, são combinados no termo residual, o qual, portanto, está presente em todas as tabelas ANOVA apresentadas. Outra questão relevante é a manutenção da hierarquia do modelo, ou seja, termos que não são significativos, mas que apresentam interação significativa foram mantidos no modelo. O nível de significância utilizado no presente trabalho foi de 5%.

Complementando a análise estatística, são apresentados e discutidos os gráficos de efeitos principais para cada fator controlado e os gráficos de interação entre dois fatores. Posteriormente são apresentados gráficos de linhas de contorno (projeção das superfícies de resposta) para as interações significativas entre dois fatores.

Nos gráficos de linhas de contorno os valores das respostas variam conforme uma escala de coloração, partindo do vermelho como sendo o extremo de valor máximo e chegando ao azul para valores mínimos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

Após a preparação das areias de RCD, detalhada no item 3.3.1, a etapa da caracterização dos agregados foi feita de acordo com o item 3.3.2. Foram trabalhados três agregados (areia cerâmica, areia de argamassa e areia natural) e dois aglomerantes (cimento e cal) em diferentes composições.

A Figura 36 mostra as curvas granulométricas das areias utilizadas no presente estudo: Areia de Argamassa (AA), Areia Cerâmica (AC) e Areia Natural (AN). As três areias estão dentro da zona utilizável. As curvas granulométricas da AA e da AC, apesar de não estarem em sua totalidade dentro da zona ótima, encontram-se dentro da zona utilizável. No presente trabalho optou-se por utilizar as areias na forma em que elas foram obtidas após a moagem. Isto foi tratado como fator de ruído, pois se sabe que no canteiro da obra a granulometria do agregado é um fator que nem sempre pode ser controlado.

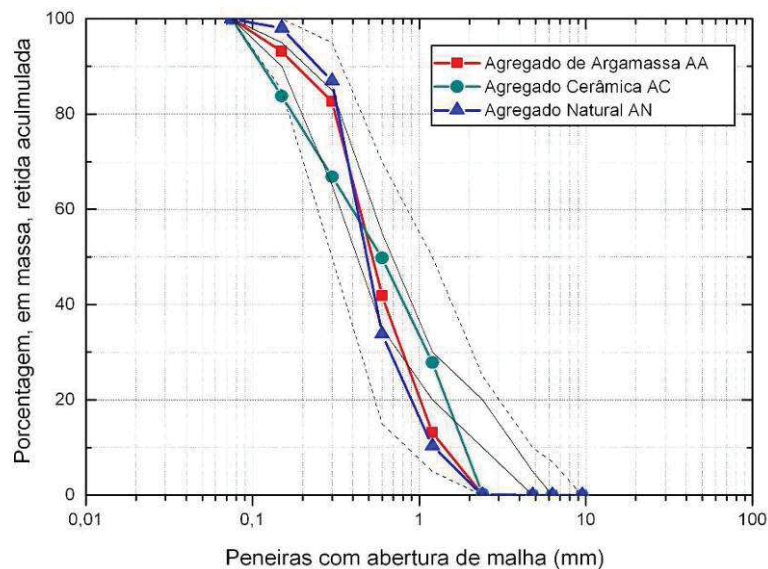


Figura 36: Curvas granulométricas das areias utilizadas (ABNT, 2003).

Foram ainda feitas as seguintes determinações: composição granulométrica, diâmetro máximo característico, massa específica, absorção de água, material pulverulento e massa unitária solta, conforme a Tabela 29.

Quanto à massa específica, o material de origem cerâmica (AC) apresentou valor de $2,38 \text{ g/cm}^3$, menor que os demais agregados AA e AN, os quais apresentaram respectivamente

2,51 g/cm³ e 2,60 g/cm³. Na Tabela 31, observa-se ainda que o agregado AC apresentou alta absorção de água, grande quantidade de material pulverulento e baixa massa unitária.

Tabela 29: Caracterização física dos materiais.

Abertura da peneira (mm)	Areia Argamassa (AA)		Areia Cerâmica (AC)		Areia Natural (AN)		Cimento	Cal
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)		
4,8	0	0	0	0	0	0		
2,4	0,2	0	0,1	0	0,1	0		
1,2	26,0	26	15,0	15	10,0	10		
0,6	22,0	48	27,0	42	24,0	34		
0,3	18,0	66	41,0	83	53,0	87		
0,15	17,0	83	10,0	93,0	11,0	98		
<0,15 *	17,00	100,00	7,0	100,00	2,0	100		
Diâmetro Máx. (mm)	2,4		2,4		2,4			
Módulo de finura	2,23		2,33		2,29			
Absorção (%)	8,33		11,52		0,59			
Mat. Pulverulento (%)	7,32		9,79		1,00			
Massa específica (g/cm³)	2,51		2,38		2,60		3,00	1,50
Massa Unit. Solta (g/cm³)	1,26		1,01		1,54		1,15	0,70

4.2. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

No estado fresco foram avaliadas as seguintes variáveis de resposta: teor de ar incorporado, conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005), e retenção de água, segundo a NBR 13277 (ABNT, 1995). Os dois ensaios foram realizados conforme preconiza o planejamento de experimentos descrito no item 3.2.5. Os 31 traços investigados estão apresentados na Tabela 30.

4.2.1. Teor de Ar Incorporado

O ensaio, descrito no item 3.4.1, foi realizado segundo a NBR 13278 (ABNT, 2005). Como era de se esperar, devido às características do presente estudo, os resultados obtidos apresentaram grande variabilidade. Os resultados para o teor de ar incorporado, apresentados na Tabela 30, variaram de 2,72 % (Traço 19) a 10,57 % (Traço 03).

A Tabela 31 apresenta a análise de variância (ANOVA) para o teor de ar incorporado, onde foram analisados os quatro fatores controlados: A (Areia de RCD/Areia Total), B

(Cimento/Aglomerante Total), C (Areia Cerâmica/Areia de RCD) e D (Consistência); e as interações entre os fatores. Na análise foi constatada apenas uma interação significativa entre o Fator B (Cimento/Aglomerante Total) e o Fator D (Consistência).

Tabela 30: Resultados dos ensaios de no estado fresco *

Ordem Padrão	Ordem de Execução	Areia de RCD/Areia Total	Cimento/Aglomerante e Total	Areia Cerâmica /Areia de RCD	Consistência (mm)	Areia Total/Aglomerante	Traço Unitário (Cim:Cal:Areia)	Teor de Ar Incorporado (%)	Retenção de Água (%)
1	12	0,375	0,400	0,375	250	3,0	1 : 1,5 : 7,5	8,52	91,93
2	22	0,625	0,400	0,375	250	3,0	1 : 1,5 : 7,5	6,64	92,73
3	24	0,375	0,600	0,375	250	3,0	1 : 0,7 : 5,0	10,57	90,91
4	20	0,625	0,600	0,375	250	3,0	1 : 0,7 : 5,0	9,01	91,03
5	14	0,375	0,400	0,625	250	3,0	1 : 1,5 : 7,5	6,60	91,18
6	17	0,625	0,400	0,625	250	3,0	1 : 1,5 : 7,5	5,81	92,49
7	13	0,375	0,600	0,625	250	3,0	1 : 0,7 : 5,0	8,69	89,33
8	10	0,625	0,600	0,625	250	3,0	1 : 0,7 : 5,0	5,92	90,80
9	26	0,375	0,400	0,375	270	3,0	1 : 1,5 : 7,5	8,79	91,45
10	11	0,625	0,400	0,375	270	3,0	1 : 1,5 : 7,5	9,13	90,27
11	19	0,375	0,600	0,375	270	3,0	1 : 0,7 : 5,0	9,70	89,45
12	25	0,625	0,600	0,375	270	3,0	1 : 0,7 : 5,0	7,22	90,96
13	7	0,375	0,400	0,625	270	3,0	1 : 1,5 : 7,5	7,84	89,74
14	4	0,625	0,400	0,625	270	3,0	1 : 1,5 : 7,5	5,73	93,11
15	18	0,375	0,600	0,625	270	3,0	1 : 0,7 : 5,0	6,47	88,45
16	5	0,625	0,600	0,625	270	3,0	1 : 0,7 : 5,0	7,56	92,00
17	29	0,250	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	10,24	91,00
18	28	0,750	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	5,80	91,01
19	3	0,500	0,300	0,500	260	3,0	1 : 2,3 : 10,0	2,72	89,51
20	6	0,500	0,700	0,500	260	3,0	1 : 0,4 : 4,3	9,46	88,12
21	27	0,500	0,500	0,250	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	9,28	91,63
22	21	0,500	0,500	0,750	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	6,04	94,07
23	8	0,500	0,500	0,500	240	3,0	1 : 1,0 : 6,0	7,96	90,35
24	15	0,500	0,500	0,500	280	3,0	1 : 1,0 : 6,0	6,63	92,91
25	1	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	8,35	90,86
26	30	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	7,15	89,86
27	16	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	6,77	90,45
28	9	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	6,78	90,49
29	23	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	7,46	90,20
30	2	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	8,29	90,10
31	31	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	8,64	89,41

* A quantidade de água está apresentada nos Anexos C e D.

Os gráficos a seguir apresentam as médias dos resultados obtidos no ensaio de teor de ar incorporado e indicam os efeitos de cada fator controlado. Ao analisar as Figuras 37 e 39, observa-se que os aumentos das quantidades de RCD (Fator A) e de material cerâmico (Fator C) presentes no RCD apresentaram efeitos semelhantes, resultando em uma diminuição no teor de ar incorporado.

Tabela 31: ANOVA para o teor de ar incorporado.

Dados analisados	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrados	Valor de F	p-valor Prob > F	Significância
Modelo	42.13	5	8.43	13.80	< 0.0001	Significativo
A-Areia de RCD/Areia Total	15.11	1	15,11	24.74	0.0001	Significativo
B-Cimento/Aglomerante Total	4,51	1	4,51	7.38	0.0120	Significativo
C-Areia Cerâmica/Areia de RCD	19,15	1	19,15	31.37	< 0.0001	Significativo
D-Consistência	0,16	1	0,16	0,27	0.6097	Não significativo
BD	3.20	1	3.20	5.25	0.0310	Significativo
Residual	14.65	24	0.61			
Falta de ajuste	10.96	18	0.61	0.99	0.5516	Não significativo
Erro Puro	3.70	6	0.62			
Total	56.79	29				

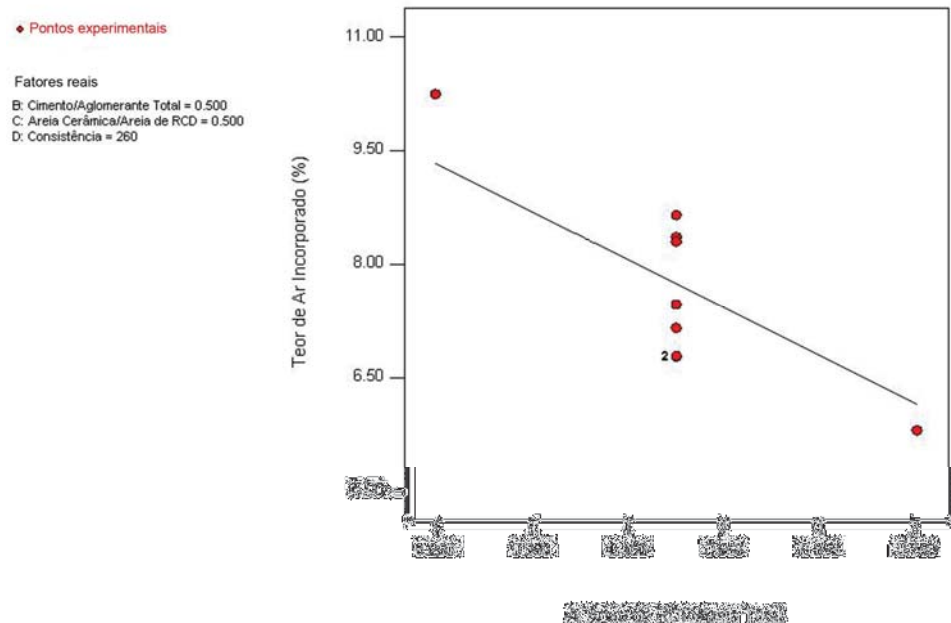


Figura 37: Efeito do fator Areia de RCD/Areia Total sobre o teor de ar incorporado

Por outro lado, analisando a Figura 38, é possível observar que o incremento da relação Cimento/Aglomerante Total (Fator B), de 0,3 para 0,7, acarretou aumento no teor de ar incorporado.

Na Figura 40, observa-se que a variação do índice de consistência (Fator D), entre os níveis 250 mm e 270 mm, não teve influência sobre o teor de ar incorporado para os traços analisados, corroborando a análise de variância.

Entretanto, analisando a interação entre os fatores estudados verificou-se, segundo a análise de variância, que a interação entre a quantidade de cimento (Fator B) e a consistência (Fator D) foi a única significativa para a resposta teor de ar incorporado. Na Figura 41 é apresentado o gráfico de interação entre estes fatores.

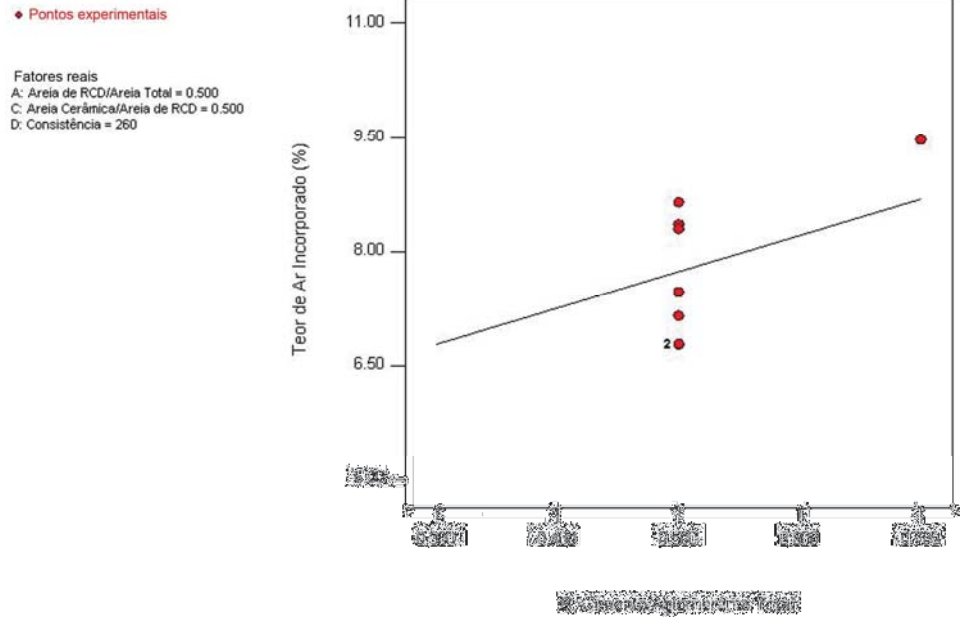


Figura 38: Efeito do fator Cimento/Aglomerante Total sobre o teor de ar incorporado.

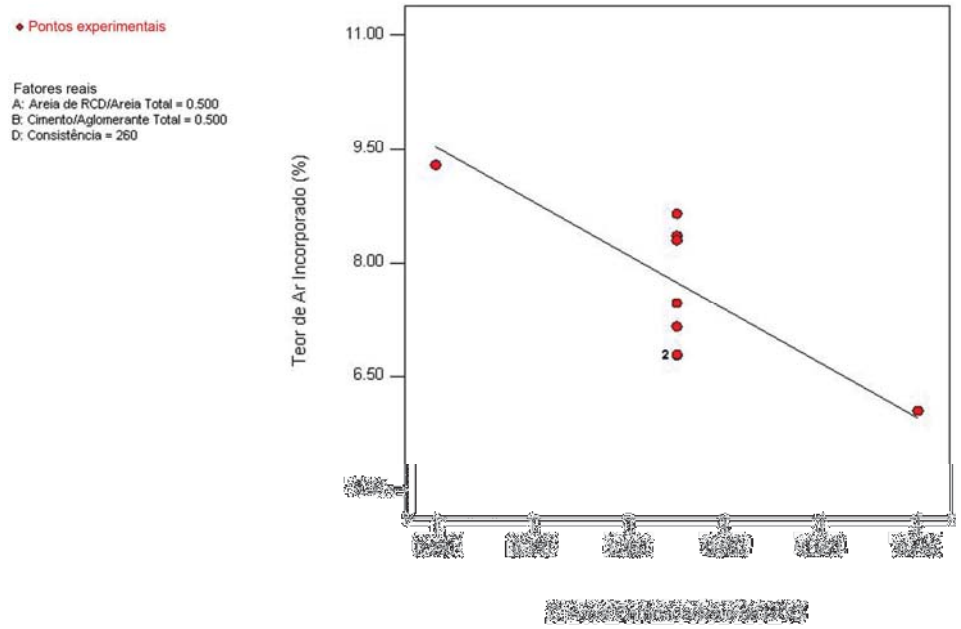


Figura 39: Efeito do fator Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre o teor de ar incorporado.

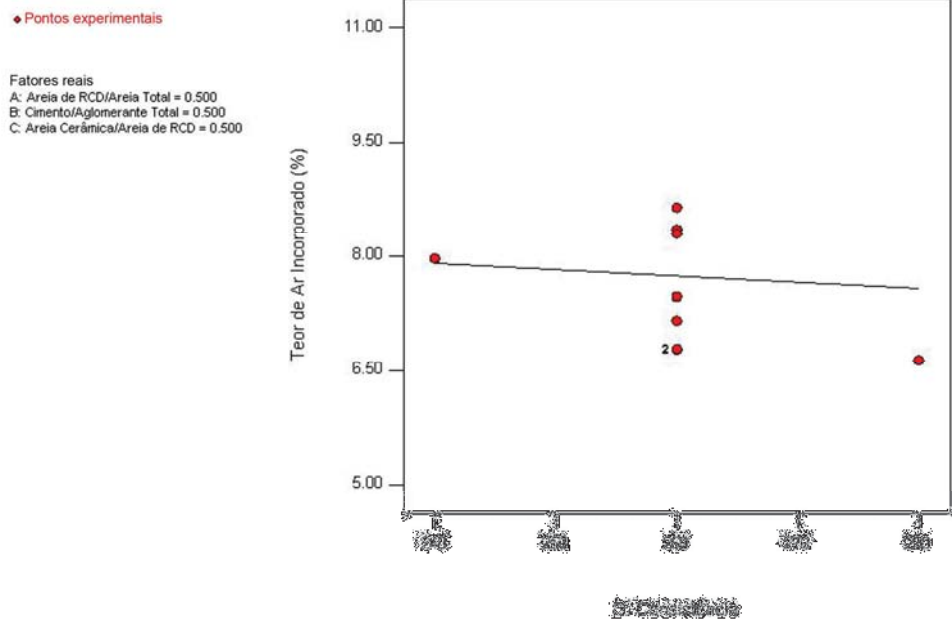


Figura 40: Efeito do fator Consistência sobre o teor de ar incorporado.

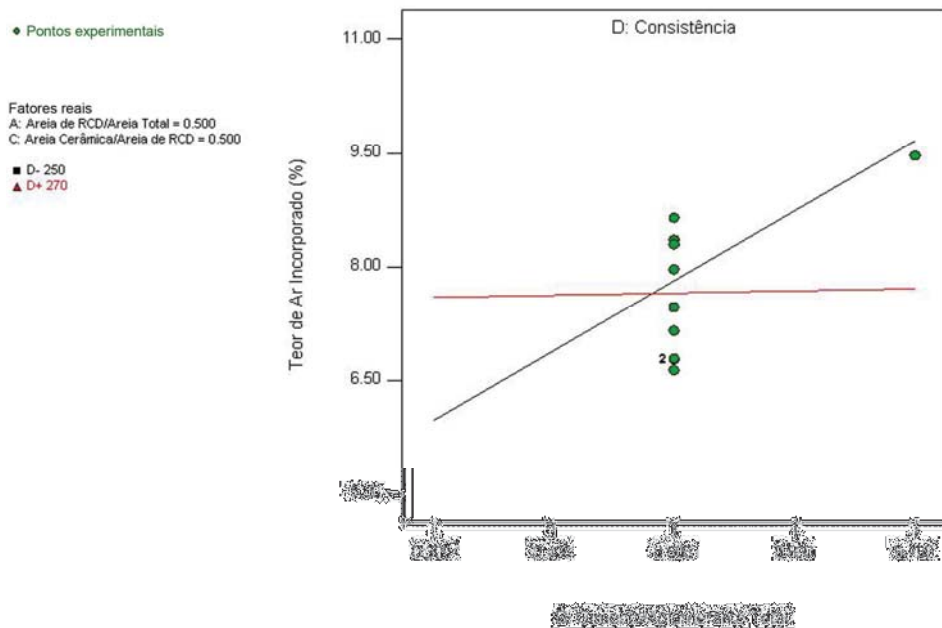


Figura 41: Efeito da interação entre Cimento/Aglomerante total e Consistência sobre o teor de ar incorporado

A Figura 41 demonstra que para a consistência de 270 mm, independente da quantidade de cimento, variando o nível de 0,3 para 0,7, o teor de ar incorporado se manteve constante. Já para a consistência de 250 mm, o teor de ar incorporado é influenciado pela variação da quantidade de cimento.

O modelo de regressão múltipla obtido para a variável de resposta teor de ar incorporado (*TAI*) é apresentado a seguir:

$$TAI = -43,9 - (6,3.A) + (121,1.B) - (7,1.C) + (0,2.D) - (4,4..B.C) \quad (R^2 = 0,72) \quad \text{Eq. (2)}$$

Na Figura 42 é apresentado o gráfico de linhas de contorno resultante do modelo de regressão para a interação entre quantidade de cimento (Fator B) e consistência (Fator D) e a resposta teor de ar incorporado. Esta figura mostra o espaço experimental analisado e permite a estimativa da resposta teor de ar incorporado em pontos diferentes daqueles que foram medidos experimentalmente no presente trabalho.

