

PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DE MATRIZ CIMENTÍCEA
INCORPORADOS COM LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS

ALEXANDRE VIANNA BAHIENSE

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
CAMPOS DOS GOYTACAZES-RJ
JUNHO – 2011

PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DE MATRIZ CIMENTÍCEA
INCORPORADOS COM LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS

ALEXANDRE VIANNA BAHIENSE

“Tese de Doutorado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais”

Orientador: Prof. Sérgio Neves Monteiro

Co-orientador: Prof. Jonas Alexandre

CAMPOS DOS GOYTACAZES-RJ

JUNHO – 2011

Bahiense, Alexandre Vianna

Pavimentos intertravados de matriz cimentícia incorporados com lama do beneficiamento de rochas ornamentais / Alexandre Vianna Bahiense. – Campos dos Goytacazes, 2011.

vii, 137 f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) --Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2011.

PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DE MATRIZ CIMENTÍCEA
INCORPORADOS COM LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS

ALEXANDRE VIANNA BAHIENSE

“Tese de Doutorado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais”

Aprovada em 28 de junho de 2011

Comissão Examinadora:

Prof. Lucio Terra Petrucci (D. Sc.) – FAETEC

Prof. Carlos Mauricio Fontes Vieira (D. Sc.) – UENF

Prof. Jonas Alexandre (D. Sc.) – UENF
(Co-orientador)

Prof. Sérgio Neves Monteiro (D. Sc.) – UENF
(Orientador)

Dedico este trabalho aos meus amados pais, Edenildo e Istael, pela herança que deixaram-me em vida, a educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade e por esta conquista, que a dedico para sua honra e glória.

Agradeço ao Professor D. Sc. Jonas Alexandre pelos conhecimentos transmitidos, cobrança, orientação e amizade durante a realização desta pesquisa. Por fazer-me compreender as cobranças como um novo caminho a seguir, como um auxílio e não como uma repreensão.

Agradeço ao Professor D. Sc. Sérgio Neves Monteiro pelos conhecimentos técnicos e pronta disponibilidade, por todo empenho, investimento e objetividade na defesa da pesquisa. Agradeço principalmente pelo incentivo e energia a mim transmitida, que sempre norteou sua admirável vida acadêmica.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil André e Vanusa, e a Luciana do Laboratório de Materiais Avançados, pelo apoio e dedicação na realização dos experimentos. Em especial ao Milton pelo apoio técnico e amizade.

Agradeço à Rosane Toledo, ao Professor D. Sc. Sergio Gonzales e ao Professor D. Sc Gustavo Xavier, Professor D. Sc Carlos Mauricio Fontes Vieira pelo acompanhamento científico, companheirismo e pronta disponibilidade para resolução dos problemas encontrados por este árduo caminho.

Agradeço ao Professor D. Sc Lucio Petrucci pelo disponibilização de equipamentos do CVT e pela colaboração na finalização deste trabalho.

Agradeço, pela amizade na alegria e no trabalho, dos velhos amigos de república e agregados Vinícius, Jair, Enerson (pretinho), Fabio (Pará), André Destefani, Luiz Fernando, Marcos, Olímpio, Anderson (gaúcho) e ao grande amigo Leonardo Pedroti.

Agradeço ao Laboratório CETAN – Centro Tecnológico de Análises, em especial ao Sr. Msc Carlos Henrique Pessôa de Menezes e Silva, pelo apoio técnico/científico e ensaios laboratoriais gentilmente cedidos em prol desta pesquisa.

Agradeço à Gislaíne Polonini pelas orações, pelo carinho, incentivo, pelo nosso plano e pelo amor incondicional a mim dedicado na etapa final deste trabalho.

Expresso meus sinceros agradecimento a todos os professores, técnicos e todos demais servidores que contribuíram na minha formação e apoio às atividades.

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

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

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

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	I
LISTA DE FIGURAS.....	III
RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VII
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Aspectos Gerais.....	1
1.2 – Objetivos	3
1.2.1 – Objetivo geral	3
1.2.2 – Objetivos específicos.....	3
1.3 – Justificativas.....	4
1.4 – Apresentação e organização da tese.....	5
CAPÍTULO 2 – RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS: REAPROVEITAMENTO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	7
2.1 – Definição e Classificação de Resíduos	7
2.2 – Rochas Ornamentais: Definição e Considerações Gerais	10
2.3 – Uso de Rochas Ornamentais na Construção Civil	11
2.4 – Espírito Santo: Pólo Produtor de Rochas Ornamentais e Grande Gerador de Resíduos	11
2.5 – Beneficiamento de Rochas Ornamentais: Problemas ambientais causados pela deposição inadequada	13
2.6 – Reaproveitamento de Resíduos.....	17
2.6.1 – Generalidades	17
2.6.2 – A construção civil como alternativa para o reaproveitamento de resíduos	18
2.6.3 – Incorporação da lama do beneficiamento de rochas ornamentais em pavimentos intertravados	20

CAPÍTULO 3 – PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DE MATRIZ CIMENTÍCEA.....	22
3.1 – Pavimentos Intertravados de Concreto	22
3.2 – Argamassas e Concretos.....	24
3.3 – Estrutura do Concreto de Cimento Portland	25
3.3.1 – Agregados	25
3.3.2 – Pasta de Cimento	26
3.3.3 – Zona de Transição: Microestrutura do Concreto	26
3.4 – Concretos para Pavimentos Intertravados	29
3.5 – Composição dos Blocos Intertravados.....	31
3.6 – Resistência a compressão	31
3.7 – Dosagem em blocos de concreto para pavimentos intertravados	33
3.6 – Caracterização Ambiental dos Blocos Intertravados.....	34
3.6.1 – Tecnologia de Solidificação/Estabilização	35
CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1 - Materiais	38
4.1.1 - Areia	38
4.1.2 – Brita	39
4.1.3 – Cimento	39
4.1.4 – Aditivo superplastificante	40
4.1.5 – LBRO.....	42
4.2 – Métodos Utilizados	43
4.2.1 - Caracterização dos materiais	43
4.2.1.1 - Espectroscopia de raios X	43
4.2.1.2 - Difração de raios X	44
4.2.1.3 – Características físicas: granulometria e densidade real dos grãos	44
4.2.1.4 – Análise Microestrutural: Análise da Zona de Transição pelo Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV.....	45
4.3 – Dosagem.....	45
4.3.3 – Planejamento em Rede Simplex – Superfície de Resposta	45
4.3.4 – Planejamento Fatorial – moldagem dos pavimentos	48

4.3.5 – Máquina de vibro/compressão.....	51
4.3.6 – Programa <i>Statística</i>	52
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1 - Areia	53
5.2 - Brita	54
5.3 - LBRO	54
5.4 – Planejamento Simplex – superfície de resposta entre os agregados	56
5.4.1 – Modelo Linear	59
5.4.2 – Modelo Quadrático	63
5.4.3 – Modelo Cúbico Especial	67
5.4.4 – Modelo Cúbico Completo	69
5.5 – Planejamento Fatorial	74
5.5.1 – Determinação dos fatores do planejamento fatorial	75
5.5.2 – Determinação da matriz de experimentos e superfície de resposta do planejamento fatorial	86
5.5 – Análise Microestrutural.....	95
5.5.1 – Areia:	96
5.5.2 – LBRO:.....	97
5.5.3 – T17 – a/c=0,4:	99
5.5.4 – T18 – a/c=0,4:	102
5.5.5 – T17 – a/c=0,6:	105
5.5.6 – T18 – a/c=0,6:	107
5.5.7 – T20 – a/c=0,5:	110
5.6 – Caracterização Ambiental	112
CAPÍTULO 6 – CONCLUSOES	119
7.1 – Considerações sobre o trabalho e os resultados	119
7.2 – Considerações Finais.....	120
7.3 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	121
CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química da granalha.....	15
Tabela 3.1 – Resistência média à compressão de rochas ígneas brasileiras (BAUER, 1994).....	25
Tabela 3.2 – Resistência média à compressão de rochas norte americanas (WOOLF apud NEVILLE, 1988).....	25
Tabela 4.1 – Composição do CP V ARI – Holcin. Dados do Fabricante.....	38
Tabela 5.1 – Composição química do resíduo em forma de óxidos.....	54
Tabela 5.2 - Matriz de experimentos.....	56
Tabela 5.3 – Ensaio de determinação do Índice de Vazios Mínimo ou Densidade Aparente Seca Máxima (e).....	57
Tabela 5.4 – Pontos usados no modelo linear.....	58
Tabela 5.5 – Parâmetros usados no modelo linear.....	59
Tabela 5.6 – Valores previstos pelo Modelo Linear e valores médios observados de IVM.....	60
Tabela 5.7 - ANOVA do Modelo Linear.....	61
Tabela 5.8 – Pontos usados no modelo linear.....	62
Tabela 5.9 – Parâmetros usados no modelo quadrático.....	63
Tabela 5.10 – Valores previstos pelo modelo quadrático e médios observados de IVM.....	64
Tabela 5.11 - ANOVA do Modelo Linear.....	64
Tabela 5.12 – Pontos usados no modelo quadrático.....	66
Tabela 5.13 – Intervalos de confiança dos coeficientes do modelo quadrático.....	67
Tabela 5.14 – Pontos experimentais do Modelo Cúbico Completo.....	68
Tabela 5.15 – Intervalos de confiança dos coeficientes do modelo cúbico completo.....	69
Tabela 5.16 – Valores previstos pelo modelo cúbico completo e médios observados de IVM.....	70
Tabela 5.17 - ANOVA do modelo cúbico completo.....	71
Tabela 5.18 - Pontos tomados na superfície de resposta.....	73
Tabela 5.19 - Traços em massa para 10% de cimento.....	75

Tabela 5.20 - Traços em massa (g) para teor de cimento de 10% e $a/c=0,5$	75
Tabela 5.21 - Traços em massa (g) para teor de cimento de 10% e $a/c=0,7$	77
Tabela 5.22 - Resistência a compressão para cimento = 10% e $a/c=0,7$	77
Tabela 5.23 - Traços em massa para 15% de cimento.....	79
Tabela 5.24 - Traços em massa (g) para teor de cimento de 15% e $a/c=0,4$	79
Tabela 5.25 – Resistência à compressão para cimento = 15% e $a/c=0,4$	80
Tabela 5.26 - Traços em massa (g) para teor de cimento de 15% e $a/c=0,5$	80
Tabela 5.27 – Resistência à compressão para cimento = 15% e $a/c=0,5$	81
Tabela 5.28 - Traços em massa (g) para teor de cimento de 15% e $a/c=0,7$	81
Tabela 5.29 – Resistência à compressão para cimento = 15% e $a/c=0,7$	81
Tabela 5.30 - Traços em massa para 10% de cimento.....	82
Tabela 5.31 – Traços em massa (g) para teor de cimento de 20% e $a/c=0,4$	82
Tabela 5.32 - Resistência à compressão para cimento = 20% e $a/c=0,4$	83
Tabela 5.33 – Traços em massa (g) para teor de cimento de 20% e $a/c=0,6$	83
Tabela 5.34 - Resistência à compressão para cimento = 20% e $a/c=0,6$	83
Tabela 5.35 - Traços T20 em massa (g) para teor de cimento de 20% e $a/c=0,5$	84
Tabela 5.36 – Convenção de sinais adotada no planejamento fatorial.....	84
Tabela 5.37 - Matriz de experimentos fatorial.....	85
Tabela 5.38 – Parâmetros usados no modelo fatorial.....	88
Tabela 5.39 – ANOVA da regressão fatorial.....	89
Tabela 5.40 – Pontos de teste.....	91
Tabela 5.41 – Resultados da caracterização ambiental segundo a norma brasileira.....	111-112
Tabela 5.42 – Caracterização ecotoxicológica do extrato lixiviado da AFNOR XPX 31-211.....	113-114
Tabela 5.43 - Caracterização ecotoxicológica crônica para fator de toxicidade do extrato lixiviado da AFNOR XPX 31-211.....	114
Tabela 5.44 – Caracterização ecotoxicológica crônica para fator de toxicidade do extrato lixiviado da AFNOR XPX 31-211 do pavimento comercial.....	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mapa dos Principais Núcleos de Extração e Beneficiamento de Rochas no Espírito Santo.....	12
Figura 2.2 – (a) Blocos de Rocha em Estado Bruto; (b) Processo de Serragem no Tear. (a) LBRO na Serragem dos Blocos; (b) Granalha.....	14
Figura 2.3 – (a) LBRO na Serragem dos Blocos; (b) Granalha.....	15
Figura 3.1 – Diferentes formas para intertravados (SOO LEE, 2003).....	22
Figura 3.2 – Micrografias da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento (G) = agregado, (P) e (C) = pasta de cimento (MORANVILLE-REGOURD, 1992).....	27
Figura 3.3 – Representação esquemática da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado (MEHTA e MONTEIRO, 1994).....	27
Figura 3.4 – Máquina de vibro-compressão para confecção de blocos de pavimentos de concreto (HOLT, 2006).....	29
Figura 3.5 – Ensaio de compressão para pavimentos intertravados (FIORITI 2007).....	32
Figura 4.1 – (a) ilustração do mecanismo de repulsão eletrostática para cadeia de naftaleno e melanina; (b) ilustração do mecanismo de repulsão estérica para a cadeia de policarboxilato (COLLEPARD, 1999).....	40
Figura 4.2 – Determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante pelo método AFREM desenvolvido por DE LARRARD <i>et al.</i> (1997).....	41
Figura 4.3 – Curvas log (Tm) <i>versus</i> teor de SP para pasta de aglomerantes (CASTRO, 2005).....	41
Figura 4.4 – Função (sistema) que liga os fatores às respostas (BARROS NETO, 2003).....	48
Figura 4.5 – Máquina de vibro-compressão para confecção dos pavimentos de concreto.....	50
Figura 5.1 - Curva granulométrica da areia.....	52
Figura 5.2 - Curva granulométrica da brita.....	53
Figura 5.3 - Curva granulométrica da LBRO.....	53
Figura 5.4 - Difratograma de raios X da LBRO.....	55
Figura 5.5 – Diagrama de Pareto para o modelo linear.....	60

Figura 5.6 - Superfície de resposta gerada pelo modelo linear.....	61
Figura 5.7 – Diagrama de Pareto para o modelo quadrático.....	63
Figura 5.8 - Superfície de resposta gerada pelo modelo quadrático.....	65
Figura 5.9 – Diagrama de Pareto para o modelo cúbico especial.....	67
Figura 5.10 – Diagrama de Pareto para o modelo cúbico completo.....	69
Figura 5.11– Diagrama de Pareto para o modelo cúbico completo modificado....	70
Figura 5.12 - Superfície de resposta gerada pelo modelo cúbico completo.....	72
Figura 5.13 – Pontos escolhidos no interior da superfície de resposta gerada pelo modelo cúbico completo.....	74
Figura 5.14 – Aspecto geral dos pavimentos com 10% de cimento e 0,5 de a/c demonstrando falta de coesão.....	76
Figura 5.15 – T14 extremamente rugoso e T19 com fluidez excessiva.....	78
Figura 5.16 – Pontos escolhidos no interior da superfície de resposta gerada pelo modelo cúbico completo, incluindo o ponto central T20.....	86
Figura 5.17 – Traço T20 sem porosidade excessiva e consistência adequada....	87
Figura 5.18 – Diagrama de Pareto para o fatorial.....	89
Figura 5.19 – Superfície de resposta do planejamento fatorial.....	90
Figura 5.20 – Pontos de teste da superfície de resposta do planejamento fatorial.....	91
Figura 5.21 – Traço T22 com consistência adequada e sem porosidade excessiva.....	92
Figura 5.22 – Traço T21 com consistência inadequada e perda de pasta.....	92
Figura 5.23 – Esquema de avanço das leituras do MEV.....	93
Figura 5.24 – Microestrutura da Areia, com os aumentos de: (a) 50x, (b) 80x; (c) e (d) 100x.....	94
Figura 5.25 – Microestrutura LBRO, com os aumentos de: (a) 100x, (b) 200x; (c) 300x, (d) 400, (e), (f) 500x e (g) e (h) 1000x.....	95-96
Figura 5.26 – T17 – a/c=0,4 com porosidade elevada, com os aumentos de: (a) 20x; (b) 46x, (c) 22x; (d) 50x; (e) 21x e (f) 47x, g) e (h) 100x.....	97-98
Figura 5.27 – T17 – a/c=0,4. Nota-se a zona de transição e aglomeração de agregados (LBRO)), com os aumentos de: (a) 200x e (b) 500x, (c) 1000x; (d) 180x; (e) 500x e (f) 1000x.....	98-99

Figura 5.28 – T18 – $a/c=0,4$ com porosidade elevada e agregado brita sem envolvimento pela pasta, com aumentos de: (a) e (b) 20x; (c) 50x; (d) 45x; (f) 120x e (g) 200.....	100
Figura 5.29 – T18 – $a/c=0,4$. Nota-se porosidade na pasta com ruptura na mesma, com aumentos de: (a) 100x; (b) 150x; (c) 200x e (d) 500x e (f) 1000x.....	101-102
Figura 5.30 – T17 – $a/c=0,6$ com porosidade inferior as observadas nos traços com $a/c=0,4$, com aumento de: (a) 20x; (b) 50x; (c) 49x; (d), (e) e (f) 100x.....	103
Figura 5.31 – T17 – $a/c=0,6$. Nota-se menor porosidade na pasta e na zona de transição, com aumento de: (a), (b) e (c) 200x e (d) 500x e (e) e (f) 1000x.	104-105
Figura 5.32 – T18 $a/c=0,6$ com porosidade baixa e envolvimento dos agregados pela pasta.....	105-106
Figura 5.33 – T18 – $a/c=0,6$. Nota-se bom cobrimento dos agregados pela pasta e poros com acúmulos de tensões provocando ruptura na pasta.....	107
Figura 5.34 – T20 – $a/c=0,5$ com baixa porosidade e pasta continua e homogênea.....	108
Figura 5.35 – T20 – $a/c=0,5$. Nota-se a ocorrência de porosidade na pasta, mas sem ruptura.....	109-110

RESUMO

O município de Cachoeiro de Itapemirim, sul do estado do Espírito Santo – Brasil tem como principal vocação de sua economia o beneficiamento de rochas ornamentais. Esta atividade, apesar de emprego e renda que proporciona, gera problemas quanto aos resíduos produzidos, que demandam soluções quanto ao destino, principalmente os de maior volume que são as lamas do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO). Uma alternativa para a redução do impacto ambiental das indústrias é a utilização desta lama em materiais de construção civil, contribuindo para a sustentabilidade do setor. O presente trabalho avaliou a influência da incorporação da LBRO como agregado na constituição dos pavimentos intertravados de matriz cimentícia, favorecendo o empacotamento de matérias primas, areia de leito de rio e brita zero, por meio do índice de vazios mínimo. Para tanto foi dotado como ferramenta estatística o planejamento experimental em rede Simplex. Depois de definida a superfície de resposta com as proporções mais compactas, foi usado o planejamento de experimentos fatorial, para verificar a influência dos traços e das relações água/cimento (a/c) e água/agregados. O planejamento fatorial avaliou a resistência a compressão dos pavimentos, além de critérios de desforma e consistência. O traço que apresentou melhor resposta, considerando os critérios mecânicos da norma brasileira e do período pré-cura, alcançou um teor em massa total da mistura de 20% de incorporação de LBRO (25% dos agregados), com 20% de aglomerante (cimento portland), para uma relação a/c de 0,5. Além disso, este traço foi caracterizado ambientalmente segundo a norma brasileira e francesa, não sendo constatado risco ambiental para a dosagem indicada.

Palavras-chave: reaproveitamento de LBRO, pavimento intertravado, índice de vazios mínimo, Rede Simplex, fatorial, caracterização ambiental.

ABSTRACT

The county, Cachoeiro de Itapemirim, located south of the state of Espírito Santo, Brazil, has as its main economical vocation, the processing of ornamental rocks. In spite of the jobs and income, this industrial activity is also associated with problems related to the wastes that demand solutions regarding their disposal. In particular, the wastes in larger amount are the sludges resulting from the ornamental rocks processing (SPO). A possible solution to reduce the environmental impact of these sludges is their incorporation into building materials for civil construction, which should contribute to the sustainability of the industrial sector. The present work evaluated the influence of SPO incorporation, as an aggregate, in the constitutions of interlocked road blocks with cement matrix. This incorporation is expected to improve the packing of the other aggregates formed by river bed sand and zero gravel, by means of the Index of Minimum Voids. The statistical tool used for this purpose was an experimental planning with a simplex network. After definition of an answer surface, with more compact properties, another factorial experimental planning was used to assess the influence of the specimen traces and water/cement (w/c) as well as water/aggregate relationships. The factorial design evaluated the compressive strength of the floors, and criteria for deformations and consistency. The trait that showed a better response, considering the criteria of the Brazilian standard mechanical and pre-healing, achieved a total mass content of the mixture of 20% incorporation of SPO (25% of households), with 20% binder (cement Portland) for a w/c ratio of 0.5. Moreover, this trait was characterized according to standard environmental Brazilian and French and is not verified environmental risk to the dosage indicated. Keywords: reuse of SPO, interlocked floor, minimum void ratio, Simplex, factorial, environmental characterization.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Aspectos Gerais

O município de Cachoeiro de Itapemirim, no sul do estado do Espírito Santo, tem como pilar de sua economia o setor industrial de beneficiamento de rochas ornamentais, que produz, em sua grande maioria, chapas brutas ou polidas, pisos e revestimentos para a construção civil. Como todo grande setor industrial, principalmente o de beneficiamento de matérias-primas naturais, gera-se um grande volume de resíduos sólidos oriundos dessas rochas devido às diversas etapas do seu processo produtivo.

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

Por sua vez, o setor da construção civil consome um volume enorme de recursos naturais e, atualmente, mostra-se como uma alternativa para reaproveitamento de resíduos. Para garantir um desenvolvimento sustentável, torna-se imprescindível o equilíbrio entre preservação da natureza e desenvolvimento econômico.

A motivação principal deste trabalho é o desenvolvimento de um material de construção com a adição do mencionado resíduo do beneficiamento de rocha,

que se encontra em grande disponibilidade no município de Cachoeiro de Itapemirim-ES, de tal modo que possua características técnicas desejáveis para seu uso em serviço.

Assim, o presente estudo é motivado também pela preocupação com a economia de matérias-primas na construção civil bem como pelo reaproveitamento dos resíduos que já se encontram dispostos no meio ambiente. Sendo assim, o resíduo em questão poderia ser considerado como uma classe de materiais recicláveis.

Apesar de já existirem muitos estudos sobre o aproveitamento dos resíduos de rochas ornamentais em materiais de construção civil, tais como telhas e blocos cerâmicos, concreto e argamassas, solo-cimento, concreto betuminoso, existe ainda a necessidade de uma metodologia de aproveitamento racional abrangendo até a escala industrial deste resíduo.

A proposta em tela firma-se na adição do referido resíduo de rochas ornamentais em blocos para pavimentos intertravados. Adotou-se este material pelo fato de ser um produto com elevado consumo de matérias primas naturais e que a cada dia ocupa maior espaço como blocos de pavimentação, tanto para fins industriais quanto para trânsito de veículos. Em princípio, esses blocos poderiam ser concebidos de forma mais econômica e eficiente com adição deste resíduo.

É importante salientar que a adição de qualquer tipo de resíduo industrial em materiais de construção, no caso os blocos para pavimentos intertravados, deve manter as características tecnológicas que o produto necessita para um bom desempenho. Ressalta-se ainda a importância de se obter um maior número possível de misturas, em diferentes proporções das matérias primas, a fim de que se tenha uma idéia de seu comportamento em função da variação de seus componentes, principalmente do resíduo de rocha.

A definição de um procedimento para o aproveitamento resíduo de rochas ornamentais nos intertravados será objeto de estudo deste trabalho, que atuará como agregado miúdo e filler na mistura. Com isso, foram realizadas modelagens numérico-experimentais de misturas, por meio do planejamento experimental em rede simplex e planejamento fatorial. O estudo contempla também a caracterização do resíduo, determinação dos teores de aglomerante (cimento portland) e das relações água/cimento (a/c).

As propriedades analisadas nesta tese foram o Índice de Vazios Mínimo (IVM), que indica o maior fator de empacotamento da mistura, e a resistência à compressão. Posteriormente foram feitos também testes de caracterização ambiental segundo a norma brasileira e francesa nas peças do pavimento, além de caracterização microestrutural. Além disso, o estudo foi realizado para os diferentes traços ou misturas, conforme as condições de trabalho deste produto, de modo a garantir um desempenho satisfatório e reduzir os impactos ambientais gerados pela atividade mineradora, além de agregar valores aos subprodutos de rocha ornamental.

1.2 – Objetivos

1.2.1 – Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral a incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais na confecção de blocos de concreto para pavimentos intertravados, a fim de que se obtenha um produto com propriedades e características adequadas para o uso na construção civil.

1.2.2 – Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar os agregados utilizados na constituição dos pavimentos intertravados, inclusive o resíduo da indústria de rochas ornamentais;
- Obter proporções de incorporação de resíduo de tal forma que se mantenha a qualidade técnica desejável ao desempenho dos pavimentos;
- Avaliar a influência dos constituintes do concreto proposto nas propriedades dos blocos, principalmente no tocante ao resíduo de rocha que, além do granito, é constituído, entre outros, de granalha, uma liga metálica que auxilia no corte dos blocos;
- Avaliar a microestrutura do concreto incorporado com resíduo e suas inter-relações com as propriedades do material;

- Determinar parâmetros relativos ao comportamento ambiental dos pavimentos, tanto do material intacto quanto moído;

1.3 – Justificativas

O estudo para o desenvolvimento de uma nova composição para materiais de construção justifica-se na busca de melhorias dos materiais, seja do ponto de vista de seu desempenho estrutural como também na diminuição dos custos para sua fabricação.

A proposta de incorporação de um tipo de resíduo industrial em materiais de construção civil, entre outros fatores, visa diminuir os custos para a confecção dos mesmos. Considerando que o resíduo em questão não possui valor econômico, a adição deste em sua composição surge como uma nova forma de redução de seu preço final, por meio da economia de agregados naturais.

Este estudo, portanto, favorece o desenvolvimento sustentável, porque subsidia a preservação do meio ambiente, pois com o reaproveitamento dos resíduos da indústria, minimizam-se os danos causados pela sua deposição incorreta, além de contribuir para diminuição do consumo de agregados (por ex: areia do leito de rio).

Do ponto de vista da tecnologia de materiais, é importante ressaltar que os materiais fabricados com adição destes resíduos devem, obrigatoriamente, possuir características melhores ou, pelo menos iguais, aos materiais convencionais, obedecendo aos critérios de desempenho e de solicitação que cada um irá sofrer. Ressalta-se também, a importância da caracterização ambiental dos materiais, uma vez que estes, quando descartados, não poderão possuir características reativas com o meio que acarretem em degradação e poluição ambiental.

Este trabalho então se justifica acima de tudo pela necessidade do desenvolvimento de um material largamente utilizado na construção civil, o pavimento intertravado de concreto, com adição de resíduos, para economia de matérias primas, preservação ambiental e diminuição de custos de produção, aliado a um desempenho adequado associado ao atendimento às normas técnicas nacionais.

1.4 – Apresentação e organização da tese

De um modo geral, este trabalho consiste em sete capítulos independentes. Vale ressaltar que os Capítulos 2, 3 e 4 apresentam uma contribuição aos aspectos fundamentais por meio de revisão bibliográfica, para uma melhor compreensão das situações experimentais e aplicação dos resultados obtidos. Portanto, o trabalho está organizado da seguinte forma:

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

O segundo Capítulo apresenta também, de forma sucinta, uma abordagem sobre definição e classificação de resíduos, seguida de aspectos básicos sobre rochas ornamentais e das lamas do seu beneficiamento. Mostra também a importância econômica da indústria de rochas e a necessidade de uma solução para a crescente geração de resíduos sólidos, propondo a incorporação destes em concretos para uso em pavimentos intertravados.

O terceiro Capítulo é dedicado a um breve histórico sobre pavimentos intertravados, apresentando definição e alguns requisitos obrigatórios segundo as normas técnicas nacionais, sua composição e dosagem. Enfatiza-se também os aspectos ambientais devido à incorporação de resíduos.

O quarto Capítulo está reservado ao programa experimental da pesquisa. Neste apresentam-se os materiais e os métodos de caracterização e mistura/dosagem dos mesmos. Também é abordado o planejamento experimental e a análise estatística dos modelos matemáticos, de acordo com as propriedades analisadas, o Índice de Vazios Mínimo e a Resistência à Compressão.

No Capítulo quinto, encontra-se a apresentação, análise e discussão dos resultados dos experimentos referentes ao planejamento experimental (modelos matemáticos e análise estatística) e as caracterizações microestruturais e ambientais.

No sexto Capítulo são feitas as conclusões e considerações finais sobre o trabalho e apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros. O último Capítulo contém as referências bibliográficas usadas neste trabalho.

CAPÍTULO 2 – RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS: REAPROVEITAMENTO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1 – Definição e Classificação de Resíduos

Com o constante crescimento mundial e como consequência, para suprir as necessidades da moderna sociedade, vem ocorrendo um aumento da produção de bens naturais e industrializados. Nos processos de beneficiamento de matérias primas, inevitavelmente, há geração de resíduos, sejam eles sólidos, líquidos ou gasosos.

Os resíduos gerados pelas indústrias, perigosos ou não perigosos, inertes ou não, são uma das grandes preocupações para os ambientalistas, no presente momento (DUARTE, 2007).

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

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

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

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

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da NBR 10004/2004 (Resíduos Sólidos: Classificação) define resíduo sólido com sendo todo resíduo nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço e de varrição.

Segundo a ABNT, os resíduos sólidos são classificados quanto à sua periculosidade em duas classes: Classe I – Perigosos e II – Não Perigosos. Os resíduos não perigosos se subdividem em duas categorias, A – Não Inertes e B – Inertes. A classificação da norma brasileira se dá por meio de análises químicas sobre o extrato solubilizado e lixiviado obtido a partir da amostra bruta do resíduo. As concentrações dos elementos detectados nos extratos são então comparadas com os limites máximos estabelecidos nas listagens constantes da NBR 10004/2004. Abaixo tem-se a classificação:

➤ **Resíduos Classe I: Perigosos**

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

- Inflamabilidade
- Corrosividade
- Reatividade
- Toxicidade
- Patogenicidade

➤ **Resíduos classe II – A: Não-inertes**

São aqueles que não se enquadram nas classificações de Resíduos Classe I - Perigosos ou de Resíduos Classe II B - Inertes, nos termos desta Norma, mas possuem propriedades tais como:

- Combustibilidade
- Biodegradabilidade
- Solubilidade em água

➤ **Resíduos Classe II – B: Inertes**

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

A análise da periculosidade dos resíduos sólidos industriais é feita em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, seguindo, além da NBR 10004/2004, as recomendações das normas brasileiras regulamentadoras:

- NBR 10005/2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos;
- NBR 10006/2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos;
- NBR 10007/2004 – Amostragem de resíduos sólidos.

A ABNT NBR 10.004/2004 – Resíduos Sólidos – Classificação foi elaborada em 1987, revisada em 2004. Essa revisão foi baseada no Regulamento Técnico Federal Norte-americano (CRF, 2004).

2.2 – Rochas Ornamentais: Definição e Considerações Gerais

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

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

A composição mineral de rochas graníticas é essencialmente constituída por grãos de quartzo e feldspato (plagioclásio e ortoclásio), com menor quantidade mica e outros minerais acessórios (YILMAZ, 2008). Os granitos são rochas claras de origem vulcânica (intrusiva) e textura grossa, que possuem altos teores de sílica (SiO_2).

Os gabros, também de origem vulcânica, são rochas escuras compostas predominantemente de minerais como o piroxênio. Os granitos e os gabros, quanto à sua origem, são classificados como rochas ígneas.

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

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

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

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

2.3 – Uso de Rochas Ornamentais na Construção Civil

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

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

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

A produção mundial de rochas ornamentais e de revestimento evoluiu de 2 milhões t/ano, na década de 1920, para um patamar de 60 milhões t/ano (MONTARI, 2003). Segundo VALE (1997) esta produção tem crescido continuamente a uma taxa média anual de 4,7 % ao ano desde a década de 70

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

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

Segundo CHIODI FILHO 2011, no ano de 2010 as exportações brasileiras de rochas ornamentais tiveram um valor de US\$ 886,1 milhões, correspondentes à comercialização de aproximadamente 474,83 mil toneladas, e no primeiro trimestre

de 2011 um total de US\$ 192 milhões, compreendidos principalmente entre granitos beneficiados em chapas polidas, além de blocos e chapas brutas.

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

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

Segundo dados do INFOROCHAS (2006), o estado do Espírito Santo representou no ano de 2006, 65 % do valor exportado pelo Brasil, que obteve um faturamento superior a US\$ 1,04 bilhão, e mais de 81 % das exportações nacionais de manufaturados de mármore e granitos.

Vale comentar que o estado do Espírito Santo possui dois grandes pólos no setor, um na região sul e outra na norte. A região sul do estado possui grande concentração de empresas de beneficiamento, e a norte forte concentração da atividade extrativa, como pode ser visto na Figura 2.1 (SPÍNOLA, 2003).

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

A Figura 2.1 mostra um mapa indicando os maiores núcleos produtivos capixaba.

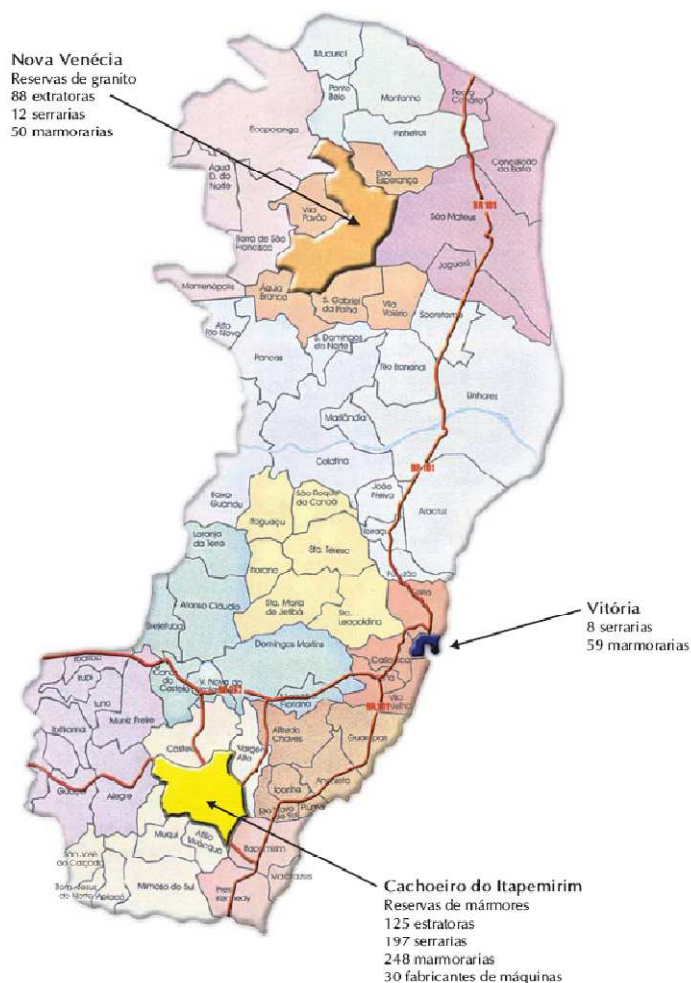


Figura 2.1 – Mapa dos Principais Núcleos de Extração e Beneficiamento de Rochas no Espírito Santo.

2.5 – Beneficiamento de Rochas Ornamentais: Problemas ambientais causados pela deposição inadequada

Em contrapartida, esse desenvolvimento econômico traz danos ambientais devido à crescente geração de resíduos. Tais resíduos, no presente trabalho, doravante denominados de Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), ao longo do tempo vêm se tornando um sério problema ambiental. Na maioria das vezes as LBRO's, são depositadas em locais inadequados, podendo provocar danos aos sistemas ecológicos, como a contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e assoreamento dos rios. Somente no estado

do Espírito Santo a geração de LBRO é de aproximadamente 98.000 t/mês, considerando uma umidade de 30 %.

Durante o processo de beneficiamento, mais especificamente durante o corte da rocha, são gerados resíduos grossos e finos que, por vezes, não possuem destinação definida. Em geral eles são depositados em locais impróprios, tais como pátios ao redor das empresas ou depósitos provisórios, provocando a degradação do meio ambiente, como contaminação dos mananciais e dos solos, além de ocupar grandes áreas próximas às empresas que poderiam ser utilizadas para outros fins.

ACCHAR *et al.* 2006, afirmaram que as LBRO's são descartadas nos recursos hídricos sem qualquer tratamento, causando sérios problemas ambientais. Nas últimas décadas tornou-se óbvio que as grandes quantidades de LBRO's dispostas sem qualquer tratamento causariam graves danos ambientais (JURIC *et al.*,2006).

Nos depósitos antigos de LBRO, reconhecidos como passivos ambientais das empresas de beneficiamento, com a secagem do material, o vento ou a movimentação sobre o mesmo podem produzir suspensão de material particulado, provocando a silicose e/ou calcificação dos pulmões, quando inalada. Além disso, ocorre a degradação das áreas exploradas, modificando completamente a paisagem local (XAVIER, 2001). Deve ser destacado também, o grande impacto paisagístico das áreas de entorno.

Existem associações e aterros coletivos para tratamento e destinação destes resíduos em aterros industriais, onde os resíduos ficariam depositados até a sua destinação final, possivelmente como matéria-prima a ser utilizada em outros projetos em estudo. Além do simples depósito algumas dessas entidades prevêm a implantação de centrais para tratamento e reaproveitamento da LBRO, recebe a submete a um tratamento em filtro-prensa para a retirada do excesso de umidade, contribuindo também para a reutilização de grande parte da água no próprio processo de beneficiamento.

Atualmente criou-se, na região sul do estado do Espírito Santo, algumas associações e/ou empresas destinadas a esse fim, podem-se citar a AMOL, ASSES, ADAMAG, ASA, SÃO JOAQUIM, J.A, TRANSPORTES C.R.A, em

Cachoeiro de Itapemirim, AEDRIM e ASSERP, em Vargem Alta, AIROMAV em Atílio Vivacqua e ASERFRA em Itapemirim.

Em Nova Venécia, norte do estado, já está em funcionamento o Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) com capacidade de armazenar cerca de 325 mil m³ de lama, que prepara a LBRO para ser reutilizada, possivelmente na fabricação de telhas e lajotas. (INFOROCHAS, 2006).

Além das centrais de tratamento, as próprias empresas investem no tratamento de seus efluentes, por meio do filtro-prensa, tanques de decantação e sedimentação chegam a reaproveitar cerca de 80% da água usada no processo, considerando que a LBRO extraída do filtro-prensa geralmente possui de 20 a 30% de umidade.

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

A LBRO a ser utilizada nesta pesquisa é gerada no beneficiamento primário, ou seja, na serragem dos blocos de rochas ornamentais (desdobramento), que são feitas em equipamentos denominados teares.

Após o processo de serragem os blocos são transformados em chapas para posterior polimento e acabamento – Figura 2.2 (a e b).

(a)



(b)



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

Para se ter uma idéia da ordem de grandeza do volume de resíduo sólido gerado nesta etapa do beneficiamento, estima-se que em média 20 a 35 % dos blocos de rocha são transformados em pó devido à serragem em chapas (MONTEIRO, 2004).

Segundo dados do INET (2001), na operação de serragem se perdem 15 % do bloco se este for rocha carbonatada, 25 % se for granito e 20 % se for ardósia e xisto. A serragem nos teares é feita através do atrito de suas lâminas com a rocha em um meio fluido, chamado de lama abrasiva. A constituição desta lama é uma mistura de granalha, água, cal e pó de rocha.

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

A composição química das granalhas de aço comerciais segue basicamente Norma SAE J1993 (1996), que é a descrita na Tabela 2.1:

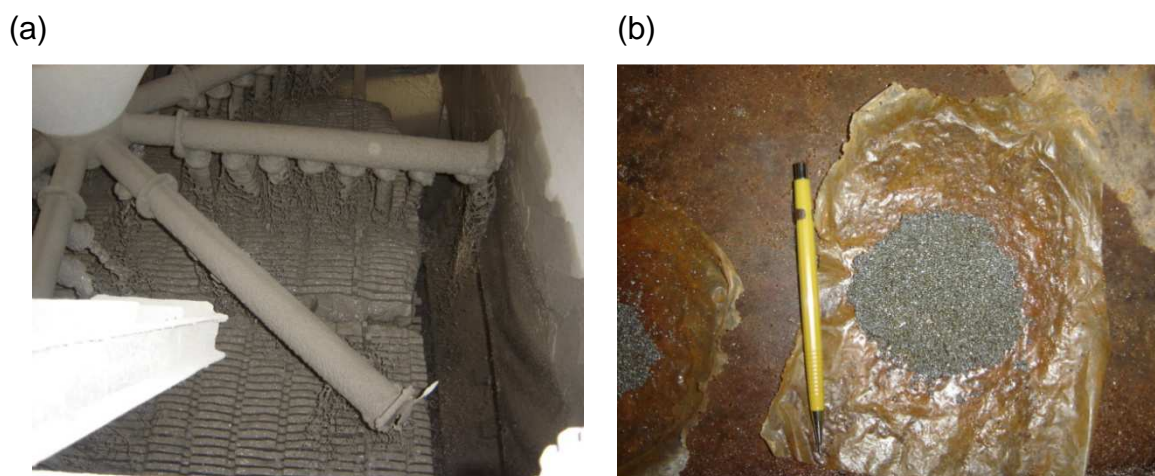


Figura 2.3 – (a) LBRO na Serragem dos Blocos; (b) Granalha.

Tabela 2.1 – Composição química da granalha

Elemento	% em peso do Produto Final
Carbono	0,80% a 1,20%
Manganês	0,60% a 1,20%
Silício	0,40% mínimo
Enxofre	0,05% máximo
Fósforo	0,05% máximo

Outro insumo usado são as lâminas de corte, compostas basicamente por uma liga de Ferro – Carbono, além de elementos de liga tais como Manganês, Níquel, Cobre, entre outros.

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

2.6 – Reaproveitamento de Resíduos

2.6.1 – Generalidades

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

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

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

MENEZES *et al.* (2002) afirmam que a reciclagem de resíduos, independentemente do seu tipo, apresenta várias vantagens em relação à utilização de recursos naturais. Dentre estas vantagens destacam-se: redução do

volume de extração de matérias-primas, redução do consumo de energia, menores emissões de poluentes e melhoria da saúde e segurança da população.

Do ponto de vista ambiental e econômico, o reaproveitamento de resíduos em materiais de construção tende a reduzir o consumo de areia natural como agregado miúdo. A exploração de areia natural proveniente dos leitos dos rios tem grande potencial de degradação ambiental e tem sido uma prática cada vez mais coibida pelos órgãos ambientais, sendo necessário buscar novos locais, distanciando-se dos centros consumidores, o que acarreta maiores custos principalmente com o transporte, além de ser considerado um recurso natural não renovável.

Pode-se citar como alternativa de economia de agregados, o uso de resíduos de indústrias de geração de energia elétrica, por meio da queima do carbono, para produção de agregados leves para concreto (ANAGNOSTOPOULOS, 2008) e no presente caso, o uso de resíduos de mármore e granito em produtos de argila (SEGADÃES, 2005).

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

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

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

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

OLIVEIRA *et al.* (2001) presumem que na maioria das cidades brasileiras, as obras são projetadas e construídas sem considerar os impactos ambientais, resultando numa grande quantidade de entulho depositado em aterros sanitários. Parte desse material é abandonada em locais inadequados, quase sempre

clandestinos, provocando danos às áreas saudas, como esgotamento e poluição de aquíferos, assoreamento das margens, poluição de cursos d'água e proliferação de vetores. No Brasil, o entulho de construção representa de 60 a 68 % da massa total dos resíduos sólidos urbanos (PINTO, 1997).

Considerando o grande desperdício nos canteiros de obras, a indústria da construção civil é responsável, por exemplo, pelo consumo de 20 a 50 % dos recursos naturais extraídos (ALAVEDRA *et al.* 1997, SIJOSTROM, 1997). O consumo dos agregados naturais varia de 1 a 8 ton/hab.ano.

Deve-se mencionar, além dos recursos extraídos, a geração da poluição, como emissão de poeira e gás carbônico, principalmente durante a produção de cimento (JOHN, 1998 e PENTALLA, 1997). A indústria de cimento gera cerca de 5% das emissões globais de CO₂, devido à decomposição de carbonatos (cerca de 50%), a combustão de combustíveis no forno (cerca de 40%) (VELOSA 2008).

Destaca-se a importância da indústria cimenteira, pois o cimento Portland é o ingrediente fundamental do concreto e, em geral, representa cerca de 15% do volume do concreto e de aproximadamente 45% do seu custo total (JURIC, 2006).

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

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

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

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

Nos últimos anos, a incorporação do resíduo de rocha ornamental em materiais de construção surge como uma das alternativas para diminuir os custos

dos mesmos, agregar valor ao subproduto de rocha e reduzir os impactos ambientais, devido aos danos causados pela disposição inadequada da LBRO.

Alguns pesquisadores vêm estudando e verificando o desempenho deste material; como por exemplo, na produção de argamassas (CALMON *et al.* 1997, SILVA 1998, AFONSO 2005 e BAHIENSE 2007), tijolos cerâmicos (NEVES *et al.* 1999), peças cerâmicas (LIMA FILHO *et al.* 1999 e XAVIER 2006) e concretos (GONÇALVES, 2000), dentre outros trabalhos.

2.6.3 – Incorporação da lama do beneficiamento de rochas ornamentais em pavimentos intertravados

Uma alternativa para a reutilização da LBRO envolve a indústria de concreto. Considerando uma produção cada vez maior, maiores são as dificuldades em se encontrar agregados naturais, devido ao uso crescente de rochas e minerais como agregados. Isto tem promovido uma busca por fontes alternativas (ROSSETTI, 2006).

Sendo assim, este trabalho propõe a incorporação da LBRO em concretos para confecção de pavimentos intertravados, onde a LBRO terá a função de agregado miúdo e *filler* na composição da mistura.

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

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

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

Enfatiza-se o ineditismo da pesquisa, que traz um procedimento de dosagem de aglomerante e agregados, com incorporação de LBRO, em um material largamente usados na indústria da construção civil, os pavimentos intertravados.

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

CAPÍTULO 3 – PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DE MATRIZ CIMENTÍCEA

3.1 – Pavimentos Intertravados de Concreto

A primeira peça pré-moldada de concreto foi fabricada no final do século XIX e algumas patentes foram registradas antes da primeira guerra mundial. Os primeiros avanços no desenvolvimento da utilização da pavimentação em blocos de concreto ocorreram na Holanda e Alemanha no período de reconstrução dos países após a Segunda Guerra Mundial. A partir de 1950, houve uma evolução dos modelos de fôrmas existentes para a fabricação destas. Foi incorporado um refinamento maior nas formas das peças, disponibilizando outros modelos de peças com formatos dentados, principalmente (CRUZ, 2003).

A partir da década de 80, com a disponibilidade no mercado de equipamentos de grande produtividade e com elevado grau de precisão dimensional, a indústria de pavimentos de peças pré-moldadas vem crescendo em grandes proporções em todo o mundo, inclusive no Brasil. O que era um tipo de material utilizado apenas em áreas que demandavam efeitos arquitetônicos ou paisagísticos, deu lugar a um material único e extremamente versátil para harmonizar qualquer tipo de pavimento, inclusive o industrial e rodoviário, tanto esteticamente quanto estruturalmente, o pavimento intertravado (SANTOS e BORJA, 2007).

Segundo SOO LEE (2003), os blocos intertravados de concreto podem ser usados de forma ampla em pavimentos, pois possui baixo custo de manutenção,

facilidade de colocação e remoção com reutilização dos blocos originais, apelo estético, além de possuir em propriedades de engenharia superiores.

Destaca-se a facilidade de execução e manutenção deste tipo de pavimento quando comparado a outros como, por exemplo, o concreto betuminoso (asfalto), pois tanto na execução quanto na manutenção não se utiliza equipamentos tão sofisticados, podendo ser realizado com pequena equipe e ferramentas manuais, inclusive podendo-se utilizar mão-de-obra pouco especializada.

Os intertravados podem adquirir diferentes formas e cores (com a adição de pigmentos) que são simultaneamente funcional e esteticamente agradáveis, sendo ainda resistentes a climas rigorosos sujeitos a ciclos de gelo/degelo (GONZALO E SMITH, 1990). A Figura 3.1 mostra alguns tipos de morfologia de pavimentos.

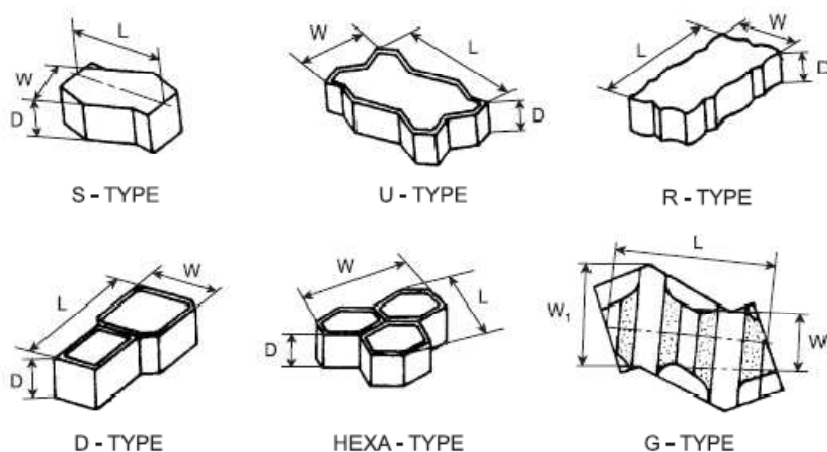


Figura 3.1 – Diferentes formas para intertravados (SOO LEE, 2003).

Segundo FIORITI (2007) na pavimentação intertravada com blocos de concreto, o procedimento adotado para se executarem reparos em redes subterrâneas de água e de esgoto é muito simples e fácil, pois basta remover os blocos de concreto da área afetada, para que os problemas ou danos sejam corrigidos, seguidos da recolocação dos blocos. Todo esse procedimento é feito sem a necessidade de equipamentos especiais.

Os blocos intertravados são maciços e permitem pavimentar superfícies. O intertravamento é a capacidade que os blocos adquirem para resistir aos

movimentos de deslocamento individual, seja ele vertical, horizontal, de rotação ou de giro em relação a suas peças vizinhas.

A adição da LBRO nos intertravados visa dar melhor acabamento às peças e melhorar parâmetros mecânicos dos blocos pavimentos, de forma que atendam às normas técnicas nacionais. Além disso, surge como uma alternativa para diminuição de custos para a confecção dos pavimentos com economia de matérias primas naturais, uma vez que a LBRO não possui até então valor econômico.

3.2 – Argamassas e Concretos

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

À luz da engenharia de materiais, concreto pode ser considerado como um compósito comum, feito com partículas grandes, onde as fases matriz e dispersa são compostas por materiais cerâmicos. Concreto subentende um material compósito que consiste em um agregado de partículas ligado umas as outras em um corpo sólido através de algum tipo de meio de ligação, isto é, o cimento (CALLISTER, 2000).

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

A estrutura de um sólido heterogêneo, como o concreto, é constituída por fases, estas se diferenciam principalmente em tipo, quantidade, tamanho e forma.

Uma análise inicial a nível macroscópico mostra o concreto como um material aparentemente, constituído de duas fases, que são as partículas de agregados de tamanho e formas variados e um meio ligante, composto de uma massa contínua de argamassa endurecida. O problema de se estudar um material tão complexo como o concreto a nível macroscópico, é que com este grau de precisão muitas propriedades e características próprias do material não conseguem ser analisadas. Portanto para pesquisá-lo é necessário ter uma visão mais aprofundada, que somente é conseguida quando são utilizados parâmetros encontrados a nível microscópico (GONÇALVES, 2001).

3.3 – Estrutura do Concreto de Cimento Portland

3.3.1 – Agregados

Os agregados, geralmente classificados em miúdo e graúdo, são obtidos diretamente da natureza, podendo-se citar a areia do leito de rio, areia da britagem de rochas, brita, entre outros.

A fase agregado é a principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Desta forma as características mais importantes de um agregado são sua massa específica, textura, granulometria, resistência à abrasão e sanidade. A composição química da rocha matriz, quando não são detectados elementos reativos com o cimento ou o meio ambiente, é menos importante que suas características físicas.

A massa específica do agregado graúdo influi diretamente na massa específica final do concreto. A massa específica do agregado é também diretamente proporcional à resistência à compressão do concreto, pois quanto mais leve o agregado, em geral é maior a sua porosidade (índice de vazios) e conseqüentemente menos resistente torna-se o agregado, que acaba se tornando o elo fraco da mistura.

Os agregados naturais usuais possuem resistência à compressão bem maior que o concreto. As Tabelas 3.1 e 3.2 mostram resistências individuais de

algumas rochas brasileiras e norte americanas, normalmente usadas como agregados para concretos (BAUER, 1994 e WOOLF apud NEVILLE, 1988).

Tabela 3.1 – Resistência média à compressão de rochas ígneas brasileiras (BAUER, 1994)

Rochas Ígneas	Resistência à Compressão (MPa)
Granito (Serra da Cantareira, SP)	154
Granito (Rio, RJ)	120
Basalto	150

Tabela 3.2 – Resistência média à compressão de rochas norte americanas (WOOLF apud NEVILLE, 1988)

Rochas Ígneas	Resistência à Compressão (MPa)
Granito	181
Felsite	324
Trap	283
Rocha calcária	159
Arenito	131
Mármore	117
Quartzito	252
Gnaisse	147
Schist	170

3.3.2 – Pasta de Cimento

A Pasta de Cimento (matriz) é o meio contínuo que une as partículas de agregados do concreto. É constituída por diferentes tipos de compostos hidratados de cimento tais como: silicatos hidratados e carbonato de cálcio (MORANVILLE-REGOURD, 1992).

Segundo FREITAS 2007, a pasta de cimento tem por objetivo envolver os agregados, preenchendo os vazios formados e possibilitar ao concreto a capacidade de manuseio quando recém misturado.

3.3.3 – Zona de Transição: Microestrutura do Concreto

O estudo da microestrutura do concreto fornece muitos parâmetros, que ao serem analisados mostram como este material possui uma estrutura complexa. Aparece outra fase, a zona de transição, que representa a região interfacial entre as partículas de agregado e pasta de cimento. Apesar de ter uma espessura muito

delgada ao redor do agregado, a zona de transição, é geralmente mais fraca do que as duas outras fases, o agregado e a argamassa, e conseqüentemente, exerce uma influência muito maior nas propriedades do material do que poderia ser esperado pela sua espessura.

Na verdade o concreto é um material trifásico, que possui as seguintes fases: agregados, argamassa endurecida (pasta de cimento) e zona de transição. Estas duas últimas fases possuem uma distribuição altamente heterogênea, ou seja, suas propriedades variam dentro de uma mesma massa de material.

Estudos de novos agregados para argamassas e concretos se justificam, pois é de extrema importância o conhecimento das inter-relações entre os agregados e a matriz cimentícia. A matriz cimentícia é constituída pela zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento propriamente dita.

A zona de transição determina de forma substancial as propriedades dos materiais compostos à base de cimento tipo portland. Esta zona é a região de concentração de tensões que determina o início da fratura nas solicitações de compressão. Isto pode ser explicado segundo estudos de NEVILLE (1988), onde se constata que a resistência individual dos agregados é muito superior que a resistência do concreto.

A porosidade na zona de transição de argamassas e concretos é maior em comparação com o volume da pasta endurecida (SCRIVENER, 1988). Isto é principalmente atribuído ao "efeito parede" que conduz a uma pequena concentração de cimento na zona de transição, contribuindo para o aumento de porosidade nesta região e, conseqüentemente, diminuindo a resistência (LEEMANN, 2006).

Explica-se então, o fato do desenvolvimento de materiais a base de concreto com adições que permitam diminuir a porosidade nesta zona, sendo que o resíduo de rocha apresenta-se como uma boa alternativa devido a sua elevada finura. As Figuras 3.2 e 3.3 mostram respectivamente uma micrografia e uma representação esquemática da zona de transição do concreto.

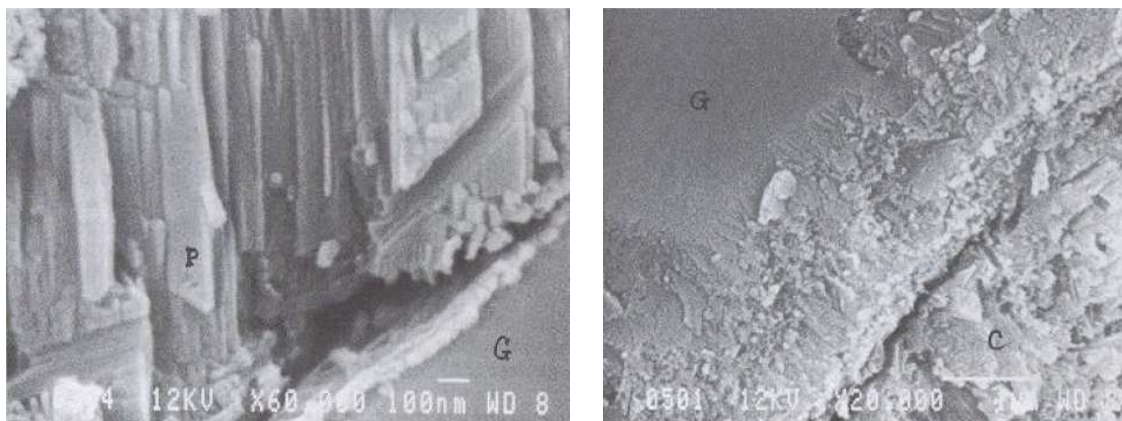


Figura 3.2 – Micrografias da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento (G) = agregado, (P) e (C) = pasta de cimento (MORANVILLE-REGOURD, 1992).

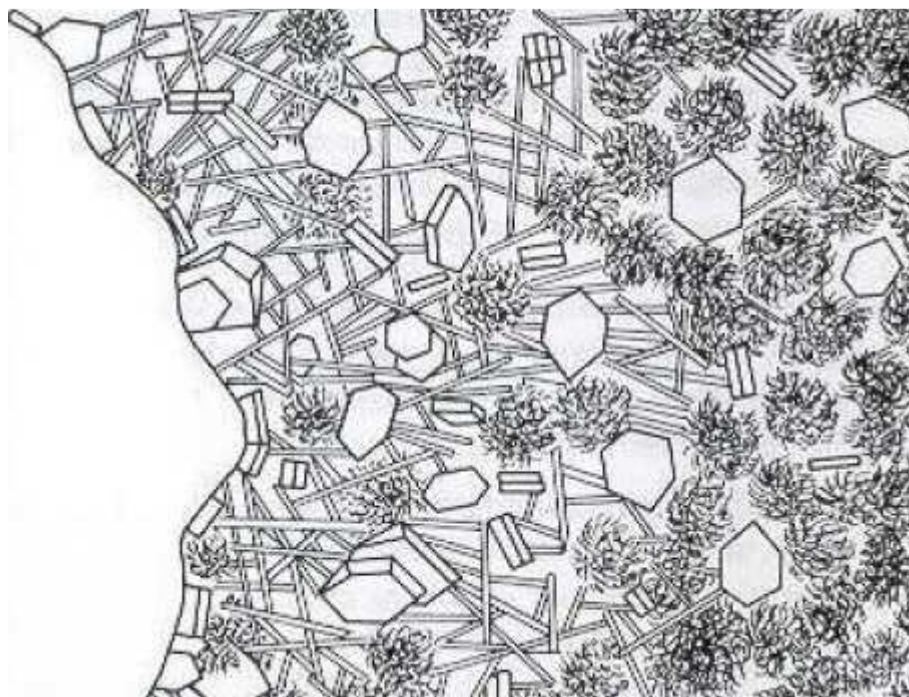


Figura 3.3 – Representação esquemática da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Para avaliar a influência da zona de transição e ocorrência de porosidade na pasta dos concretos, elaborados com adição de LBRO rocha, para pavimentos será usada a técnica do MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura.