Para o nível mínimo da consistência (240 mm), à medida que aumenta a quantidade de cimento, aumenta o teor de ar incorporado. Por exemplo, para a quantidade máxima de cimento (nível 0,70) obtêm-se valores acima de 10,47% de teor de ar incorporado. Já para quantidades mínimas de cimento (nível 0,3), se obtêm valores inferiores a 5,86%. Da mesma forma, conforme aumenta a consistência (280 mm) o teor de ar incorporado aumenta para valores superiores a 8,16%. Entretanto, se os dois fatores (consistência e quantidade de cimento) encontram-se simultaneamente em seus níveis máximos, ocorre uma diminuição no teor de ar incorporado.

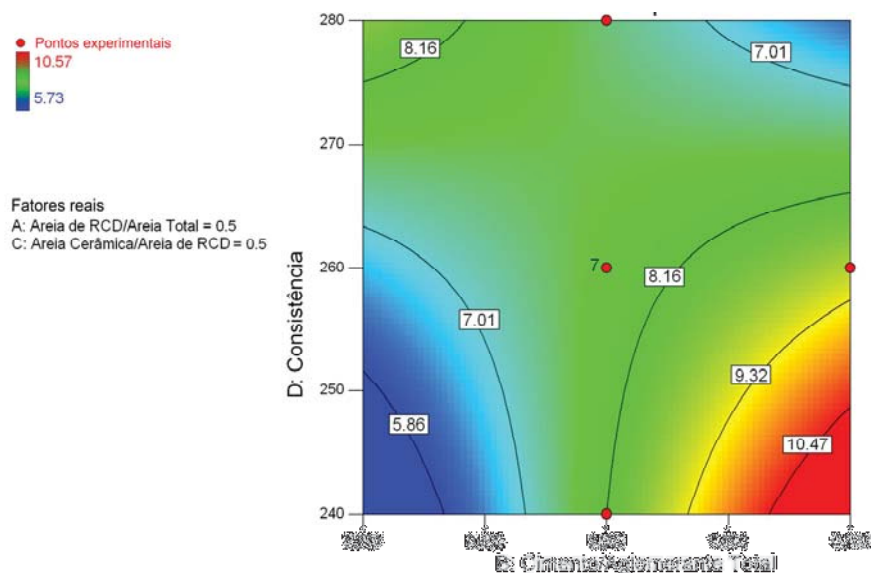


Figura 42: Linhas de contorno para Cimento/Aglomerante Total, Consistência e teor de ar incorporado.

Com base na ANOVA e nos gráficos de linhas de contorno, observa-se que o teor de ar incorporado é influenciado principalmente pela variação da quantidade de água e pela quantidade de cimento em relação ao aglomerante total.

Esta influência da quantidade de cimento sobre o teor de ar incorporado também foi observada por Calhau et al. (1999) e Ishikawa (2003), conforme mostra a Tabela 32.

Tabela 32: Influência do teor de cimento no teor de ar incorporado.

Referência	Traço em Volume	Cimento/ Aglomerante total	Teor de ar Incorporado (%)
Calhau et al (1999)	1:2:9 (cimento:cal:A.N)	0,30	2,10
ishikawa (2003)	1:0,16:3,12 (cimento:cal:A.N)	0,86	9,86
	1:0,16:3,12 (cimento:cal:A.N)	0,86	10,05

A incorporação do RCD, tanto no que diz respeito à quantidade total e ao teor de material cerâmico, também influenciou significativamente o teor de ar incorporado. Quanto maior quantidade de cerâmica na areia de RCD e quanto maior a quantidade total de RCD, menor o teor de ar incorporado. Esta diminuição do teor de ar incorporado pode estar relacionada à presença de finos no material cerâmico, conforme foi observado por Alves (2002).

4.2.2 Retenção de Água

Os resultados do ensaio de retenção de água, realizado conforme o item 3.4.2, são mostrados na Tabela 30. O menor resultado de retenção de água foi de 88,12% (Traço 20) e o maior foi de 94,07% (Traço 22). De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), os agregados são classificados como normais na faixa de 80% a 90% de retenção de água, ou de alta retenção, para valores superiores a 90%.

A Tabela 33 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a retenção de água, que avaliou os efeitos principais dos quatro fatores estudados A (Areia de RCD/Areia total), B (Cimento/Aglomerante Total), C (Areia de Cerâmica/Areia total) e D (Consistência), bem como as interações entre estes fatores. Além dos efeitos dos fatores A, B e C, foram avaliados como significativos a interação entre o Fator A e o Fator C e o efeito quadrático do Fator C.

A Figura 43, referente à quantidade de RCD (Fator A) nas argamassas, mostra que ao aumentar a concentração deste fator de 0,25 para 0,75 ocorre o aumento da retenção de água.

A Figura 44 indica que ao aumentar a quantidade de cimento (Fator B) de seu nível baixo (0,3) para o seu nível alto (0,7), as argamassas apresentaram diminuição da retenção de água.

Esta observação corrobora o estudo elaborado por John (2003), no qual argamassas com maiores teores de aglomerante apresentaram maiores retenções de água.

Tabela 33: Resultado da ANOVA para a retenção de água.

Dados analisados	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrados	Valor de F	p-valor Prob > F	Significância
Model	28,50	5	5,70	5,38	0,0017	Significativo
A-Areia de RCD/Areia Total	5,01	1	5,01	4,73	0,0393	Significativo
B-Cimento/Aglomerante Total	6,77	1	6,77	6,39	0,0182	Significativo
C-Areia Cerâmica/Areia de RCD	0,44	1	0,44	0,42	0,5252	Não Significativo
AC	4,46	1	4,46	4,21	0,0508	Significativo
C ²	11,83	1	11,83	11,16	0,0026	Significativo
Residual	26,50	25	1,06			
Falta de ajuste	25,17	19	1,32	5,97	0,0176	Significativo
Erro Puro	1,33	6	0,22			
Total	55,02	30				

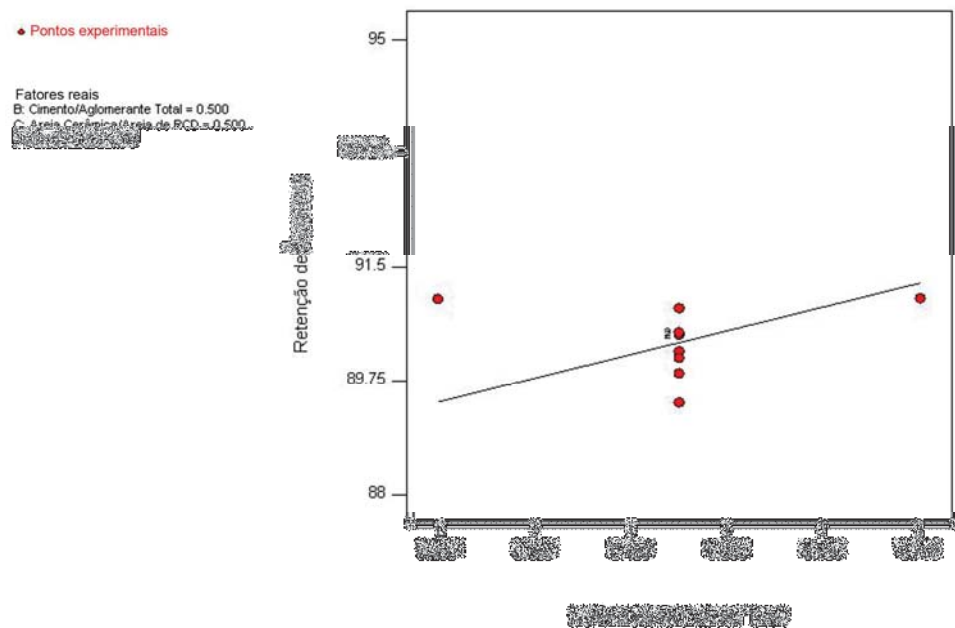


Figura 43: Efeito do fator Areia de RCD/Areia Total sobre a retenção de água.

Pode-se observar na Figura 45 que, em relação à quantidade de material cerâmico (Fator C), as maiores retenções de água foram verificadas para os seus níveis extremos (0,25 e 0,75), se comparados ao seu nível intermediário (0,5).

Segundo a análise de variância, foi avaliada como significativa a interação entre as quantidades de RCD (Fator A) e de material cerâmico (Fator C) em relação à resposta retenção de água. A Figura 46 apresenta o gráfico de interação entre os fatores A e C.

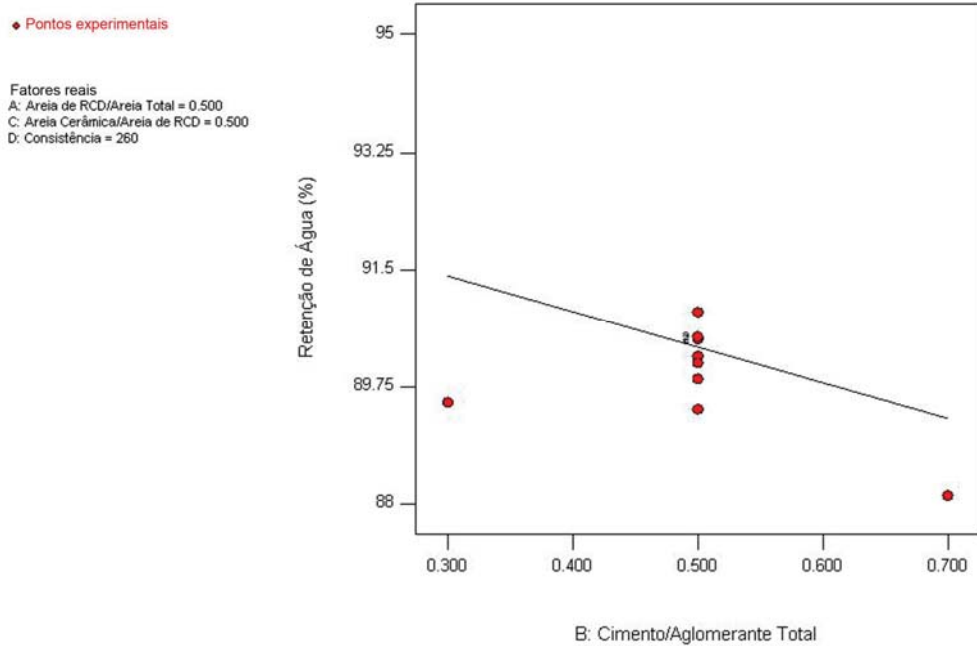


Figura 44: Efeito do fator Cimento/Aglomerante Total sobre a retenção de água.

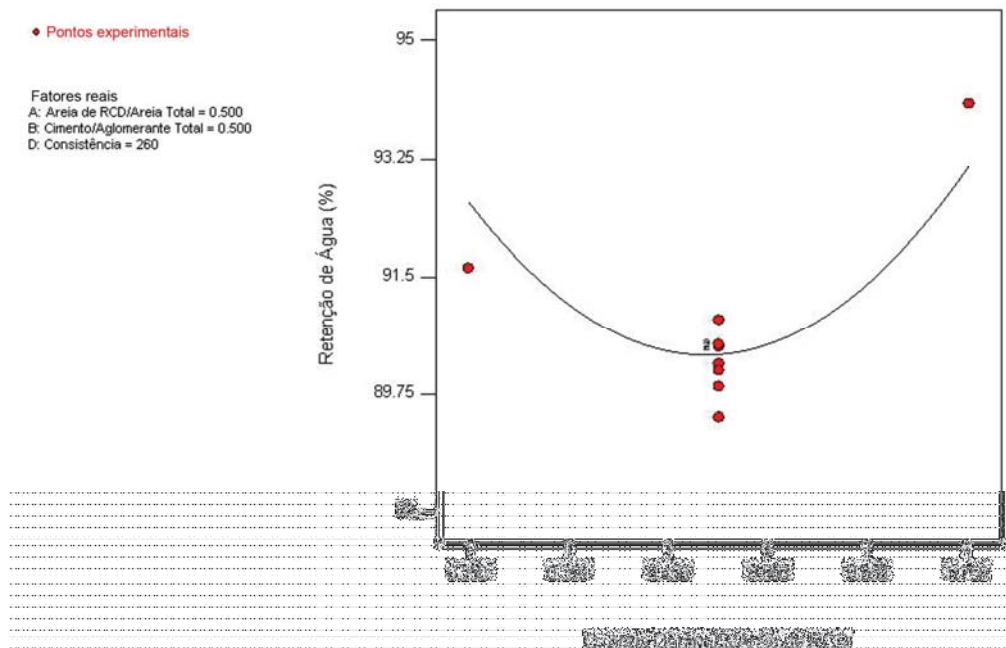


Figura 45: Efeito do fator Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre a retenção de água.

Ao observar a Figura 46, é possível verificar que a quantidade de material cerâmico (Fator C) em seu nível 0,375, independente da quantidade de RCD (Fator A), resulta em uma retenção de água praticamente constante. Porém, para maiores quantidades de material

cerâmico, à medida que aumenta o teor de areia de RCD, há um aumento na retenção de água, demonstrando a influência do material cerâmico.

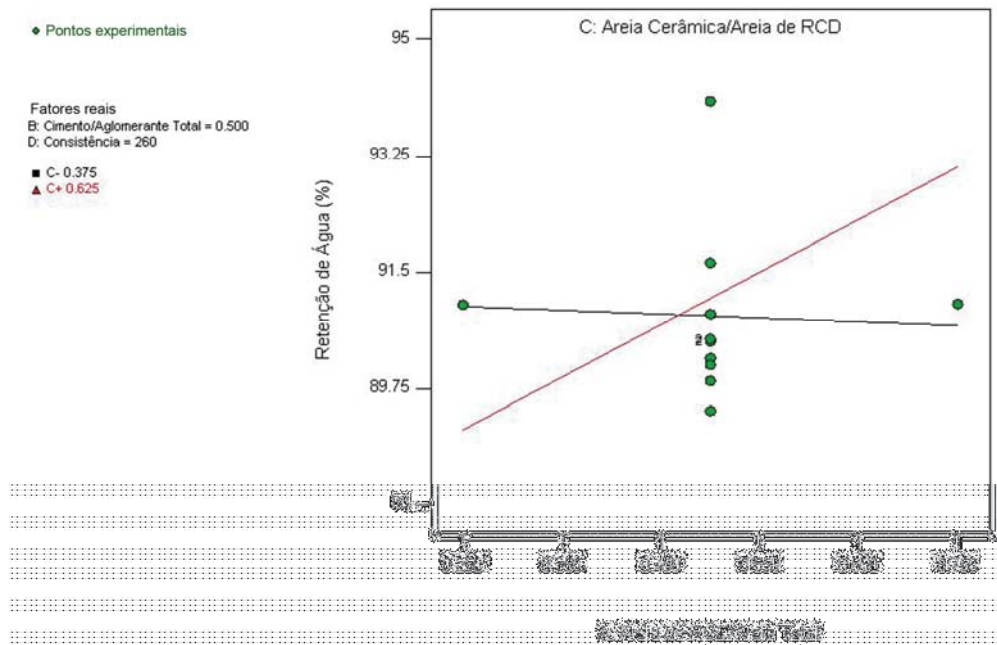


Figura 46: Efeito da interação entre Areia de RCD/Areia Total e Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre a retenção de água.

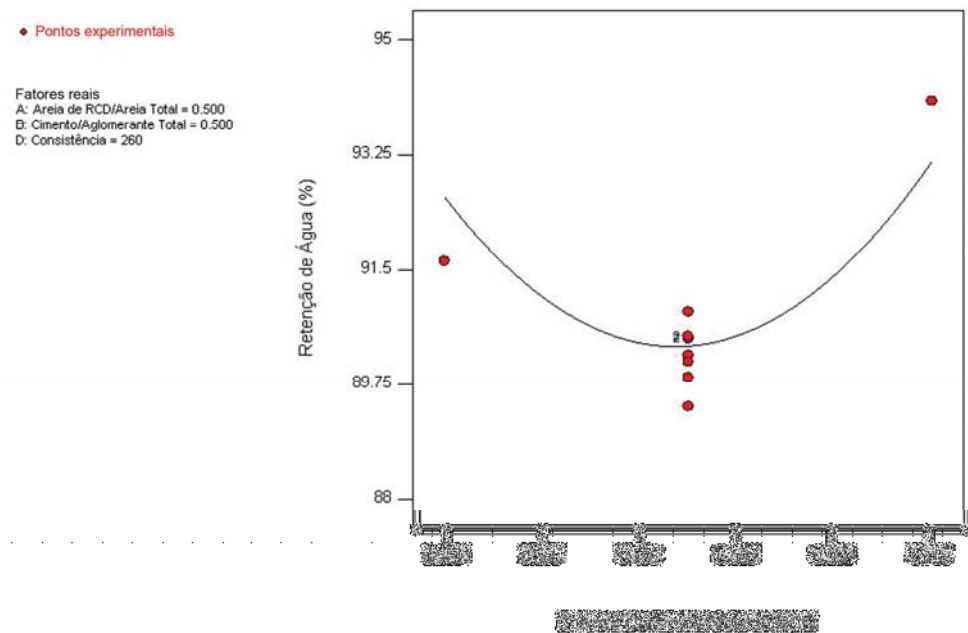


Figura 47: Efeito da interação entre Areia de RCD/Areia Total e Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre a retenção de água.

O modelo de regressão múltipla obtido para a variável de resposta retenção de água (RA) é apresentado na Equação 3.

$$RA = +109,2 - (13,2.A) - (5,3.B) - (56,4.C) + (33,8.A.C) + (40,6.C^2) \quad (R^2 = 0,51) \quad \text{Eq. (3)}$$

A Figura 48 apresenta as linhas de contorno referentes à interação entre quantidade de areia de RCD (Fator A) e quantidade de material cerâmico (Fator C), para a resposta retenção de água. Este modo de representação dos resultados é importante para demonstrar o comportamento em toda amplitude do espaço experimental.

Para as quantidades de material cerâmico (Fator C) e RCD total (Fator A) em seus níveis mínimos (0,25 para ambos os fatores), a retenção de água é superior a 94,26%. Conforme aumenta o teor de RCD (Fator A) para 0,50, a retenção de água diminui para algo em torno de 91%. Contudo, aumentando a quantidade de RCD para 0,75 observa-se um aumento na retenção de água para valores superiores a 92,79%.

Para uma quantidade de areia de RCD (Fator A) no intervalo de 0,25 a 0,50, à medida que aumenta a quantidade de material cerâmico (Fator C), a retenção de água diminui para valores inferiores a 91,33 %.

Quando se tem os níveis de ambos os fatores acima de 0,50, a retenção de água é superior a 92,79%.

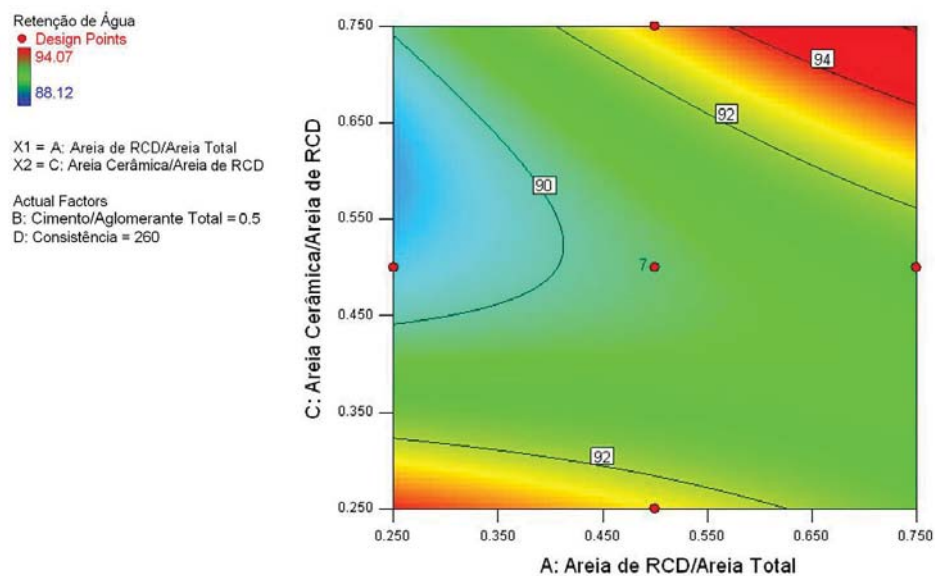


Figura 48: Linhas de contorno para Areia de RCD/Areia Total, Areia Cerâmica/Areia de RCD e retenção de água.

Analisando as linhas de contorno e a ANOVA observa-se que, para as argamassas analisadas, a retenção de água foi influenciada principalmente pela quantidade de cimento. Analisando-se isoladamente a incorporação de areia de RCD e a quantidade de material cerâmico, conclui-se que o efeito destes dois fatores não foi significativo sobre a retenção de água. No entanto, a interação entre estes dois fatores tem influência na retenção de água, conforme se observa no gráfico apresentado na Figura 48.

De acordo com o gráfico de interação da Figura 46, à medida que se aumentam simultaneamente a quantidade de cerâmica e a quantidade de areia de RCD, ocorre um acréscimo no valor de retenção de água, chegando a 97,18% para os níveis máximos destes fatores, o que seria considerado um valor de alta retenção de água, segundo a NBR 13281 (ABNT, 1995). Estes resultados podem estar relacionados ao fato de que com maiores quantidades de RCD, e conseqüentemente maior quantidade de finos, a água da mistura é parcialmente combinada com os finos e aprisionada no interior dos grãos cerâmicos, resultando num aumento da capacidade de retenção de água.

4.3 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios no estado endurecido foram realizados em corpos-de-prova prismáticos (resistência à compressão e resistência à tração na flexão) e em painéis (resistência de aderência à tração e comprimento de fissuras). A metodologia utilizada foi descrita no item 3.5.

4.3.1 Ensaios em Corpos-de-prova Prismáticos

Nos ensaios em corpos-de-prova prismáticos, com dimensões 40x40x160 mm, as argamassas foram avaliadas quanto à resistência à tração na flexão e à compressão conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005). Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 34.

4.3.1.1 Resistência à Tração na Flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos foi executado conforme descrito no item 3.4.4., em acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005). Os resultados estão apresentados na Tabela 34 e variaram de 0,88 MPa (Traço 19) a 4,75 MPa (Traço 20).

Na análise de variância para a resistência à tração na flexão, foram verificados como significativos os fatores B (Cimento/Aglomerante Total) e D (Consistência), bem como a interação entre estes dois fatores. Segundo a ANOVA, o Fator B apresenta o maior efeito sobre a resistência à tração na flexão, seguido da interação entre o Fator B e o Fator D. O resultado da análise pode ser observado na Tabela 35.

Tabela 34: Ensaio em corpos-de-prova prismáticos.

Ordemadão	Ordem de Execução	Areia de RCD / Areia Total	Cimento/ Aglomerante Total	% de Cerâmica na Areia de RCD	Consistência (mm)	Areia Total/ Aglomerante	Traço Unitário (Cim:Cal:Areia)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Resistência à Compressão Simples (MPa)	Fator A/C	Consumo de cimento (kg/m ³)	Quantidade de Água (g)
1	12	0,375	0,400	0,375	250	3,0	1 : 1,5 : 7,5	1,93	5,34	2,05	145	310,17
2	22	0,625	0,400	0,375	250	3,0	1 : 1,5 : 7,5	1,52	5,76	2,35	140	391,07
3	24	0,375	0,600	0,375	250	3,0	1 : 0,7 : 5,0	3,58	10,20	1,24	225	257,57
4	20	0,625	0,600	0,375	250	3,0	1 : 0,7 : 5,0	2,78	10,34	1,45	215	344,67
5	14	0,375	0,400	0,625	250	3,0	1 : 1,5 : 7,5	1,81	6,55	2,25	143	364,47
6	17	0,625	0,400	0,625	250	3,0	1 : 1,5 : 7,5	1,88	7,44	2,51	137	434,57
7	13	0,375	0,600	0,625	250	3,0	1 : 0,7 : 5,0	3,90	9,28	1,37	222	309,17
8	10	0,625	0,600	0,625	250	3,0	1 : 0,7 : 5,0	3,46	9,81	1,63	213	414,87
9	26	0,375	0,400	0,375	270	3,0	1 : 1,5 : 7,5	1,79	5,53	2,08	144	316,37
10	11	0,625	0,400	0,375	270	3,0	1 : 1,5 : 7,5	2,23	6,82	2,22	139	355,07
11	19	0,375	0,600	0,375	270	3,0	1 : 0,7 : 5,0	2,94	10,39	1,34	221	300,37
12	25	0,625	0,600	0,375	270	3,0	1 : 0,7 : 5,0	2,78	9,63	1,52	216	371,90
13	7	0,375	0,400	0,625	270	3,0	1 : 1,5 : 7,5	2,14	5,38	2,25	141	364,07
14	4	0,625	0,400	0,625	270	3,0	1 : 1,5 : 7,5	1,71	5,18	2,64	135	469,77
15	18	0,375	0,600	0,625	270	3,0	1 : 0,7 : 5,0	2,26	7,76	1,54	218	378,57
16	5	0,625	0,600	0,625	270	3,0	1 : 0,7 : 5,0	2,57	8,23	1,63	209	417,67
17	29	0,250	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	2,26	7,30	1,48	185	255,07
18	28	0,750	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	2,10	7,74	2,07	171	453,67
19	3	0,500	0,300	0,500	260	3,0	1 : 2,3 : 10,0	0,88	4,11	3,41	115	447,07
20	6	0,500	0,700	0,500	260	3,0	1 : 0,4 : 4,3	4,75	10,70	1,20	257	320,77
21	27	0,500	0,500	0,250	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	2,48	7,66	1,63	181	304,67
22	21	0,500	0,500	0,750	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	2,03	8,54	1,97	174	421,17
23	8	0,500	0,500	0,500	240	3,0	1 : 1,0 : 6,0	3,08	7,33	1,77	179	352,77
24	15	0,500	0,500	0,500	280	3,0	1 : 1,0 : 6,0	2,23	6,48	1,86	178	382,57
25	1	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	2,47	6,66	1,82	176	371,47
26	30	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	2,10	9,06	1,73	182	341,27
27	16	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	2,38	8,39	1,82	179	371,67
28	9	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	2,82	7,95	1,80	180	364,27
29	23	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	1,98	7,44	1,86	177	383,77
30	2	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	2,40	7,24	1,78	178	358,17
31	31	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	2,28	8,13	1,72	179	335,57

Os gráficos de efeitos principais para os fatores controlados em relação à resistência à tração na flexão são apresentados nas Figuras 49 e 50. Ao se aumentar a quantidade relativa de cimento (Fator B) de 0,3 para 0,7, ocorre um aumento na resistência à tração na flexão. A inclinação acentuada da linha do gráfico indica uma influência considerável deste fator.

Tabela 35: Resultado da ANOVA para resistência à tração na flexão.

Dados analisados	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrados	Valor de F	p-valor Prob > F	Significância
Modelo	9,18	3	3,06	35,49	< 0,0001	Significativo
B-Cimento/Aglomerante Total	7,51	1	7,51	87,17	< 0,0001	Significativo
D-Consistência	0,71	1	0,71	8,28	0,0418	Significativo
BD	0,95	1	0,95	11,03	0,0027	Significativo
Residual	2,24	26	0,086			
Falta de ajuste	1,80	20	0,090	1,22	0,4333	Não Significativo
Erro Puro	0,44	6	0,074			
Total	11,42	29				

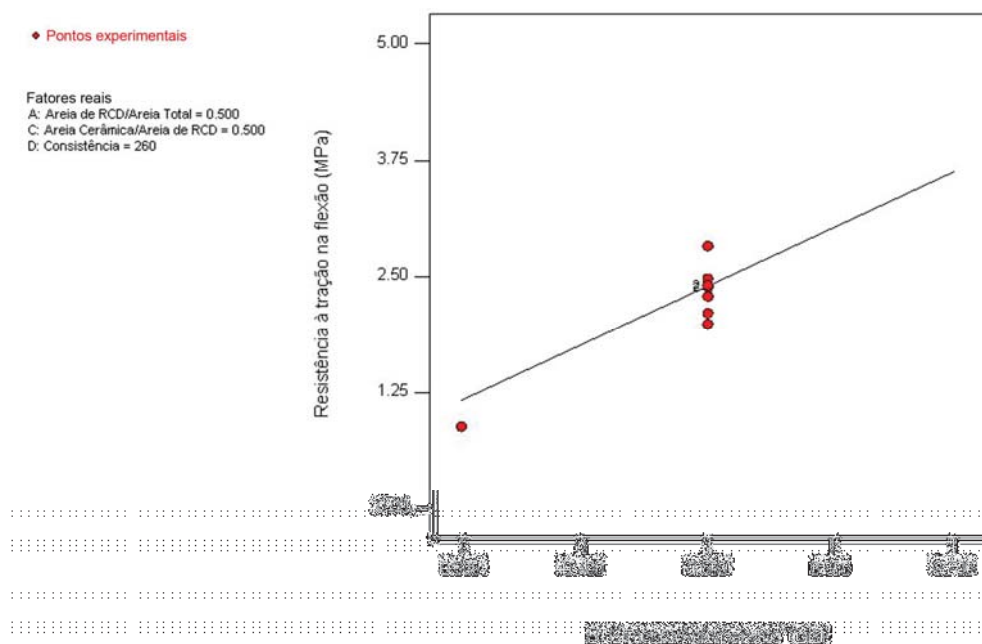


Figura 49: Efeitos do fator Cimento/Aglomerante Total sobre a resistência à tração na flexão.

O aumento no índice de consistência (Fator D), de 240 mm para 280mm, conforme mostrado na Figura 50, acarretou a diminuição da resistência à tração na flexão.

Segundo a análise de variância e conforme ilustra a Figura 51, foi verificada uma interação significativa entre a quantidade de cimento (Fator B) e a consistência (Fator D) para a resposta resistência à tração na flexão.

Para a consistência em seu nível 250 mm, a variação da quantidade de cimento causa maior variação na resistência à tração na flexão, se comparada ao efeito da quantidade de cimento para a consistência de 270 mm. A bibliografia explica esse comportamento pela quantidade de água necessária para produzir consistências mais elevadas, o que acaba alterando a resistência à tração na flexão.

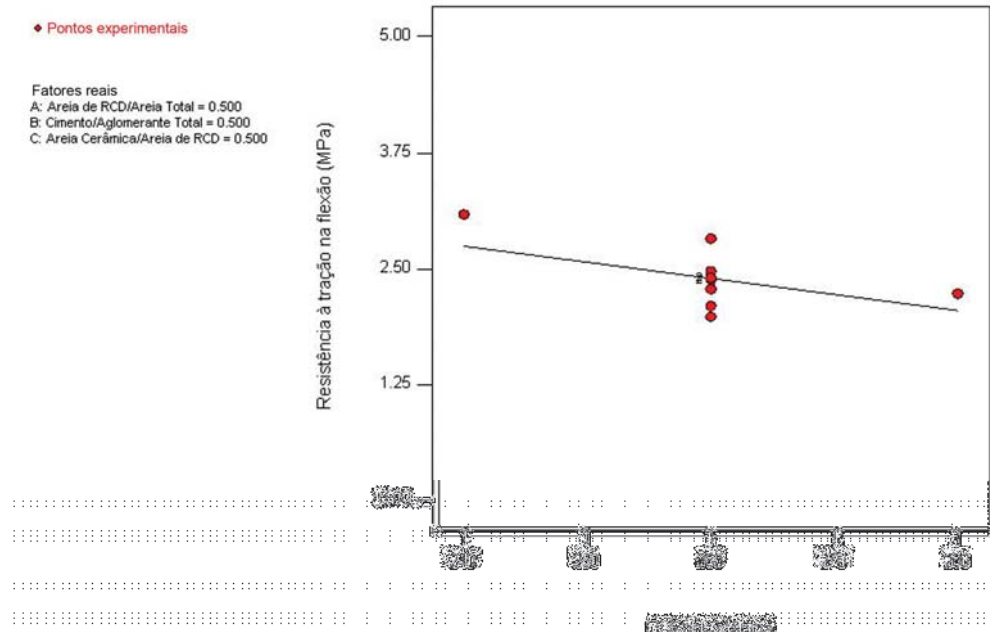


Figura 50: Efeito do fator Consistência sobre a resistência à tração na flexão.

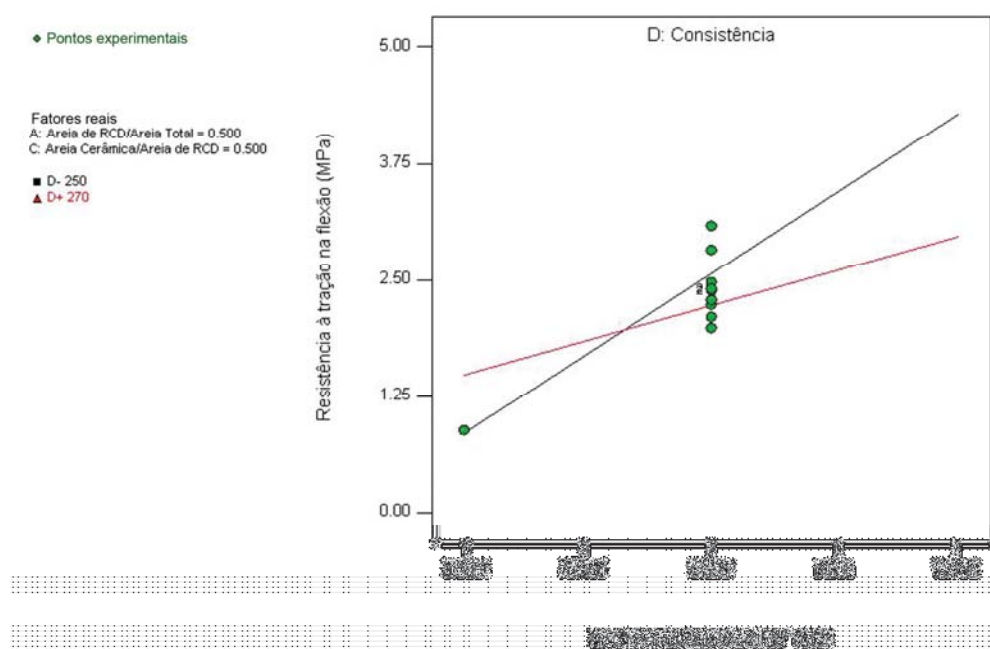


Figura 51: Efeito da interação entre Cimento/Aglomerante Total e Consistência sobre a resistência à tração na flexão.

O modelo de regressão múltipla obtido para a variável de resposta resistência à tração na flexão (f_t) é apresentado na Equação 4.

$$f_t = -27,9 + (69,5.B) + (0,10.D) - (0,24.B.D) \quad (R^2 = 0,80) \quad \text{Eq. (4)}$$

A Figura 52 apresenta as linhas de contorno referentes à interação entre quantidade de cimento (Fator B) e consistência (Fator D) e a resposta resistência à tração na flexão.

Para a consistência (Fator D) em seu nível 240 mm e a quantidade de cimento (Fator B) em seu nível 0,30 se obtém resistências à tração na flexão inferiores a 1,19 MPa. Ao aumentar a quantidade de cimento, observa-se o aumento da resistência à tração na flexão para valores superiores a 4,38 MPa.

Este comportamento, porém, se altera conforme aumenta o nível da consistência (Fator D). A partir do nível 260 mm diminui a influência da quantidade de cimento, conseqüentemente diminuindo os valores de resistência à tração na flexão.

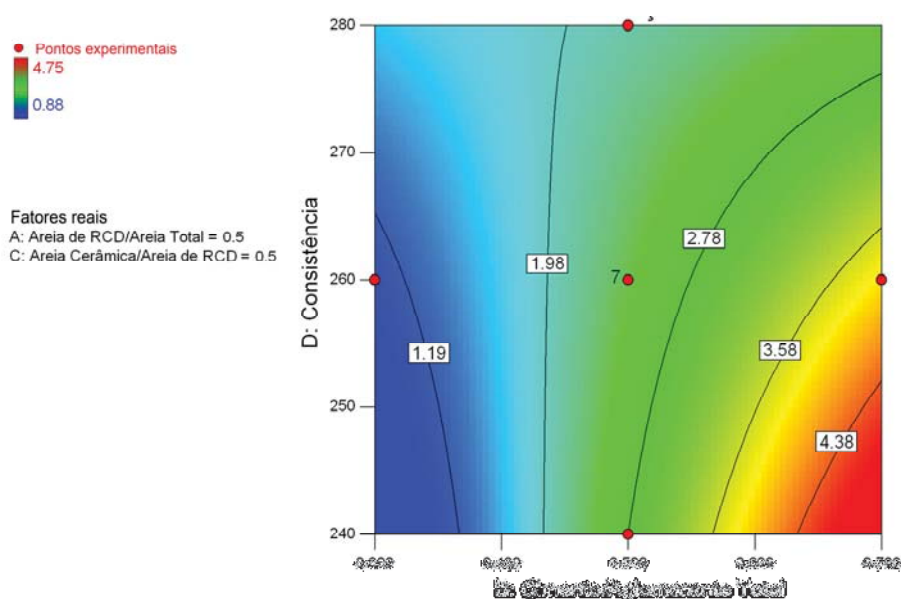


Figura 52: Linhas de contorno para Cimento/Aglomerante Total, Consistência e resistência à tração na flexão.

Com base na ANOVA e nos gráficos de linhas de contorno, observou-se que a quantidade de cimento (Fator B) apresentou influencia preponderante na resistência tração na flexão.

4.3.1.2 Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005), conforme descrito no item 3.4.4.2. Os valores de resistência à compressão obtidos variaram de 4,11 MPa (Traço 19) a 10,70 MPa (Traço 20).

A Tabela 36 apresenta a análise de variância para a resistência à compressão. Foram avaliados como significativos os fatores: B (Cimento/Aglomerante Total), C (Areia Cerâmica/Areia de RCD) e D (Consistência), bem como e as interações entre estes fatores. Segundo a ANOVA, o Fator B apresentou o maior efeito sobre a resistência à compressão.

Tabela 36: Resultado da ANOVA para resistência à compressão.

Dados analisados	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrados	Valor de F	p-valor Prob > F	Significância
Model	78,06	5	15,61	40,62	< 0,0001	Significativo
B-Cimento/Aglomerante Total	69,43	1	69,43	180,66	< 0,0001	Significativo
C-Areia Cerâmica/Areia de RCD	0,29	1	0,29	0,74	0,3965	Não Significativo
D-Consistência	2,34	1	2,34	6,10	0,0207	Significativo
BC	2,71	1	2,71	7,04	0,0136	Significativo
CD	3,29	1	3,29	8,57	0,0072	Significativo
Residual	9,61	25	0,38			
Falta de ajuste	5,81	19	0,31	0,48	0,8947	Não significativo
Erro Puro	3,80	6	0,63			
Total	87,67	30				

A análise dos efeitos principais de cada um dos fatores controlados no presente estudo sobre a resistência à compressão é apresentada a seguir.

Na Figura 53, é possível observar a forte influência da quantidade de cimento na resistência à compressão nas argamassas. À medida que aumenta o teor deste fator aumenta a resistência à compressão.

Segundo a Tabela 37, e comparando com os trabalhos realizados por Calhau et al (1999) e Bavaresco (2001), é possível concluir que os valores elevados de resistência à compressão estão associados às quantidades de RCD e de cimento presentes nas argamassas.

Tabela 37: Valores de resistência à compressão encontrados na literatura.

Autor	Traço em volume	Cimento/ Agglomerante total	Resistência à compressão (MPa)
Calhau et al (1999)	1:2:9 (Cim:Cal:A.N)	0,30	1,7
Bavaresco (2001)	1:2:9 (Cim:Cal: A.N:AC)*	0,30	3,47
	1:1:6 (Cim:Cal: A.N:AC)*	0,50	7,66

* 50% Areia na natura e 50% de areia cerâmica.

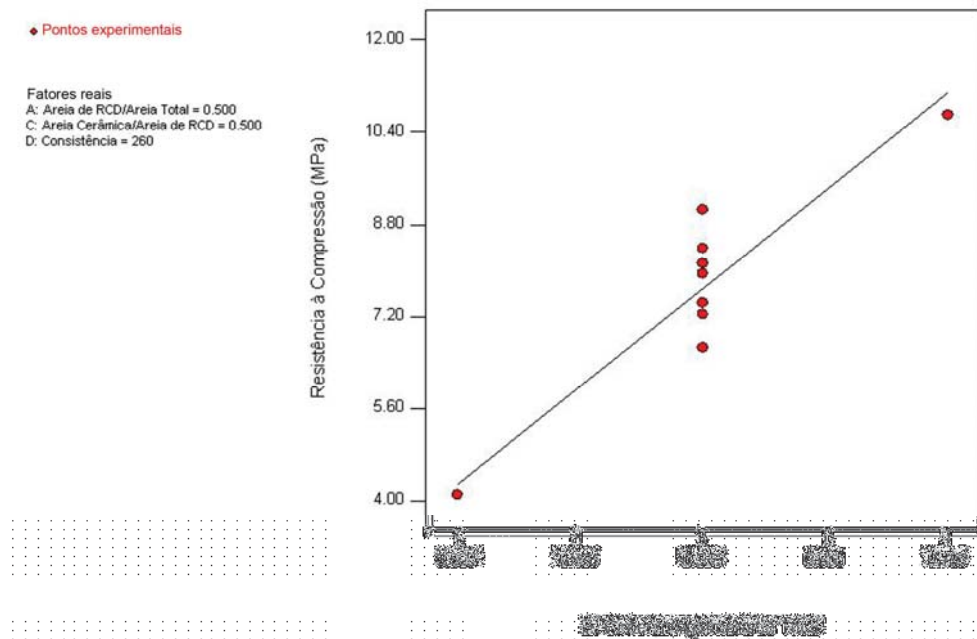


Figura 53: Efeito do fator Cimento/Aglomerante Total sobre a resistência à compressão.

O aumento da quantidade de material cerâmico (Fator C) do nível 0,25 para 0,75, como pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 54, resultou em uma diminuição pouco expressiva da resistência a compressão.

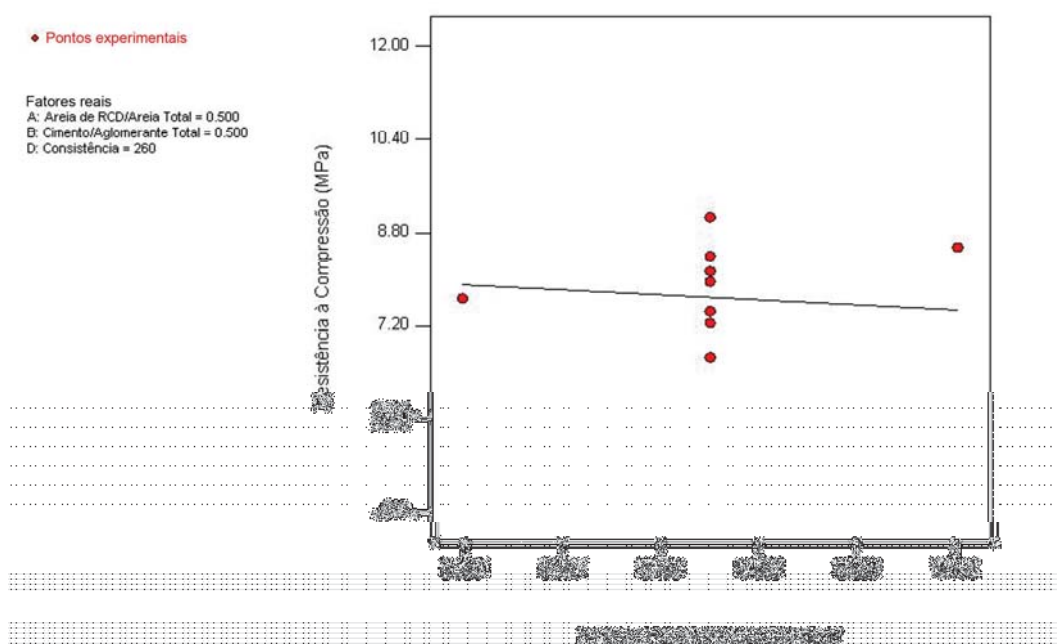


Figura 54: Efeito do fator Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre a resistência à compressão.