3.4 – Concretos para Pavimentos Intertravados

Os concretos para a fabricação de blocos são compostos de cimento Portland, agregado miúdo (areia natural e/ou artificial) e agregado graúdo (pedrisco) (VARGAS, 2002).

OLIVEIRA (2004) menciona que os concretos estruturais normais, ou também chamados plásticos, caracterizam-se pelo elevado consumo de água, além da quantidade necessária à hidratação do cimento, para obtenção de uma mistura plástica e com consistência conveniente capaz de ser perfeitamente, adensada. Essa característica permite que esses concretos sejam aplicados com certa facilidade, sendo que a retirada do ar aprisionado às misturas, geralmente, é feita mediante equipamentos simples, tais como vibradores de imersão.

A água adicionada em “excesso”, ou seja, além da necessária para hidratação do cimento, é devido à necessidade de obtenção de uma trabalhabilidade adequada, que por sua vez, resulta em poros na pasta de cimento e, também, em fissuras causadas pela perda do excesso de água para o meio, reduzindo significativamente a resistência mecânica após o completo endurecimento.

Os concretos destinados a confecção de pavimentos intertravados, em geral, possuem consistência mais seca, ou seja, uma consistência significativamente superior à dos concretos plásticos. De acordo com MACHARD (1996), o baixo consumo de água desses concretos é devido necessidade de desforma imediata das peças.

Com isso, considerando a elevada consistência, com abatimento tendendo a zero, para moldagem dos pavimentos torna-se necessário utilizar-se equipamentos especiais para remoção do ar aprisionado em excesso na mistura, maior compactação, assim como promover melhor acabamento. Para tanto se empregam processos de fabricação mecanizada.

Segundo HOLT, 2006 utilizam-se máquinas de vibro-compressão onde o concreto é levado mecanicamente às formas, vibrado e compactado. Este procedimento deve ser feito tendo em vista se obter bom acabamento e maior agregação entre as partículas.

Devido à elevada resistência à compressão que este tipo de pavimento requiere, de no mínimo 35 MPa, segundo prescrições da NBR 9781/1987 - Peças de Concreto para Pavimentação: Especificação é necessário que o concreto possua, além de alta agregação entre as partículas, que a pasta de cimento envolva maior quantidade de agregados possível.

A Figura 3.4 mostra uma máquina usada por HOLT (2006) em seus experimentos.



Figura 3.4 – Máquina de vibro-compressão para confecção de blocos para pavimentos de concreto (HOLT, 2006)

As principais propriedades requeridas no estado endurecido, como textura superficial – relacionada com a composição granulométrica da mistura, resistência à compressão e absorção de água, além da mistura apresentar boa coesão e trabalhabilidade, estão relacionadas diretamente com as características e regulagens da máquina de vibro-compressão utilizada para fabricação dos pavimentos intertravados (PETTERMANN, 2006).

3.5 – Composição dos Blocos Intertravados

Um concreto é composto essencialmente por agregado miúdo e graúdo e um aglomerante, no caso cimento portland. Os blocos, como citado anteriormente, serão confeccionados por concretos com adição de LBRO, que terá a função de agregado miúdo e filler.

Com base na referencias bibliográficas, os componentes básicos dos blocos de concreto são, em geral, uma mistura de cimento, areia, pedrisco e água. Este trabalho propõe além destes componentes a adição da LBRO.

A priori, a propriedade inicial para a determinação das proporções será a resistência à compressão, por ser requisito básico inicial para pavimentos intertravados de concreto, considerando as solicitações de tráfego de veículos que serão impostas nos blocos.

3.6 – Resistência a compressão

MEHTA & MONTEIRO (1994) definem a resistência de um material a capacidade de este resistir à tensão sem ruptura, sendo que a ruptura é algumas vezes identificada com o aparecimento de fissuras. Ou seja, no caso de concretos, a resistência está relacionada com a tensão requerida para causar a fratura e, também, ao grau de ruptura no qual a tensão aplicada alcança seu valor máximo.

Na compressão, o modo de ruptura, quando comparado à tração uniaxial, é menos frágil porque consideravelmente mais energia é necessária para gerar e aumentar as fissuras na matriz (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Os mesmos autores ainda admitem que num ensaio de compressão uniaxial em concreto, nenhuma fissura é iniciada na matriz até pouco acima de 50% da tensão de ruptura. A partir deste estágio, um sistema estável de fissuras, designadas “fissuras de cisalhamento”, já existe nas proximidades do agregado graúdo e, a níveis mais elevados de tensões, começam a aparecer fissuras também no interior da matriz. Quando as fissuras na matriz se unem com as fissuras de cisalhamento ocorre, então, a ruptura.

A resistência à compressão dos pavimentos é o principal parâmetro de controle de qualidade dos blocos, sendo que esse valor não exerce grande influência no comportamento estrutural dos pavimentos, quando limitada entre 20 e 60 MPa (SHACKEL, 1980 apud OLIVEIRA, 2004).

Segundo a NBR 9781/1987 - Peças de Concreto para Pavimentação: Especificação, a resistência característica à compressão dos blocos para pavimentos, calculada de acordo com as prescrições da NBR 9780/1987- Peças de Concreto para Pavimentação:” Determinação da Resistência à Compressão, deve ser 35 MPa para solicitações de veículos comerciais de linha ou 50 MPa quando houver tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão.

Com base nessas informações, para que se consiga alcançar essas resistências necessita-se o desenvolvimento de novos materiais e o aprofundamento do estudo de dosagem. A LBRO, devido ao baixo diâmetro dos grãos (granulometria da ordem dos grãos do cimento) tende a aumentar o empacotamento do concreto e, com isso, aumentar a resistência à compressão.

A norma técnica nacional (ABNT) adotou o ensaio de carregamento parcial como sendo o método de ensaio normalizado para a determinação da resistência à compressão dos blocos empregados em pavimentação. Este ensaio é feito por meio de placas auxiliares circulares (NBR 9780/87) colocadas em contato com as duas faces da peça e perfeitamente alinhadas, simulando um “puncionamento duplo”.

Essa adaptação se torna necessária devido à grande resistência à compressão que estes pavimentos requerem, pois com a área de sua superfície, seria preciso uma prensa de grande capacidade de compressão para que fosse atingido à tensão requerida.

A Figura 3.5 ilustra o modo de execução do ensaio segundo a norma brasileira.

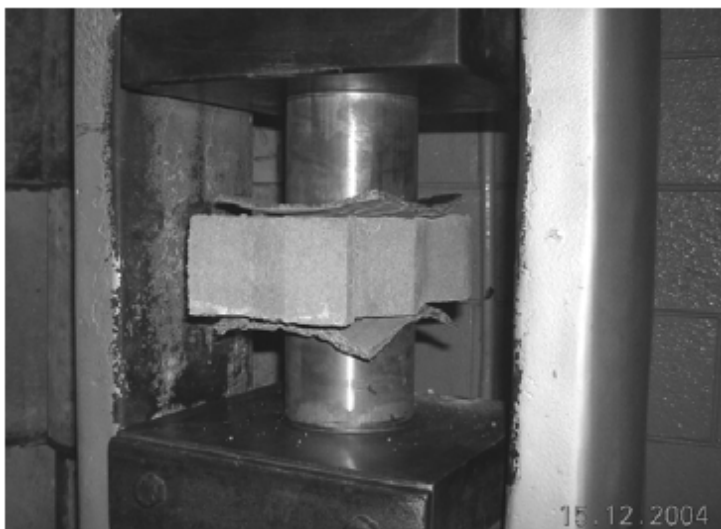


Figura 3.5 – Ensaio de compressão para pavimentos intertravados (FIORITI 2007).

3.7 – Dosagem em blocos de concreto para pavimentos intertravados

Segundo NEVILLE (1995), a dosagem do concreto, por ele chamado de seleção de materiais, é o processo adequado de escolher os ingredientes do concreto e determinar suas quantidades relativas, com o objetivo de produzir o mais econômico concreto possível, atendendo propriedades importantes como resistência, durabilidade e tipo de consistência requerida.

A metodologia de dosagem utilizada para produção de pavimentos intertravados depende do tipo de técnica de produção adotada. A maioria das fábricas utiliza vibro prensas requerendo concretos de consistência seca e coesão suficiente para se manterem íntegros até seu endurecimento, sem sofrer desmoronamentos ou quebra de arestas. A coesão da mistura é obtida principalmente em função da correta quantidade de finos em conjunto com a vibração e pressão de adensamento exercido pelo equipamento no momento da moldagem dos pavimentos intertravados (Shackel, 1992 e 2000, Abreu, 2002).

Neste trabalho, a determinação da composição do concreto para a confecção dos pavimentos foi feita utilizando-se a metodologia de planejamento de experimentos e misturas.

Misturas podem ser definidas como experimentos onde a resposta assumida depende somente das proporções relativas dos ingredientes presentes na mistura e não na quantidade total da mistura (CORNELL, 1990).

O planejamento de experimentos com misturas tem sido uma ferramenta utilizada em diversas áreas da indústria, tais como: alimentos, materiais de construção, detergentes, tintas, vidros, metais, produtos químicos, etc. Alguns autores que seguem esta linha de pesquisa podem ser citados, tais como: ALEXANDRE (2000), Sena *et. al.* (2001), Oliveira e Silva (2003), GALDAMEZ e CARPINETTI (2004), COSCIONE (2005), VALDECIR e CINCOTTO (2005), XAVIER (2006), BAHIANSE (2007) dentre outros.

A mistura dos componentes dos blocos para pavimentos intertravados pode ser definida como a determinação das proporções entre os seus constituintes; no caso, cimento, agregados e LBRO (adição mineral). As propriedades e características que se desejam obter são funções desta mistura. Portanto, é importante encontrar um melhor proporcionamento a partir do tipo de cimento e agregados escolhidos, para estabelecer uma composição que dê a melhor resposta com o menor custo.

Sendo assim, em busca de um modelo mais adequado para as misturas de agregados, principalmente com relação às misturas com resíduos, neste trabalho foi usada a modelagem numérico-experimental de misturas por meio da Metodologia de Rede Simplex (*Simplex-Lattice Design*). Após determinação das composições de agregados, foi elaborado um Planejamento de Experimentos Fatorial para moldagem dos pavimentos propriamente ditos.

A determinação da formulação numérico-experimental foi apresentada de forma descritiva por CORNELL (1990), BARROS NETO *et al.* (2003), MONTGOMERY (1997), MONTGOMERY (2003), BAHIANSE (2007), entre outros.

3.6 – Caracterização Ambiental dos Blocos Intertravados

A caracterização ambiental segundo a NBR 1004/2004 se dá por meio de análises químicas sobre o extrato lixiviado (NBR 10005/2004 – Lixiviação de

Resíduo: Procedimento) e solubilizado (NBR 10006/2004 – Solubilização de Resíduo: Procedimento).

A ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio das NBR^{rs} citadas, fixam os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado e solubilizado dos resíduos sólidos. Ambos os procedimentos determinam que o tamanho das partículas das amostras não devem ser superiores a peneira de malha de 9,5 mm. Caso contrário, a amostra deve ser triturada até que atenda ao requisito acima.

Sendo assim, ensaios de caracterização ambiental em materiais de construção civil, segundo a norma brasileira, não consideram o material intacto, o que aumenta consideravelmente sua área específica. Além disso, a metodologia nacional trata o material de construção como um resíduo, desconsiderando a capacidade de estabilização que a pasta de cimento promove nos grãos de resíduo.

A caracterização ambiental segundo os procedimentos descritos na norma nacional será empregada neste trabalho a título de comparação com o procedimento adotado na norma francesa AFNOR XPX 31-211, que considera as amostras intactas, ou seja, sem trituração.

A AFNOR XPX 31-211 considera a técnica de Solidificação/Estabilização para análise da influencia ambiental da LBRO nos materiais.

3.6.1 – Tecnologia de Solidificação/Estabilização

Esta tecnologia, projetada inicialmente para fixação química e encapsulamento de resíduos radio - nucleares e de galvanoplastia, atualmente vem sendo aplicada a uma larga faixa de resíduos, que incluem os resíduos industriais orgânicos e inorgânicos, solos contaminados e/ou constituintes orgânicos e resíduos de incineração (HILLS E POLLARD, 1997). Nos Estados Unidos, a tecnologia de solidificação/estabilização vem sendo empregada a mais de 20 anos (USEPA, 2000).

Segundo USEPA (1999), a solidificação refere-se às técnicas que promovem a solidificação de resíduos sob forma de material sólido, não envolvendo necessariamente uma interação química entre os contaminantes e os

agentes solidificados. A estabilização refere-se às técnicas que reduzem quimicamente o potencial perigoso de um resíduo, convertendo seus contaminantes em formas menos solúveis, móveis ou tóxicas. As características de manipulação e natureza física do resíduo não são necessariamente mudadas pela estabilização (LORENZONI, 2005).

Geralmente, o processo de solidificação/estabilização tem sido avaliada de acordo com critérios e padrões especificados pela legislação federal, estadual e local, ou por agências reguladoras que usam métodos e padrões englobando os grupos de propriedades físicas e propriedades químicas do resíduo solidificado (WEITZMANN *et al.*, 1988).

Com isso, a área de contato do material com os agentes externos aumenta consideravelmente, favorecendo assim, a solubilização e lixiviação dos componentes, que antes poderiam estar simplesmente encapsulados no interior das peças.

Este trabalho adotou, para caracterização ambiental das peças de pavimentos intertravados, a AFNOR XPX 31-211, norma francesa que determina os procedimentos para o teste de lixiviação de resíduos sólidos inicialmente maciços ou gerados por um processo de solidificação.

O extrato lixiviado, obtido por meio da AFNOR XP31-211, é proveniente das amostras em estado original, ou seja, sem a necessidade da cominuição com redução do tamanho das partículas (cerca de 9,5 mm), e conseqüente aumento da área específica de contato.

Alguns resíduos são de difícil classificação e até mesmo os já classificados e titulados como classe II A e II B, ainda que submetidos ao teste de solubilização conforme a NBR 10006 (ABNT, 2004c), não garantem ausência de toxicidade (RODRIGUES, 2007).

Após a obtenção e caracterização do extrato lixiviado, este passou por uma caracterização ecotoxicológica. Flohr *et al* 2005, afirmaram que estes ensaios possibilitam a identificação de substâncias tóxicas no lixiviado, o que denota a presença de uma das características descritas pela NBR 10.004, a toxicidade, que é argumento suficiente para classificar o resíduo em classe I.

A ecotoxicidade pode ser classificada em aguda e crônica. KNIE e LOPES (2004) afirmaram que o efeito agudo se manifesta dentro de períodos curtos (horas

ou dias) de exposição dos organismos aquáticos a um agente nocivo, causando quase sempre a letalidade. Pode também ocorrer a imobilidade a alguns microcrustáceos.

O efeito crônico se refere a anomalias causadas pelo agente nocivo em períodos prolongados de exposição, propiciando alterações na fisiologia da vida.

Uma das formas de entrada de agentes tóxicos para o ambiente aquático se dá através do resíduo sólido industrial. Não se deve subestimar o controle de poluentes tóxicos que afetam adversamente o meio ambiente, devido à grande diversidade de novas substâncias que estão sendo introduzidas no mesmo (ZAGATTO et al, 1992).

O grau de toxicidade é medido por meio de Unidades Tóxicas cônicas (UTc) ou Unidades Tóxicas Agudas (UTa), ou mesmo pelo Fator de Toxicidade – FT para cada caso, agudo ou crônico, que indica quantas vezes é necessário diluir o efluente para não apresentar toxicidade. KNIE e LOPES (2004) informam que quando o resultado de toxicidade apresentar valor maior que 1 a amostra apresenta toxicidade mas, se este valor for menor ou igual a 1 a amostra não é tóxica, pois não precisou ser diluída para não ocorrer efeito tóxico aos organismos.

Os ensaios descritos neste tópico darão subsídios para validação deste pavimento em condições de uso, que além dos critérios tecnológicos do concreto, deve garantir a integridade dos recursos hídricos e solo, por meio da estabilização da LBRO.

CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 - Materiais

Os concretos convencionais geralmente têm como seus constituintes básicos o cimento portland e agregados miúdos e/ou graúdos. A proposta deste trabalho é a incorporação da LBRO em substituição parcial ao agregado miúdo tendo, também a função de enchimento, isto é *filler* na mistura.

Neste capítulo, apresentam-se as características das matérias-primas que foram utilizadas para a elaboração das misturas.

4.1.1 - Areia

Com o intuito de ser obter um traço, isto é uma proporção, de referência, para uma análise comparativa entre os materiais convencionais produzidos na indústria local e as misturas incorporadas com LBRO, utilizou-se areia natural do rio Paraíba do Sul. Optou-se por esta areia por ser na prática a mais usualmente empregada no preparo de argamassas e concretos em Campos dos Goytacazes-RJ.

A areia usada passou por secagem em estufa a de 105°C por 24 horas, até a massa constante, a fim de retirar-se a umidade inicial para se determinar a real quantidade de água a ser adicionada à mistura total. Não foram adotadas as frações granulométricas da areia normal, segundo os procedimentos de separação da NBR 7214, pela necessidade de aproximação da realidade industrial.

4.1.2 – Brita

De forma análoga à areia usada neste trabalho foi a brita 0, assim classificada segundo a NBR 7211/2009, também é amplamente usada na indústria de pré-moldados de concreto. Esse agregado foi submetido à secagem em estufa a de 105°C por 24 horas, onde a umidade encontrada foi considerada desprezível para as dosagens em questão.

4.1.3 – Cimento

Como aglomerante, foi usado o cimento portland de alta resistência inicial CP V ARI PLUS, da marca Holcin, por ser o mais utilizado na indústria de pré-moldados e pavimentos, pois estes materiais necessitam de maior agilidade no período de cura para serem introduzidos rapidamente no mercado. Segundo o fabricante, este cimento está de acordo com a NBR 5733/1991 – Cimento Portland de alta resistência inicial – Especificação. A Tabela 4.1 mostra características deste cimento.

Tabela 4.1 – Composição do CP V ARI – Holcin. Dados do Fabricante

Tipo	Sigla	Classe	Norma	Clínquer + Gesso	Calcáreo
II	CP V ARI	32	NBR 5733	56 a 94 %	0 a 10 %

É importante o uso do mesmo tipo de cimento e do mesmo fabricante, pois a mudança do tipo de cimento pode acarretar alterações nas propriedades do concreto endurecido. Estudos feitos por HALE (2008) comprovam mudanças nas propriedades de concretos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, conforme a variação do tipo de cimento e agregados.

4.1.4 – Aditivo superplastificante

Os aditivos plastificantes/superplastificantes são utilizados freqüentemente para reduzir a água na mistura e promover a melhora da trabalhabilidade do concreto (SILVA, 2009).

Os aditivos mais usados no mercado são os plastificantes à base de lignosulfonato, superplastificantes a base de naftaleno sulfonado e a base de policarboxilato.

Segundo HARTMANN e HELENE (2003), as partículas de cimento Portland quando entram em contato com a água, que tem molécula polar, apresentam forte tendência à floculação. Certa quantidade de água fica aprisionada entre os grãos de cimento, reduzindo tanto a disponibilidade de água quanto a lubrificação da mistura. Tais fenômenos aumentam a viscosidade da mistura e também reduzem a área específica dos grãos de cimento para as reações de hidratação.

Os plastificantes à base de lignosulfonato assim como os superplastificantes a base de naftaleno sulfonado e de policarboxilato atuam na repulsão eletrostática, que aumenta a fluidez e conseqüente redução na quantidade da demanda de água de amassamento (AITCIN, 1998).

Além do efeito de repulsão eletrostática, os superplastificantes a base de policarboxilato possuem o efeito de repulsão estérica, que é possibilitada pela presença de uma longa cadeia lateral ligada em vários pontos na cadeia central do polímero. Este arranjo produz forte efeito dispersante, pois o impedimento do entrelaçamento das cadeias laterais de diferentes moléculas de aditivos cria uma capa de adsorção de grande volume que impede a aproximação das partículas de cimento (GETTO e RONCERO, 1998).

Neste trabalho foi usado o aditivo superplastificante a base de policarboxilato.

A Figura 4.1 ilustra o mecanismo de repulsão dos aditivos.

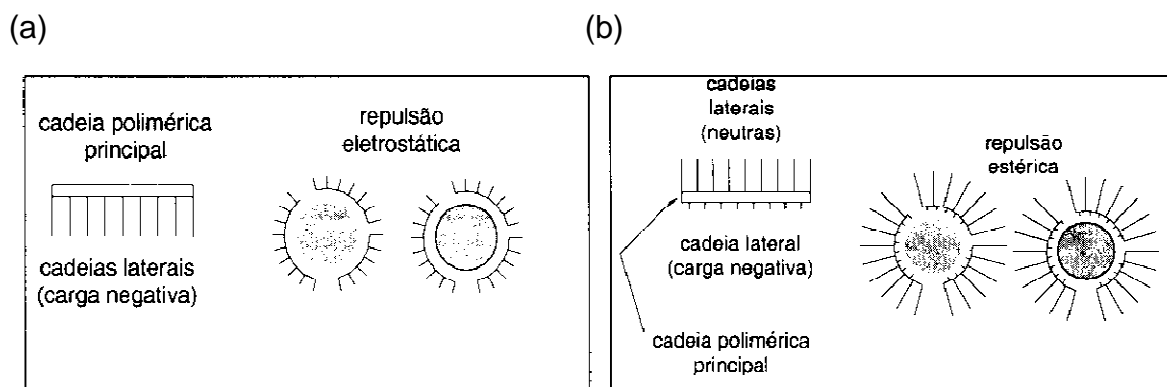


Figura 4.1 – (a) ilustração do mecanismo de repulsão eletrostática para cadeia de naftaleno e melanina; (b) ilustração do mecanismo de repulsão estérica para a cadeia de policarboxilato (COLLEPARD, 1999)

O teor de superplastificante da mistura, que é tomado por meio de um percentual da massa de aglomerante, foi determinado segundo estudos de DE LARRARD *et al.* 1997 e CASTRO 2005. Inicialmente, o estudo envolveu a otimização das pastas para a determinação do teor ótimo de superplastificante e a avaliação da compatibilidade entre o cimento e o aditivo com o auxílio dos ensaios de cone de Marsh. Este ensaio corresponde a um método de avaliação da melhor dosagem de plastificantes.

Nesse método, o ponto de saturação do aditivo é considerado como o teor de aditivo onde uma reta com inclinação de 2:5 tangencia a curva do logaritmo do tempo de escoamento *versus* teor de superplastificante. A escolha da inclinação de 2:5 é arbitrária, porém foi adotada em função das proporções adequadas de superplastificantes determinadas a partir da mesma.

A Figura 4.2 ilustra a metodologia de determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante, conhecido como método AFREM.

A Figura 4.3 traz os resultados obtidos por CASTRO (2005) para dois tipos de aglomerantes – Cimento Portland ARI CP V RS e Cimento Portland ARI CP V Plus. São apresentadas as curvas do logaritmo dos tempos de escoamento medidos pelo ensaio de cone de Marsh *versus* teor de SP. Observa-se que o teor ótimo de SP variou em função do tipo de cimento: para o CPV ARI Plus, o teor determinado foi de 0,61%, enquanto que para o CPV ARI RS o teor foi de 0,46%.

Com isso, este trabalho utilizou um teor de aditivo de 0,61%, em função da massa de aglomerante.

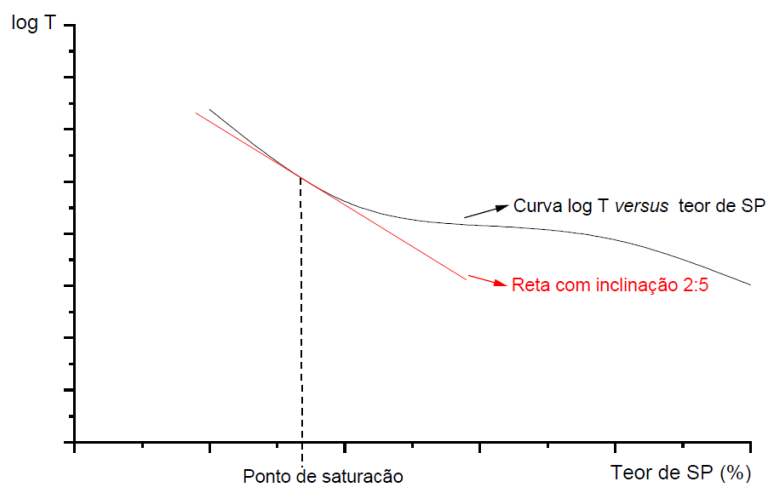


Figura 4.2 – Determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante pelo método AFREM desenvolvido por DE LARRARD *et al.* (1997).

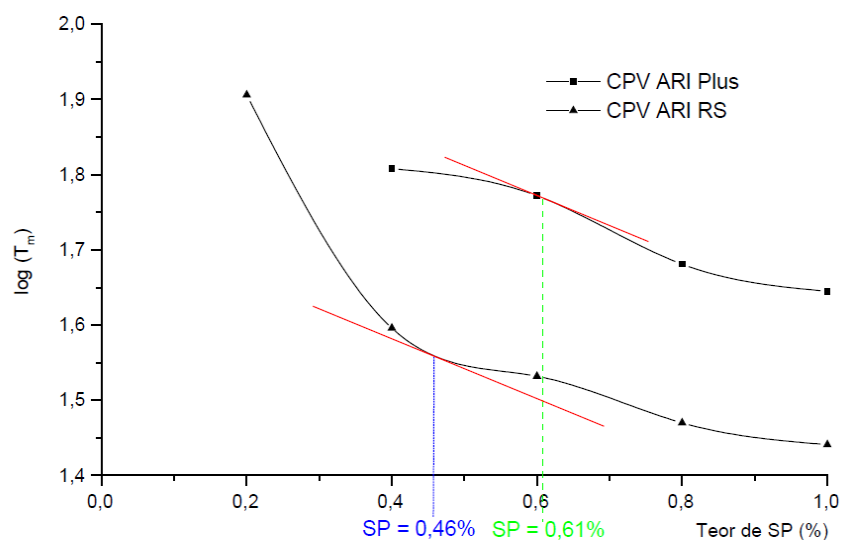


Figura 4.3 – Curvas log (T_m) versus teor de SP para pasta de aglomerantes (CASTRO, 2005)

4.1.5 – LBRO

A LBRO utilizada foi proveniente da região sul do Estado do Espírito Santo, mais especificamente da cidade de Cachoeiro de Itapemirim-ES. Foi coletada em um depósito temporário, impermeabilizado e coberto, anexo a uma empresa, sendo que antes passou pelo tratamento de perda de umidade no equipamento filtro prensa.

Esse processo de tratamento faz com que o resíduo atinja aproximadamente 30 % de umidade no momento em que o mesmo sai do filtro. Esta queda na umidade facilita consideravelmente seu manuseio, tanto na indústria quanto em escala de laboratório, pois devido a sua finura, apresenta grande dificuldade para a perda de umidade.

Em laboratório, com o intuito de se retirar matéria orgânica tais como folhas e alguns cacos e aparas de rocha, além de homogeneização, a LBRO, foi destorroada em peneira ABNT N^o. 60. O material retido foi descartado.

Após essa etapa o resíduo sofreu secagem em estufa a 105°C por um período de 24 horas, até a massa constante, para retirada da umidade inicial assim como foi feito com a areia, para depois ser usado no preparo das amostras.

4.2 – Métodos Utilizados

4.2.1 - Caracterização dos materiais

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

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

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

4.2.1.1 - Espectroscopia de raios X

A determinação da composição química semiquantitativa do resíduo de rocha, em forma de óxidos, foi obtida por meio da técnica de análise química por

fluorescência de raios X de energia dispersiva (“EDX”), em um equipamento Shimadzu EDX-700. A condição de ajuste é a de “vácuo dois canais” e as amostras foram analisadas sob forma de pó, com o auxílio de um porta-amostra. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV - UENF).

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

4.2.1.2 - Difração de raios X

A análise por difração de raios – X, com o objetivo de identificar as fases cristalinas do resíduo de rocha, foi realizada no difratômetro (Modelo Seifert URD65, Alemanha) do Laboratório de Ciências Físicas da UENF. Foi utilizada a linha k_{α} de Co ($\lambda = 1,78897 \text{ \AA}$) com filtro de Fe num feixe primário.

O equipamento foi operado a 40 kV e 30 mA e a varredura (2θ de 6 a 70 °C), realizou-se na forma de passo a passo de 0,02° (2θ) por 4 segundos de acumulação.

A amostra, na forma de pó (do mesmo pó usado na análise por EDX), foi depositada em lâmina de vidro com cavidade retangular. Os picos difratados, características de fases cristalinas, foram identificados em 2θ (ângulo de Bragg), d (distância interplanar) além da intensidade das contagens.

Estes valores foram comparados com valores tabelados na base de dados de padrões de difrações (JCPDS – *Joint Comitee of Powder Diffraction Standards*) os minerais e outras fases cristalinas presentes no resíduo de rocha foram identificados.

4.2.1.3 – Características físicas: granulometria e densidade real dos grãos

As características físicas determinam o emprego do resíduo na mistura dos concretos para a confecção dos intertravados, podendo ter a função de agregado miúdo ou *filler*. A curva de distribuição granulométrica da LBRO foi determinada

segundo as prescrições da NBR 7181/1984 e a massa específica real dos grãos segundo a NBR 6508. Estes ensaios serão realizados no Laboratório de Solos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

4.2.1.4 – Análise Microestrutural: Análise da Zona de Transição pelo Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV

Por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), verificou-se as características microestruturais do concreto, principalmente no tocante à zona de transição, além da identificação dos agregados LBRO e areia, a fim de reconhecimento das fases do concreto. Ensaios com MEV da marca Zeiss, modelo DSM 362 foram conduzidos no Laboratório do LAMAV/UENF.

Com auxílio do MEV verificou-se também a porosidade da massa, a aderência entre a pasta de cimento e os agregados, além da influência do encapsulamento dos grãos de LBRO pela pasta de cimento.

4.3 – Dosagem

As metodologias de dosagem adotadas foram os modelos matemáticos determinados no Planejamento de Experimentos em Rede Simplex e do Planejamento Fatorial.

4.3.3 – Planejamento em Rede Simplex – Superfície de Resposta

Primeiramente, este trabalho baseou-se na determinação de um modelo matemático numérico-experimental para obtenção das composições entre os agregados, sendo eles areia, brita 0 e LBRO. Desta forma buscou-se um modelo que indicasse o maior fator de empacotamento entre os componentes citados.

Assim, usou-se, para o proporcionamento dos agregados, a metodologia de rede simplex discutida por CORNELL (1990), BARROS NETO *et al.* (2003) e BAHIANSE (2007).

A metodologia de rede simplex consiste em uma mistura que a quantidade total dos constituintes se mantém constante, variando apenas as proporções de seus componentes. Se a quantidade total é mantida constante, o valor da resposta varia quando mudanças são feitas nas proporções relativas dos componentes.

Experimentos freqüentemente satisfazem a definição requerida pela fixação da quantidade total dos constituintes, sendo o mesmo valor para toda mistura. As suas proporções expressam a fração onde elas devem somar a unidade, especialmente se elas são somente constituintes para serem estudados juntos na mistura (CORNELL 1990).

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

Depois de se gerar a superfície de resposta mais ajustada para a propriedade Índice de Vazios Mínimo (IVM) segundo modelamento matemático Simplex, foi constatada a existência de uma região experimental, que compreende as n possíveis misturas que determinam a mesma resposta experimental - IVM.

Ainda baseado no principio de dosagem estatística, procedeu-se a delimitação de uma subárea, compreendida no interior da área de máxima densidade entre os agregados.

Depois de definidos os modelos matemáticos mais adequados às restrições experimentais impostas, seguiram-se à comprovação experimental e à análise estatística destes modelos. O modelo com a resposta experimental estatisticamente mais adequada foi usado para a definição dos traços para outras análises de interesse.

Tomou-se como base 16 pontos experimentais no planejamento em Rede Simplex. Considerando que nem todos os pontos distribuídos pela região experimental foram usados para a montagem dos modelos, os pontos excedentes serviram de comprovação experimental para os modelos gerados numericamente.

Para a análise dos parâmetros dos modelos matemáticos, foram adotadas as seguintes nomenclaturas para os componentes: brita (0) = x_1 , areia = x_2 e LBRO = x_3 .

Pontos experimentais, correspondendo à combinação dos três componentes foram definidos, de acordo com cada modelo testado. O delineamento de misturas foi aplicado em etapas, tendo como base os modelos de regressão quadrática e as superfícies de resposta. Testes estatísticos foram feitos para determinar a significância estatística dos modelos ajustados. A otimização da composição foi executada buscando-se Índice de Vazios Mínimo (IVM), ou seja, um maior fator de empacotamento.

O procedimento para execução do experimento, e conseqüentemente, para a obtenção das superfícies de resposta das misturas, utilizou de uma adaptação ao ensaio de “Determinação do Índice de Vazios Mínimo e Máximo de Componentes Não Coesivos – MB-3388 da ABNT.

A execução dos ensaios obedeceu à seguinte ordem: cada mistura foi introduzida em recipiente cilíndrico de volume conhecido ($3242,80 \text{ cm}^3$) e passou por um processo de vibração a uma frequência de 50 Hz, durante um período de 10 minutos. Sobre este cilindro foi colocada uma sobrecarga de 10 kg em contato com a amostra. Ao final da vibração, o topo do cilindro foi planado com uma régua metálica, para que fosse retirado o excesso do material, e em seguida foi realizada a medida de sua massa. De posse do valor da massa de cada mistura e sendo o volume do cilindro conhecido, pode-se obter a densidade máxima aparente seca ou IVM de cada ponto experimental.

Os componentes (brita 0, areia e LBRO) perfizeram um total de 480 kg de material. Estes materiais foram secos em estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$, por um período mínimo de 24 horas. A LBRO, além da secagem, passou por processo de destorroamento.

Foram determinados, com base no planejamento experimental, 16 pontos experimentais com 3 repetições por ensaio, onde a matriz experimental conta com 48 ensaios para o índice de vazios mínimo.

Depois de determinadas às matrizes dos experimentos, seguiram-se a formulação e análise estatística dos modelos matemáticos. Os modelos numéricos utilizados, conforme a quantidade mínima de pontos requerida para a geração dos

mesmos foi: Modelo Linear (3 pontos), Modelo Quadrático (6 pontos), Modelo Cúbico Especial (7 pontos) e Modelo Cúbico Completo (10 pontos).

Para cada modelo foi realizada a Análise de Variância (ANOVA) e aplicado o Critério de Fischer (Teste F) para verificação do ajuste dos modelos (CALADO e MONTGOMERY 2003; BARROS NETO 2003; BOX e DRAPER 2007 e CORNELL 1990). Para que uma regressão não seja apenas estatisticamente significativa, mas também útil para fins preditivos, o valor da razão entre as médias quadráticas da regressão e dos resíduos experimentais (MQ_R/MQ_r) deve ser comparado com, no mínimo, quatro a cinco vezes o valor de F_{v_1, v_2} tabelado (BOX e WETZ, 1973).

4.3.4 – Planejamento Fatorial – moldagem dos pavimentos

O planejamento fatorial tem sido muito aplicado em pesquisas básicas e tecnológicas e é classificado como um método do tipo simultâneo, onde as variáveis de interesse que realmente apresentam influências significativas na resposta são avaliadas ao mesmo tempo. Para realizar um planejamento fatorial, escolhem-se as variáveis a serem estudadas e efetuam-se experimentos em diferentes valores destes fatores.

Um dos problemas mais comuns que um experimentador pode enfrentar é a determinação da influência de uma ou mais variáveis sobre outra variável de interesse. Como exemplo, deseja-se determinar como a influência da incorporação de LBRO nos concretos pode alterar as propriedades de desempenho, de forma a confeccionar um material que seja adequado às normas e evitando o aparecimento de patologias, com um máximo de incorporação.

Estatisticamente pode-se dizer que interessa descobrir como a resposta (desempenho do concreto) depende dos fatores (traço, relação a/c) mencionados anteriormente. Esta situação pode ser representada esquematicamente na Figura 4.4, em que certo número de fatores, F_1, F_2, \dots, F_K , atuando sobre o sistema em estudo, produz as respostas R_1, R_2, \dots, R_J . O sistema é considerado como uma função (desconhecida em princípio, senão não precisaríamos de experimentos) que atua sobre as variáveis de entrada (os fatores) e produz como saída às respostas observadas (BARROS NETO, 2003).

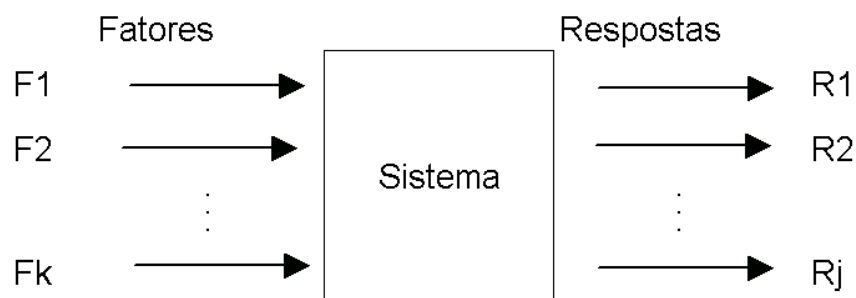


Figura 4.4 – Função (sistema) que liga os fatores às respostas (BARROS NETO, 2003)

O objetivo é descobrir como atua esse sistema por meio de funções ou pelo menos, obter uma aproximação satisfatória. Este modelo matemático sofre uma análise estatística, após a comprovação experimental.

Para executar um planejamento fatorial precisa-se em primeiro lugar especificar os níveis em que cada fator será estudado, isto é, os valores dos fatores que serão empregados nos experimentos. Um planejamento fatorial requer a execução de experimentos para todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. Cada um desses experimentos, em que o sistema é submetido a um conjunto de níveis definido (por exemplo: na dosagem de uma argamassa composta de 50% de areia e 50% de resíduo), é um ensaio experimental.

Em geral, se houver n_1 níveis do fator 1, n_2 do fator 2, ... n_k do fator k o planejamento fatorial será um fatorial de $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k$. Isso não significa obrigatoriamente que serão realizados apenas $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k$ experimentos. Este é o número mínimo para se ter um planejamento fatorial completo. Os ensaios devem ser repetidos a fim de se obtenha uma estimativa dos erros do modelo experimental e uma posterior análise estatística (BARROS NETO, 2003).

Analisar o comportamento da combinação dos fatores sobre a resposta requer a variação dos mesmos e uma posterior observação dessas respostas, de modo que é necessária a realização de pelo menos dois níveis desse fator. Um planejamento fatorial em que todas as variáveis são estudadas em apenas dois níveis é, portanto o mais simples de todos eles. Havendo k fatores, isto é, k variáveis controladas pelo experimentador, o planejamento requer a realização de

$2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ensaios diferentes, sendo chamado por isso de *planejamento fatorial 2^k* (BARROS NETO, 2003).

O planejamento fatorial aplicado neste trabalho baseou-se na análise do aumento da relação a/c e a influencia dos traços escolhidos. Sendo assim, aplicou-se um planejamento 2^2 .

Considerando que foi constatado que existe uma região experimental, que compreende as n possíveis misturas entre os agregados (componentes) areia, brita 0 e LBRO, e que por sua vez, determinam a mesma reposta experimental - Índice de Vazios Mínimo (IVM). Sendo assim, procedeu-se a delimitação de uma subárea, compreendida no interior da área central onde se obteve o maior IVM.

Os fatores envolvidos foram o traço e o fator água/cimento (a/c). Usou-se quatro traços no interior da superfície mais compacta, sendo eles, o traço T14, ponto usado na geração do modelamento simplex, o T17, T18 e T19. Estes quatro pontos (traços) formam um retângulo que abrange a região de estudo.

A propriedade dos pavimentos intertravados a ser analisada neste trabalho é a resistência à compressão, pois, como foi visto, é o principal parâmetro de controle de qualidade dos blocos.

Desta forma possibilitou-se determinar as faixas de resistência para os n traços da superfície e assim como seus respectivos fatores água/cimento (a/c).

Tomou-se em cada traço um teor de aglomerante (cimento portland) inicial de 10% (em massa) da massa total das misturas. Simultaneamente foram elaborados pavimentos com teores de água/cimento (a/c) com aumentos gradativos desta relação, até o ponto de moldagem, ou seja, foram desconsiderados os traços com fluidez excessiva ou muito secos.

O ponto de moldagem deve ser obedecido tendo em vista a necessidade de realização da desforma, que é feita imediatamente após o processo de vibração/prensagem. Com isso, concretos com teores de água elevados ou muito reduzidos ficam fluidos ou sem coesão respectivamente. Por obvio, os traços com estes teores de água foram desconsiderados.

Os procedimentos de ensaio e moldagem e cura dos corpos-de-prova seguiram às prescrições das NBR¹⁵ 9780 e 9781.

Os pavimentos tiveram como padrão de classificação a resistência que os habilita às condições de tráfego que poderão sofrer. Sendo assim, serão classificados em duas categorias, segundo a NBR 9781:

- Pavimentos para trânsito de veículos comerciais e de linha: com resistência a compressão maior que 35 MPa;
- Pavimentos para trânsito especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão: com resistência a compressão superior a 50 MPa.

4.3.5 – Máquina de vibro/compressão

A máquina usada neste trabalho possui as seguintes especificações fornecidas pelo fabricante: frequência de vibração de 60 Hz e sobrecarga de 80 libras, equivalente a 36,30 kg. A Figura 4.5 mostra o equipamento usado.



Figura 4.5 – Máquina de vibro-compressão para confecção dos pavimentos de concreto

4.3.6 – Programa *Statistica*

Como ferramenta, para geração de gráficos, superfícies de resposta e também para ilustrar as curvas de “iso-resposta” dos modelos matemáticos, foi usado o *Statistica* 6.0.

O software comercial *Statistica* 6.0, criado pela *Statsoft*, foi empregado especificamente para planejamento de experimentos. Além disso, foi aplicado o módulo *Experimental Design*, com a opção *Mixture desigs and triangular surfaces*, específico para misturas ternárias e geração de superfícies de resposta.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos da caracterização dos materiais e do planejamento experimental adotado.

5.1 - Areia

A areia usada neste trabalho é a natural do rio Paraíba do Sul. O material caracterizado, conforme a recomendação da ABNT possui densidade aparente seca máxima $1,62 \text{ g/cm}^3$, módulo de finura de $2,25 \text{ g/cm}^3$; massa específica aparente no estado solto de $1,41 \text{ g/cm}^3$ e massa específica teórica de $2,57 \text{ g/cm}^3$. Esses valores (os três últimos) são parecidos com os obtidos por DÉ SIR *et al.* 2005, que obtiveram $2,65 \text{ g/cm}^3$; $1,39 \text{ g/cm}^3$ e $2,65 \text{ g/cm}^3$ respectivamente. A Figura 5.1 mostra a curva granulométrica da areia.

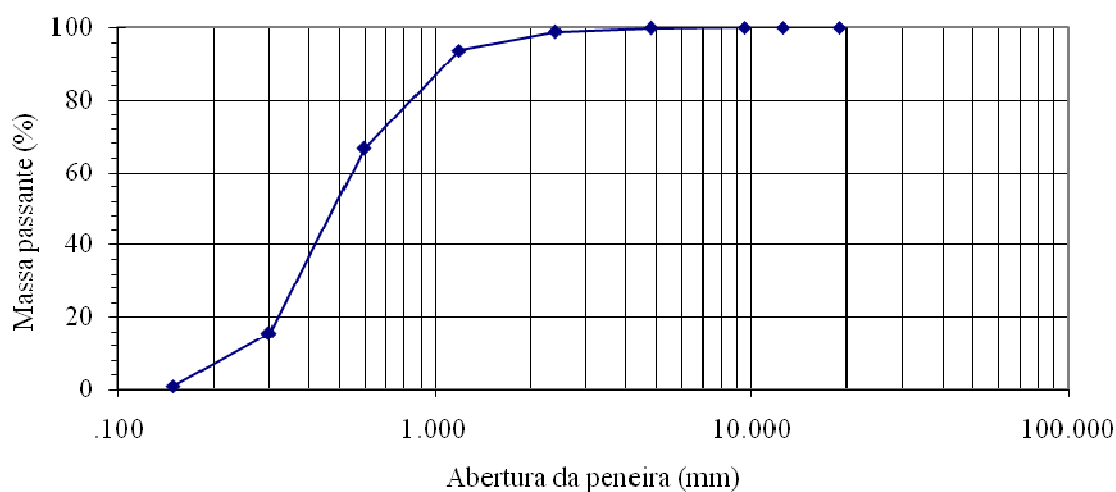


Figura 5.1 - Curva granulométrica da areia

5.2 - Brita

A brita usada é classificada com brita 0 e possui as seguintes características: Diâmetro máximo 6,3 mm, densidade aparente seca máxima 1,59 g/cm³ e módulo de finura de 4,01 g/cm³.

A Figura 5.2 mostra a curva granulométrica da brita 0.

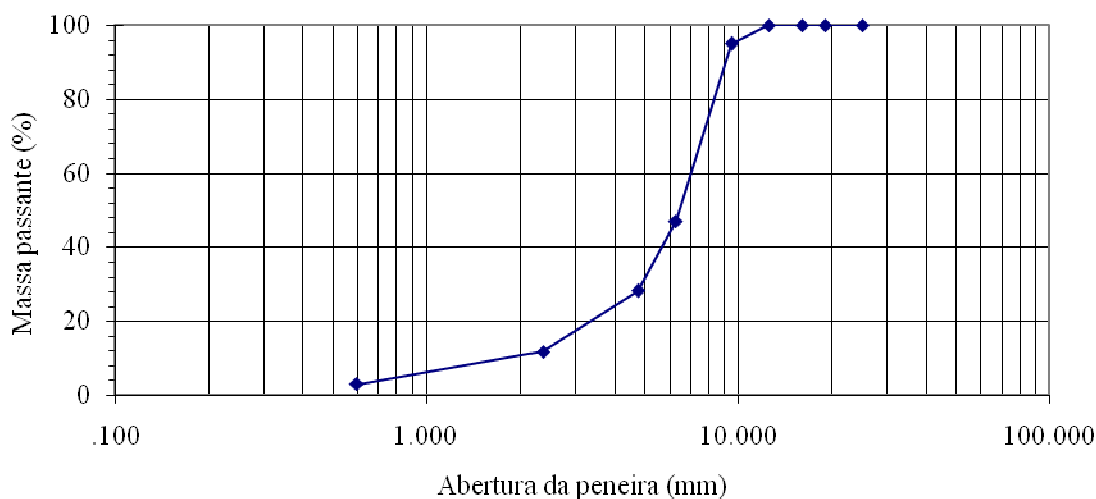


Figura 5.2 - Curva granulométrica da brita

5.3 - LBRO

A LBRO possui densidade real dos grãos de 2,86 g/cm³ e densidade aparente seca máxima 1,47 g/cm³. Tem-se na Figura 5.3 a curva granulométrica da LBRO.

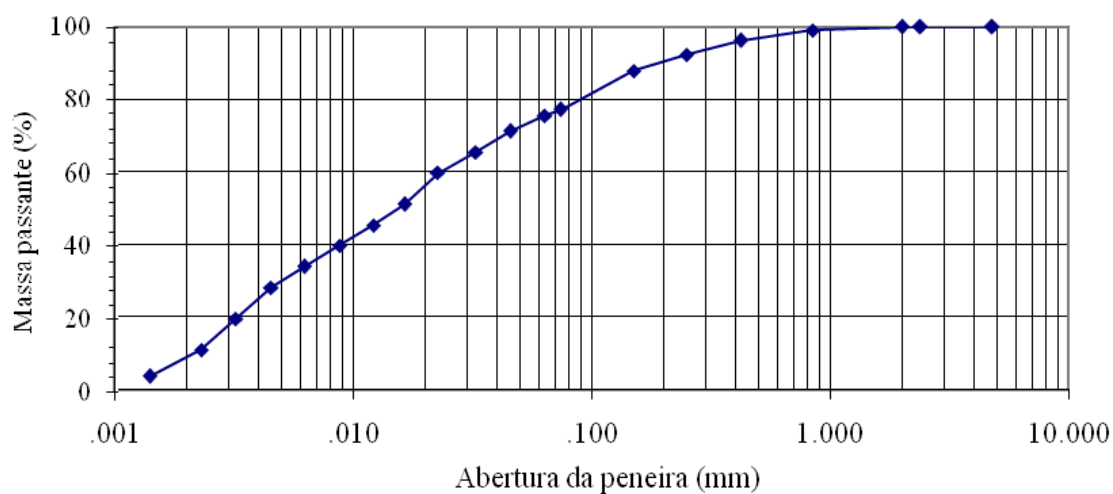


Figura 5.3 - Curva granulométrica da LBRO

Analisando as distribuições granulométricas acima, nota-se a grande diferença de diâmetros existente entre os agregados.

Pode-se então concluir que, alguma composição resultante da mistura entre eles, proporcionará uma granulometria mais contínua, favorecendo um maior empacotamento da mistura.

A Tabela 5.1 apresenta as composições químicas semiquantitativas do resíduo de rocha ornamental. Ao analisar essa tabela, observa-se que o teor de sílica (SiO_2) é superior a 63% e o de alumina (Al_2O_3) é de aproximadamente 14%. Pode-se concluir que as rochas de origem desse resíduo são ácidas (rochas silicatadas), na maioria das vezes granitos e gnaisses, contendo minerais como o quartzo, feldspatos e micas (muscovita e biotita).

Tabela 5.1 – Composição química do resíduo em forma de óxidos.

Composição Química do Resíduo	
Óxido	Teor (%)
SiO_2	63,20
Al_2O_3	14,80
K_2O	6,90
Fe_2O_3	5,95
CaO	6,66
SO_3	1,58
TiO_2	0,64
MnO	0,10
ZrO_2	0,027
SrO	0,019
ZnO	0,013

Os teores de CaO (6,66%) e Fe_2O_3 (5,95%) são devido, principalmente, aos constituintes da própria LBRO, assim como a adição de granalha e CaO como lubrificante no processo de serragem da rocha.

A identificação das fases cristalinas da LBRO, por meio do difratograma de raios X, é mostrada na Figura 5.4. Verificam-se picos de difração característicos das fases cristalinas referentes ao quartzo (sílica - SiO_2), microclina (feldspato

potássico - KAlSi_3O_8), albita (feldspato sódico - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), cordierita ($\text{Mg}_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5)\text{O}_{18}$) e ilita/mica.

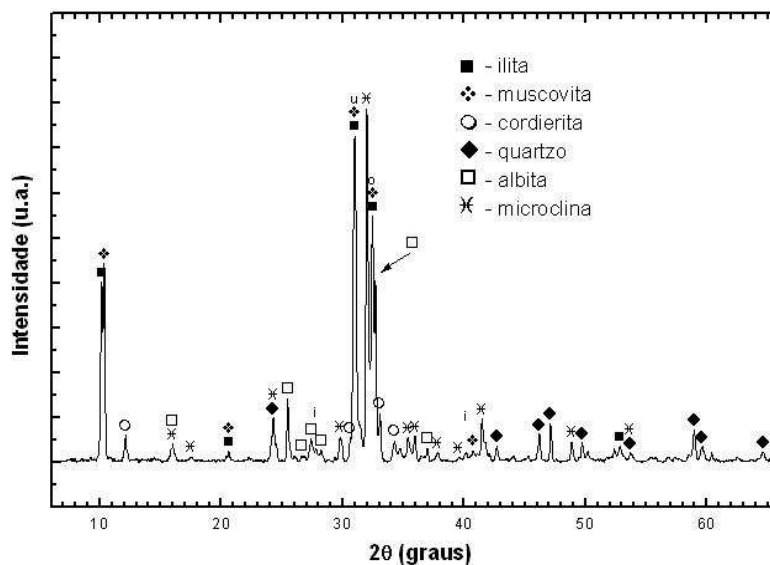


Figura 5.4 - Difratograma de raios X da LBRO

5.4 – Planejamento Simplex – superfície de resposta entre os agregados

Para a análise dos parâmetros (LBRO, areia e brita 0) dos modelos, adotou-se a seguinte nomenclatura para os componentes:

Brita 0 - x_1

Areia - x_2

LBRO - x_3

As Tabelas 5.2 e 5.3 trazem as matrizes dos experimentos e de resultados dos IMV para as 48 amostras ensaiadas.

Tabela 5.2 - Matriz de experimentos.

ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS MÍNIMO							
Traço	Matriz de Misturas			Massa Total Mínima (kg)	Traço em Massa (kg)		
	Brita (0)	Areia	LBRO		Brita (0)	Areia	LBRO
1	1	0	0	10	10,00	0,00	0,00
2	0	1	0	10	0,00	10,00	0,00
3	0	0	1	10	0,00	0,00	10,00
4	0,5	0,5	0	10	5,00	5,00	0,00
5	0,5	0	0,5	10	5,00	0,00	5,00
6	0	0,5	0,5	10	0,00	5,00	5,00
7	1/3	1/3	1/3	10	3,33	3,33	3,33
8	2/3	0	1/3	10	6,67	0,00	3,33
9	1/3	0	2/3	10	3,33	0,00	6,67
10	1/3	2/3	0	10	3,33	6,67	0,00
11	2/3	1/3	0	10	6,67	3,33	0,00
12	0	2/3	1/3	10	0,00	6,67	3,33
13	0	1/3	2/3	10	0,00	3,33	6,67
14	2/3	1/6	1/6	10	6,67	1,67	1,67
15	1/6	2/3	1/6	10	1,67	6,67	1,67
16	1/6	1/6	2/3	10	1,67	1,67	6,67
Massa Total dos Componentes (kg)					53,33	53,33	53,33
Massa Total dos Componentes (kg)- 03 repetições					160	160	160

Analisando a Tabela 5.2, vê-se que os componentes, areia, LBRO e brita 0, perfizeram um total de 480 kg de material. Os 16 pontos experimentais sofreram 03 repetições por ensaio, ou seja, a matriz experimental contou com 48 ensaios para o índice de vazios mínimo (IMV).

Tabela 5.3 – Ensaio de determinação do Índice de Vazios Mínimo ou Densidade Aparente Seca Máxima (e).

Traço	Volume do Cilindro = 3242,80 cm ³						
	Massa (g)			e (g/cm ³)			
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	IVM ₁	IVM ₂	IVM ₃	$e_{\text{médio}}$
1	5141	5152	5188	1,585	1,589	1,600	1,591
2	5346	5144	5223	1,649	1,586	1,611	1,615
3	4824	4684	4797	1,488	1,444	1,479	1,470
4	6141	6094	6138	1,894	1,879	1,893	1,889
5	5870	5893	5927	1,810	1,817	1,828	1,818
6	5557	5560	5555	1,714	1,715	1,713	1,714
7	6343	6430	6242	1,956	1,983	1,925	1,955
8	6356	6329	6308	1,960	1,952	1,945	1,952
9	5551	5558	5642	1,712	1,714	1,740	1,722
10	5831	5782	5782	1,798	1,783	1,783	1,788
11	6055	6170	6074	1,867	1,903	1,873	1,881
12	5651	5649	5665	1,743	1,742	1,747	1,744
13	5422	5395	5405	1,672	1,664	1,667	1,667
14	6441	6385	6327	1,986	1,969	1,951	1,969
15	5697	5753	5790	1,757	1,774	1,785	1,772
16	5296	5223	5342	1,633	1,611	1,647	1,630

Depois de determinada às matrizes do experimento, seguiu-se a formulação e análise estatística dos modelos matemáticos.

Os modelos numéricos utilizados, conforme a quantidade mínima de pontos para a geração dos mesmos, foram: Modelo Linear (3 pontos), Modelo Quadrático (6 pontos), Modelo Cúbico Especial (7 pontos) e Modelo Cúbico Completo (10 pontos).

Sobre cada modelo foi realizada a Análise de Variância (ANOVA) e aplicado o Critério de Fischer (Teste F) para verificação do ajuste dos modelos. Foi sugerido por BOX e WETZ (1973), que uma regressão não seja apenas estatisticamente significativa, mas também útil para fins preditivos. O valor de MQ_R/MQ_r , ou seja, a razão entre as medias quadráticas da regressão e dos resíduos experimentais, deve ser comparado com no mínimo quatro a cinco vezes o valor de $F_{v1,v2}$.

A seguir tem-se a análise de cada modelamento.

5.4.1 – Modelo Linear

Para a formulação do modelo linear são necessários, pelo menos, três pontos experimentais. Em cada ponto do modelo foram feitas três repetições, a fim de que houvesse uma maior representatividade dos resultados. Os pontos do modelo são os mostrados na Tabela 5.4:

Tabela 5.4 – Pontos usados no modelo linear

Pontos	Componentes		
	x_1	x_2	x_3
y_1	1	0	0
y_2	0	1	0
y_3	0	0	1

Sendo assim, a Equação 5.1, representa todos os pontos da região experimental estimados pelo modelo linear.

$$\hat{y} = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (5.1)$$

Onde:

y = resposta estimada pelo modelo;

b_i = parâmetros do modelo;

x_i = proporção de matéria-prima utilizada na mistura.

Após os cálculos dos coeficientes por meio de manipulação de matrizes (CORNELL 1990, BARROS NETO *et al.* 2003 e BAHIENSE 2007), obtém-se a Equação 5.2 do modelo linear, que estima as respostas na superfície à medida que variam as proporções dos componentes da mistura para área experimental.

$$\hat{y} = 1,90 x_1 + 1,76 x_2 + 1,62 x_3 \quad (5.2)$$

Intervalos de confiança: $b \pm t_{n-p} \times$ (erro padrão)

Admitindo-se que os erros se distribuem normalmente, empregou-se, então, a distribuição de *Student* para testar a significância dos parâmetros (b_i 's) do modelo ao nível de 95 % de confiança (CORNELL 1990, BARROS NETO *et al.* 2003 e BAHIENSE 2007).

Onde:

$n = 9$ ensaios $t_6 = 2,447$

$p = 3$ parâmetros

erro padrão dos parâmetros b_i 's = 0,044

A Tabela 5.5 mostra que os parâmetros do modelo linear pertencem aos intervalos de confiança, e os mesmos são significativos, pois os limites dos intervalos de confiança têm sinais iguais, ou seja, não há evidência estatística de que algum parâmetro seja zero.

Tabela 5.5 – Parâmetros usados no modelo linear

Pontos		Intervalos de	
b_1	1,90	1,81	1,99
b_2	1,76	1,67	1,84
b_3	1,62	1,53	1,71

A Figura 5.5 representa o diagrama de Pareto, que comprova graficamente a significância dos parâmetros do modelo linear. Os valores vistos ao lado dos retângulos são relativos ao teste t , de forma que os efeitos que se encontrarem ao lado direito da linha de $p = 0,05$ de probabilidade são significativos.