A Figura 55 apresenta a influência da consistência (Fator D) sobre a resistência à compressão. Foi observado que ao variar a consistência de 240 mm para 280 mm, a resistência à compressão apresenta uma diminuição.

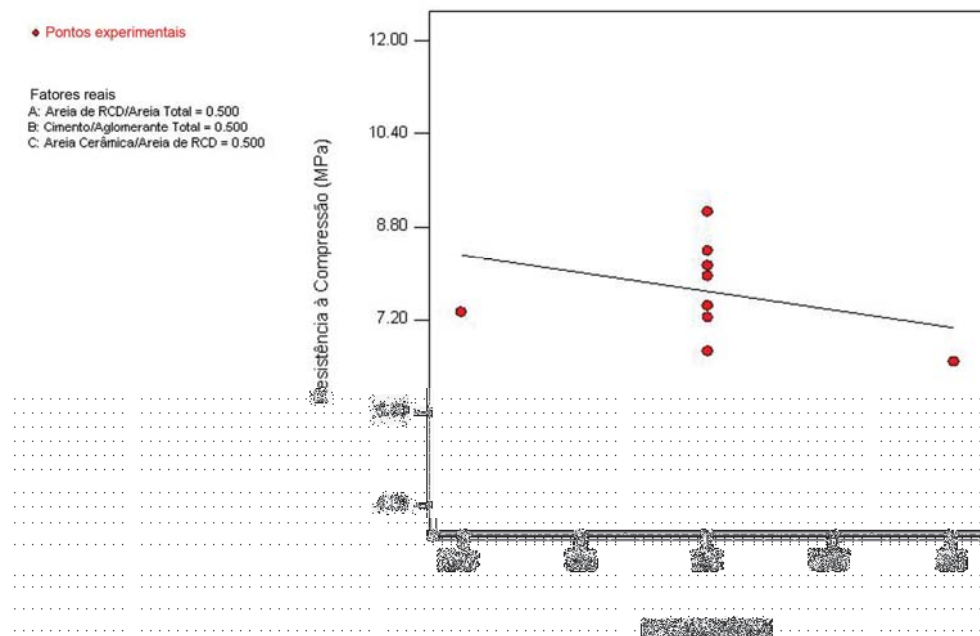


Figura 55: Efeito do fator Consistência sobre a resistência à compressão.

Na análise de variância resultaram significativas duas interações: entre quantidade de material cerâmico (Fator C) e consistência (Fator D) e entre quantidade de cimento (Fator B) e material cerâmico (Fator C).

A Figura 56 apresenta a interação entre quantidade de cimento (Fator B) e quantidade de material cerâmico (Fator C). A forte influência da quantidade de cimento sobre a resistência à compressão é evidenciada, pois independe da quantidade de material cerâmico (Fator C) presente nas argamassas. Outra leitura possível é indicada pela inclinação das retas, isto é, o efeito da quantidade de cimento é maior quando a quantidade de material cerâmico é menor.

A Figura 57 refere-se à interação entre quantidade de material cerâmico (Fator C) e consistência (Fator D). Para a consistência de 250 mm, conforme aumenta a quantidade de material cerâmico (Fator C) presente nas argamassas, aumenta a resistência à compressão. Já para consistência de 270 mm, à medida que aumenta a quantidade de material cerâmico (Fator C), a resistência à compressão diminui. Esta constatação pode ser creditada ao aumento de vazios da argamassa, o qual resulta em melhor trabalhabilidade, porém em menor resistência à compressão.

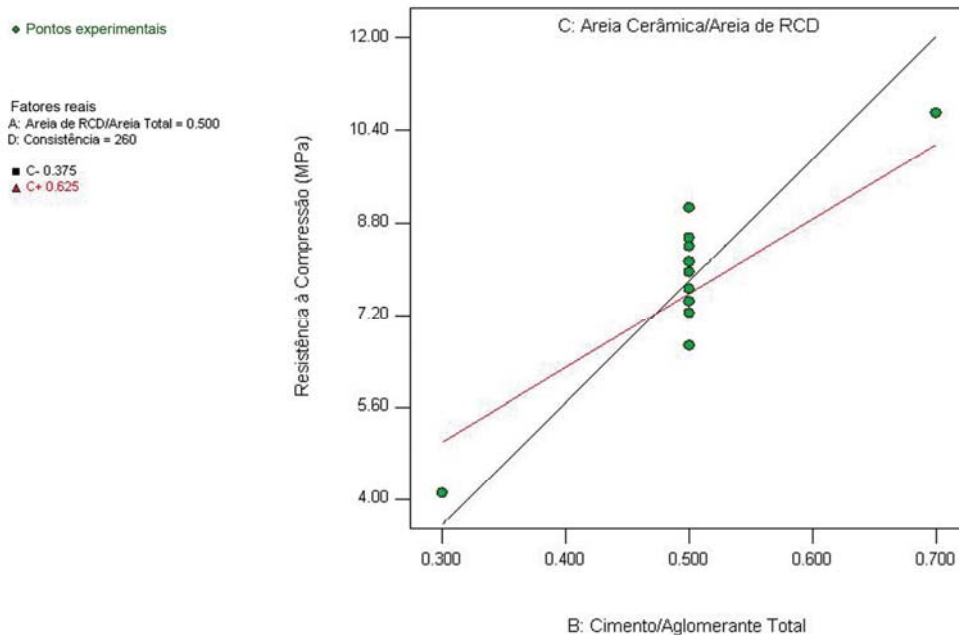


Figura 56: Efeito da interação entre Cimento/Aglomerante Total e Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre a resistência à compressão

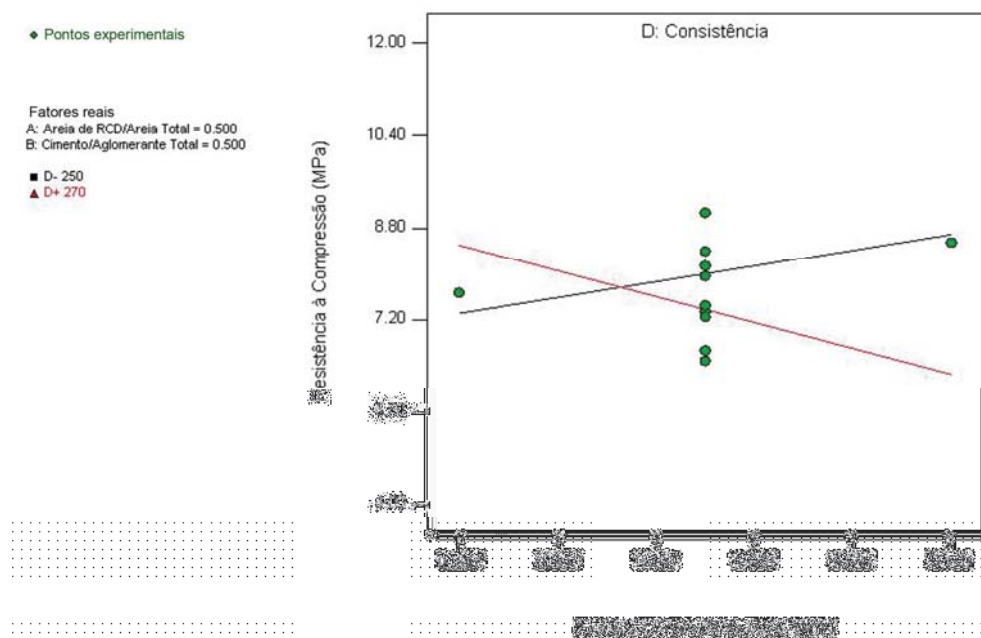


Figura 57: Efeito da interação entre Areia Cerâmica/Areia de RCD e Consistência sobre a resistência à compressão

O modelo de regressão múltipla obtido para a variável de resposta resistência à compressão (f_c) é apresentado na Equação 5.

$$f_c = -47,7 + (33,4.B) + (110,0.C) + (0,15.D) - (32,9.B.C) - (0,36.C.D) \quad (R^2 = 0,89) \quad \text{Eq. (5)}$$

A Figura 58 apresenta as linhas de contorno para a interação entre quantidade de cimento (Fator B) e quantidade de material cerâmico (Fator C), as quais demonstram a influência da quantidade de cimento na resistência à compressão. A quantidade de cimento (Fator B), entre os níveis 0,3 e 0,4, produz resultados de resistência à compressão em torno de 3,50 MPa. Para os níveis 0,50 e 0,75 a resistência à compressão é de 7,77 MPa e 9,33 MPa, respectivamente.

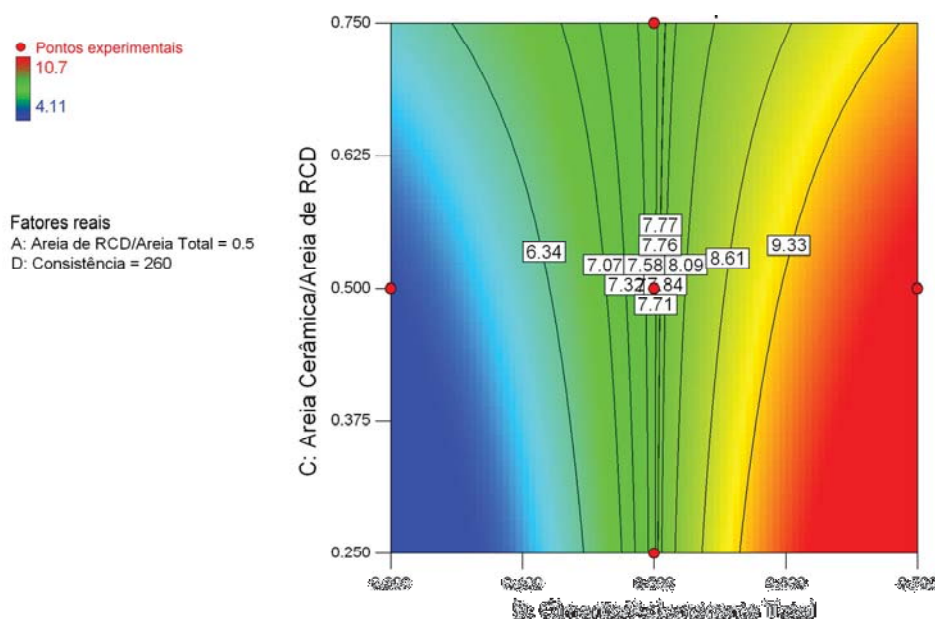


Figura 58: Linhas de contorno para Cimento/Aglomerante Total, Areia Cerâmica/Areia de RCD e resistência à compressão.

A Figura 59 apresenta as linhas de contorno para a interação entre quantidade de material cerâmico (Fator C) e consistência (Fator D).

Para a quantidade de material cerâmico (Fator C) em seu nível 0,25 e a consistência em seu nível 240 mm, a resistência à compressão é inferior a 7,07 MPa. Aumentando os níveis de ambos os fatores os resultados de resistência à compressão aumentam. Com a quantidade de material cerâmico (Fator C) em seu nível máximo se obtém resistência à compressão superior a 9,33 MPa. Com a consistência (Fato D) em seu nível máximo se obtém resistência à compressão superior a 8,61 MPa. Já ambos os fatores em seus níveis máximos apresentam resultados inferiores 6,34 MPa.

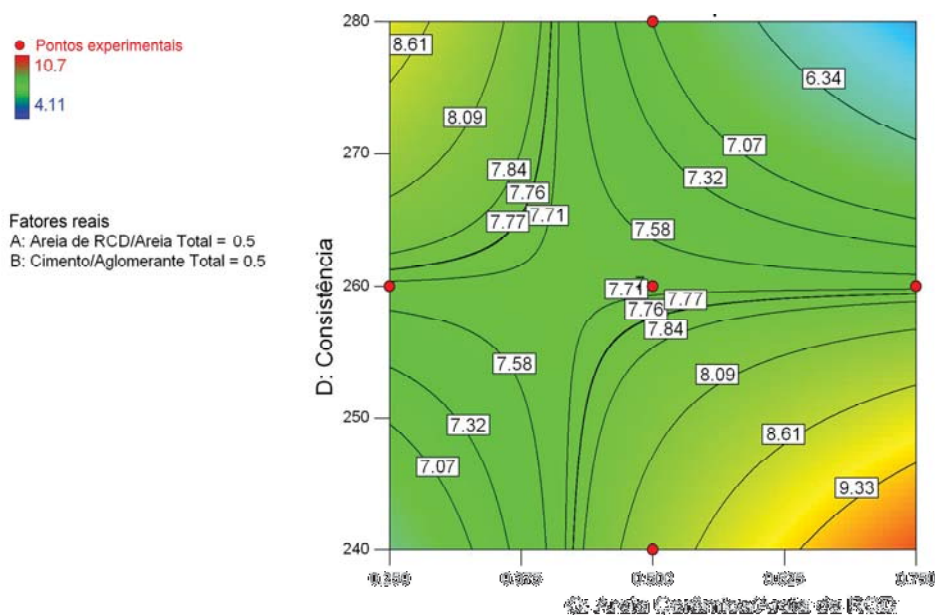


Figura 59: Linhas de contorno para a Areia cerâmica/Areia de RCD e Consistência.

Com base na ANOVA e nos gráficos das Figuras 58 e 59, observou-se que o fator que teve influência preponderante na resistência à compressão foi a quantidade de cimento (Fator B), como já era esperado. No entanto, mesmo havendo interação significativa deste fator com a quantidade de água, ou seja, com a consistência, e com a quantidade de material cerâmico, observou-se que a influência da quantidade de cerâmica na resistência a compressão é significativa somente a partir do nível 0,625 deste fator.

4.3.2 Ensaios em Painéis

Os ensaios em painéis foram executados conforme descrição apresentada no item 3.5, seguindo o planejamento de experimentos detalhado no item 3.2.5, isto é, com os fatores controlados: A - Areia de RCD/Areia Total, B - Cimento/Aglomerante Total, C - Areia de Cerâmica/Areia de RCD e D - Consistência, variados em cinco níveis. As argamassas foram avaliadas partir da medição de duas variáveis de resposta: o comprimento de fissuras por m^2 e a resistência de aderência à tração segundo a NBR 13528 (ABNT, 1995). Os resultados estão sumarizados na Tabela 38.

As formas de ruptura observadas nos ensaios de aderência à tração, indicadas na Tabela 38, podem ser visualizadas nas Figuras 60a e 60b. Cabe salientar que os traços 08 e 18 estão grafados com “N”, pois os respectivos traços, confeccionados conforme o planejamento

experimental, não aderiram ao substrato (chapisco), conforme pode ser observado nas Figuras 61 e 62.

Tabela 38: Resultados dos ensaios em painéis.

Ordem Padrão	Ordem de Execução	Areia de RCD / Areia Total	Cimento/ Aglomerante Total	% de Cerâmica na Areia de RCD	Consistência (mm)	Areia Total/ Aglomerante	Traço Unitário (Cim:Cal:Areia)	Fissuras Comprimento por m2	Resistência aderência (Mpa)	Forma de ruptura*	Espessura revestimento (mm)
1	12	0,375	0,400	0,375	250	3,0	1 : 1,5 : 7,5	823	0,20	a	28,45
2	22	0,625	0,400	0,375	250	3,0	1 : 1,5 : 7,5	511	0,23	a	29,86
3	24	0,375	0,600	0,375	250	3,0	1 : 0,7 : 5,0	241	0,32	c	26,55
4	20	0,625	0,600	0,375	250	3,0	1 : 0,7 : 5,0	356	0,30	a	25,35
5	14	0,375	0,400	0,625	250	3,0	1 : 1,5 : 7,5	314	0,22	c	26,33
6	17	0,625	0,400	0,625	250	3,0	1 : 1,5 : 7,5	452	0,42	a	27,75
7	13	0,375	0,600	0,625	250	3,0	1 : 0,7 : 5,0	497	0,25	a	24,87
8	10	0,625	0,600	0,625	250	3,0	1 : 0,7 : 5,0	N	N	N	N
9	26	0,375	0,400	0,375	270	3,0	1 : 1,5 : 7,5	518	0,28	a	29,62
10	11	0,625	0,400	0,375	270	3,0	1 : 1,5 : 7,5	1004	0,16	a	23,82
11	19	0,375	0,600	0,375	270	3,0	1 : 0,7 : 5,0	127	0,37	c	27,30
12	25	0,625	0,600	0,375	270	3,0	1 : 0,7 : 5,0	349	0,33	c	23,96
13	7	0,375	0,400	0,625	270	3,0	1 : 1,5 : 7,5	861	0,21	a	21,71
14	4	0,625	0,400	0,625	270	3,0	1 : 1,5 : 7,5	793	0,21	a	27,01
15	18	0,375	0,600	0,625	270	3,0	1 : 0,7 : 5,0	422	0,31	c	30,14
16	5	0,625	0,600	0,625	270	3,0	1 : 0,7 : 5,0	642	0,32	c	26,93
17	29	0,250	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	544	0,23	a	27,88
18	28	0,750	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	N	N	N	N
19	3	0,500	0,300	0,500	260	3,0	1 : 2,3 : 10,0	835	0,11	a	26,47
20	6	0,500	0,700	0,500	260	3,0	1 : 0,4 : 4,3	317	0,34	a	26,90
21	27	0,500	0,500	0,250	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	439	0,41	a	29,41
22	21	0,500	0,500	0,750	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	283	0,31	a	27,58
23	8	0,500	0,500	0,500	240	3,0	1 : 1,0 : 6,0	710	0,27	a	25,58
24	15	0,500	0,500	0,500	280	3,0	1 : 1,0 : 6,0	759	0,23	c	24,80
25	1	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	804	0,24	a	28,11
26	30	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	371	N	N	N
27	16	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	753	0,25	a	30,47
28	9	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	611	0,27	a	28,82
29	23	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	270	0,25	a	27,60
30	2	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	704	0,28	a	29,16
31	31	0,500	0,500	0,500	260	3,0	1 : 1,0 : 6,0	387	0,16	a	27,11

* Forma de ruptura - a (ruptura na interface argamassa-substrato); c (ruptura no substrato).

Isto pode ter sido ocasionado pela composição dos traços. O traço 08 tem grande quantidade de RCD e este é composto em sua maior parte por areia cerâmica. Ainda, sua consistência foi de 250 mm, resultando em uma argamassa com pouca trabalhabilidade e com pouca água. O traço 18 apresenta uma maior concentração de RCD em relação à areia natural, o que resultou em uma argamassa de difícil trabalhabilidade e muito seca.

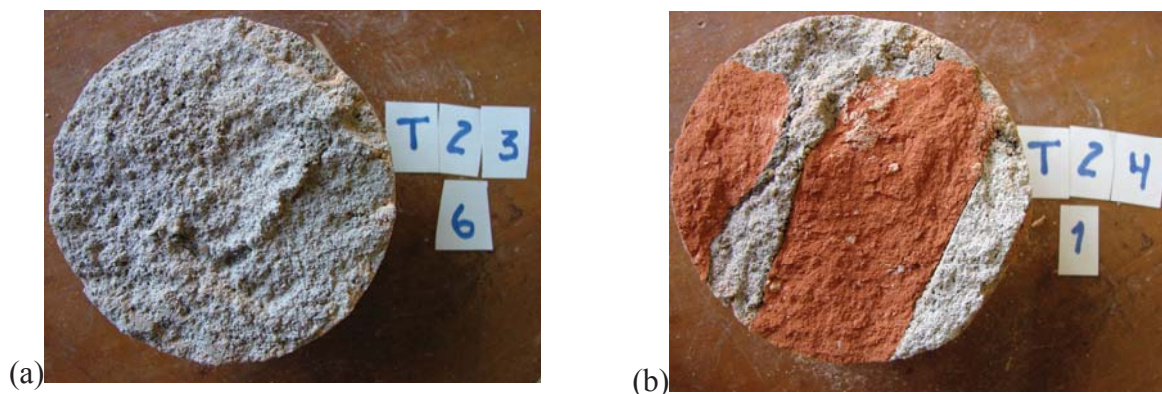


Figura 60: Formas de ruptura observadas após o ensaio de aderência à tração: (a) Ruptura na interface argamassa-substrato; (b) ruptura no substrato.



Figura 61: Painel traço 08.



Figura 62: Painel traço 18.

4.3.2.1 Comprimento de Fissuras

A determinação do comprimento de fissuras por m^2 seguiu o procedimento descrito no item 3.5.2.1. Este ensaio permitiu diferenciar os painéis segundo seu desempenho quanto à fissuração. A Tabela 38 apresenta os resultados de comprimento de fissuras em centímetros por m^2 para cada um dos 31 traços de argamassa investigados.

São muitos os fatores que estão associados à fissuração dos revestimentos: tipo de base e tratamento, características dos agregados e aglomerantes, traços das argamassas, métodos de execução, questões ambientais (temperatura, umidade, vento, etc.). Os resultados, como esperado, apresentaram muita variação, devido ao grande número de variáveis abordadas. Cabe salientar que os resultados quanto ao comprimento de fissuras por m^2 ficaram na faixa de 127 cm (Traço 11) a 1004 cm (Traço 10).

A análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta comprimento de fissuras por m^2 apresentou como significativo apenas o Fator B (Cimento/Aglomerante Total), conforme mostra a Tabela 39.

Tabela 39: Resultado da ANOVA para comprimento de fissuras por m^2 .

Dados analisados	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrados	Valor de F	p-valor Prob > F	Significância
Modelo	4,284E+005	1	4,284E+005	11,43	0,0022	Significativo
B-Cimento/Aglomerante Total	4,284E+005	1	4,284E+005	11,43	0,0022	Significativo
Residual	1,012E+006	27	37494,19			
Falta de ajuste	7,425E+005	21	35358,49	0,79	0,6879	Não Significativo
Erro Puro	2,698+005	6	44969,14			
Total	1,441+006	28				

A Figura 63 apresenta o efeito principal da quantidade de cimento (Fator B) sobre o comprimento de fissuras por m^2 . No nível mais baixo deste fator (0,3) observa-se uma elevada fissuração, porém, à medida que aumenta a quantidade de cimento, diminui o comprimento de fissuração. Esta mesma observação foi feita por Passos et al. (2008), conforme ilustra a Tabela 40.