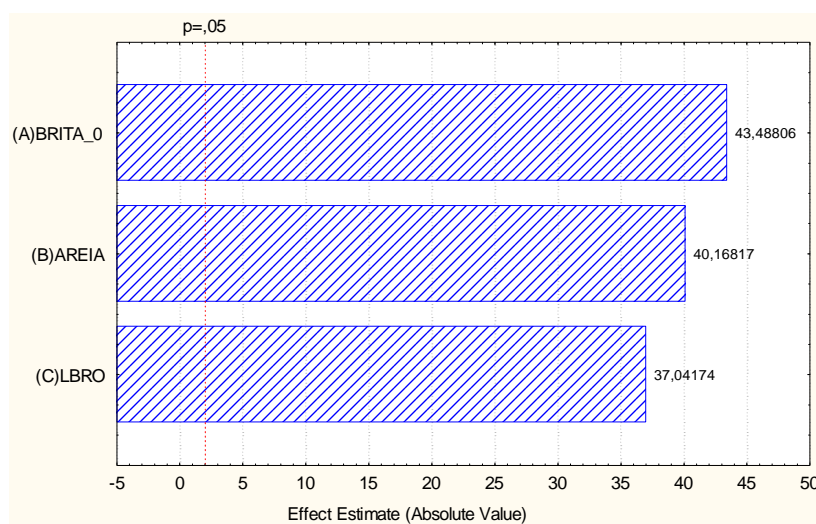


Figura 5.5 – Diagrama de Pareto para o modelo linear

Análise do modelo

Após a obtenção da Equação 5.2 do modelo linear, calculada com apenas três pontos, foi feita a comprovação do modelo em mais sete pontos (misturas) distribuídos pela região experimental. Estes pontos foram elaborados anteriormente no programa de ensaios. A Tabela 5.6 mostra o resultado de dez respostas obtidas pelo modelo linear (\hat{y}) e dez valores médios de observações, em triplicata, obtidas nos ensaios (y).

Tabela 5.6 – Valores previstos pelo Modelo Linear e valores médios observados de IVM

Misturas	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	x_{1123}	x_{1223}	x_{1233}
\hat{y}	1,90	1,76	1,62	1,83	1,76	1,69	1,76	1,83	1,76	1,69
y	1,90	1,76	1,62	1,89	1,82	1,71	1,96	1,97	1,77	1,63

Considerando a diferença evidente entre os resultados obtidos pelo modelo linear (\hat{y}) e os resultados obtidos experimentalmente (y), foi feita uma análise estatística por meio do método dos mínimos quadrados ou análise de regressão de variância (ANOVA), considerando dez pontos experimentais, com três repetições cada um, no interior da superfície de resposta em questão. A Tabela 5.7 lista os resultados obtidos.

Tabela 5.7 - ANOVA do Modelo Linear.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de	Média Quadrática
Regressão	0,26	2	0,13
Resíduos	0,70	45	0,015
Total	0,96	47	0,020

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 23,78 \%$

O Modelo Linear apresentou como índice de ajuste do modelo (R^2) um valor de 23,78 %, que se considera um baixo ajuste. Sendo assim este modelo pode ser desconsiderado. Segue-se a Figura 5.6 mostra a superfície de resposta gerada.

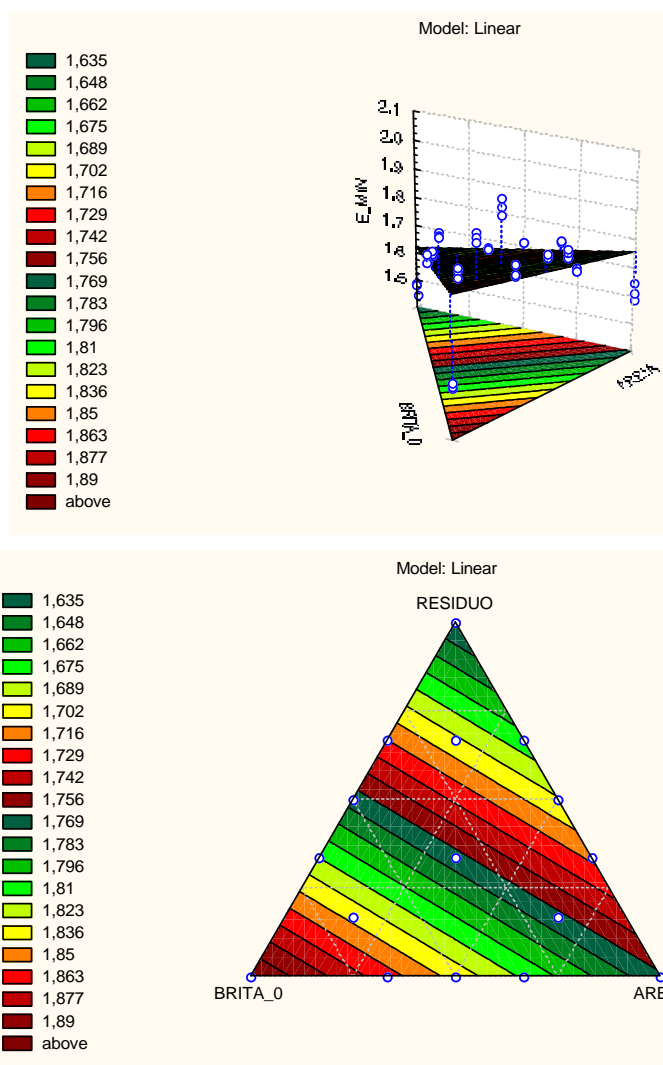


Figura 5.6 - Superfície de resposta gerada pelo modelo linear

5.4.2 – Modelo Quadrático

O modelo quadrático considera, além dos três pontos já usados no modelo linear, outros três pontos na superfície de resposta. A Tabela 5.8 traz os pontos do modelo.

Tabela 5.8 – Pontos usados no modelo linear

Pontos	Componentes		
	x_1	x_2	x_3
y_1	1	0	0
y_2	0	1	0
y_3	0	0	1
y_{12}	0,5	0,5	0
y_{13}	0,5	0	0,5
y_{23}	0	0,5	0,5

Com isso, a Equação 5.3 representa todos os pontos da região experimental estimados pelo modelo quadrático.

$$\hat{y} = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (5.3)$$

Feitos os cálculos dos coeficientes, obteve-se a Equação 5.4 do modelo quadrático, que estima as respostas na superfície conforme vão sendo variadas as proporções dos componentes da mistura para área experimental.

$$\hat{y} = 1,65x_1 + 1,59x_2 + 1,41x_3 + 1,02x_1x_2 + 1,28x_1x_3 + 0,82x_2x_3 \quad (5.4)$$

Intervalos de confiança

$n = 18$ ensaios $t_{12} = 2,179$

$p = 6$ parâmetros

erro padrão dos parâmetros b_j 's = 0,033

erro padrão dos parâmetros b_{ij} 's = 0,013

Tabela 5.9 – Parâmetros usados no modelo quadrático

Pontos	Intervalos de confiança		
b_1	1,65	1,59	1,72
b_2	1,59	1,53	1,66
b_3	1,41	1,34	1,47
b_{12}	1,02	0,76	1,28
b_{13}	1,28	1,01	1,54
b_{23}	0,82	0,57	1,08

A Tabela 5.9 mostra que os parâmetros do modelo quadrático não só pertencem aos intervalos de confiança mas são significativos, pois não há evidência estatística de que algum parâmetro seja zero.

A Figura 5.7 representa o diagrama de Pareto, comprovando a significância dos parâmetros do modelo.

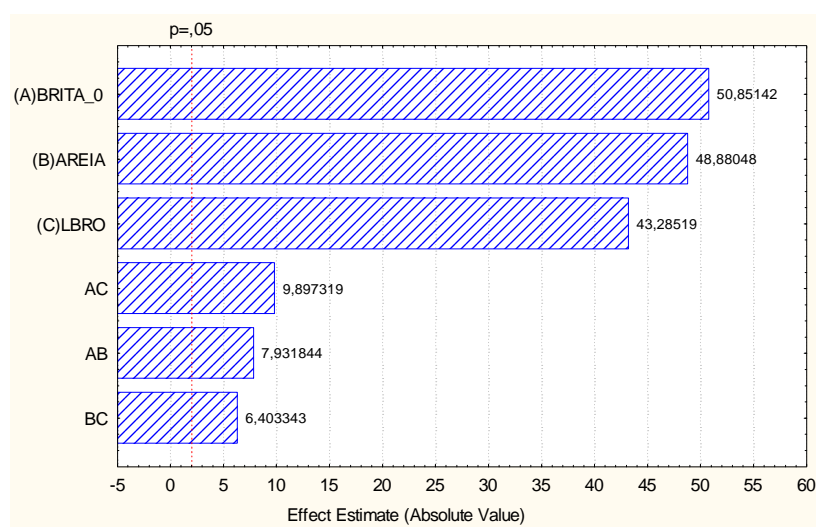


Figura 5.7 – Diagrama de Pareto para o modelo quadrático

Análise do modelo

Após a obtenção da Equação 5.4 do modelo quadrático, calculada com seis pontos, foi feita a comprovação do modelo em mais quatro pontos (misturas) distribuídos pela região experimental, já ensaiados anteriormente no planejamento

experimental. A Tabela 5.10 mostra o resultado de dez respostas obtidas pelo modelo quadrático (\hat{y}) e os valores médios das outras observações (y).

Tabela 5.10 – Valores previstos pelo modelo quadrático e médios observados de IVM

Misturas	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	x_{1123}	x_{1223}	x_{1233}
\hat{y}	1,65	1,59	1,41	1,88	1,85	1,71	1,90	1,81	1,81	1,74
y	1,90	1,76	1,62	1,89	1,82	1,71	1,96	1,97	1,77	1,63

Considerando a diferença entre os resultados obtidos pelo modelo quadrático (\hat{y}) e os resultados obtidos experimentalmente (y), foi feita uma análise da regressão de variância (ANOVA), considerando dez pontos experimentais, com três repetições cada um, no interior da superfície de resposta em questão. A Tabela 5.11 lista os resultados obtidos.

Tabela 5.11 - ANOVA do Modelo Linear.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	0,80	5	0,16
Resíduos Experimentais	0,008	42	0,0002
Total	0,96	47	0,020

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 81,36\%$

O modelo quadrático apresentou como índice de ajuste do modelo (R^2) um valor de 81,36 % que, ao contrario do modelo linear, representa um bom ajuste. A Figura 5.8 mostra a superfície de resposta gerada.

Critério de Fisher

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

Adotando-se 95 % de probabilidade pelo critério de Fisher, tem-se para $F_{5,42} = 2,46$.

$$\frac{MQ_R}{MQr} > 5 \cdot F_{5,42}$$

$$\frac{MQ_R}{MQr} = 42,97 > 12,30$$

Uma comparação entre esses dois valores pelo teste F , indica uma regressão significativa, pois quanto maior a razão $\frac{MQ_R}{MQr}$, maior a evidência estatística da regressão com os resultados obtidos.

A superfície gerada pelo modelo esta apresentada na Figura 5.8. Pode-se notar a grande diferença existente entre os modelos linear e quadrático.

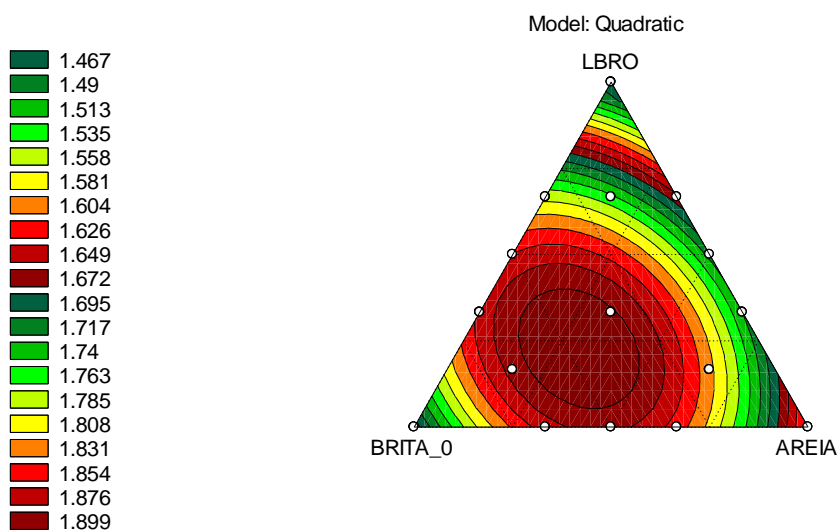
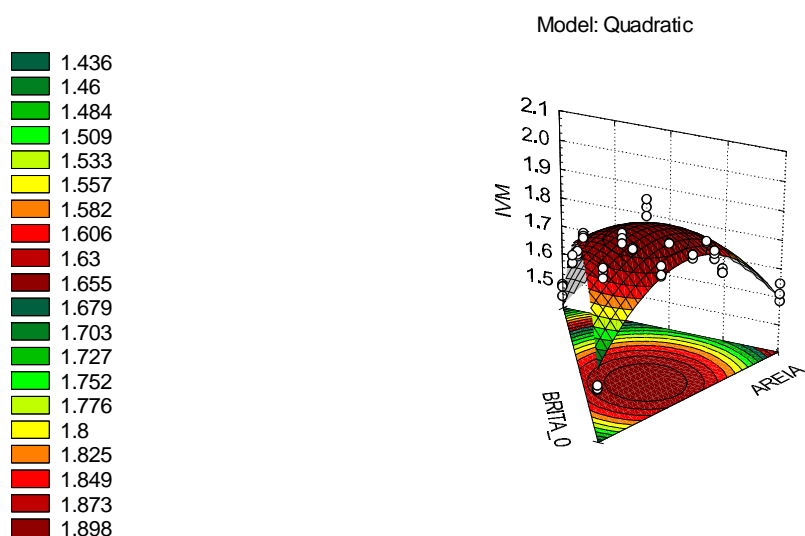


Figura 5.8 - Superfície de resposta gerada pelo modelo quadrático

5.4.3 – Modelo Cúbico Especial

Este modelo considera os pontos usados nas modelagens feitas até agora e mais um ponto no centróide da região triangular experimental, fazendo um total de 7 pontos. Os sete componentes do modelo estão representados na Tabela 5.12.

A Equação 5.5 representa todos os pontos da região experimental estimados pelo modelo cúbico especial.

$$\hat{y} = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (5.5)$$

Tabela 5.12 – Pontos usados no modelo quadrático

Pontos	Componentes		
	x_1	x_2	x_3

b_1	1	0	0
b_2	0	1	0
b_3	0	0	1
b_{12}	0,5	0,5	0
b_{13}	0,5	0	0,5
b_{23}	0	0,5	0,5
b_{123}	0.33	0.33	0.33

Após os cálculos dos coeficientes, obteve-se a Equação 5.6 do modelo cúbico especial.

$$\hat{y} = 1,65 x_1 + 1,59 x_2 + 1,41 x_3 + 1,00 x_1 x_2 + 1,26 x_1 x_3 + 0,81 x_2 x_3 + 0,37 x_1 x_2 x_3 \quad (5.6)$$

Intervalos de confiança

$n = 21$ ensaios $t_{14} = 2,145$

$p = 7$ parâmetros

erro padrão dos parâmetros b_j 's = 0,0331

erro padrão dos parâmetros b_{ij} 's = 0,0139

Tabela 5.13 – Intervalos de confiança dos coeficientes do modelo quadrático

Pontos	Intervalos de confiança		
	b_1	1,65	1,59
b_2	1,59	1,53	1,66
b_3	1,41	1,34	1,48
b_{12}	1,00	0,72	1,28
b_{13}	1,26	0,98	1,54
b_{23}	0,81	0,52	1,09
b_{123}	0,37	-1,53	2,26

A Tabela 5.13 mostra que o parâmetro b_{123} , que representa a interação dos três componentes, não é consistente. Sendo assim o modelo cúbico especial (7

pontos) não se aplica neste caso. Conforme a análise da significância dos parâmetros, verificou-se que o termo b_{123} não é significativo ao nível de 95% de probabilidade e, com isso, deve ser retirado do modelo em análise. Isto pode ser comprovado no diagrama de Pareto - Figura 5.9. Sendo assim, o modelo cúbico especial não foi usado.

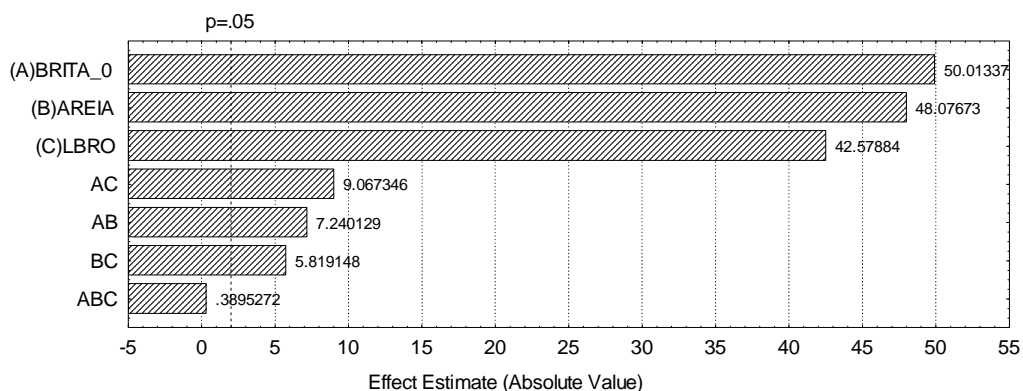


Figura 5.9 – Diagrama de Pareto para o modelo cúbico especial

5.4.4 – Modelo Cúbico Completo

Neste modelo utiliza-se, além dos três pontos já usados, outros três pontos na superfície de resposta, sendo necessárias dez misturas para a elaboração do mesmo. A Tabela 5.14 traz os pontos do modelo e a Equação 5.7 representa a região experimental.

Tabela 5.14 - Pontos experimentais do Modelo Cúbico Completo

Pontos	Componentes Originais		
	x_1	x_2	x_3
b_1	1	0	0
b_2	0	1	0
b_3	0	0	1
b_{123}	1/3	1/3	1/3
b_{112}	2/3	1/3	0

b_{122}	1/3	2/3	0
b_{223}	0	2/3	1/3
b_{233}	0	1/3	2/3
b_{113}	2/3	0	1/3
b_{133}	1/3	0	2/3

$$\hat{y} = b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 + d_{112} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + d_{113} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + d_{223} x_2 x_3 (x_2 - x_3) \quad (5.7)$$

A Equação 5.8 do modelo cúbico completo, representa a superfície de resposta obtida.

$$\hat{y} = 1,58x_1 + 1,61x_2 + 1,47 x_3 + 1,09 x_1 x_2 + 1,28 x_1 x_3 + 0,70 x_2 x_3 + 0,36 x_1 x_2 x_3 + 0,74 x_1 x_2 (x_1 - x_2) + 1,44 x_1 x_3 (x_1 - x_3) + 0,28 x_2 x_3 (x_2 - x_3) \quad (5.8)$$

Intervalos de confiança

n= 30 ensaios

$t_{20} = 2,086$

p= 10 parâmetros

erro padrão dos parâmetros b_i 's = 0,016

erro padrão dos parâmetros b_{ij} 's = 0,065

erro padrão dos parâmetros b_{ijk} = 0,436

erro padrão dos parâmetros d_{ijk} = 0,142

Tabela 5.15 – Intervalos de confiança dos coeficientes do modelo cúbico completo

Pontos	Intervalos de confiança		
	b_1	1,58	1,55
b_2	1,61	1,57	1,64
b_3	1,47	1,44	1,50
b_{12}	1,09	0,95	1,22
b_{13}	1,28	1,15	1,41
b_{23}	0,70	0,57	0,83
b_{123}	0,36	-0,51	0,83
d_{112}	0,74	0,45	1,03

d_{113}	1,44	1,15	1,73
d_{223}	0,28	-0,003	0,57

A Tabela 5.15 mostra que os parâmetros b_{123} e d_{223} do modelo cúbico completo não pertencem aos intervalos de confiança, não sendo considerados significativos, havendo inclusive evidência estatística de que algum parâmetro seja zero.

A Figura 5.10 representa o diagrama de Pareto comprovando a não significância dos coeficientes b_{123} e d_{223} .

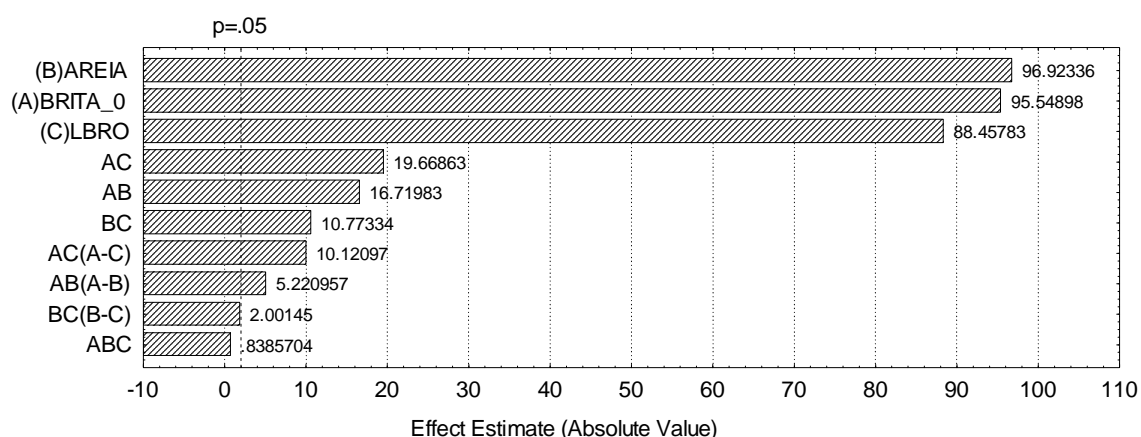


Figura 5.10 – Diagrama de Pareto para o modelo cúbico completo

Sendo assim, os coeficientes b_{123} e d_{223} foram removidos do modelo cúbico completo, que agora é representado pela Equação 5.9. Após a retirada dos referidos coeficientes do modelo, pode-se verificar a significância dos termos da Equação 5.9 na Figura 5.11, que representa o modelo cúbico completo modificado.

$$\hat{y} = 1,58x_1 + 1,61x_2 + 1,46x_3 + 1,09x_1x_2 + 1,31x_1x_3 + 0,72x_2x_3 + 0,71x_1x_2(x_1 - x_2) + 1,47x_1x_3(x_1 - x_3) \quad (5.9)$$

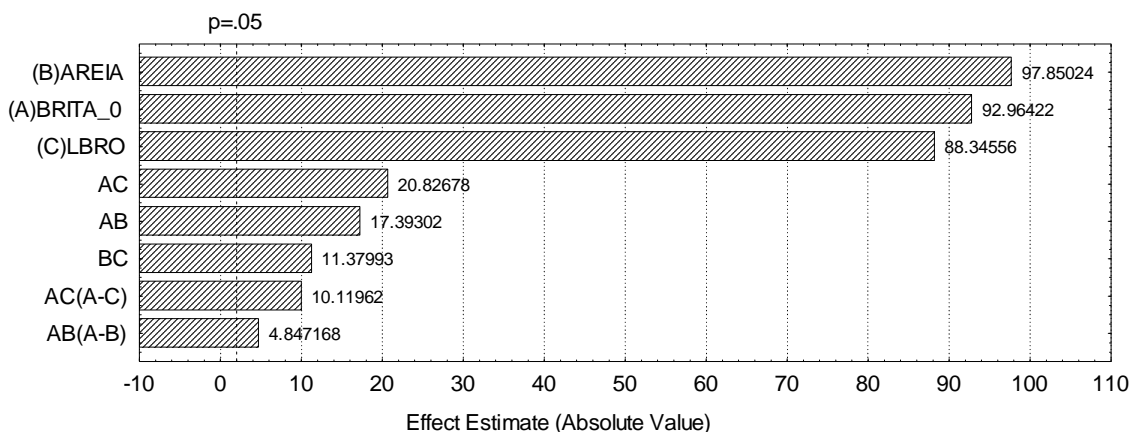


Figura 5.11– Diagrama de Pareto para o modelo cúbico completo modificado

Análise do modelo

De posse da Equação 5.9, comprovou-se o ajuste do modelo com mais pontos de teste no planejamento experimental. A Tabela 5.16 mostra o contraste entre as respostas obtidas pelo modelo (\hat{y}) e os valores médios das observações (y).

Tabela 5.16 – Valores previstos pelo modelo cúbico completo e médios observados de IVM

Misturas	x_1	x_2	x_3	x_{112}	x_{122}	x_{113}	x_{133}	x_{223}	x_{233}	x_{123}	x_{1123}	x_{1223}	x_{1233}
\hat{y}	1,58	1,61	1,46	1,89	1,79	1,94	1,68	1,72	1,67	1,90	1,98	1,78	1,68
y	1,59	1,61	1,47	1,88	1,79	1,95	1,72	1,74	1,67	1,95	1,97	1,77	1,63

Verifica-se, segundo dados apresentados na Tabela 5.16, que o modelo se ajusta melhor aos resultados obtidos experimentalmente, com isso, seguiu-se nova análise da regressão de variância (ANOVA), Tabela 5.17.

Tabela 5.17 - ANOVA do modelo cúbico completo

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	0,92	7	0,13
Resíduos	0,035	40	0,0009

Experimentais			
Total	0,96	47	0,020

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 95,62\%$

O modelo cúbico completo apresentou um excelente índice de ajuste para o modelo (R^2), com valor de 95,62 %. Isto justifica o pequeno contraste entre as respostas obtidas pelo modelo (\hat{y}) e os valores médios das observações (y). A Figura 5.12 mostra a superfície de resposta gerada.

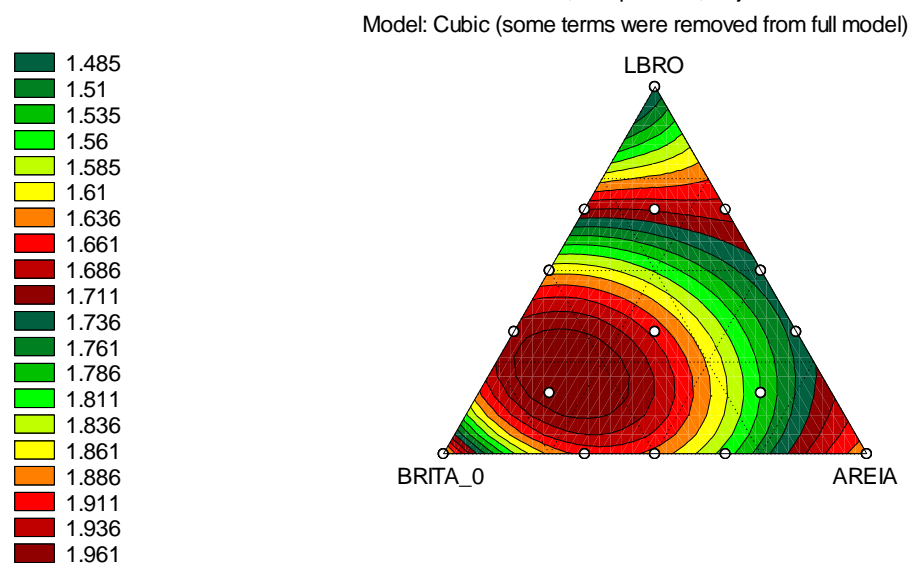
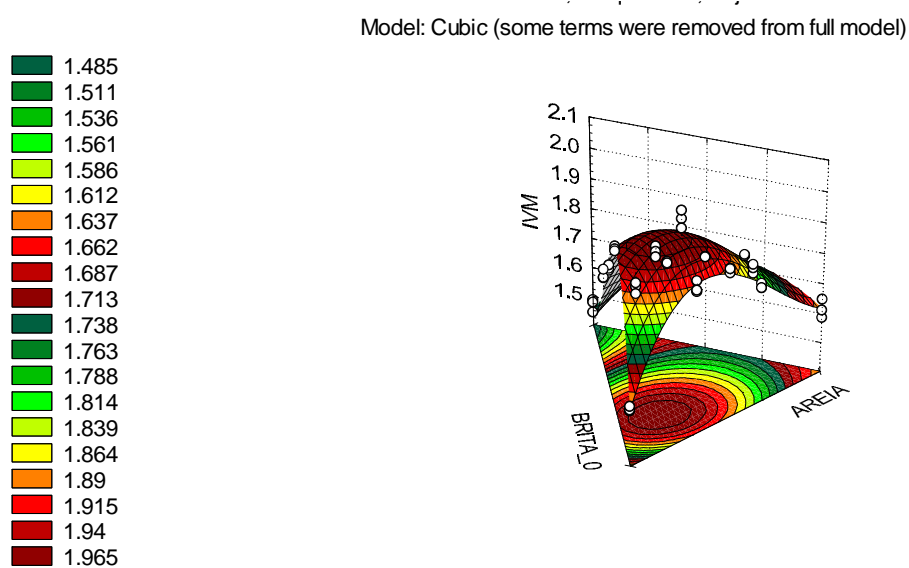


Figura 5.12 - Superfície de resposta gerada pelo modelo cúbico completo

Nota-se que a superfície de resposta gerada pelo modelo em questão apresenta uma sensível diferença, quando comparada com o modelo quadrático, de forma que a região que apresenta maior fator de empacotamento encontra-se levemente deslocada para esquerda.

Critério de Fisher

O modelo numérico demonstrado pela equação de regressão 5.9, do modelo cúbico completo, foi o que obteve maior ajuste. Foi com isso, aplicado o Critério de Fisher (teste F).

Com 95 % de probabilidade pelo critério de Fisher, tem-se para $F_{7,40} = 2,25$.

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} > 5.F_{7,40}$$

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} = 144,45 > 11,25$$

Segundo o teste F , o modelo cúbico completo possui uma regressão altamente significativa, maior que todos os outros modelos expostos anteriormente. Sendo assim, a Equação 5.9 representa o modelo numérico experimental utilizado para a obtenção do Índice de Vazios Mínimo para os agregados em questão.

A Figura 5.12 mostra a superfície gerada pelo modelo.

5.5 – Planejamento Fatorial

A Tabela 5.18 traz os quatro pontos tomados na superfície de resposta mais compacta, gerada pelo modelo cúbico completo (Equação 5.9), que também é demonstrada na Figura 5.13. Os valores da Tabela 5.18 esboçam a proporção dos agregados na mistura, que terá em seguida as adições dos teores de cimento e água.

Os pontos foram denominados de T17, T18 e T19, e foram escolhidos aleatoriamente. Contudo buscou-se abranger uma área experimental mais representativa na superfície mais compacta.

Tabela 5.18 - Pontos tomados na superfície de resposta

Traço	Matriz de Misturas			Resposta
	Brita (0)	Areia	Resíduo	e_{\min} (g/cm ³)
17	0,62	0,13	0,25	1,986
18	0,50	0,25	0,25	1,977
19	0,54	0,29	0,17	1,979

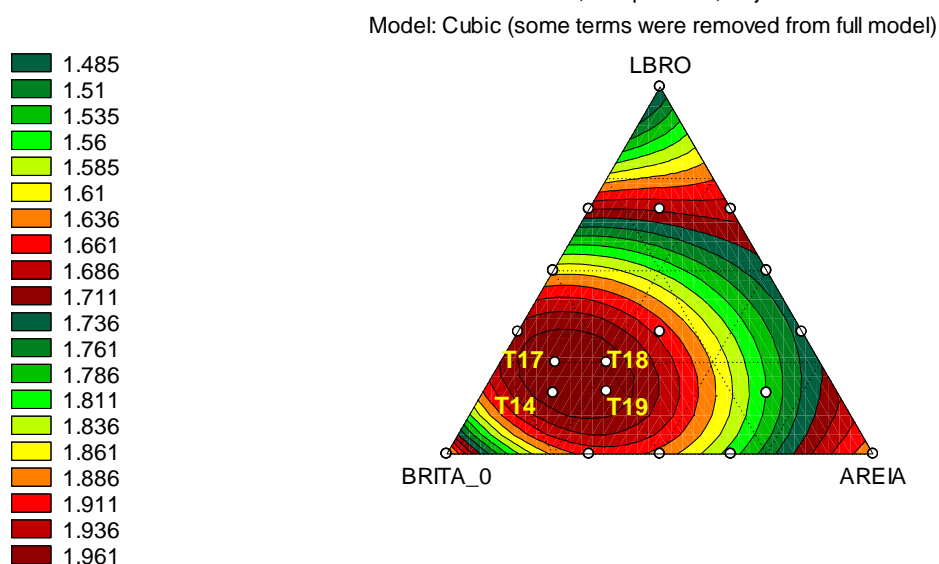


Figura 5.13 – Pontos escolhidos no interior da superfície de resposta gerada pelo modelo cúbico completo

Depois de obtidos os pontos, seguiu-se a determinação dos traços, com indicação do consumo de cimento, em % da massa total da mistura, e teores de a/c .

5.5.1 – Determinação dos fatores do planejamento fatorial

Conforme a proposta do planejamento fatorial foi necessário inicialmente, determinar os fatores envolvidos na análise, ou seja, os traços e as relações água/cimento (a/c) para um determinado consumo de cimento.

Foi então convencionado um teor inicial de 10% em massa de cimento em relação à massa total da mistura.

Para a/c foram adotados os limites entre a falta de coesão e fluidez excessiva, ou seja, os limites necessários para o desmolde e manuseio dos pavimentos no período pré-cura. Desta maneira que para relações a/c e água/agregados muito baixas os pavimentos se fragmentavam após a saída da máquina de vibro/pressão devido à falta de coesão e, para a/c e água/agregados altas, ocorria exudação e abatimento elevado, que por sua vez acarreta perda de pasta, contato entre as peças e deslocamento após a secagem.

Além dos critérios de consistência para desforma, os primeiros pavimentos foram confeccionados observando os limites de a/c e o aumento gradativo dos teores de cimento, no intuito de se obter os valores de resistência à compressão, que se enquadram norma brasileira NBR 9781/1987, que é de no mínimo 35 MPa.

- **1º teste: Cimento 10% e a/c=0,5:**

Na primeira etapa de ensaios, sobre os pontos indicados na Figura 5.13, tomou-se um teor de cimento de 10%. A Tabela 5.19 evidencia os traços em massa desta bateria de ensaios.

Os procedimentos de ensaio e moldagem e cura dos corpos-de-prova seguiram às prescrições das NBR^{TS} 9780 e 9781, que tiveram espessura de 8 cm. Tem-se na Tabela 5.19 os quantitativos destes ensaios.

Tabela 5.19 - Traços em massa para 10% de cimento

Teor de cimento: 10 (%)				
Traços	Componentes			
	Brita 0	Areia	LBRO	Cimento
T14	0,60	0,15	0,15	0,10
T17	0,56	0,12	0,23	0,10
T18	0,45	0,23	0,23	0,10
T19	0,49	0,26	0,15	0,10

Vale ressaltar que as proporções expostas na Tabela 5.18 referem-se somente aos agregados da mistura, ou seja, brita, areia e LBRO. Com a adição do cimento, os valores expostos na Tabela 5.19 foram automaticamente reajustados,

de forma que as proporções dos agregados passam a obedecer agora ao indicado na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 - Traços em massa (g) para teor de cimento de 10% e $a/c=0,5$

Teor de cimento: 10 (%) – $a/c = 0,5$									
Traços	Brita 0	Areia	LBRO	Cimento	Surp.	Umidade LBRO	Umidade Areia	Correção Água	Água
T14	36000	9000	9000	6000	36,60	0,0506	0,0951	- 1311	1652
T17	33480	7020	13500	6000				- 1350	1613
T18	27000	13500	13500	6000				- 1967	996
T19	29160	15660	9180	6000				- 1954	1010
Relação água/agregados = 0,055									

Conforme exposto no Capítulo 4, o teor de superplastificante foi tomado em função da massa de aglomerante (cimento CP V-Holcim), ou seja 0,61%. Neste caso, para um consumo de 6.000 g de cimento, teve-se uma massa de 36,60 g.

Foi considerada ainda a umidade inicial dos agregados, determinada por secagem em estufa por 24 h. Conforme verificado na Tabela 5.13, a água já presente nos agregados foi descontada da massa total de água a ser adicionada para obtenção da relação $a/c=0,5$.

Não foi considerada a umidade do agregado graúdo brita 0, pois se obteve para este agregado valores de umidade tendendo a zero. Durante o intervalo de medição da umidade, período compreendido de 24h, os agregados foram acondicionados em lona plástica em local seco, arejado e sem contato com o piso, para impedir a perda ou ganho de umidade.

A proposta inicial foi desconsiderada, pois os pavimentos obtidos para o teor de cimento de 10% e $a/c=0,5$ não alcançaram a consistência necessária para desforma. Estes por sua vez, se fragmentaram logo após a retirada da prensa devido à umidade reduzida que proporcionou falta de coesão entre os agregados, logo, por óbvio, teores de umidade inferiores a relação $a/c = 0,5$ também seriam desconsiderados. A Figura 5.14 traz o aspecto geral de um dos pavimentos fragmentados.



Figura 5.14 – Aspecto geral dos pavimentos com 10% de cimento e 0,5 de a/c demonstrando falta de coesão.

- **2º teste: Cimento 10% e a/c=0,7:**

Com isso, foram tomados os mesmos traços, desta vez com aumento da relação a/c para 0,7, conforme exposto na Tabela 5.21.

Tabela 5.21- Traços em massa (g) para teor de cimento de 10% e a/c=0,7

Teor de cimento: 10 (%) – a/c = 0,7									
Traços	Brita 0	Areia	LBRO	Cimento	Surp.	Umidade LBRO	Umidade Areia	Correção Água	Água
T14	36000	9000	9000	6000	36,60	0,0506	0,0951	- 1311	2852
T17	33480	7020	13500	6000				- 1351	2813
T18	27000	13500	13500	6000				- 1967	2196
T19	29160	15660	9180	6000				- 1954	2210
Relação água/agregados = 0,077									

Os traços constantes na Tabela 5.21 não se fragmentaram durante a desforma, e tendo-se as seguintes resistências à compressão - Tabela 5.22.

Tabela 5.22 - Resistência a compressão para cimento = 10% e a/c=0,7

Traços	Resistência média (Mpa)
T14	26.25
T17	27.61

T18	28.73
T19	25.03

Os resultados expostos na Tabela 5.22 indicam que os traços não alcançaram a resistência mínima requerida pela norma brasileira, que é de 35 MPa.

Apesar de se ter conseguido a desforma, os traços T14 e T19 aparentaram textura extremamente rugosa e baixa consistência respectivamente. Com isso, estes dois pavimentos não podem ser fabricados em escala industrial, pois não suportam os impactos inerentes ao manuseio pré-cura.

A Figura 5.15 mostra o aspecto dos pavimentos com os referidos traços. O T14 aparentou aspecto extremamente rugoso e T19 com fluidez excessiva. Este último sofreu inclusive contato entre os pavimentos durante a desforma, causando deslocamento.

Em seguida foi promovido um novo aumento da relação a/c, desta vez para 0,8. A elevação da a/c para 0,8 causou nos pavimentos fluidez excessiva, impossibilitando a desforma, que neste caso também leva a desconsideração dos traços. Tal fato é explicado devido aos pontos T14 e T19 situarem-se nos extremos inferiores da superfície de resposta, ou seja, com a máxima proporção de agregado graúdo e LBRO respectivamente.





Figura 5.15 – T14 extremamente rugoso e T19 com fluidez excessiva.

Pode-se concluir então que, para os pontos ensaiados da superfície de resposta da Figura 5.13, com consumo de cimento de 10% em massa, os pavimentos não obtiveram o índice mínimo resistência dos pavimentos (35 MPa). Sendo assim, realizaram-se novos pavimentos, com um procedimento análogo ao demonstrado anteriormente, porém desta vez com teor de cimento de 15%.

- **3º teste: Cimento 15% e $a/c=0,4$:**

A Tabela 5.23 traz os traços com 15% de cimento.

Tabela 5.23 - Traços em massa para 15% de cimento

Teor de cimento: 15 (%)				
Traços	Componentes			
	Brita 0	Areia	LBRO	Cimento
T14	0,57	0,14	0,14	0,15
T17	0,53	0,11	0,21	0,15
T18	0,43	0,21	0,21	0,15
T19	0,46	0,25	0,14	0,15

A priori foi feito um ensaio do teor de cimento de 15% e relação a/c de 0,3, todavia, assim como para o teor de cimento de 10% e a/c=0,5, os pavimentos não alcançaram a consistência necessária para desforma.

Assim, foi aumentada a relação a/c para 0,4. A Tabela 5.24 traz os traços com 15% de cimento e a/c = 0,4.

Tabela 5.24 - Traços em massa (g) para teor de cimento de 15% e a/c=0,4

Teor de cimento: 15 (%) – a/c = 0,4									
Traços	Brita 0	Areia	LBRO	Cimento	Surp.	Umidade LBRO	Umidade Areia	Correção Água	Água
T14	34000	8500	8500	9000				- 1578	1967
T17	31620	6630	12750	9000	54,90	0,0455	0,1402	- 2089	1456
T18	25500	12750	12750	9000				- 2367	1177
T19	27540	14790	8670	9000				- 1888	1657
Relação água/agregados = 0,069									

Nota-se na Tabela 5.24 que, com o aumento do teor de cimento, aumenta-se também o quantitativo de superplastificante, porém obedecendo-se a proporção de 0,61% em relação à massa de cimento.

Vale ressaltar que a diferenciação existente entre as umidades das tabelas 5.21 e 5.24 é devido à execução dos ensaios terem sido feitos em datas diferentes, que promoveu variações na umidade, porém com mesmo lote de matéria prima.

A Tabela 5.25 mostra os valores obtidos de resistências à compressão para 15% de cimento e relação a/c=0,4.

Tabela 5.25 – Resistência à compressão para cimento = 15% e a/c=0,4

Traços	Resistência média (Mpa)
T14	27,44
T17	28,32
T18	28,99
T19	26,59

Os resultados expostos na Tabela 5.24 mostram que os traços para 15% de cimento e a/c=0,4 não alcançaram a resistência mínima preconizada na norma brasileira (35 MPa). Além disso, assim como os traços com 10% de cimento, o T14 e T19 ficam em desuso devido à alta porosidade e grande fluidez respectivamente.

Sendo assim, em busca da obtenção da resistência à compressão de 35MPa, aumentou-se a relação a/c para 0,5.

- **4º teste: Cimento 15% e a/c=0,5:**

Com o aumento da relação a/c para 0,5, os traços são representados na Tabela 5.26.

Tabela 5.26 - Traços em massa (g) para teor de cimento de 15% e a/c=0,5

Teor de cimento: 15 (%) – a/c = 0,5									
Traços	Brita 0	Areia	LBRO	Cimento	Surp	Umidade LBRO	Umidade Areia	Correção Água	Água
T14	34000	8500	8500	9000				- 1238	3207
T17	31620	6630	12750	9000	54,9	0,05	0,10	- 1276	3169
T18	25500	12750	12750	9000				- 1858	2587
T19	27540	14790	8670	9000				- 1845	2600
Relação água/agregados = 0,087									

Comparando os traços constantes nas tabelas 5.23 e 5.25, verifica-se que foi mudada apenas a quantidade de água nas misturas, evidentemente devido ao aumento da relação a/c e, conseqüentemente, a relação água/agregados para 0,087.

A resistência à compressão dos traços expostos na Tabela 5.26 são mostrados na Tabela 5.27.

Tabela 5.27 – Resistência à compressão para cimento = 15% e a/c=0,5

Traços	Resistência média (Mpa)
T14	31,70
T17	30,96
T18	31,37
T19	30,58

Os resultados contidos na Tabela 5.27 mostram que os traços para cimento = 15% e $a/c=0,4$ não alcançaram a resistência mínima preconizada na norma brasileira (35 MPa) e, novamente, os traços T14 e T19 não aparentaram textura satisfatória.

- **5º teste: Cimento 15% e $a/c=0,7$:**

Seguindo o mesmo procedimento adotado, aumentou-se o fator a/c para 0,7, que foi representado na Tabela 5.28. Os valores de resistência são demonstrados na Tabela 5.29.

Tabela 5.28 - Traços em massa (g) para teor de cimento de 15% e $a/c=0,7$

Teor de cimento: 15 (%) – $a/c = 0,7$									
Traços	Brita 0	Areia	LBRO	Cimento	Surp	Umidade LBRO	Umidade Areia	Correção Água	Água
T14	34000	8500	8500	9000	54,9	0.0506	0,095	-1238	5007
T17	31620	6630	12750	9000				-1740	4505
T18	25500	12750	12750	9000				-2056	4189
T19	27540	14790	8670	9000				- 1715	4530
Relação água/agregados = 0,122									

Tabela 5.29 – Resistência à compressão para cimento = 15% e $a/c=0,7$

Traços	Resistência média (Mpa)
T14	17.67
T17	25.68
T18	23.47
T19	20.38

Pode-se observar que não se obteve o mínimo de 35 MPa. Foi observado com o aumento do fator a/c de 0,5 para 0,7, com relação água/agregados para 0,122, uma queda acentuada nos valores de resistência à compressão, fato que acarretou o aumento no teor de cimento para 20%.

- **6º teste: Cimento 20% e a/c=0,4:**

O 6º teste é demonstrado na Tabela 5.30.

Tabela 5.30 - Traços em massa para 10% de cimento

Teor de cimento: 20 (%)				
Traços	Componentes			
	Brita 0	Areia	LBRO	Cimento
T14	0,60	0,15	0,15	0,10
T17	0,56	0,12	0,23	0,10
T18	0,45	0,23	0,23	0,10
T19	0,49	0,26	0,15	0,10

Primeiramente tentou-se moldagem de pavimentos com 20% de cimento e a/c=0,3. Todavia os pavimentos não alcançaram um ponto de desforma, se desintegrando após a vibração e por este motivo desconsiderados. Então foram elaborados pavimentos com traços com a/c=0,4, que são expostos na Tabela 5.31.

Tabela 5.31 - Traços em massa (g) para teor de cimento de 20% e a/c=0,4

Teor de cimento: 20 (%) – a/c = 0,4									
Traços	Brita 0	Areia	LBRO	Cimento	Surp	Umidade LBRO	Umidade Areia	Correção Água	Água
T17	9920	2080	4000	4000	24,4	0,0127	0,022	553	1023
T18	8000	4000	4000	4000				595	981
Relação água/agregados = 0,098									

Da mesma maneira que o ocorrido nas composições dos pavimentos relatados até o momento, os traços T14 e T19 não obtiveram consistência adequada, inclusive para o teor de 20% de cimento e a/c=0,4, que demonstrou fluidez exagerada, fato que levou o descarte dos pontos T14 e T19.

Tem-se a seguir a Tabela 5.32, com os valores de resistência.

Tabela 5.32 – Resistência à compressão para cimento = 20% e a/c=0,4

Traços	Resistência média (Mpa)
T17	20,92
T18	16,32

Analisando a tabela acima, verifica-se não o índice de mínimo de 35 MPa ainda não foi alcançado. Adotou-se então o fator a/c de 0,6.

- **7º teste: Cimento 20% e a/c=0,6:**

As Tabelas 5.33 e 5.34 trazem os traços e os valores de resistência para a composição em tela.

Tabela 5.33 - Traços em massa (g) para teor de cimento de 20% e a/c=0,6

Teor de cimento: 20 (%) – a/c = 0,6									
Traços	Brita 0	Areia	LBRO	Cimento	Surp	Umidade LBRO	Umidade Areia	Correção Água	Água
T17	9920	2080	4000	4000	24,4	0,0127	0,022	553	1823
T18	8000	4000	4000	4000				595	1781
Relação água/agregados = 0,148									

Tabela 5.34 – Resistência à compressão para cimento = 20% e a/c=0,6

Traços	Resistência média (Mpa)
T17	30,44
T18	33,90

Os valores obtidos para teor de cimento = 20% e fator a/c=0,6, ainda não alcançaram o valor mínimo de 35 MPa, entretanto foram os que mais se aproximaram do requisitado pela NBR. Considerando que os traços elaborados com a/c de 0,7 não obtiveram consistência, com fluidez elevada, coube considerar que um fator intermediária de a/c, ou seja, da ordem de 0,5.

A opção de elevação da quantidade de cimento para teores acima de 20% foi descartada, pois proporções superiores que 20% em massa são, em geral, superiores que os adotados na prática industrial, para pavimentos de 35 MPa.

Desta forma determinaram-se os fatores a serem usados no planejamento fatorial, que são: dois fatores traços – T17 e T18, e três níveis de a/c, de 0,4 e 0,6, com um ponto central T20 a/c=0,5. Com isso, elaborou-se um planejamento fatorial 2³ com ponto central, cujo ponto central consistiu em um ponto intermediário entre

T17 e T18, denominado de T20. O T20 apresentou a seguinte composição – Tabela 5.35:

Tabela 5.35 – Traços T20 em massa (g) para teor de cimento de 20% e $a/c=0,5$

Teor de cimento: 20 (%) – $a/c = 0,5$									
Traços	Brita 0	Areia	LBRO	Cimento	Surp	Umidade LBRO	Umidade Areia	Correção Água	Água
T20	17920	6080	8000	8000	48,8	0,1268	0,0219	1147	2804
Relação água/agregados = 0,123									

5.5.2 – Determinação da matriz de experimentos e superfície de resposta do planejamento fatorial

Conforme convenção normalmente adotada em planejamento de experimentos fatoriais (BARROS NETO *et al.* 2003), adotaram-se os índices -1, 0, +1, para determinação dos níveis superior, central e inferior do planejamento. Então, a Tabela 5.36 traz convenção adotada:

Tabela 5.36 – Convenção de sinais adotada no planejamento fatorial

Traços	Sinais
T17	-1
T20	0
T18	+1
$a/c = 0,4$	-1
$a/c = 0,5$	0
$a/c = 0,6$	+1

Isto posto, tem-se na Tabela 5.37 a matriz do planejamento fatorial com os experimentos realizados de resistência à compressão, inclusive incluindo o T20, que é o ponto médio entre T17 e T18, conforme demonstrado na Figura 5.14.

Tabela 5.37 – Matriz de experimentos fatorial

Ensaio	Traço	a/c	Matriz		Resistência (MPa)
1	T17	0,4	-1	-1	21,65
2			-1	-1	20,59
3			-1	-1	20,52

4	T18	0,4	1	-1	15,17
5			1	-1	18,41
6			1	-1	15,39
7	T17	0,6	-1	1	32,60
8			-1	1	28,91
9			-1	1	29,81
10	T18	0,6	1	1	35,61
11			1	1	33,53
12			1	1	32,56
13	T20	0,5	0	0	35,37
14			0	0	37,46
15			0	0	35,59
16			0	0	36,24
17			0	0	38,74
18			0	0	36,82

O T20, por ser ponto médio entre o T17 e T18, e possuir relação $a/c=0,5$, também uma relação intermediária entre $a/c=0,4$ e $0,6$, caracteriza-se como ponto central do experimento fatorial.

Pode-se notar na análise da Tabela 5.37 que foram feitas três repetições por ensaio, sendo que no ponto central procederam-se seis repetições para estimativa dos erros experimentais.

Além disso, percebe-se na Tabela 5.37, que o ponto central T20 – $a/c=0,5$ já superou a resistência mínima requerida pela norma brasileira (35 MPa). Nota-se na Figura 5.16 a localização dos pontos na superfície de resposta obtida por meio do modelo cúbico completo.

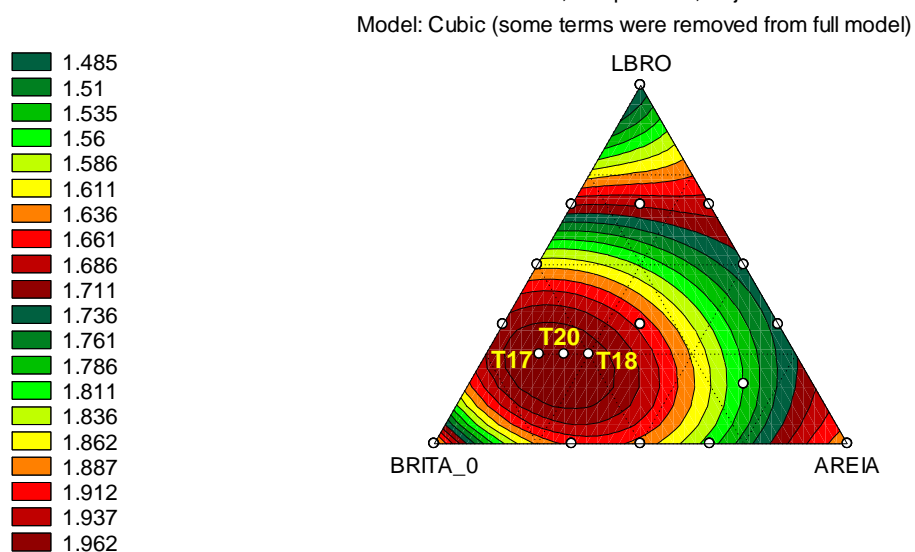


Figura 5.16 – Pontos escolhidos no interior da superfície de resposta gerada pelo modelo cúbico completo, incluindo o ponto central T20

A Figura 5.17 evidencia o aspecto do T20 com $a/c=0,5$, com bom acabamento.





Figura 5.17 – Traço T20 sem porosidade excessiva e consistência adequada

Assim como no planejamento simplex, tem-se a seguir a análise do modelo numérico fatorial. A Equação 5.10 mostra o modelo, onde foram usados os termos lineares e quadráticos dos efeitos principais e interações de segunda ordem.

$$\hat{y} = 36,70 - 11,31T^2 + 6,77AC + 2,01TAC \quad (5.10)$$

Onde,

\hat{y} - resposta resistência a compressão;

T – traços;

AC – relação a/c

Intervalos de confiança

$n = 18$ ensaios $t_{13} = 2,160$

$p = 5$ parâmetros

erro padrão do parâmetro $b = 0,595$

erro padrão dos parâmetros b_i 's = 0,728

erro padrão dos parâmetros b_j 's e b_{ij} 's = 0,420

Tabela 5.38 – Parâmetros usados no modelo fatorial

Pontos		Intervalos de confiança	
b_1	36,70	35,42	37,98
b_2	-11,31	-12,88	-9,73
b_3	6,77	5,87	7,68
b_{23}	2,01	1,10	2,92

A Tabela 5.38 mostra que os parâmetros da Equação 5.10 pertencem aos intervalos de confiança e são significativos, pois não há evidência estatística de que algum parâmetro seja zero.

A Figura 5.18 representa o diagrama de Pareto, comprovando a significância dos parâmetros do modelo.

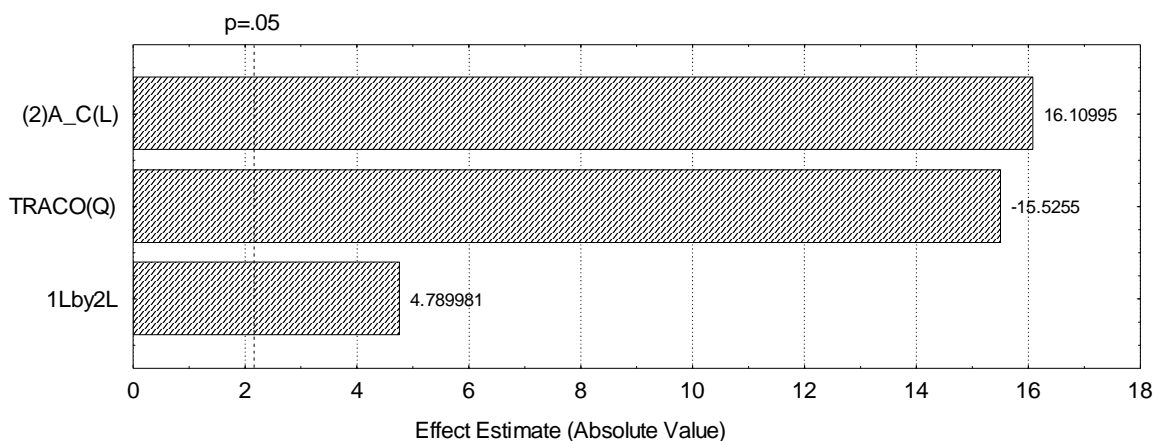


Figura 5.18 – Diagrama de Pareto para o fatorial

Análise do modelo

De posse da Equação 5.10 do planejamento fatorial, foi feita uma análise da regressão de variância (ANOVA), listada na Tabela 5.40.

Tabela 5.39 - ANOVA da regressão fatorial.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	1.110,79	3	370,26
Resíduos Experimentais	28,55	14	2,04
Total	1139,34	17	67,02

% de variação explicada: $R^2 = SQ_R/SQ_T = 97,50 \%$

O modelo de regressão fatorial para os pavimentos intertravados de concreto, expresso pela Equação 5.10, apresentou como índice de ajuste de (R^2) de no valor de 97,50 %, que representa um ótimo ajuste.

Critério de Fisher

Aplicando-se o teste F para o modelo fatorial em questão, e admitindo-se 95 % de probabilidade pelo critério de Fisher, tem-se para $F_{3,14} = 3,34$.

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} > 5.F_{5,42}$$

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} = 180 > 16,70$$

Comparando-se os valores pelo teste F com a razão das médias quadráticas $\frac{MQ_R}{MQ_r}$, verifica-se que ha evidência estatística que a regressão é significativa perante aos resultados obtidos.

A superfície gerada pelo modelo fatorial é representada pela Figura 5.19 abaixo.

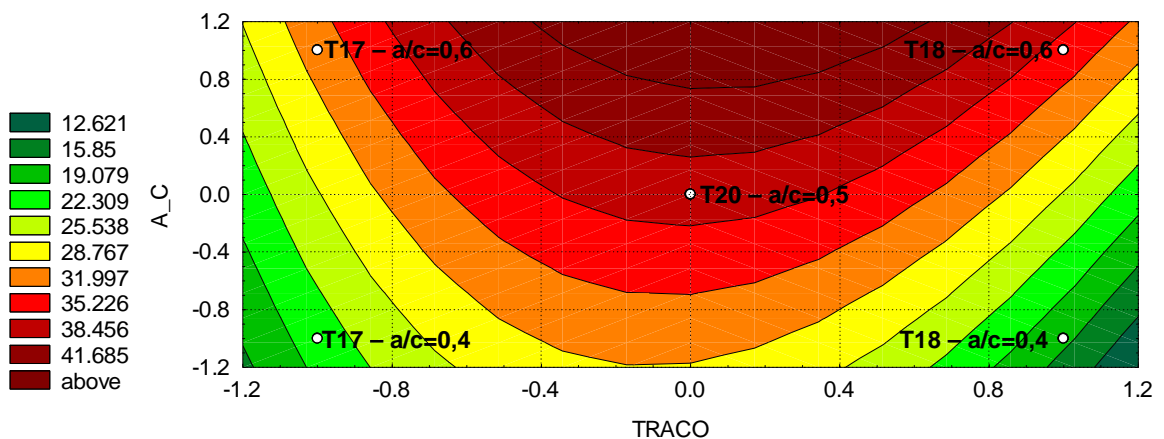


Figura 5.19 – Superfície de resposta do planejamento fatorial

A superfície de reposta acima é formada pelo plano cartesiano TRAÇO x A/C. Na escala lateral dos eixos é representado os níveis dos experimentos, conforme exposto na matriz de experimentos - Tabela 5.37.

A superfície em tela representa as respostas (resistência a compressão) de todas as composições de agregados e a/c, existentes entre T17 e T18 e a/c=0,4 e 0,6 respectivamente.