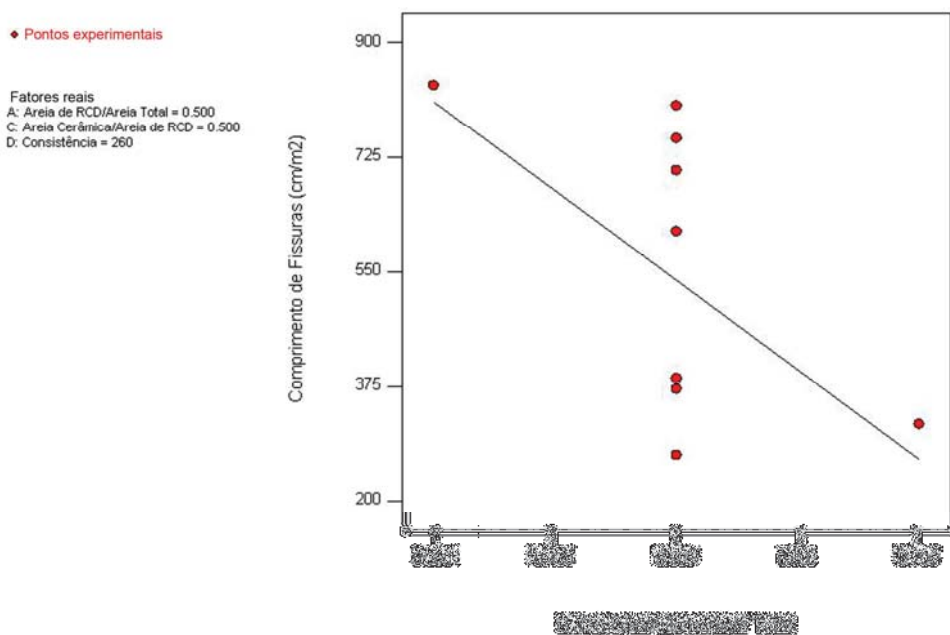


Figura 63: Efeito do fator Cimento/Aglomerante Total sobre o comprimento de fissuras por m^2 .

O modelo de regressão múltipla obtido para a variável comprimento de fissuras por metro quadrado (l_f) é apresentado na Equação 6.

$$l_f = +1219,5 - (1365,8.B) \quad (R^2 = 0,30) \quad \text{Eq. (6)}$$

Tabela 40: Valores de comprimento de fissuras por m² observados na literatura.

Referência	Traço em massa	Cimento/ Aglomerante total	Fissuração (cm/m ²)
Passos et al. (2008)	1:4,27:13,70 (Cim:Cal:A.N)	0,19	948
	1:3,12:10,15 (Cim:Cal:A.N)	0,24	1211
	1:1,49:6,09 (Cim:Cal:A.N)	0,40	1190
	1:1,34:6,75 (Cim:Cal:A.N)	0,42	527
	1:1,17:5,98 (Cim:Cal:A.N)	0,46	763
	1:0,77:5,40 (Cim:Cal:A.N)	0,56	373

4.3.2.2 Resistência de Aderência à Tração.

O ensaio foi realizado seguindo os procedimentos descritos no item 3.5.2.2. Os resultados de resistência de aderência à tração podem ser observados na Tabela 41, os quais variaram na faixa de 0,42 MPa (Traço 21) à 0,11 MPa (Traço 19).

A Tabela 41 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta resistência de aderência à tração. Foram analisados os efeitos dos fatores: A (Areia de RCD/Areia Total), B (Cimento/Aglomerante Total), C (Areia Cerâmica/Areia de RCD) e D (Consistência), bem como das interações de segunda ordem entre os fatores, além de efeitos quadráticos. Segundo a ANOVA, o Fator B tem o maior efeito sobre a variável de resposta. Além disso, as interações AC e AD e o termo quadrático C² apresentaram efeitos significativos.

Tabela 41: Resultado da ANOVA para resistência de aderência à tração.

Dados analisados	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrados	Valor de F	p-valor Prob > F	Significância
Model	0,10	7	0,015	7,50	0.0002	Significativo
A-Areia de RCD/Areia Total	3,022E-003	1	3,022E-003	1,55	0.2268	Não Significativo
B-Cimento/Aglomerante Total	0,051	1	0,051	26,33	<0,0001	Significativo
C-Areia Cerâmica/Areia de RCD	5,421E-005	1	5,421E-005	0,028	0.8690	Não Significativo
D-Consistência	2,310E-003	1	2,310E-003	1,19	0.2886	Não Significativo
AC	0,016	1	0,016	8,03	0.0103	Significativo
AD	0,016	1	0,016	8,03	0.0103	Significativo
C ²	0,027	1	0,027	13,75	0.0014	Significativo
Residual	0,039	20	1,944E-003			
Falta de ajuste	0,030	15	1,986E-003	1,09	0,5023	Não Significativo
Erro Puro	9,083E-003	5	1,817E-003			
Total	0,14	27				

Os efeitos principais de cada um dos fatores controlados sobre a resistência de aderência à tração são discutidos a seguir.

Na Figura 64, que apresenta o efeito da quantidade de RCD (Fator A), observa-se que o aumento nos níveis deste fator resulta em aumento da resistência de aderência à tração. Esta observação também foi feita por Miranda (2000), conforme ilustra a Tabela 42.

Tabela 42: Valores de Resistência de aderência à tração encontrados na literatura.

Referência	Traço em massa	Areia RCD/ Areia Total	Resistência de aderência à tração (MPa)
Miranda (2000)	1:0,66:0,43:7,9 (Cim:AC:AA:A.N)	0,12	0,29
	1:1,88:1:23:5,9 (Cim:AC:AA:A.N)	0,34	0,50
	1:2,75:2,25: 4,0 (Cim:AC:AA:A.N)	0,55	0,41

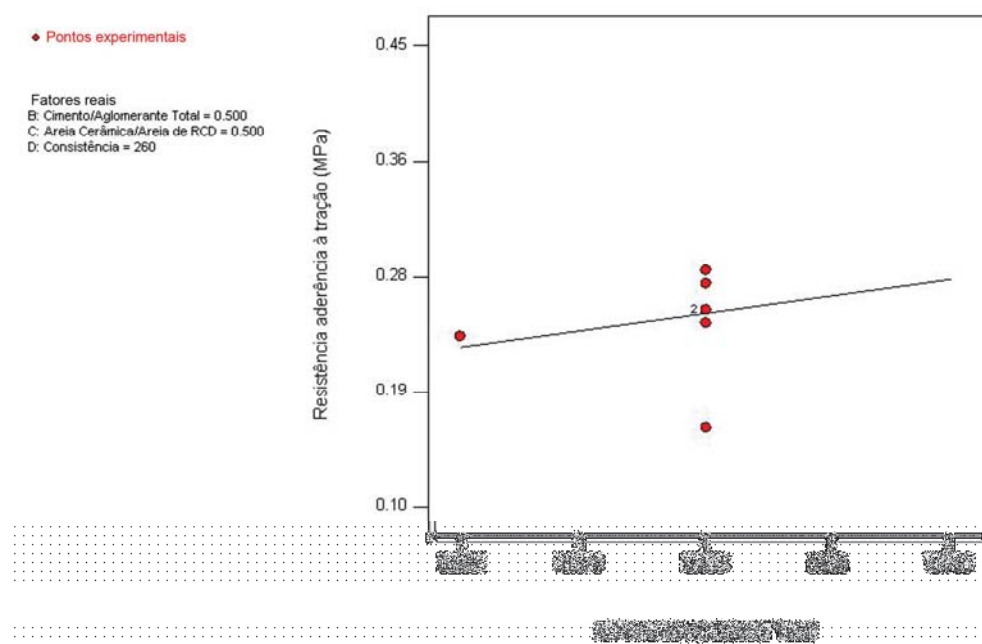


Figura 64: Efeito principal do fator Areia de RCD/Areia Total sobre a resistência de aderência à tração.

A Figura 65 apresenta o efeito da quantidade de cimento (Fator B). No seu nível mínimo (0,30) observa-se uma baixa resistência. No entanto, um aumento significativo ocorre quando a quantidade de cimento é aumentada até o nível máximo do fator (0,70), o que demonstra a importância deste fator para resistência de aderência à tração. A Tabela 43 foi adaptada do trabalho realizado por Passos et. al. (2008), no qual foi observado comportamento similar.

A Figura 66, referente ao efeito da quantidade de material cerâmico (Fator C), mostra que os melhores resultados para a resistência de aderência à tração foram observados para os níveis extremos deste fator (0,25 e 0,75), enquanto que o pior resultado ocorreu para o seu nível intermediário (0,50).

Tabela 43: Valores de resistência de aderência à tração encontrados na literatura.

Referência	Traço em massa	Cimento/ Agglomerante total	Resistência de aderência à tração (MPa)
Passos et al. (2008)	1:4,27:13,70 (Cim:Cal:A.N)	0,19	0,06
	1:3,12:10,15 (Cim:Cal:A.N)	0,24	0,10
	1:1,49:6,09 (Cim:Cal:A.N)	0,40	0,19
	1:1,34:6,75 (Cim:Cal:A.N)	0,42	0,15
	1:1,17:5,98 (Cim:Cal:A.N)	0,46	0,22
	1:0,77:5,40 (Cim:Cal:A.N)	0,56	0,25

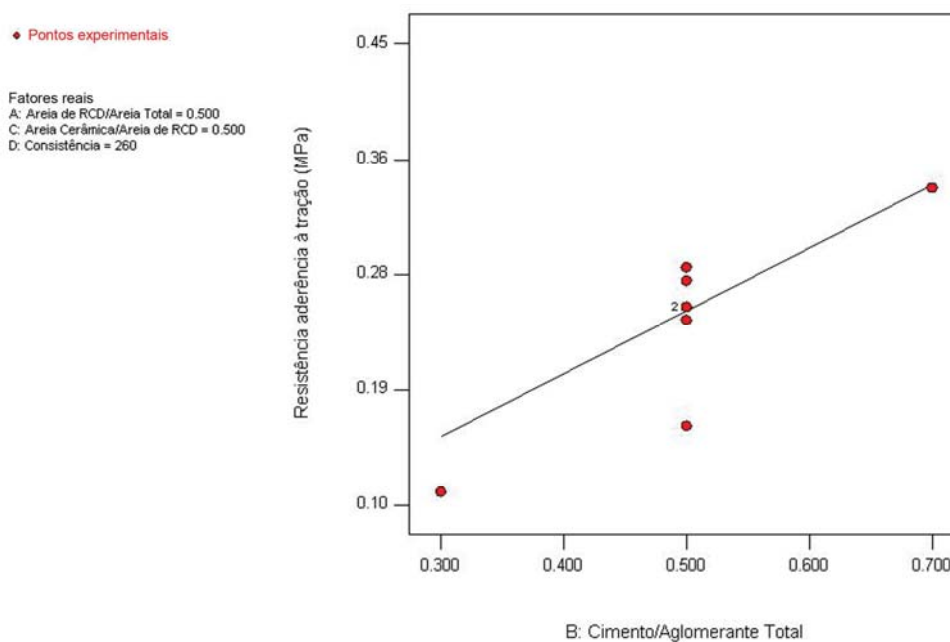


Figura 65: Efeito do fator Cimento/Agglomerante Total sobre a resistência de aderência à tração

A variação da consistência (Fator D), como mostra a Figura 67, de 240 mm para 280 mm, resultou na diminuição da resistência de aderência à tração, porém não de forma muito expressiva.

A análise de variância (ANOVA) resultou em duas interações significativas, entre quantidade de RCD (Fator A) e quantidade de material cerâmico (Fator C) e entre quantidade de RCD e consistência (Fator D).

Na Figura 68 pode-se observar a interação entre quantidade de RCD (Fator A) e quantidade de material cerâmico (Fator C). Para a quantidade de material cerâmico em seu nível mínimo (0,375), o aumento da quantidade de RCD provoca a diminuição da resistência de aderência à tração. Já para a quantidade máxima de material cerâmico (0,625), o comportamento é inverso, isto é, o aumento da quantidade de RCD resulta em aumento da

resistência de aderência à tração. Este gráfico evidencia que quantidades maiores de material cerâmico (Fator C) contribuem para uma melhor resistência de aderência à tração dos revestimentos de argamassas.

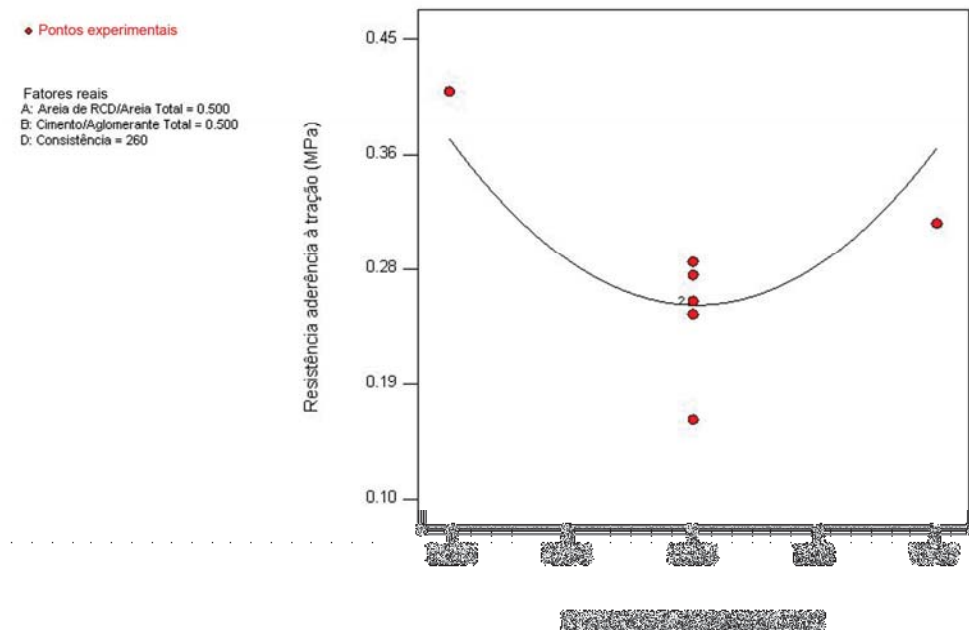


Figura 66: Efeito do fator Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre a resistência de aderência à tração.

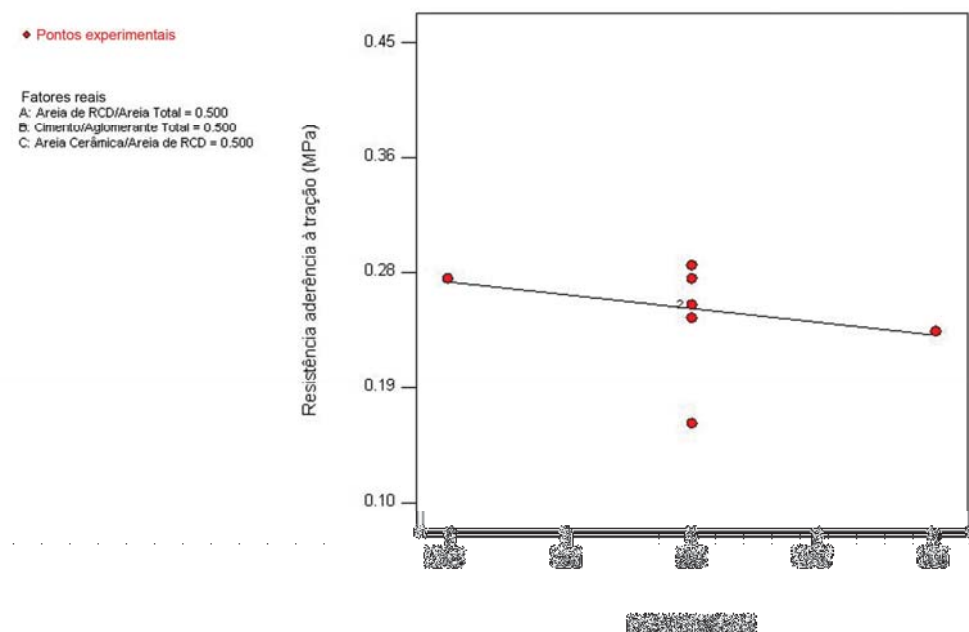


Figura 67: Efeito do fator Consistência sobre a resistência de aderência à tração.

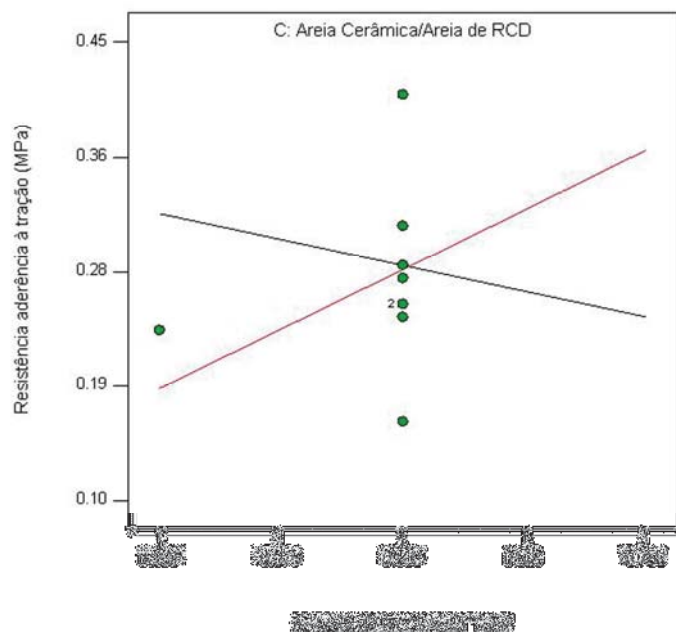


Figura 68: Efeito da interação entre os fatores Areia de RCD/Areia Total e Areia Cerâmica/Areia de RCD sobre a resistência de aderência à tração.

A Figura 69 apresenta a interação entre quantidade de RCD (Fator A) e consistência (Fator D). Para a consistência em seu nível mínimo (250 mm), o aumento da quantidade de RCD produz o aumento da resistência de aderência à tração. Quando se analisa a consistência em seu nível máximo (270 mm), o inverso é observado, ou seja, aumentando a quantidade de RCD a resistência de aderência à tração diminui.

De acordo com a Figura 69, a consistência (Fator D) interfere nos resultados de resistência de aderência à tração, pois o acréscimo de água necessário para obter uma melhor trabalhabilidade, segundo a bibliografia, aumenta os vazios pela evaporação da água, resultando em revestimentos menos resistentes.

O modelo de regressão múltipla obtido para a variável de resposta resistência de aderência à tração (f_b) é apresentado na Equação 7.

$$f_b = -2,1 + (5,8.A) + (0,5.B) - (3,0.C) + (0,01.D) + (2,1.A.C) - (0,02.A.D) + (1,9.C^2) \quad (R^2 = 0,72)$$

Eq. (7)

Na Figura 70 são apresentadas as linhas de contorno para a resistência de aderência à tração, referentes à interação entre quantidade de RCD (Fator A) e quantidade de material cerâmico (Fator C).

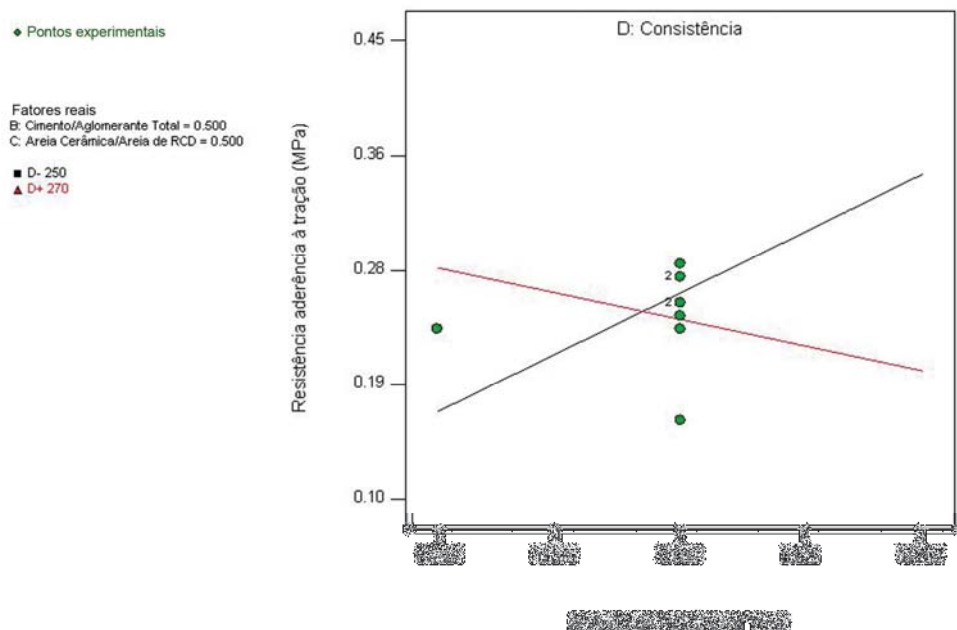


Figura 69: Efeito da interação entre os fatores Areia de RCD/Areia Total e Consistência sobre a resistência de aderência à tração.

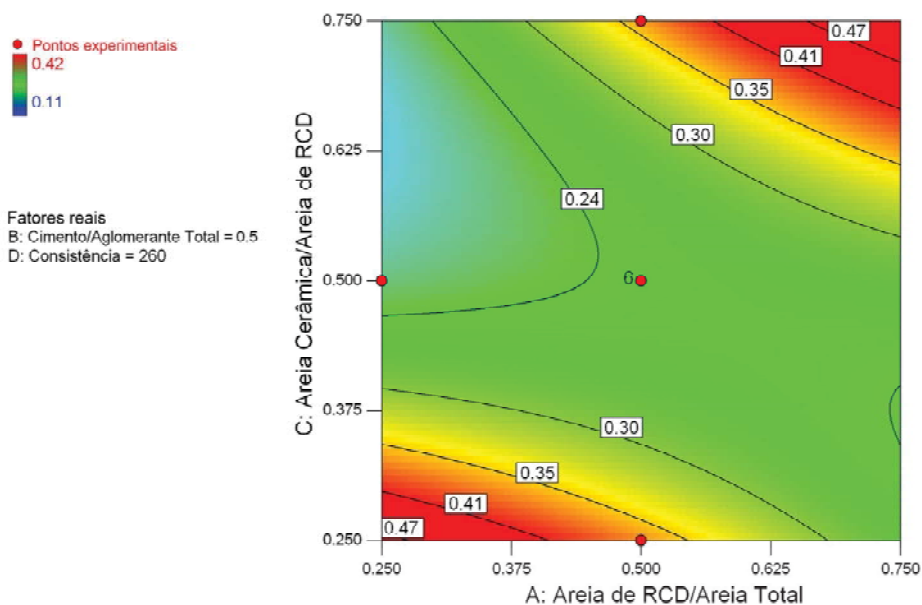


Figura 70: Linhas de contorno para Areia de RCD/Areia Total, Areia Cerâmica/Areia de RCD e resistência de aderência à tração.