Com a ferramenta advinda da Equação da 5.10, procedeu-se um teste para verificar, além das respostas, o comportamento dos pavimentos quanto à consistência e padrões de desforma, já relatados nesta tese.

Foram então escolhidos dois pontos, sendo um acima e abaixo do T20, de forma que possuíssem resistência mínima se 35 MPa. Escolheu-se o T20 como

base de comparação, pois este alcançou a resistência normalizada, teve bom aspecto após desforma e não faz parte dos extremos da superfície. Abaixo, na Figura 5.20, tem-se os pontos extras de teste, denominados T21 e T22.

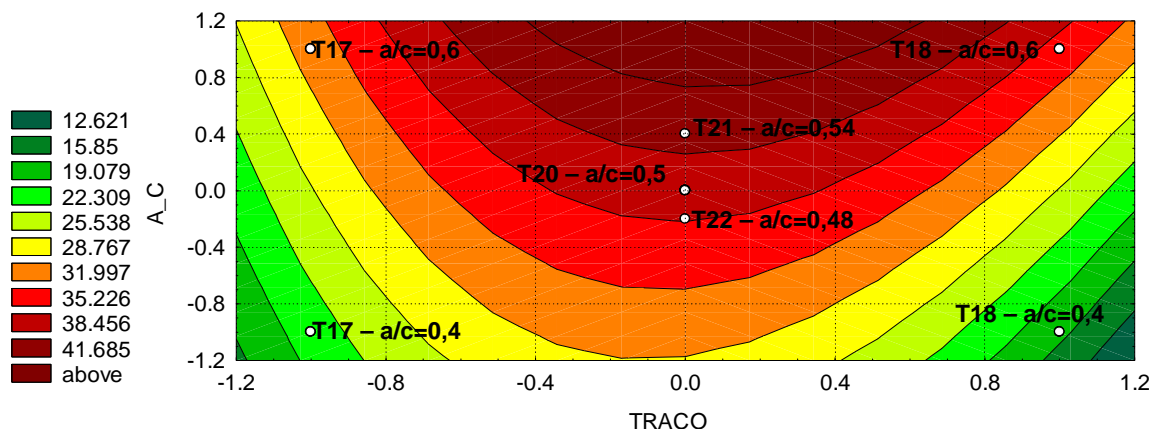


Figura 5.20 – Pontos de teste da superfície de resposta do planejamento fatorial

A Tabela 5.40 representa as composições dos traços T21 e T22 e a resistência obtida experimentalmente (y) e a estimada pelo modelo (\hat{y}) em MPa. Nota-se também, o erro entre as observações (e).

Tabela 5.40 – Pontos de teste

Traço	a/c	\hat{y}	y	e	Relação água/agregados
T21	0,54	39,41	38,61	0,80	0,133
T22	0,48	35,34	35,88	0,54	0,118

Verifica-se na Tabela 5.40, que o erro experimental encontrado (e), como sendo a diferença existente entre os valores previstos pelo modelo e os obtidos experimentalmente, é baixo quando comparado com a ordem de grandeza dos valores, evidenciando o ajuste do planejamento fatorial.

Tanto o T21 quanto o T22 atenderam a resistência a compressão preconizada na NBR 9781. O T22 atendeu aos critérios de desforma, conforme pode-se verificar na Figura 5.21, entretanto demonstrou resistência mecânica um pouco inferior que o T20.



Figura 5.21 – Traço T22 com consistência adequada e sem porosidade excessiva

Percebe-se que, apesar do T21 ter respondido mecanicamente conforme previsto pela regressão fatorial, este não apresentou boa consistência, apresentando um pequeno abatimento após a desforma.

A Figura 5.22 traz o pavimento obtido no T21.



Figura 5.22 – Traço T21 com consistência inadequada e perda de pasta

Analisando a Figura 5.22, nota-se o abatimento e a fuga de pasta, devido ao excesso de água livre na mistura.

Pode-se concluir que, apesar de não ser a maior resistência a compressão obtida, o T20 com $a/c=0,5$ apresentou-se como o melhor traço, pois além de atender o critério mecânico da norma nacional, apresentou bom acabamento e consistência adequada para desforma, que são requisitos indispensáveis na produção em escala industrial.

5.5 – Análise Microestrutural

Com o auxílio do Microscópio Eletrônico e Varredura – MEV realizou-se a identificação das fases do concreto, sendo primeiramente feita a identificação dos agregados mais finos mistura, ou seja, a areia e a LBRO. A terceira fase, o agregado gráudo brita 0, não foi caracterizado em separado, pois o mesmo pode ser diferenciado claramente a olho nu.

Posteriormente, foram realizadas varreduras nos concretos dos pavimentos, sempre utilizando-se para análise, as superfícies de fratura promovidas quando da realização do ensaio de compressão. Utilizou-se o mesmo procedimento para varredura da superfície da fratura, que consistiu em três leituras na diagonal de cada face, conforme o sentido demonstrado no esquema da Figura 5.23:

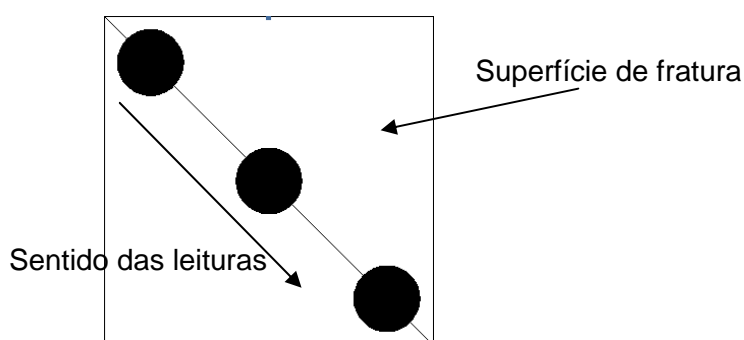


Figura 5.23 – Esquema de avanço das leituras do MEV

As Figuras 5.24 e 5.25 trazem respectivamente as amostras da areia e LBRO usadas nos traços.

5.5.1 – Areia:

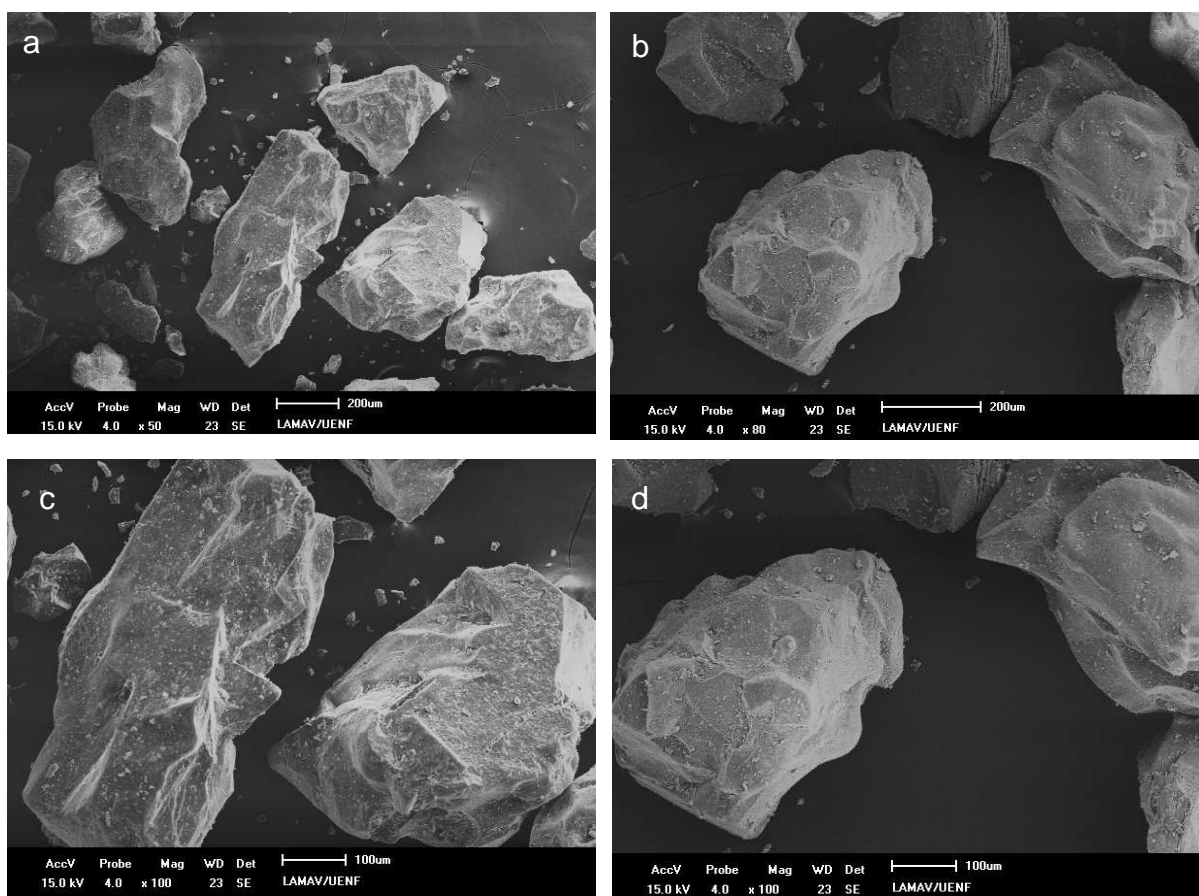


Figura 5.24 – Microestrutura da Areia, com os aumentos de: (a) 50x, (b) 80x; (c) e (d) 100x

A Figura 5.24 representa os grãos de areia, que foi proveniente do leito do Rio Paraíba do Sul. Verifica-se que este agregado caracteriza-se como partículas de arestas irregulares, com dimensão máxima característica de aproximadamente 200 μm, ou seja, 0,2 mm.

5.5.2 – LBRO:

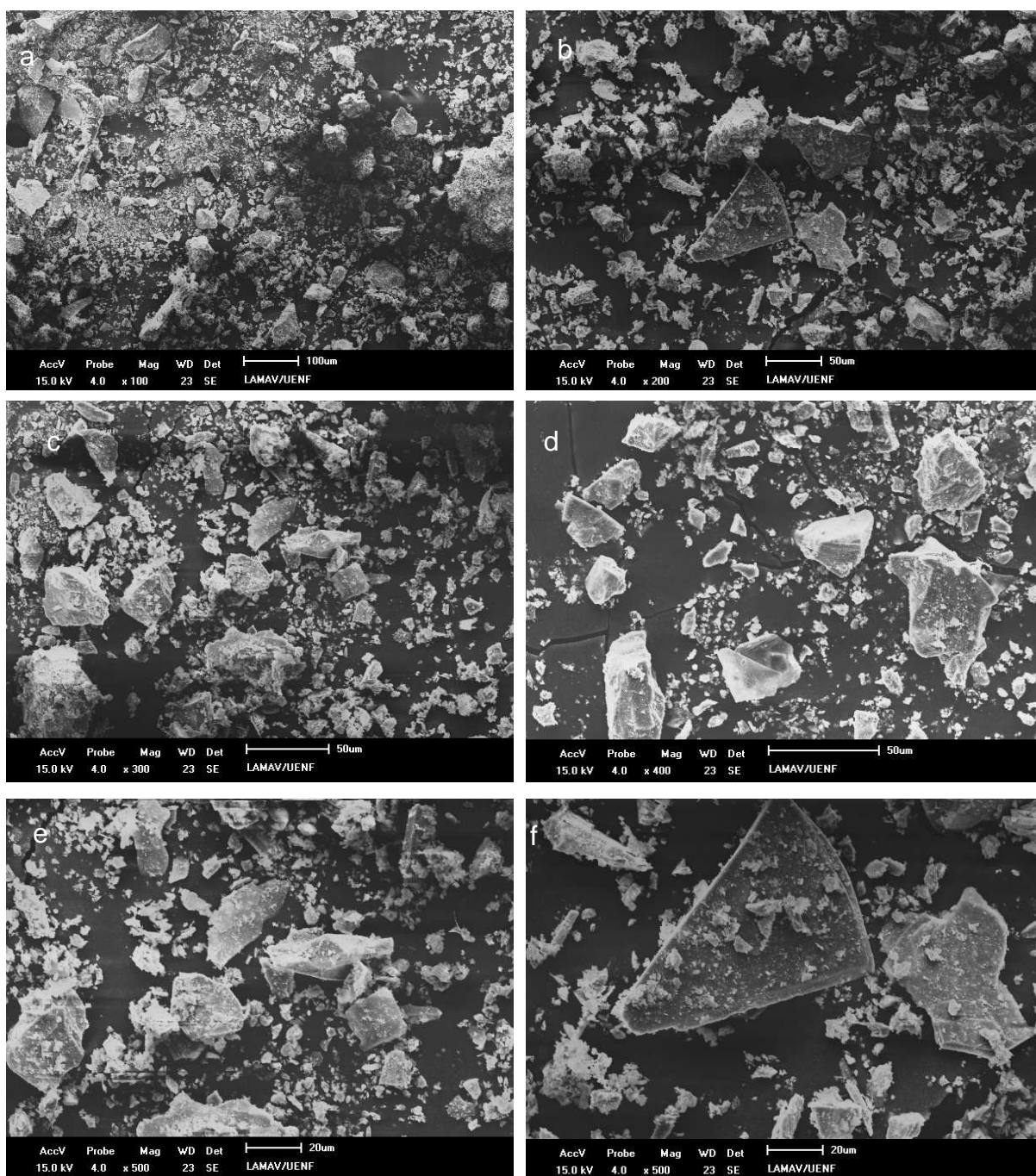


Figura 5.25 – Microestrutura LBRO com os aumentos de: (a) 100x, (b) 200x; (c) 300x, (d) 400, (e) e (f) 500x

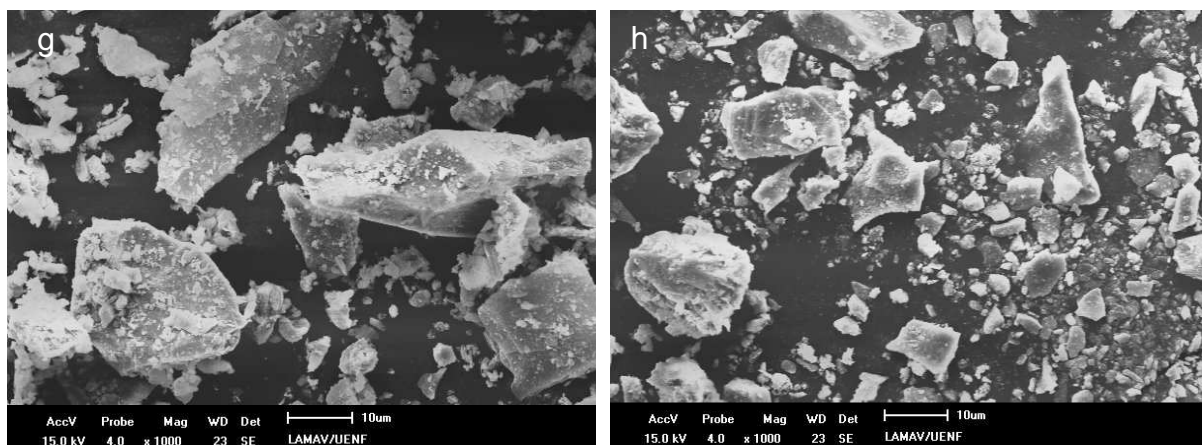


Figura 5.25 (continuação) – Microestrutura LBRO com os aumentos de: (g) e (h) 1000x

A Figura 5.25 traz a morfologia da LBRO, em aumentos sucessivos de 100 a 1000 vezes. Nota-se que o material possui distribuição variada do diâmetro das partículas, com arestas irregulares como a areia, porém com dimensões predominantes menores, variando de 0,05 a 50 μm , ou 0,00005 a 0,080 mm, conforme também exposto na distribuição granulométrica – Figura 5.4.

Explica-se a aparência com a areia devido a LBRO ser predominantemente composta de grãos de rocha granítica cominuída, que são rochas ricas em sílica assim como a areia. Apesar da areia do leito de rio ter suas arestas confeccionadas durante um tempo geológico muito maior que o período do processo de serragem dos blocos, a feição dos grãos na área da fratura, tanto para a areia quanto pra LBRO, se mostram semelhantes.

As próximas figuras trazem o aspecto microestrutural dos traços estudados até então, o T17, T18 e T20, com suas respectivas relações a/c.

5.5.3 – T17 – a/c=0,4:

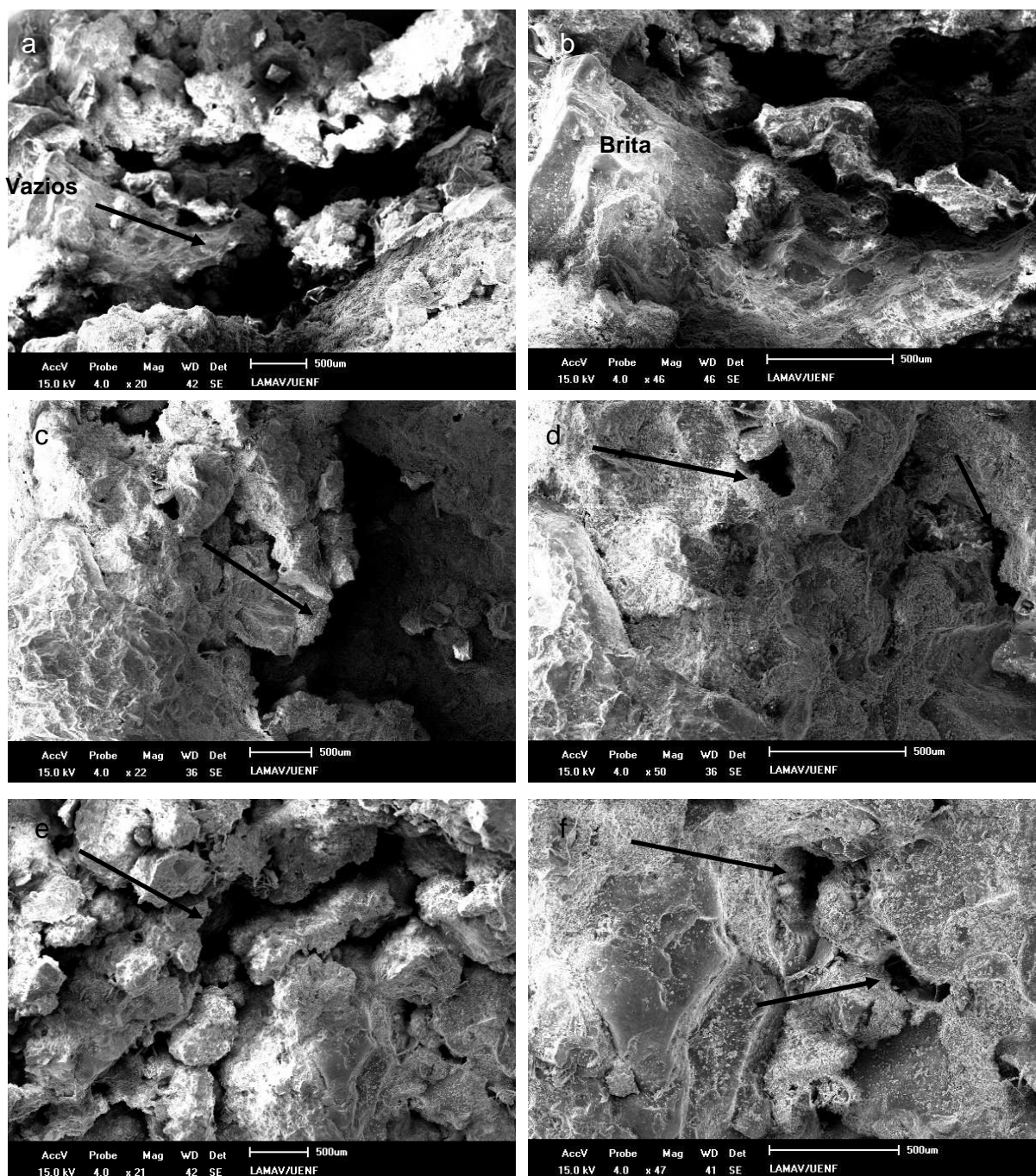


Figura 5.26 – T17 – a/c=0,4 com porosidade elevada, com os aumentos de: (a) 20x; (b) 46x, (c) 22x; (d) 50x; (e) 21x e (f) 47x

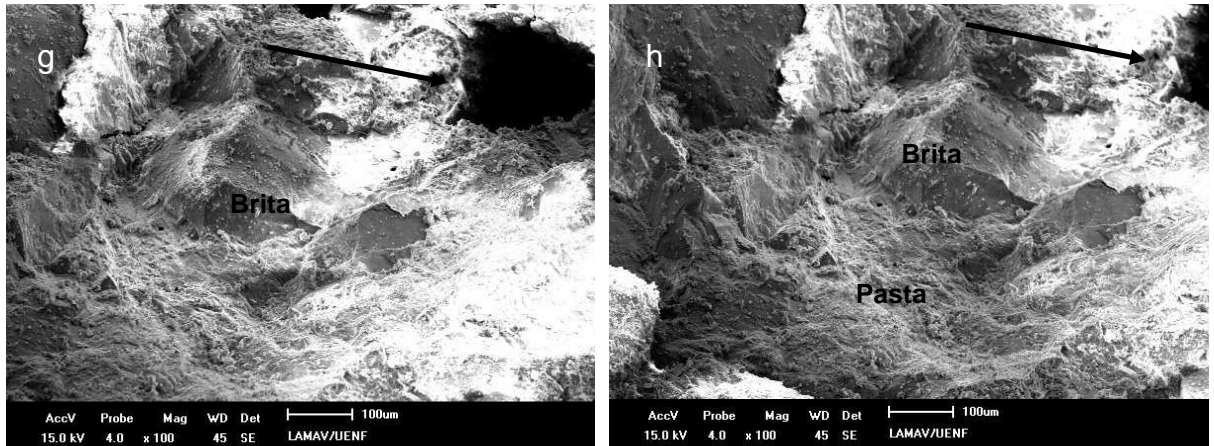


Figura 5.26 (continuação) – T17 – $a/c=0,4$ com porosidade elevada, com os aumentos de: (g) e (h) 100x

Conforme demonstrado nas micrografias da Figura 5.26, com aumentos entre 36 e 100 vezes, percebe-se que o T17 com relação a/c de 0,4 apresentou uma porosidade elevada, com poros da ordem de 0,1 a 0,5 mm, explicando a obtenção de baixas resistências a compressão, da ordem de 21 MPa. A porosidade observada ocorre devido ao baixo consumo de água, com relação água/agregados de 0,098, que dificulta o processo de mistura, prejudicando assim o envolvimento da pasta nos agregados, inclusive o agregado graúdo – brita.

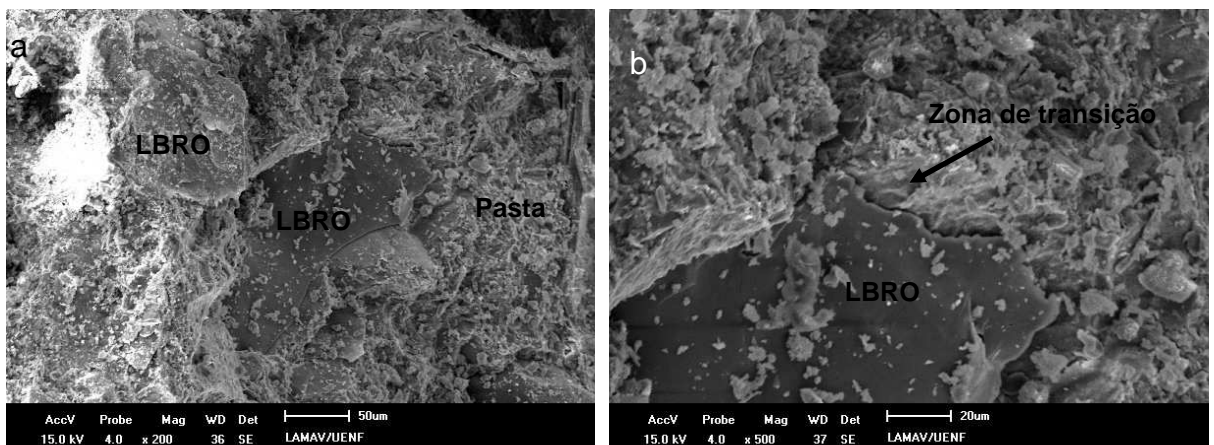


Figura 5.27 – T17 – $a/c=0,4$. Nota-se a zona de transição e aglomeração de agregados (LBRO), com os aumentos de: (a) 200x e (b) 500x

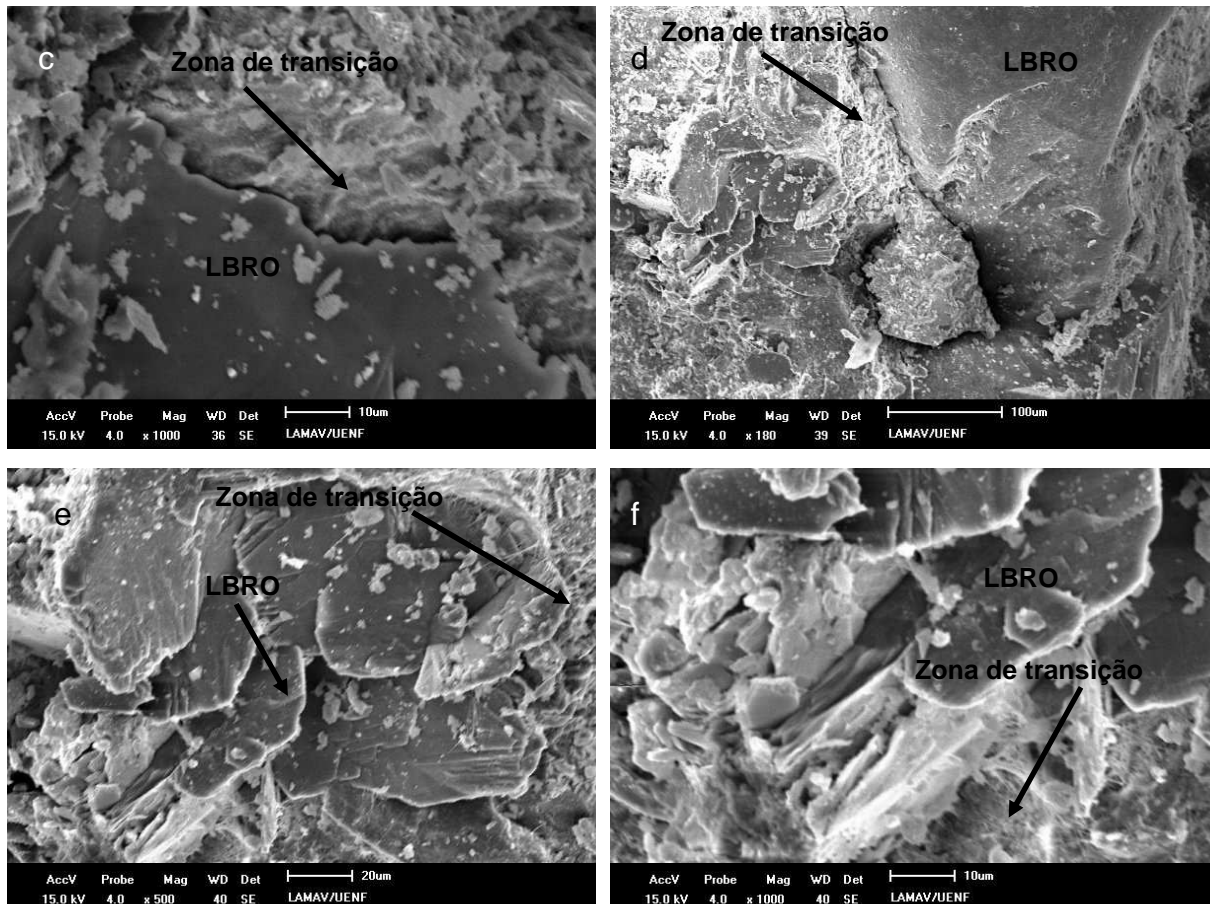


Figura 5.27 (continuação) – T17 – $a/c=0,4$. Nota-se a zona de transição e aglomeração de agregados (LBRO), com aumentos de: (c) 1000x; (d) 180x; (e) 500x e (f) 1000x

Além da porosidade elevada, nota-se nas micrografias da Figura 5.27, com aproximações entre 200 e 1000 vezes, que a zona de transição entre o agregado LBRO e a pasta possui lacunas que prejudicam as propriedades mecânicas. Além disso, tem-se uma aglomeração de partículas de LBRO com ausência de cobertura pela pasta.