Mantendo-se as quantidades de material cerâmico (Fator C) e de RCD (Fator C) nos seus níveis mínimos (0,25 em ambos os casos), a resistência de aderência à tração é superior a 0,47 MPa. Aumentando-se a quantidade de RCD para o seu nível máximo (0,75), a resistência de aderência à tração diminui para menos de 0,30 MPa.

Quando a quantidade de RCD (Fator A) está em seu nível mínimo (0,25) e à medida que aumenta a quantidade de material cerâmico (Fator C), a resistência de aderência à tração diminui para valores inferiores a 0,24 MPa. Porém, quando ambos os fatores estão em seus níveis máximos, a resistência de aderência à tração chega a valores superiores a 0,47 MPa.

A Figura 71 apresenta as linhas de contorno para a interação entre quantidade de RCD (Fator A) e consistência (Fator D).

Para a consistência (Fator D) e a quantidade de RCD em seus níveis mínimos (240 mm e 0,25, respectivamente), se obtém resistências de aderência à tração inferiores a 0,16 MPa. Aumentando a quantidade de RCD, aumenta a resistência de aderência à tração. Para a quantidade de RCD em seu nível máximo (0,75), a resistência de aderência à tração chega a valores superiores a 0,37 MPa.

Para a quantidade de RCD (Fator A) em seu nível mínimo (0,25), e à medida que aumentam os níveis de consistência (Fator D), a resistência de aderência à tração atinge valores superiores a 0,32 MPa. Por outro lado, quando ambos os fatores estão em seus níveis máximos, a resistência de aderência à tração apresenta resultados inferiores a 0,16 MPa.

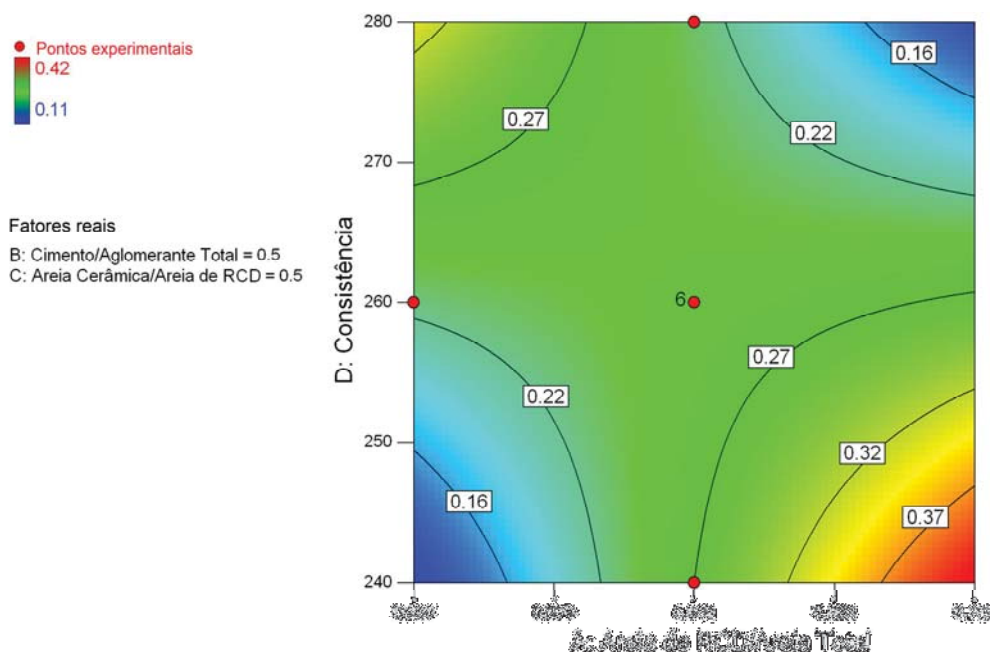


Figura 71: Linhas de contorno para Areia de RCD/Areia Total, Consistência e resistência de aderência à tração.

Segundo a ANOVA, o principal fator em relação à resistência de aderência à tração foi a quantidade de cimento. Outro fator que teve influência foi a quantidade de água (consistência), conforme indica a Figura 69. Na Figura 68, pode-se observar que o aumento na resistência de aderência à tração também é afetado pela interação entre o a quantidade de RCD (Fator A) e a quantidade de material cerâmico (Fator C).

4.4 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE RESPOSTA

A análise de correlação entre as variáveis de resposta foi realizada conforme descrito no item 3.6, a partir da construção dos gráficos de dispersão apresentados nas Figuras 72 a 75.

Ao analisar a Figura 72a, em que o teor de ar incorporado é plotado contra a resistência à tração na flexão, é possível confirmar o que diz a bibliografia, isto é, que maiores valores de resistência à tração na flexão são obtidos para teores maiores de ar incorporado.

Nas Figuras 72b e 72d, que correlacionam, respectivamente, a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão com a relação água/cimento (a/c), pode-se verificar a qualidade e a consistência do experimento realizado. Observa-se que para se obter melhores resultados de resistências à tração na flexão e à compressão são necessárias menores relações a/c. Quanto aos coeficientes de correlação, estes apresentaram, respectivamente, os seguintes valores: -0,793 e -0,816, indicando uma boa correlação linear (negativa). O gráfico de dispersão da Figura 72c mostra uma forte correlação positiva entre as resistências à tração na flexão e à compressão, como era de se esperar.

A Figura 73 apresenta o gráfico de dispersão para as variáveis de resposta que são influenciadas pelo teor de finos.

Ao se analisar a Figura 73e, quantidade de água versus teor de finos, pode-se observar a necessidade de maiores quantidades de água em argamassas com maiores quantidades de finos.

Na Figura 73f, teor de ar incorporado versus teor de finos, observa-se o aumento no teor de ar incorporado à medida que diminui o teor de finos. Na Figura 73g, retenção de água versus teor de finos, maiores teores de finos determinam melhores resultados quanto à retenção de água.

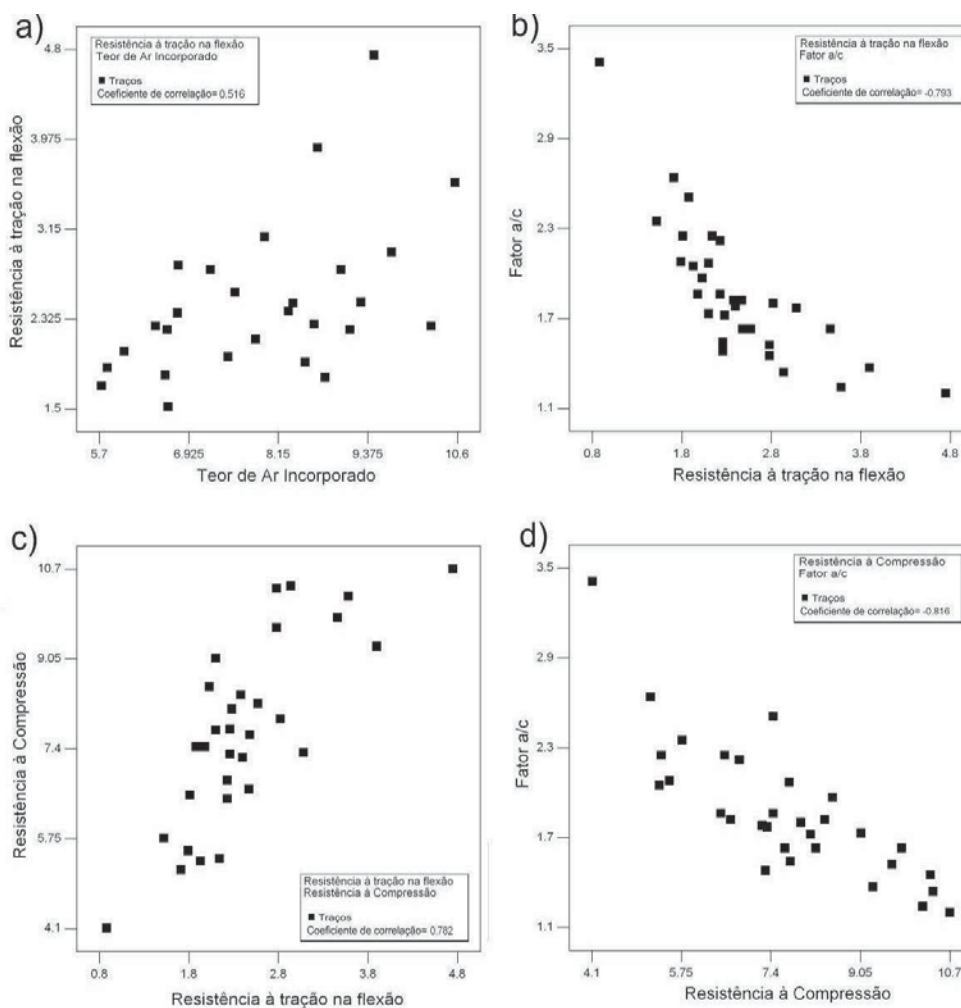


Figura 72: (a) Teor de ar incorporado x Resistência à tração na flexão; (b) Resistência à tração na flexão x Fator a/c; (c) Resistência à tração na flexão x Resistência à compressão; (d) Resistência à compressão x Fator a/c.

A correlação mostrada na Figura 73 aponta um aumento na retenção de água conforme aumenta o fator a/c. Porém, neste caso, o coeficiente de correlação é de 0,309, indicando uma fraca correlação positiva entre as variáveis analisadas.

A Figura 74 apresenta a análise de correlação referente às variáveis de resposta estudadas nos ensaios em painéis.

Observa-se, nos gráficos da Figura 74, uma maior dispersão dos dados quando comparados com os resultados obtidos nos ensaios realizados em corpos-de-prova, apresentados na Figura 72. Esta dispersão pode estar associada aos fatores de ruído.

Os resultados apresentados na Figura 74a, comprimento de fissuras versus relação a/c, evidenciam que o comprimento de fissuras aumenta conforme aumenta a relação a/c. O coeficiente de correlação entre as duas variáveis é de 0,555.

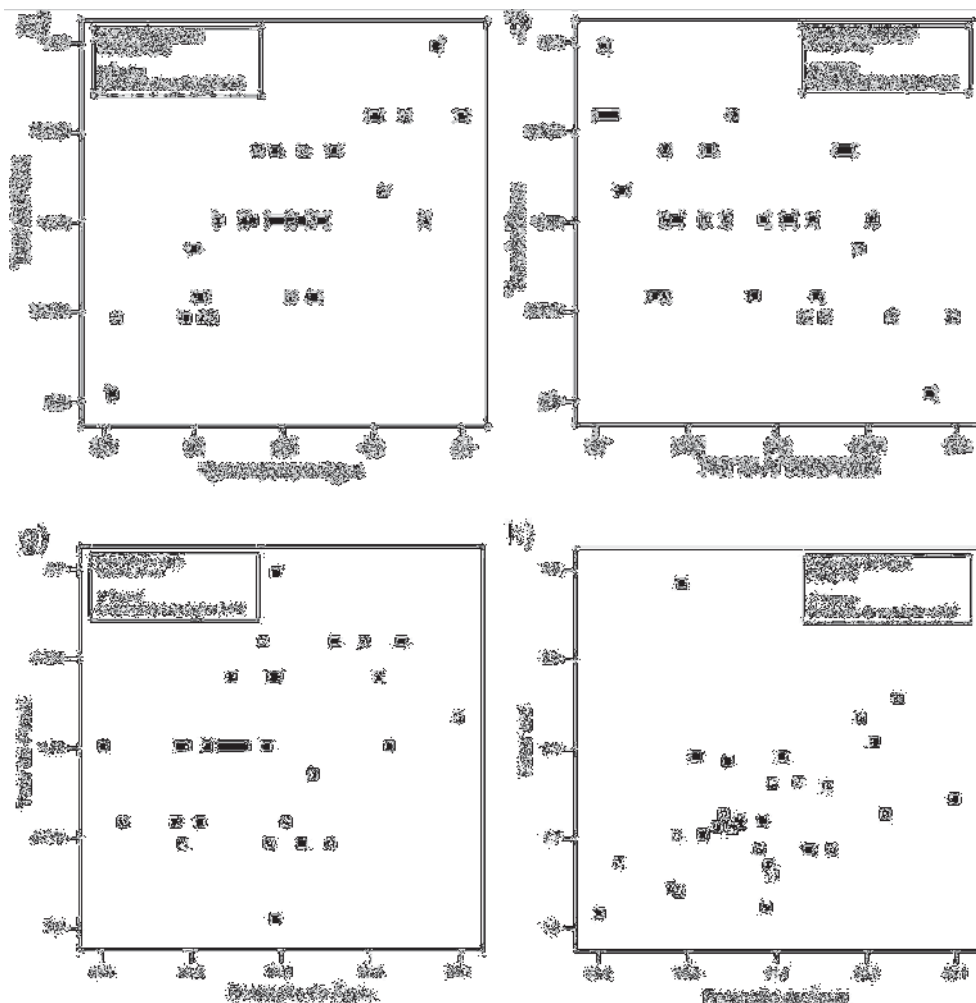


Figura 73: (e) Quantidade de água x Teor de Finos; (f) Teor de Ar Incorporado x Teor de Finos; (g) Retenção de água x Teor de Finos; (h) Retenção de água x Fator a/c.

Já no gráfico apresentado na Figura 74b, comprimento de fissuras versus resistência aderência, observa-se que para as argamassas com melhores resultados de aderência à tração existe uma tendência das mesmas serem menos suscetíveis a fissuração. Esta correlação apresentou coeficiente de $-0,588$.

O gráfico de dispersão mostrado na Figura 74c, referente à correlação entre resistência à compressão e comprimento de fissuras e o da Figura 74d, referente à correlação entre resistência à tração na flexão e comprimento de fissuras, demonstram que maiores resistências à compressão e à tração na flexão acarretam menores comprimentos de fissuras. Os coeficientes de correlação obtidos entre estas variáveis foram respectivamente: $-0,684$ e $-0,332$.

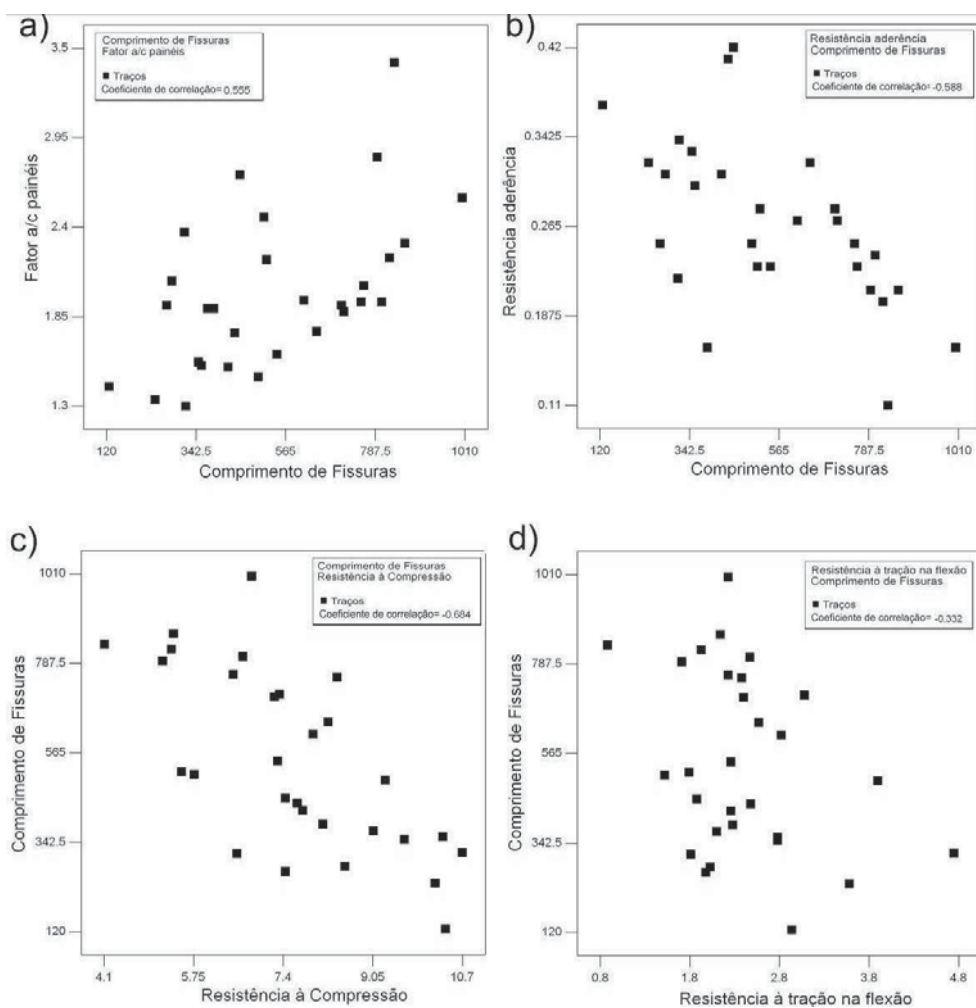


Figura 74: (a) Comprimento de fissuras x Fator a/c painéis; (b) Comprimento de fissuras x Resistência aderência; (c) Resistência à compressão x Comprimento de fissuras; (d) Resistência à tração na flexão x Comprimento de fissuras.

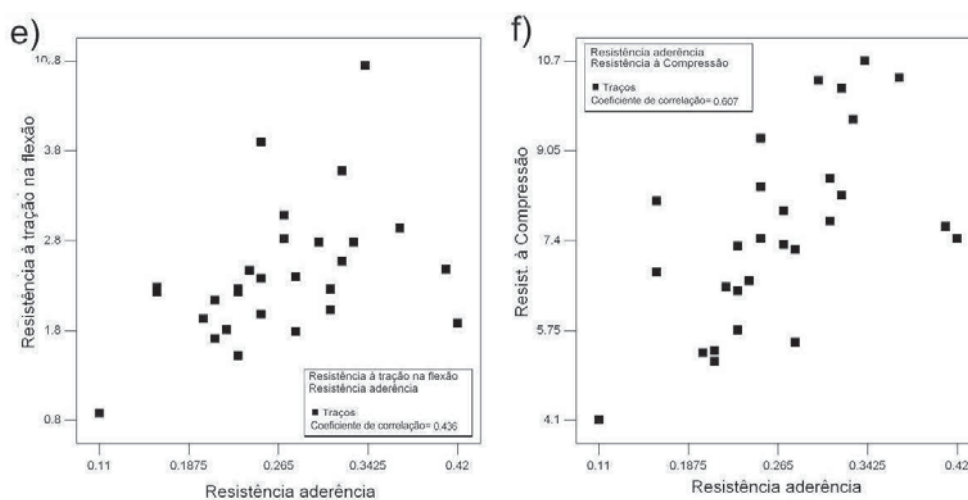


Figura 75: (e) Resistência de Aderência x Resistência à tração na flexão; (f) Resistência à compressão x Resistência aderência.

Os gráficos de dispersão apresentados nas Figuras 75e e 75f, referentes respectivamente às correlações entre resistência de aderência e resistência à tração na flexão e resistência à compressão e resistência de aderência, evidenciam que maiores valores de resistência à compressão e resistência à tração na flexão resultam em maiores resistências de aderência à tração. Os coeficientes de correlação obtidos entre estas variáveis foram, respectivamente, 0,436 e 0,607.

4.5 ANÁLISE DE ROBUSTEZ

A análise de robustez está fundamentada na avaliação da função de propagação do erro (*POE*), definida anteriormente no item 3.1.7. A análise ficou restrita somente às variáveis de resposta medidas nos ensaios em painéis (resistência de aderência e comprimento fissuração), pois estas refletem a qualidade propriamente desejada dos revestimentos. Cabe reafirmar que a propagação do erro é a variabilidade (desvio-padrão) transmitida à variável de resposta pelas flutuações nos ajustes dos fatores de controle (na presente pesquisa estes fatores são: relação Areia de RCD/Areia Total; relação Cimento/Aglomerante Total; porcentagem de cerâmica na Areia de RCD; Consistência). A análise requer, portanto, que seja feita uma mensuração ou estimativa preliminar das variabilidades associadas ao ajuste dos fatores de controle aos seus valores nominais. Por exemplo, se a consistência da argamassa é especificada em 250mm, o valor real obtido em obra estará inevitavelmente distribuído em torno deste valor nominal seguindo uma dada distribuição de probabilidades e com um determinado desvio-padrão (note-se que esta distribuição poderá ou não estar centrada no valor nominal de especificação). Esta variação da consistência em torno do valor nominal transmitirá às propriedades da argamassa (a resistência de aderência, por exemplo), uma determinada variabilidade, denominada propagação do erro. Quanto menor esta propagação, mais robusto é o produto, no caso a argamassa de revestimento. O propósito da análise de robustez é verificar a possibilidade de minimização da função propagação do erro no espaço experimental investigado, e determinar quais fatores de controle, se algum, podem ser utilizados para controlar a propagação do erro.

A Tabela 44 apresenta os valores dos desvios-padrão estimados para os fatores de controle investigados no presente trabalho. Estes valores foram utilizados na análise de robustez e foram estabelecidos arbitrariamente, porém buscou-se representar situações reais de obra.

Tabela 44: Fatores controláveis investigados no programa experimental.

Fatores investigados	Desvio-padrão
A: Relação Areia de RCD/Areia Total	0,1
B: Relação Cimento/Aglomerante Total	0,1
C: Porcentagem de Cerâmica na Areia de RCD	10%
D: Consistência da Mistura	10mm

Ao examinar a Equação 3.1 para a determinação da propagação do erro, observa-se que o valor calculado é função das derivadas parciais da equação de regressão geradora da superfície de resposta para uma dada variável de desempenho. No caso de superfícies de resposta de primeira ordem (equações lineares), obviamente a função *POE* será constante em todo o espaço experimental e, neste caso, nenhum dos fatores de controle poderá ser utilizado com vistas à minimização da variabilidade. Deve-se salientar que o delineamento experimental adotado (projeto composto central) permite o ajuste de modelos de primeira e de segunda ordem (quadráticos).

Para a variável de resposta comprimento de fissuração, o modelo estatístico ajustado aos dados experimentais foi de primeira ordem. Desta forma, a propagação do erro é uniforme e nenhum dos fatores de controle investigados pode ser utilizado no seu controle. No caso da resistência de aderência à tração, o modelo de regressão mais adequado foi o quadrático, ocasionando uma propagação do erro não uniforme ao longo do espaço experimental. Por esta razão o estudo da *POE* foi realizado somente para a variável resistência de aderência à tração.

A Figura 76 apresenta a de variação da propagação do erro para cada um dos fatores de controle: A Figura 76a representa a Areia de RCD/Areia Total (Fator A), a Figura 76b representa a quantidade de Cimento/Aglomerante Total (Fator B), a Figura 76c representa a quantidade de Areia Cerâmica/Areia de RCD (Fator C) e a Figura 76d referente à Consistência (Fator D).

Pode-se observar na Figura 76b claramente que a quantidade de cimento (Fator B) e a Figura 76d consistência (Fator D) não são efetivas no controle da propagação do erro, isto é, o valor de *POE* é praticamente o mesmo para todos os níveis destes dois fatores. Por outro lado, para a Areia de RCD/Areia total (Fator A) e quanto a Areia Cerâmica/Areia de RCD (Fator C), a situação é distinta. Pode-se concluir que nos níveis médios destes dois fatores, que refletem a quantidade e a composição do RCD presentes na argamassa, é obtida a menor propagação do erro. Estes fatores, portanto, podem ser utilizados para minimizar a propagação

do erro e melhorar a robustez da argamassa, desde que sejam especificados em níveis adequados.

Pode-se verificar claramente que a propagação do erro é minimizada na região central do espaço experimental e que conforme aumentam ou diminuem os níveis de ambos os fatores, em direção as fronteiras do espaço experimental, *POE* (resistência de aderência à tração) aumenta. Deve-se salientar que a propagação do erro varia de 0,09 (na região central) a aproximadamente 0,30.

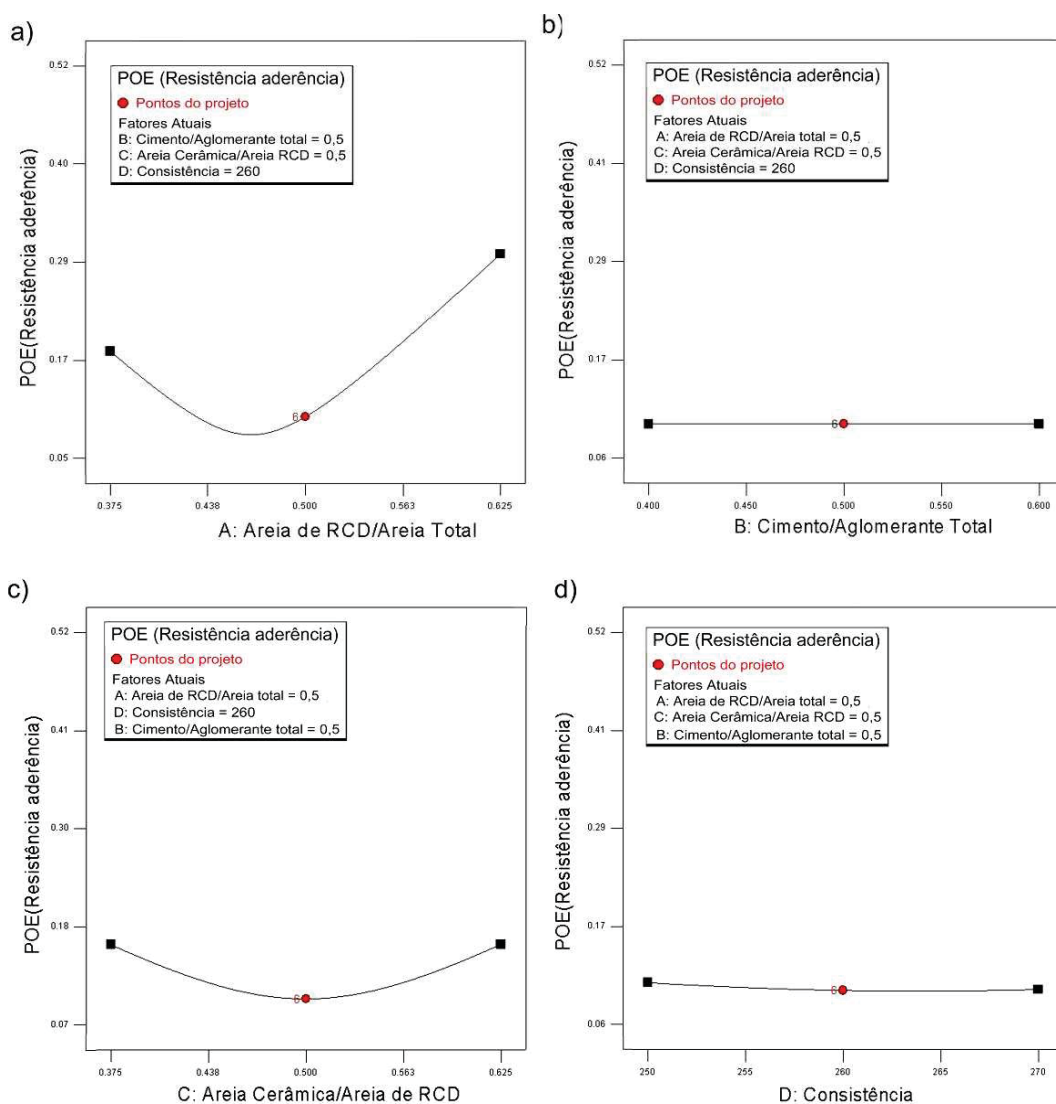


Figura 76: Efeitos principais dos fatores controlados sobre a propagação do erro: (a) Fator A (Areia de RCD/Areia total); (b) Fator B (Cimento/Aglomerante total); (c) Fator C (Areia Cerâmica/Areia de RCD); (d) Fator D (consistência).

A análise da Figura 76 permite ainda constatar um comportamento anisotrópico em relação aos efeitos de ambos os fatores, isto é, a taxa de variação do valor da função *POE* é

maior na direção do Fator A (Areia de RCD/Areia total) do que na direção do Fator C (Areia Cerâmica/Areia de RCD). Isto significa que um ajuste na proporção de areia de RCD presente na argamassa é mais efetivo na redução da propagação do erro e na melhoria da robustez.

A Figura 77 apresenta a perturbação para a função POE (resistência de aderência à tração). Este gráfico compara simultaneamente os efeitos dos quatro fatores estudados sobre a função *POE* medidos em relação ao ponto central do experimento. A análise desta figura corrobora as afirmações feitas no parágrafo anterior.

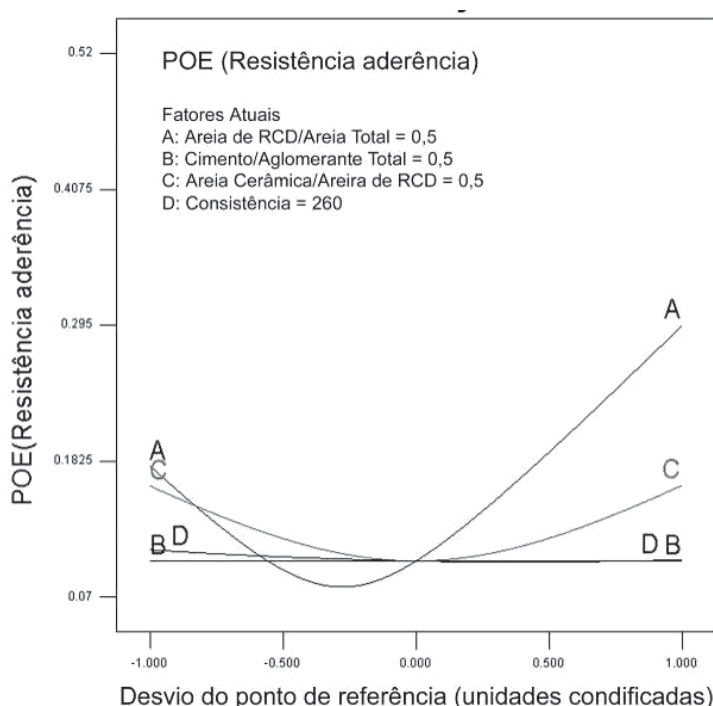


Figura 77: Gráfico de perturbação para POE (resistência de aderência à tração).

A Figura 78 apresenta o efeito da interação entre os fatores A (Areia de RCD/Areia total) e C (Areia Cerâmica/Areia de RCD) sobre a função *POE* para a resistência de aderência à tração.

4.6 ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO

A análise de otimização foi realizada conforme descrito no item 3.1.7. Assim como no item anterior, nesta análise foram consideradas somente as características de qualidade dos painéis, comprimento de fissuras e resistência de aderência à tração. O objetivo da análise é otimizar a combinação entre os fatores de controle: areia de RCD/areia total (Fator A),

cimento/aglomerante total (Fator B), areia cerâmica/areia de RCD (Fator C) e consistência (Fator D), de forma a atender a critérios pré-estabelecidos de desempenho, ao mesmo tempo em que a propagação do erro (resistência de aderência à tração) é minimizada.

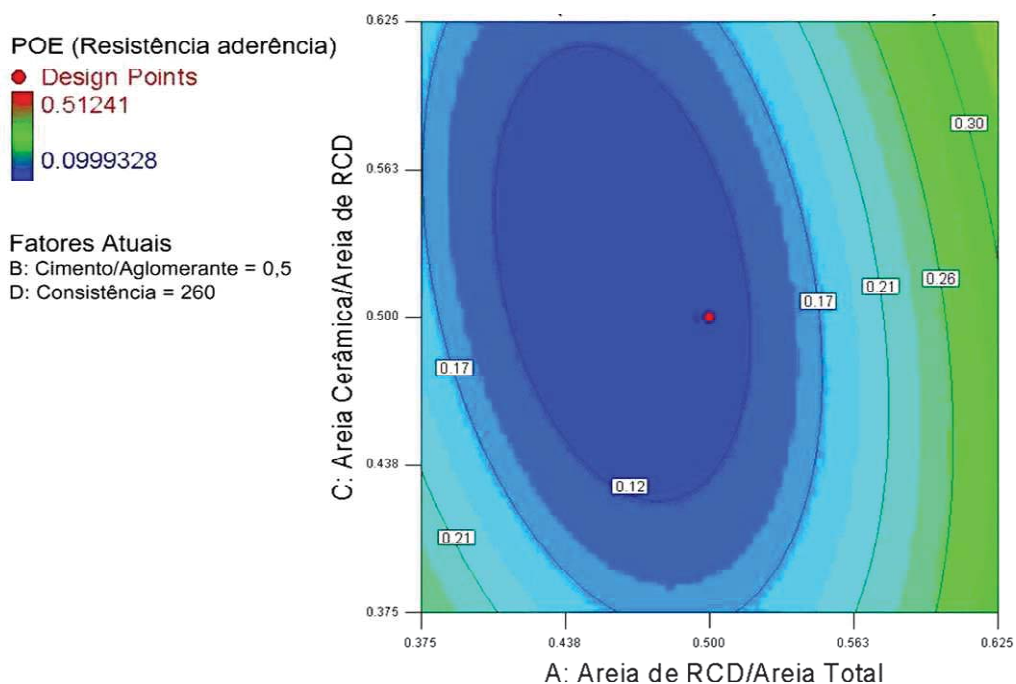


Figura 78: Efeitos de interação dos fatores A (Areia de RCD/Areia total) e C (Areia Cerâmica/Areia de RCD) sobre a propagação do erro.

Na análise, para cada combinação possível dos fatores de controle, é calculada uma função de deseabilidade, cujo valor indica o grau de atendimento aos critérios de otimização. O valor da função de deseabilidade varia entre 0 e 1, sendo que no limite superior se verifica o atendimento total aos critérios de otimização estabelecidos.

O critério utilizado foi o de maximizar a resistência de aderência à tração, utilizando como restrição um limite inferior de 0,3 MPa, minimizar o comprimento de fissura e minimizar a propagação do erro (resistência de aderência à tração), conforme é mostrado na Tabela 45. Nesta tabela também são apresentados os limites de variação tanto dos fatores de controle como das variáveis de resposta a otimizar. Os valores ressaltados em **negrito** representam a melhor condição possível de ser alcançada na otimização, o que corresponderia a uma deseabilidade igual a um. A restrição imposta à resistência de aderência seguiu a recomendação da norma NBR 13749 (ABNT, 1996), a qual estabelece um valor mínimo desta propriedade para revestimentos externos em argamassa (para revestimentos internos este valor

poderia ser menor). Embora seja possível adotar pesos diferentes para cada um dos critérios de otimização, o que, na prática, significaria priorizar um critério em detrimento dos demais, na presente análise foram adotados pesos iguais para os três critérios estabelecidos.

Tabela 45: Critérios de otimização.

Fator	Meta	Limite inferior	Limite superior
Areia de RCD/Areia Total	Controlado	0,375	0,625
Cimento/Aglomerante Total	Controlado	0,4	0,6
Areia Cerâmica/Areia de RCD	Controlado	0,375	0,625
Consistência	Controlado	250	270
Resistência aderência	Maximizar	0,3 ^(*)	0,42
POE (Resistência de aderência à tração)	Minimizar	0,09	0,51
Comprimento de Fissuras	Minimizar	127	1004

^(*) restrição imposta

As Figuras 79 e 80 apresentam graficamente o resultado da análise de otimização, obtido a partir a aplicação de um algoritmo numérico com o auxílio de um programa computacional. As Figuras apresentadas, denominados gráficos de rampas, mostram a combinação ótima dos fatores de controle (pontos vermelhos na Figura 80 e o desempenho estimado para esta combinação ótima (pontos azuis na Figura 79): resistência de aderência de 0,39MPa, comprimento de fissuras de 400 cm/m², e *POE* (resistência de aderência) de 0,295.

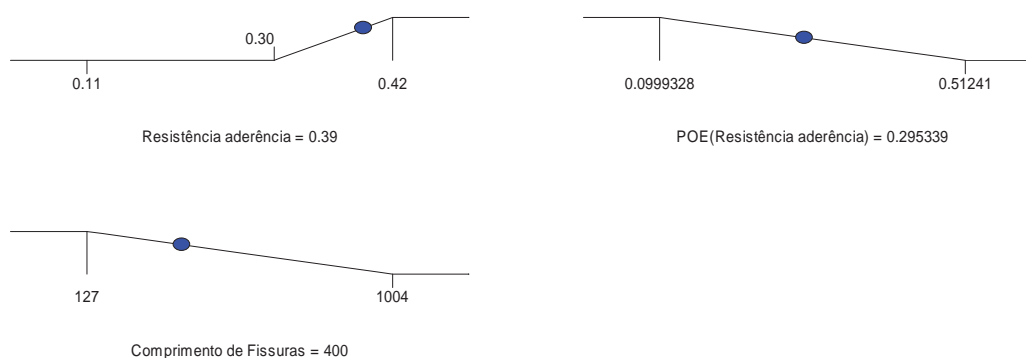


Figura 79: Rampas para as variáveis de resposta e POE.

De acordo com a Figura 79, a combinação ótima obtida para os fatores de controle foi a seguinte: Fator A (areia de RCD/areia total) no nível 0,59; Fator B (cimento/aglomerante total) no nível 0,60; Fator C (areia cerâmica/areia de RCD) no nível 0,625; Fator D (consistência) no nível 250mm.

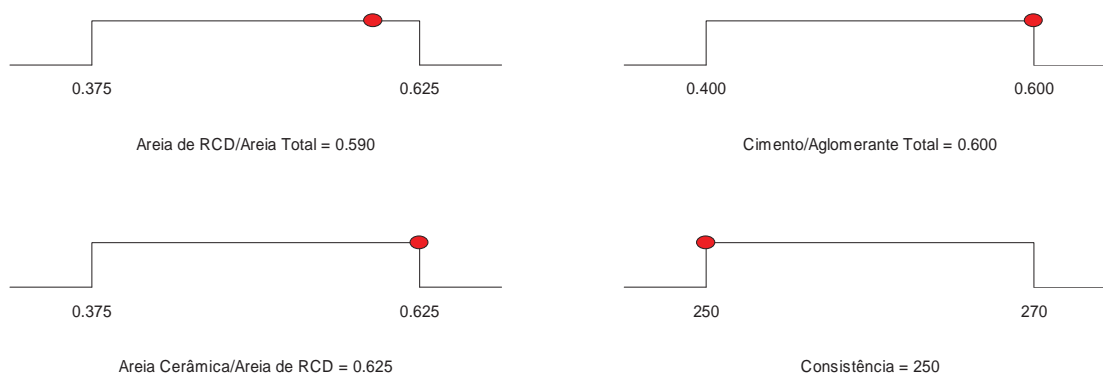


Figura 80: Rampas para os fatores de controle.

A Figura 81 apresenta os valores da função de desejabilidade calculados individualmente para cada critério (0,76 para a resistência de aderência; 0,69 para o comprimento de fissuração; 0,53 para a propagação do erro), bem como um valor global combinado de aproximadamente 0,65.

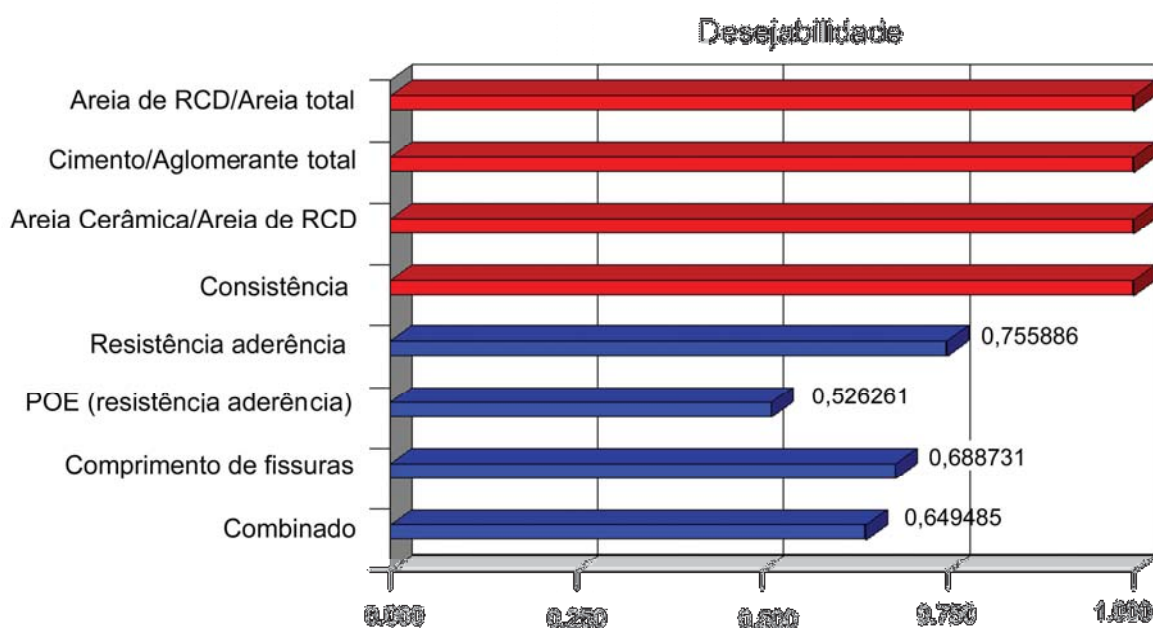


Figura 81: Função de desejabilidade.

A Figura 82 apresenta o efeito da interação entre os fatores A (areia de RCD/areia total) e C (areia cerâmica/areia de RCD) sobre a função de desejabilidade, os quais apresentaram significância também na análise de *POE* (resistência de aderência à tração) realizada no item

anterior. Os demais fatores tiveram seus níveis fixados segundo o resultado da análise de otimização. O Fator B (cimento/aglomerante total) foi fixado em seu nível 0,60 e o Fator D (consistência) foi fixado em seu nível 250.

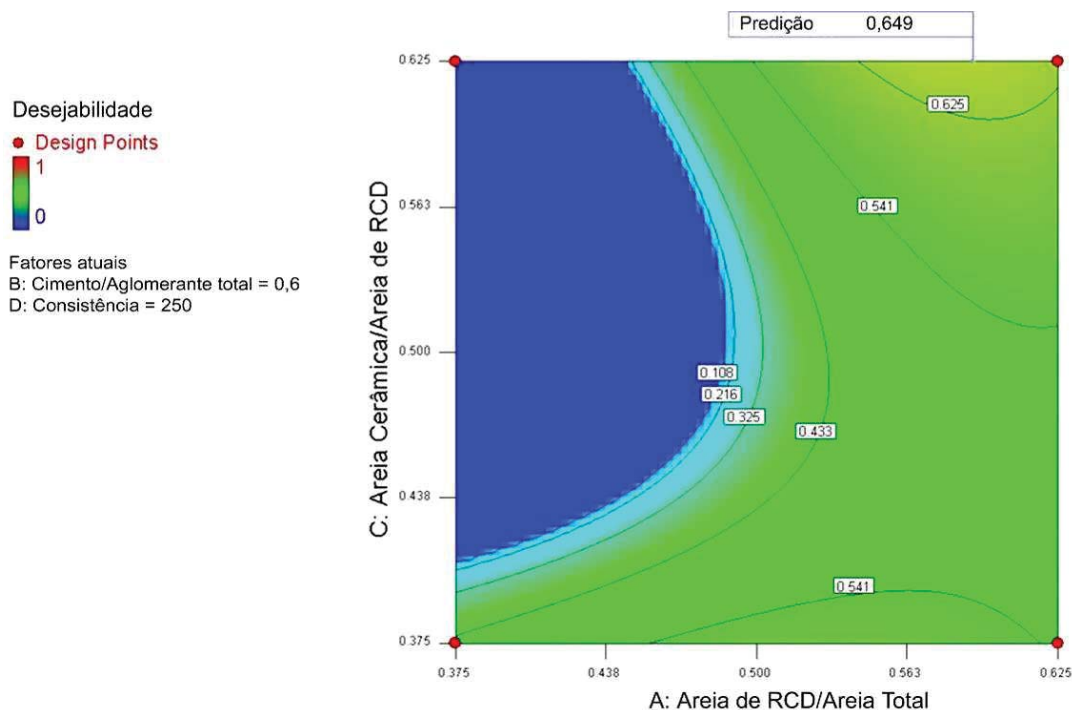


Figura 82: Efeitos de interação dos fatores A (Areia de RCD/Areia total) e C (Areia Cerâmica/Areia de RCD) sobre a desejabilidade.