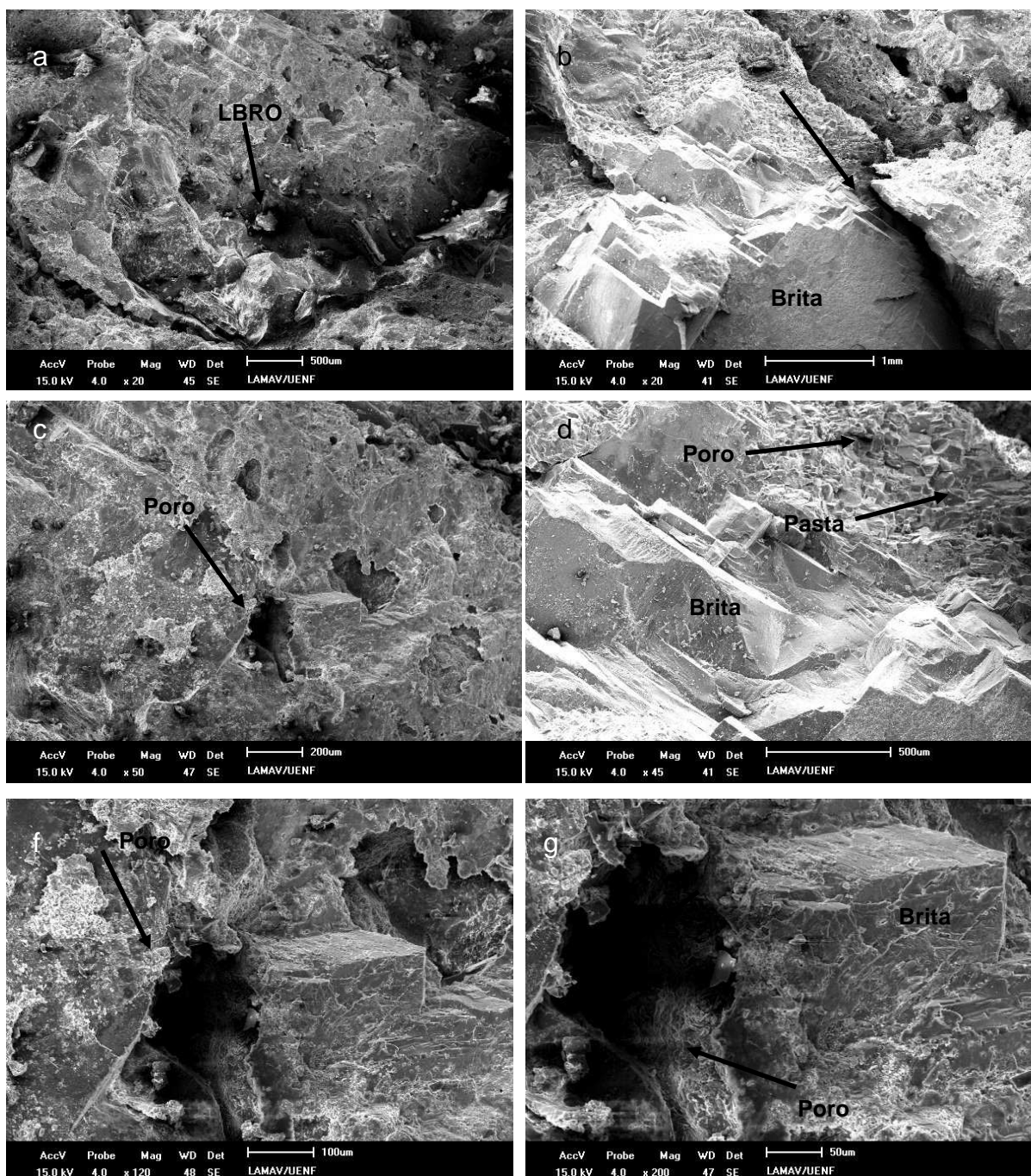
5.5.4 – T18 – $a/c=0,4$:

Figura 5.28 – T18 – $a/c=0,4$ com porosidade elevada e agregado brita sem envolvimento pela pasta, com aumentos de: (a) e (b) 20x; (c) 50x; (d) 45x; (f) 120x e (g) 200

As micrografias da Figura 5.28, com aumentos entre 41 e 50 vezes, mostram a grande porosidade do T18 com relação a/c de 0,4, que apresentam lacunas semelhantes ao T17, $a/c= 0,4$, causando vazios na pasta e entre os

agregados, notando-se principalmente o agregado graúdo sem envolvimento pela pasta em alguns casos.

As porosidades observadas ocorrem em virtude de principalmente dois fatores: a baixa relação água/agregados (0,098) e o aumento do agregado miúdo areia, o dobro em relação ao T18 - $a/c=0,4$, que aumenta consideravelmente a área específica da mistura, dificultando o envolvimento da pasta nos agregados. Esses fatos explicam sua baixa resistência à compressão, da ordem de 16 MPa, as menores do planejamento.

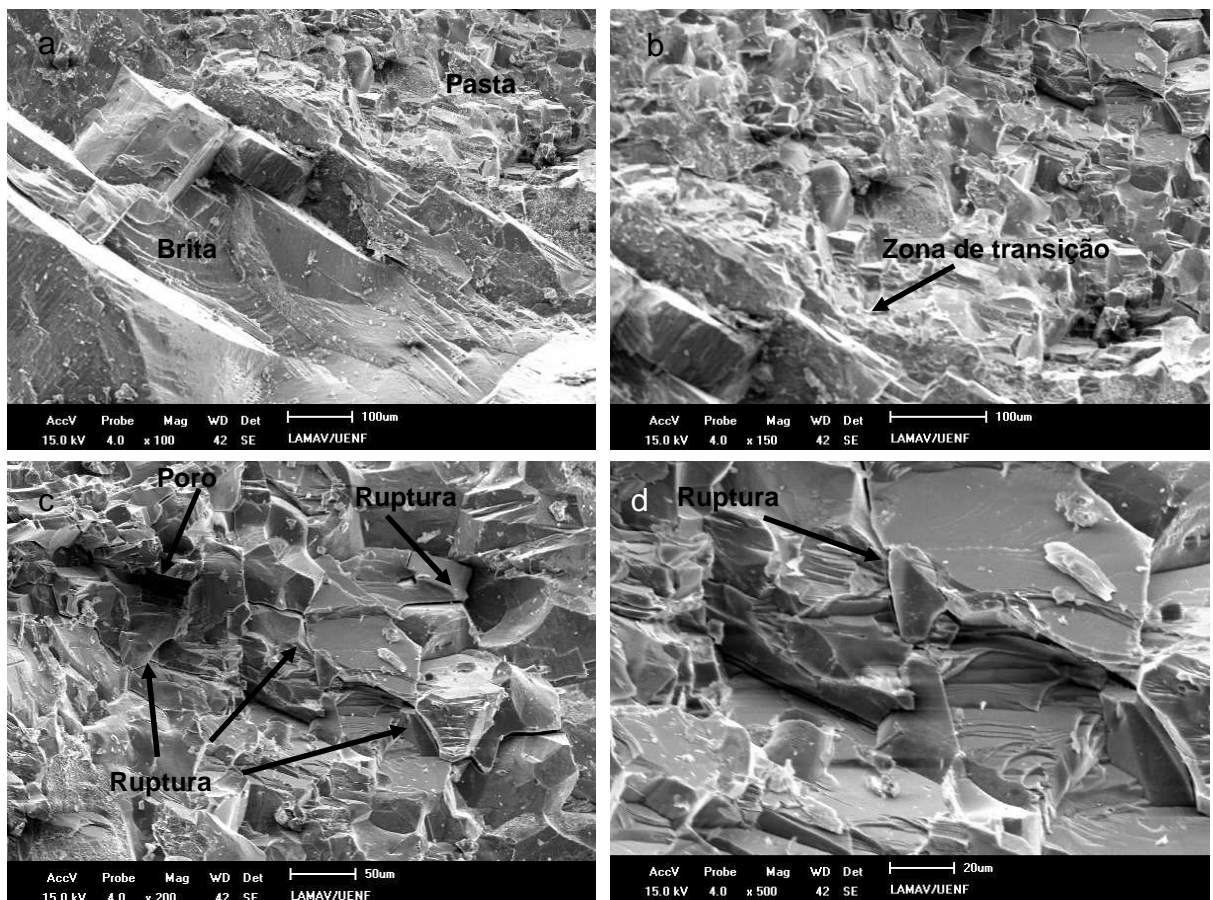


Figura 5.29 – T18 – $a/c=0,4$. Nota-se porosidade na pasta com ruptura na mesma, com aumentos de: (a) 100x; (b) 150x; (c) 200x e (d) 500x

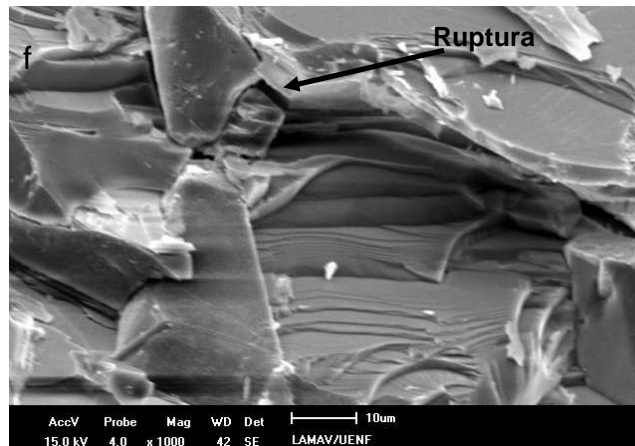


Figura 5.29 (continuação) – T18 – $a/c=0,4$. Nota-se porosidade na pasta com ruptura na mesma, com aumento de: (f) 1000x

Assim como no T17 – $a/c=0,4$, o T18 – $a/c=0,4$ apresentou grande porosidade entre as fases, entretanto também verificou-se a ruptura da pasta, daí valores muito baixos de resistência. O rompimento da pasta se explica pela existência de porosidade na mesma, que causa concentração de tensões nos poros e com isso a ruptura.

5.5.5 – T17 – $a/c=0,6$:

Os traços a seguir, o T17 e T18 possuem relação a/c de 0,6. A relação água/agregados é de 0,148, que é maior que a adotada nos mesmos traços já analisados com reação $a/c=0,4$, que eram de 0,098.

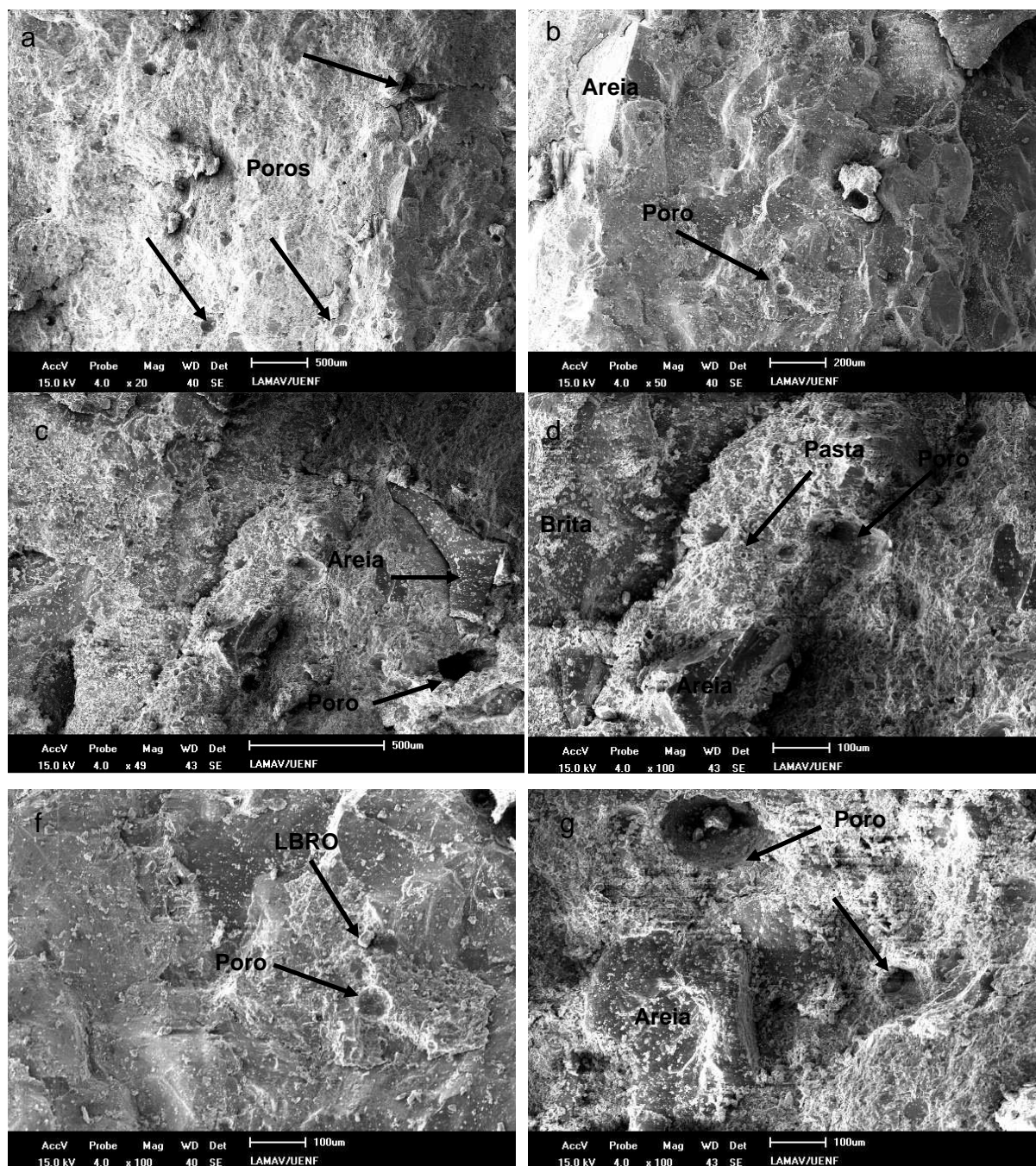


Figura 5.30 – T17 – $a/c=0,6$ com porosidade inferior as observadas nos traços com $a/c=0,4$, com aumento de: (a) 20x; (b) 50x; (c) 49x; (d), (e) e (f) 100x

As micrografias do T17 - $a/c=0,6$, com aumentos entre 20 e 100 vezes, expostas na Figura 5.30, evidenciam que o T17 possui porosidades concentradas principalmente na pasta, em torno de 0,1 mm (máxima), ordem de grandeza muito menor que os traços com relação a/c de 0,4. Além disso, nota-se maior cobertura da pasta sobre os agregados.

Isso se explica pelo fato do aumento da relação água/agregados, que passou de 0,098 para 0,148. Com o aumento do volume da pasta ocorre um maior envolvimento dos agregados e, com isso, aumento nas propriedades mecânicas, que alcançou cerca de 31 MPa de resistência a compressão.

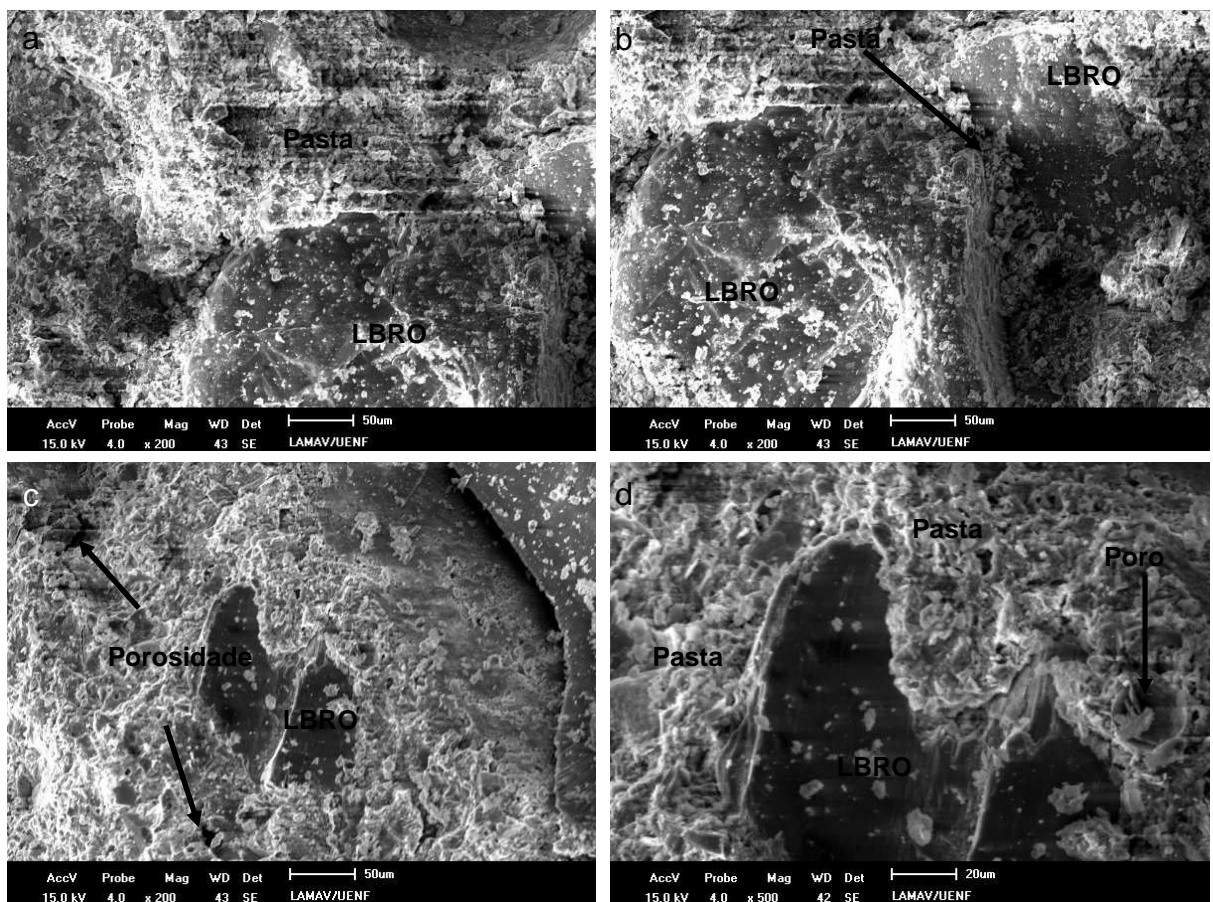


Figura 5.31 – T17 – $a/c=0,6$. Nota-se menor porosidade na pasta e na zona de transição, com aumento de: (a), (b) e (c) 200x e (d) 500x

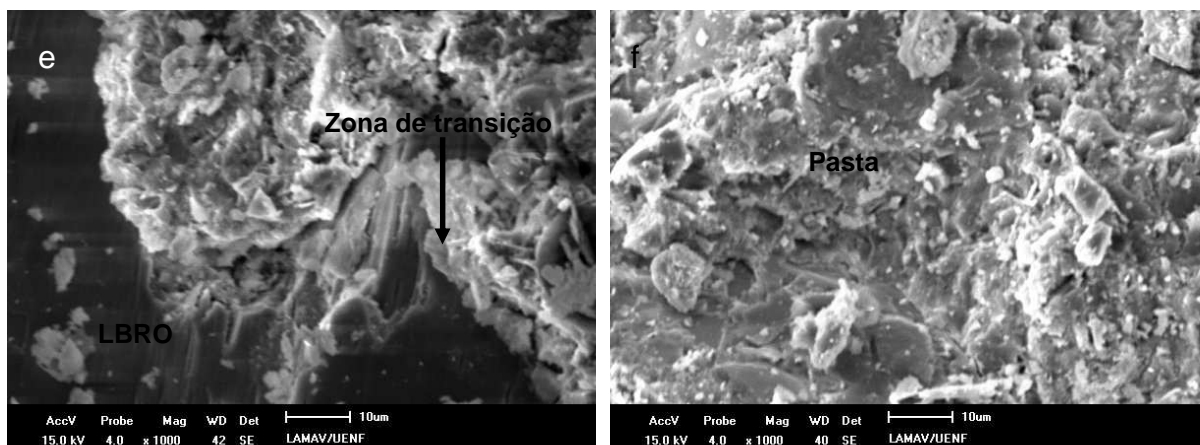
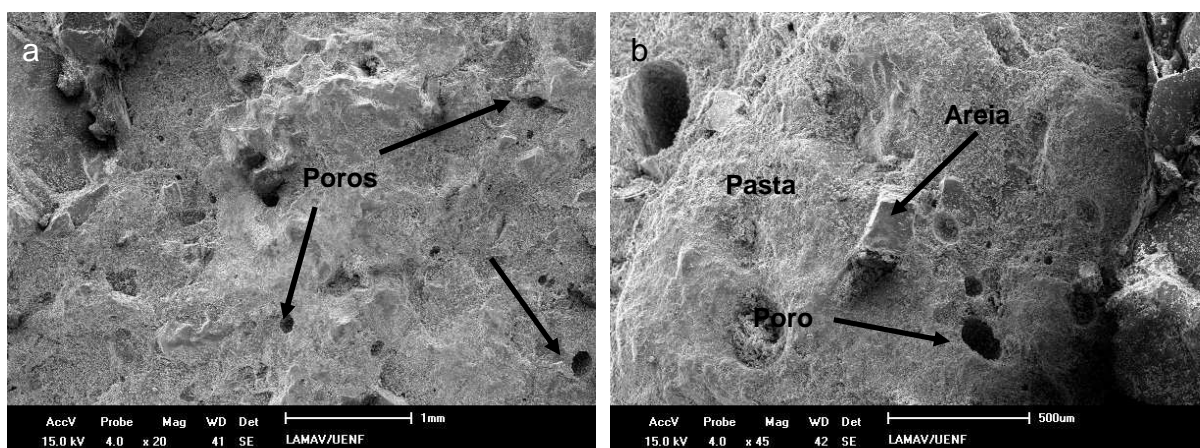


Figura 5.31 (continuação) – T17 – $a/c=0,6$. Nota-se menor porosidade na pasta e na zona de transição, com aumento de: (e) e (f) 1000x

Analisando as micrografias da Figura 5.31, tem-se que o T17 com relação $a/c=0,6$ apresentam menores porosidades entre as fases, quando comparado com o ponto com 0,4 de a/c . nota-se ainda maior envolvimento da pasta aos agregados e zona de transição pouco porosa. Estes fatores explicam o aumento de resistência à compressão (31 MPa).

5.5.6 – T18 – $a/c=0,6$:



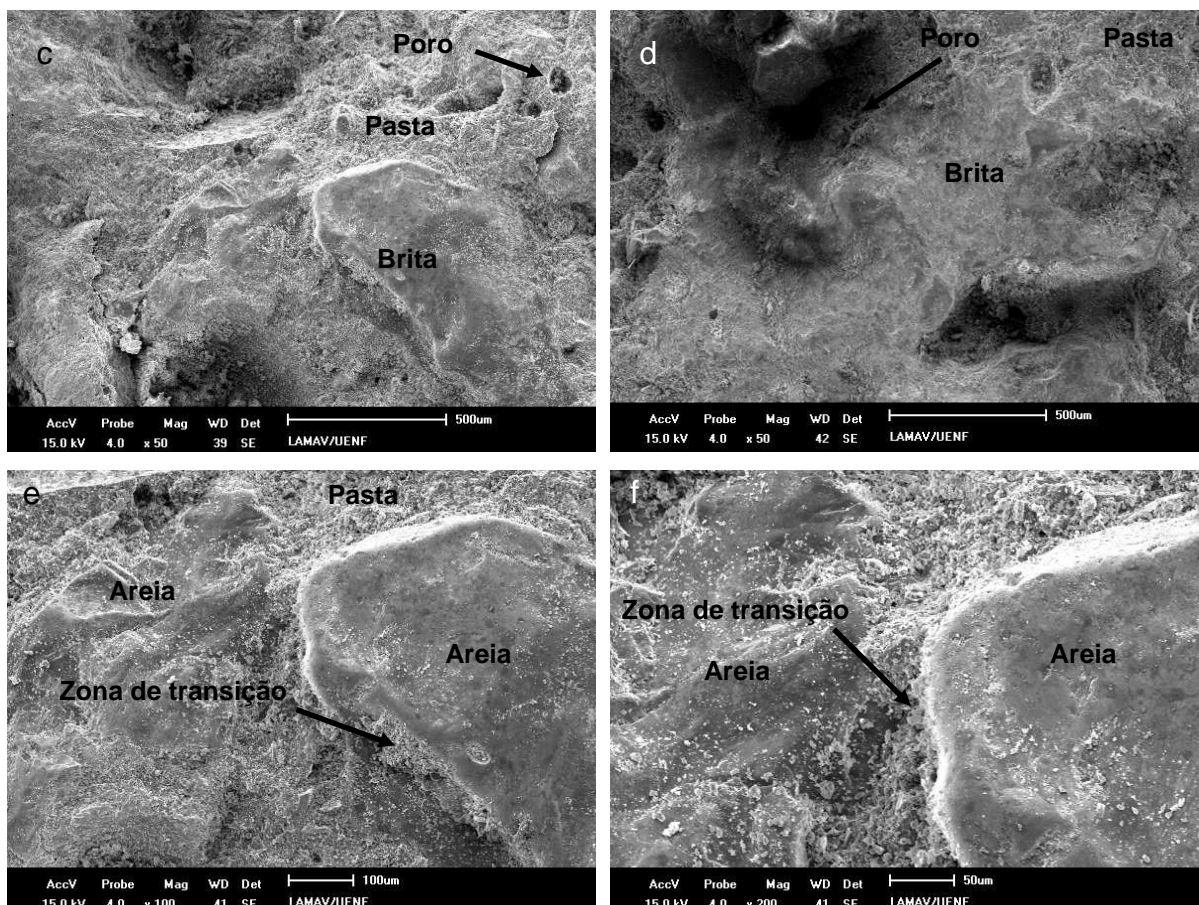


Figura 5.32 – T18 $a/c=0,6$ com porosidade baixa e envolvimento dos agregados pela pasta, com aumento de: (a) 20x, (b) 45x, (c) e (d) 50x; (e) 100x e (f) 200x

O T18 - $a/c=0,6$ se apresenta com porosidades em torno de 0,1 mm, conforme demonstrado na Figura 5.32. Apesar da porosidade semelhante ao T17 $a/c=0,6$, pode-se verificar que ocorreu maior cobrimento dos agregados pela pasta e uma zona de transição mais homogênea, fazendo com que fosse alcançados valores de resistência a compressão de até 35 MPa.

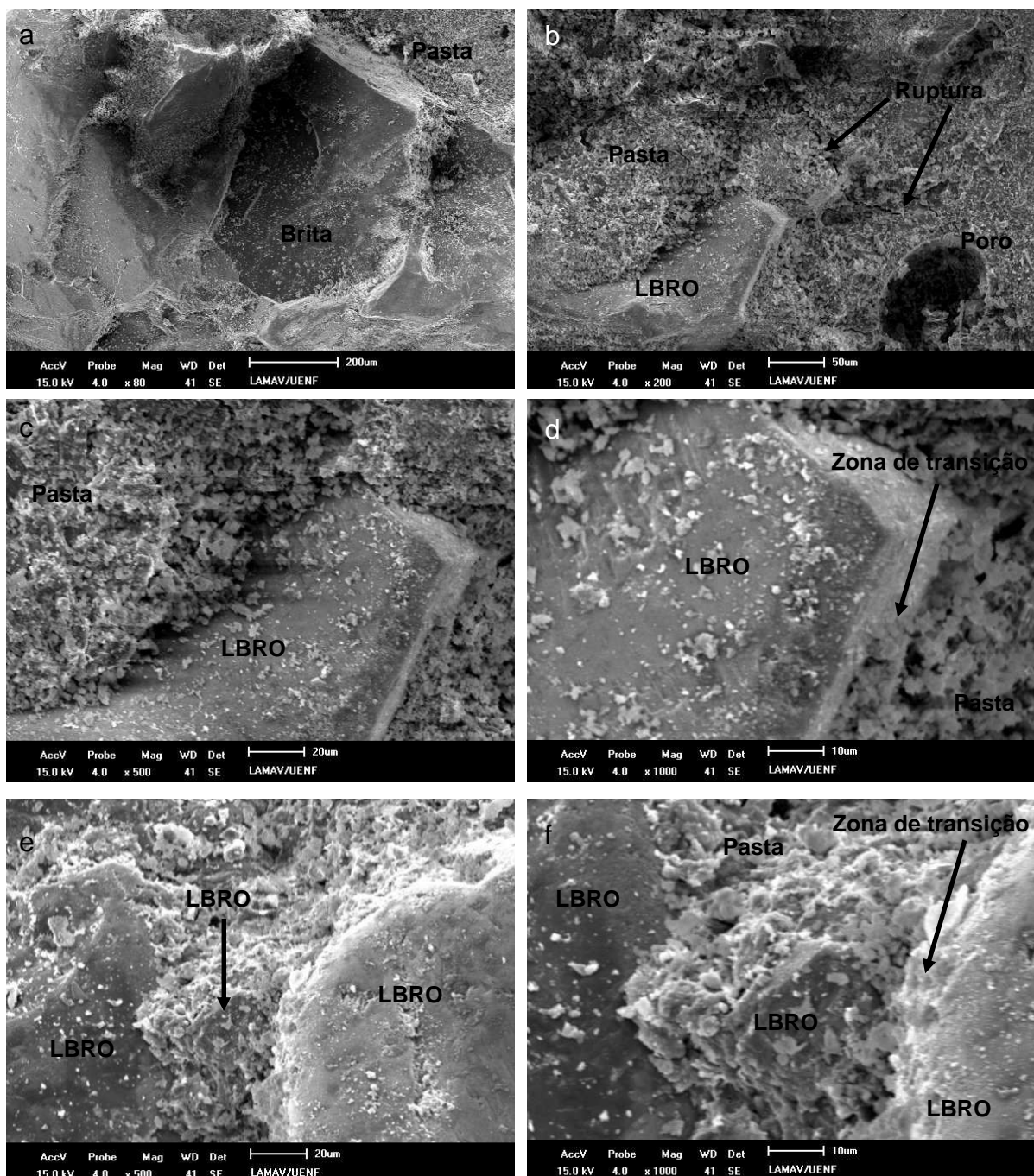


Figura 5.33 – T18 – $a/c=0,6$. Nota-se bom cobertura dos agregados pela pasta e poros com acúmulos de tensões provocando ruptura na pasta, com aumentos de: (a) 80x; (b) 200x; (c) e (e) 500x; (d) e (f) 1000x.

Nas micrografias da Figura 5.33, nota-se mais uma vez o bom cobertura da pastas aos agregados e a zona de transição homogênea. Um fator desfavorável foi à ocorrência de poros na pastas causando concentrações de tensão e, com isso, ruptura do sistema.

A relação água/agregados de 0,148 usada neste traço, propicia o maior cobrimento dos agregados, em contrapartida favorece o aparecimento de poros na pasta, devido à relação a/c mais alta adotada no planejamento, que foi de 0,6.

5.5.7 – T20 – a/c=0,5:

Conforme visto anteriormente, o T20 se apresentou como o melhor traço, pois atendeu ao critério mecânico da norma nacional e apresentou acabamento e consistência adequadas. A seguir tem-se a análise microestrutural.