A Figura 82 mostra mais claramente a região do espaço experimental em torno do ponto ótimo, no canto superior direito do gráfico. Esta região poderia ser delimitada estabelecendo-se limites (inferiores e superiores) mais abrangentes para as variáveis a serem otimizadas, definindo, desta forma, uma zona ótima, com maior utilidade prática na definição dos traços.

A Figura 83 apresenta um exemplo da obtenção gráfica de uma zona ótima, a partir da superposição das superfícies de resposta, obtidas nos itens anteriores, para a resistência de aderência, o comprimento de fissuração, e a propagação do erro (resistência de aderência). Neste gráfico, foram variados somente os fatores A (areia de RCD/areia total) e C (areia cerâmica/areia de RCD), os quais também apresentaram efeitos significativos sobre a propagação do erro (resistência de aderência). Os demais fatores, B (cimento/aglomerante total) e D (consistência), foram fixados respectivamente em seus níveis 0,60 e 250mm, obedecendo ao resultado da análise de otimização. Para determinar a zona ótima foram estabelecidos os seguintes critérios: resistência de aderência à tração mínima de 0,30MPa,

POE (resistência de aderência) inferior a 0,25 MPa e comprimento de fissuras máximo 450 cm/m².

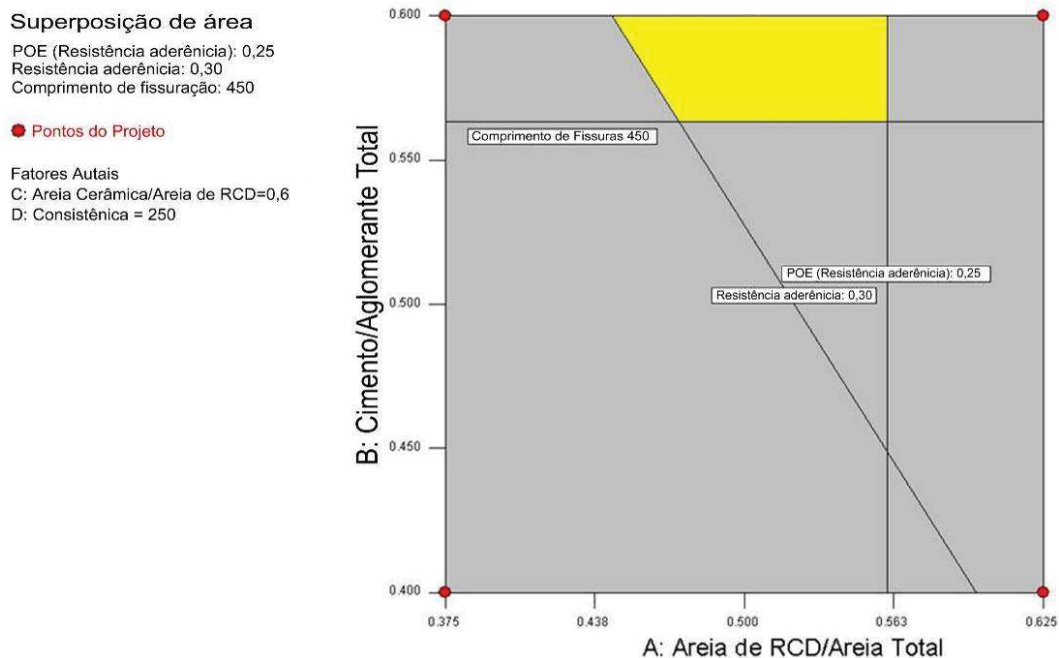


Figura 83: Otimização gráfica e definição da zona ótima

A área amarela mostrada no gráfico de superposição da Figura 83 representa a zona ótima, onde, em princípio, são obtidas argamassas de revestimento com melhor desempenho global, considerando, além das características de desempenho, a maior robustez do produto.

Por fim, é possível afirmar que a análise de otimização, utilizada em conjunto com a metodologia de projeto robusto, mostrou ser uma ferramenta efetiva na investigação do desempenho das argamassas de revestimento, indica a faixa ideal de trabalho das variáveis, para reduzir a variabilidade e, portanto, no aumento da robustez e qualidade do produto, bem como na determinação de critérios objetivos para a definição de traços que satisfaçam às exigências de projeto.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados apresentados no Capítulo 4, as seguintes conclusões quanto aos efeitos dos quatro fatores controlados no presente trabalho, A – Areia de RCD/Areia total, B – Cimento/Aglomerante total, C – Areia Cerâmica/Areia de RCD e D – Consistência, sobre as variáveis de respostas puderam ser estabelecidas:

(a) Ensaio no estado fresco

Quanto ao teor de ar incorporado, a quantidade de cimento, a quantidade de água, a quantidade de RCD e a quantidade de material cerâmico tiveram influência sobre esta propriedade. Para níveis elevados de cimento, maior foi o teor de ar incorporado obtido. No entanto, para níveis elevados da quantidade de RCD e de material cerâmico, uma diminuição desta variável de resposta foi observada. Este fato pode estar relacionado à quantidade de finos que preenchem os vazios das misturas, ocupando o espaço do ar.

Quanto ao ensaio de retenção de água, a quantidade de cal teve influência significativa nesta propriedade. A maior quantidade de cal nas argamassas, também pela presença de finos deste material, garantiu melhores resultados de retenção de água, ou seja, quanto menor a quantidade de cimento e maior a quantidade de cal maior a retenção de água. Observou-se também um aumento na retenção de água com o aumento da quantidade de material cerâmico e da quantidade de RCD.

(b) Ensaio no estado endurecido

No estado endurecido, as argamassas foram ensaiadas em corpos-de-prova prismáticos, nos quais foram avaliadas a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão. No

caso dos ensaios em painéis, as argamassas foram avaliadas pela resistência de aderência à tração e pelo comprimento de fissuras por metro quadrado.

Nos ensaios de resistência à compressão, a quantidade de cimento foi o fator preponderante sobre os resultados obtidos, independente da quantidade de RCD e de material cerâmico.

Na resistência à tração na flexão, os fatores preponderantes foram a quantidade de cimento e a quantidade de água a partir da variação da consistência entre 260 e 280 mm.

Na avaliação do comprimento de fissura por metro quadrado de argamassa, foi verificada a importância da quantidade de cimento. Em níveis elevados deste Fator A fissuração é bem menor se comparado a níveis baixos do mesmo fator.

Quanto à resistência de aderência, o fator mais significativo foi a quantidade de cimento. Níveis elevados deste fator resultaram em valores elevados de resistência de aderência à tração. As quantidades de RCD, de material cerâmico e de água também influenciaram na resistência de aderência à tração. Os melhores resultados de resistência de aderência à tração foram obtidos entre o nível 0,50 e 0,625 de material cerâmico e para a consistência 250mm.

(c) Análise de robustez

A análise de robustez mostrou-se uma ferramenta efetiva na identificação dos fatores de controle que podem ser utilizados na redução da variabilidade e, portanto, no aumento da robustez e qualidade da argamassa de revestimento estudada. A análise se restringiu às características de desempenho medidas nos ensaios em painéis, e, neste caso, concluiu-se que tanto a proporção de agregado de RCD quando a quantidade de cerâmica presentes na sua composição são fatores que podem ser ajustados no sentido de reduzir a variabilidade transmitida à resistência de aderência. Já quanto ao comprimento de fissuração, nenhum dos fatores investigados apresentou efeito sobre a variabilidade, não podendo, portanto serem utilizados no seu controle.

(d) Análise de otimização.

A análise de otimização, utilizada em conjunto com a metodologia de projeto robusto, mostrou-se uma ferramenta efetiva na investigação do desempenho das argamassas de revestimento, permitindo a determinação de uma condição ótima ou uma zona ótima, onde, em princípio, são obtidas argamassas com melhor desempenho global, satisfazendo as características de desempenho exigidas e melhorando a robustez do produto.

O melhor traço obtido foi para a combinação com a relação Areia de RCD/Areia Total 0,59; a relação cimento/aglomerante 0,60; a relação Areia Cerâmica/Areia de RCD 0,625; e a Consistência de 250mm, cujo desempenho estimado apresentou uma resistência de aderência de 0,39MPa, comprimento de fissuras de 400 cm/m², e propagação do erro na resistência de aderência de 0,295.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes composições de argamassas de revestimento com a incorporação de RCD sobre algumas propriedades no estado fresco (retenção de água e teor de ar incorporado) e no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência de aderência e fissuração). No entanto, várias questões não foram investigadas neste trabalho devido à necessidade de delimitação do escopo. Neste sentido, algumas sugestões para trabalhos futuros são relacionadas abaixo:

- Verificar a influência da forma dos grãos dos agregados reciclados nas variáveis de resposta avaliadas no presente trabalho;
- Avaliar a influência, nas propriedades no estado fresco e endurecido, da pré-umidificação dos agregados reciclados durante a preparação das argamassas;
- Avaliar a incorporação de aditivos químicos, como incorporadores de ar, em argamassas com RCD e a sua influência no estado fresco e endurecido;
- Avaliar a permeabilidade à água em argamassas de revestimento com RCD;
- Avaliar a influência da variação da temperatura e da umidade na fissuração por retração em argamassas produzidas com RCD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5735: **Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____. NBR 6508 - **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7175 – **Cal hidratada para argamassas - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 7200 - **Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1982.

_____. NBR NM 248 - **Agregado - Determinação da Composição Granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 46 - **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 30- **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 45 - **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR 10004 – **Resíduos sólidos –**. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 12142 - **Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. NBR 13276 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13277 - **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água.** Rio de Janeiro, 1995.

_____. NBR 13278 - **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13279 - **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à compressão - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13281 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13528 - **Resistência de aderência à tração – arrancamento.** Rio de Janeiro, 1995.

_____. NBR 13530 - **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas.** Rio de Janeiro, 1995.

_____. NBR 13749 - **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação.** Rio de Janeiro, 1996.

ALVES, N. J. D.; DO Ó, S. W. **Aditivos incorporadores de ar e retentores de água.** In: BAUER, E. **Revestimentos de argamassa características e peculiaridades.** 1ª Ed. Brasília LEM-UnB, Sinduscon, 2005. Página 46-58.

BASTOS, P.K.X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassa mistas de revestimentos.** Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia e Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

BAUER, E.; SOUZA, J. G. G.de. **Materiais constituintes e suas funções.** In: BAUER, E. **Revestimentos de argamassa características e peculiaridades.** 1ª Ed. Brasília LEM-UnB, Sinduscon, 2005. Página 25-36.

BAVARESCO, C. R. **Utilização de entulho reciclado para produção de argamassas.** 2001. Florianópolis. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina.

BERNARDES, A. **Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição no município de Passo Fundo - RS.** 2006. Dissertação – Universidade de Passo Fundo.

BOLORINO, H.; CINCOTTO, M. A. **Adequação de traços de argamassa mista conforme o tipo de cimento**. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 1999. p.183-191.

BORKOWSKI J. J.; LUCAS, J. M.. Designs of mixed resolution for process robustness studies. **Technometrics**, v. 39, p. 63-70, 1997.

BORROR, C. M.; MONTGOMERY, D. C.. Mixed resolution designs as alternatives to Taguchi inner/outer array designs for robust design problems. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 17, p. 117-127, 2000.

BORROR, C. M.; MONTGOMERY, D. C.; MYERS, R. H.. Evaluation of statistical designs for experiments with noise variables. **Journal of Quality Technology**, 2002.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA n. 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul. 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/conama>> Acesso em: 15 dezembro. 2007.

BRITO FILHO, J. A. **Cidade versus entulho**. In: 2º Sem. Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. São Paulo, IBRACON, 1999. p56-57.

CALHAU, E. L.; TRISTÃO, F. A. **Influência do teor de ar incorporado nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. III Simpósio brasileiro de Tecnologia das argamassas. Vitória ES, abril 1999. p219-230.

CAMARGO, Antônio. Minas de Entulho. Revista Técnica nº 15. Editora Pini. p. 15 Mar/Abr 1995.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo(SP), 1996.

CARASEK, H. **Apostila da disciplina Tecnologia das Argamassas**. Goiânia: Curso de Mestrado UFG, 2005.

CARASEK, H.; COSTA, E. B. C.; DUARTE, R. J. **Análise da influência do tipo de equipamento e do operador nos resultados de resistência de aderência dos revestimentos de argamassa**. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. ENTAC, 2006. p.4061-4072.

CARASEK, H. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo, IBRACON, 2007.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. **Requisitos e critérios de desempenho para revestimentos de camada única em argamassa de cimento e cal**. In: I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 1995. p.326-337.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas**. In: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 1999.

CARNEIRO, Alex P. et al. **Construction waste characterisation for production of recycled aggregate - Salvador/Brasil**. In: SCIENCE AND ENGINEERING OF RECYCLING FOR ENVIROMENTAL PROTECTION, Wascon, 2000. Anais... Leeds, 2000. p.825-835.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CARASEK, H. **Argamassa de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 118p. Boletim 68.

COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO DE PORTO ALEGRE, 2005. Disponível em : <http://www.abcp.org.br/comunidades/poa/center.htm>.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. **Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate**. Construction and Building Materials, N. 23, pg 289–294, 2008.

COSTA, F. N. **Processo de produção de revestimento de fachada de argamassa : problemas e oportunidades de melhoria**. 2005. 180p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

DESAI, S. B. **Sustainable developlment and recycling of concrete aggregate**. Use of recycled concrete aggrete. DHIR, HENDERSON & IMABCHIYA eds. Tomas Telford, 1998.

FILOMENO, ORLANDO LUZ, **Caracterização das argamassas de assentamento empregadas na região de Florianópolis e estudo comparativo entre argamassas de assentamento de cimento e cal e cimento e saibro**. Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Santa Catarina. 1993.

FORMOSO, C. T.; JOBIM, M. S. S.; COSTA, A. L.; ROSA, F. P. **Perdas de materiais na construção civil: um estudo em canteiros de obras no Estado do Rio Grande do Sul.** In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE TECNOLOGIA E GESTÃO NA PRODUÇÃO DE EDIFÍCIOS: Soluções para o terceiro milênio., 1998, São Paulo. Anais... São Paulo: POLI-USP. v. 1, p. 299-307.

GREEN, K. M.; CARTER, M. A.; HOLL, W. D.; WILSON, M. A. The effects of lime and admixtures on the water-retaining properties of cement mortars. **Cement and Concrete Research**, vol.29, 1999.

GROOT, C. J. W. P. **Effects of water on mortar- brick bond.** Technische university Delft, 1993.

HAMASAKI, L. T.; NETO, C. S.; FLORINDO, M. C. **Utilization of construction waste in rendering mortar.** In: Concrete in the service of mankind. – International conference concrete for environment enhancement and protection. Dundee, 1996. Proceedings. Grã Bretanha, Ravindra & Thomas, 1996.

HELENE, P. R. L.; SOUZA, R. de. **Controle da qualidade na indústria da construção civil.** In: Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo. Divisão de Edificações. Tecnologia de Edificações. São Paulo: Pini, 1988. p. 537-542.

ISAIA, G. E., et al., **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, IBRACON, 2007.

ISHIKAWA, P. H. **Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural.** Campinas, 2003. Dissertação (mestrado) – Faculdade de engenharia civil, arquitetura e urbanismo - Universidade Estadual de Campinas.

JADOVSKI, I. **Diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição.** 2005. 178p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

JOHN, V.M., **Reciclagem de resíduos na Construção Civil – contribuição à pesquisa e desenvolvimento.** São Paulo. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

JOHN, V. M. **Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas.** V Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas. São Paulo junho 2003. ANTAC. P47-62.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2001. 270 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos.** São Paulo, 1997. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, USP, 1997.

LEVY, S. M. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos, Produzidos com Resíduos de concreto e alvenaria.** São Paulo, 2001. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PCC. USP.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. **Reciclagem de entulhos na construção civil, a solução política e ecologicamente correta.** I Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas. p. 315 – 325. Goiânia, 1995.

LIMA, J. A. R. de. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** São Carlos, 1999 Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

MARTINELLI, F.A. **Contribuição ao estudo de dosagem das argamassas mistas destinadas ao assentamento e revestimento de alvenarias.** São Paulo, 1989. 168p - Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Civil.

MATOS, G.; WAGNER, L. **Consumption of Materials in the United States 1900-1995.** Us Geological Survey. [1999] 9p.

MIRANDA, Leonardo Fagundes Rosembach. **Estudo dos fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado.** 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MORAIS, F. L.; SELMO, S. M. S. **Estudo comparativo de fatores intervenientes na fissuração de revestimentos de argamassa de cimento e cal.** São Paulo, 1999. (Relatório Final – Iniciação Científica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MOURA, C.B. **Aderência de revestimentos externos de argamassas em substratos de concreto: influência das condições de temperatura e ventilação na cura do chapisco.** 2007. 180p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. 5.ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 684 p.

MYERS, Raymond H.; MONTGOMERY, Douglas C.. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. 2.ed. Estados Unidos: Wiley-Interscience, 2002. 792 p. (Wiley Series in Probability and Statistics)

PAES, I. N. L.; GONÇALVES (Autor), S. R. de C (Autor). Dos momentos iniciais pós-aplicação ao desenvolvimento da aderência In: BAUER, E. (Coord.). **Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades**, 2005. Disponível em:http://www.abcp.org.br/comunidades/brasil/ download/LNK_05/REVESTIMENTOS_D E_ARGAMASSA.pdf Data de acesso: 10/03/2012.

PARAVISI S. **Avaliação de sistemas de produção de revestimentos de fachada com aplicação mecânica e manual de argamassa**. 2008. 178p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

PASSOS, J. S.; CÂNDIDO, W. F.; MENDES, M. V.; ARAÚJO, A. M.; CARASEK, H. **Fissuração de argamassas de revestimento devido à retração plástica**. XII ENTAC Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Fortaleza – CE. Outubro 2008

PEREIRA, C.H.A.F. (2007). **Contribuição ao Estudo da Fissuração, da Retração e do Mecanismo de Descolamento do Revestimento à Base de Argamassa**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação: E.TD – 006 A/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 195p.

PEREIRA et al. **Teor de cimento ou A/C: Quem exerce maior influência na resistência de aderência**. In: I Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Vitória - ES, 1999.

PHADKE, M. S. **Quality Engineering Using Robust Design**. 1ª edição. New Jersey: P T R prentice-Hall, 1989.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas**. São Carlos, 1986. 137p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferencia de resíduos sólidos da construção urbana**. São Paulo, 1999. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

RILEM - MR – 3 - **The complex workability consistence - plasticidade**. St, Ed. France, 1982.

SABATINI, F. H. Tecnologia de execução de revestimentos de argamassa. In: SIMPÓSIO DE APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DO CONCRETO, 13., São Paulo. **Anais...**São Paulo: EPUSP, 1990. 32p.

SALVADOR G. A.B. **Otimização da distribuição granulométrica do agregado miúdo para o uso em revestimentos de argamassa na cidade de Sant'ana do Livramento - RS.** 2005. 130p. Trabalho de Conclusão (Mestrado Profissional) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

SANTANA, M. J. A.; CARNEIRO, A. P.; SAMPAIO, T. S. **Uso do agregado reciclado em argamassa de revestimento.** In: CASS, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. (Org.). Reciclagem de entulho para produção de material de construção. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. p. 262-299.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas de edifícios.** 1989. 202p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, USP, São Paulo, 1989.

SELMO, S. M. S.; BUCHER, H. R. E. **O saibro na formulação de argamassas de assentamento e revestimento: contribuição ao estabelecimento de critérios para dosagem.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 2.; São Paulo, 1990. Anais. São Paulo, ABCP, 1990. v.2, p. 477-96.

SILVA. A. S.R. da. et all. **Argamassa inorgânica com emprego de entulho reciclado.** II simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas. p. 201 - 207 Salvador - BA, 1997

SILVA, J.; de BRITO J.; VEIGA, R. **Incorporation of fine ceramics in mortars.** Construction and Building Materials 23 (2009) 556–564. Novembro 2007.

SILVEIRA, Z. de C. **Análise Estatística e Otimização de Parâmetros de Projeto em Componentes de Sistemas Mecânicos.** Campinas, 2003. Tese (doutorado) – Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de São Paulo.

SJÖSTRÖM, C. **Service life of the building. In. Applications of the performance concept in building. Proceedings.** CIB: Tel Aviv, 1996 v. 2, p.6-16;6-11.

TAGUCHI, Genichi. **Introduction to Quality Engineering - Designing Quality into Products and Processes.** Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986.

THOMAZ, Ercio. **Trincas em Edifícios: Causas, Prevenção e Recuperação.** São Paulo: PINI/IPT/EPUSP, 1989.

TRISTÃO, F.A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

TRISTÃO, F. A.; MACHADO, V. K. C. B. L. **Análise de métodos de retenção de água e consistência em argamassas.** V Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas. São Paulo junho 2003. ANTAC. P233-242.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, Denise C. C.; **Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 47-63, out./dez. 2004.

WHITCOMB, P. J.; ANDERSON, M. J. **Robust design – reducing transmitted variation: finding the plateaus via response surface methods.** <www.statease.com/pubs/robust5.pdf> acessado em 15/05/2009.

ZORDAN, S.E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** Campinas. 1997. 140p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP.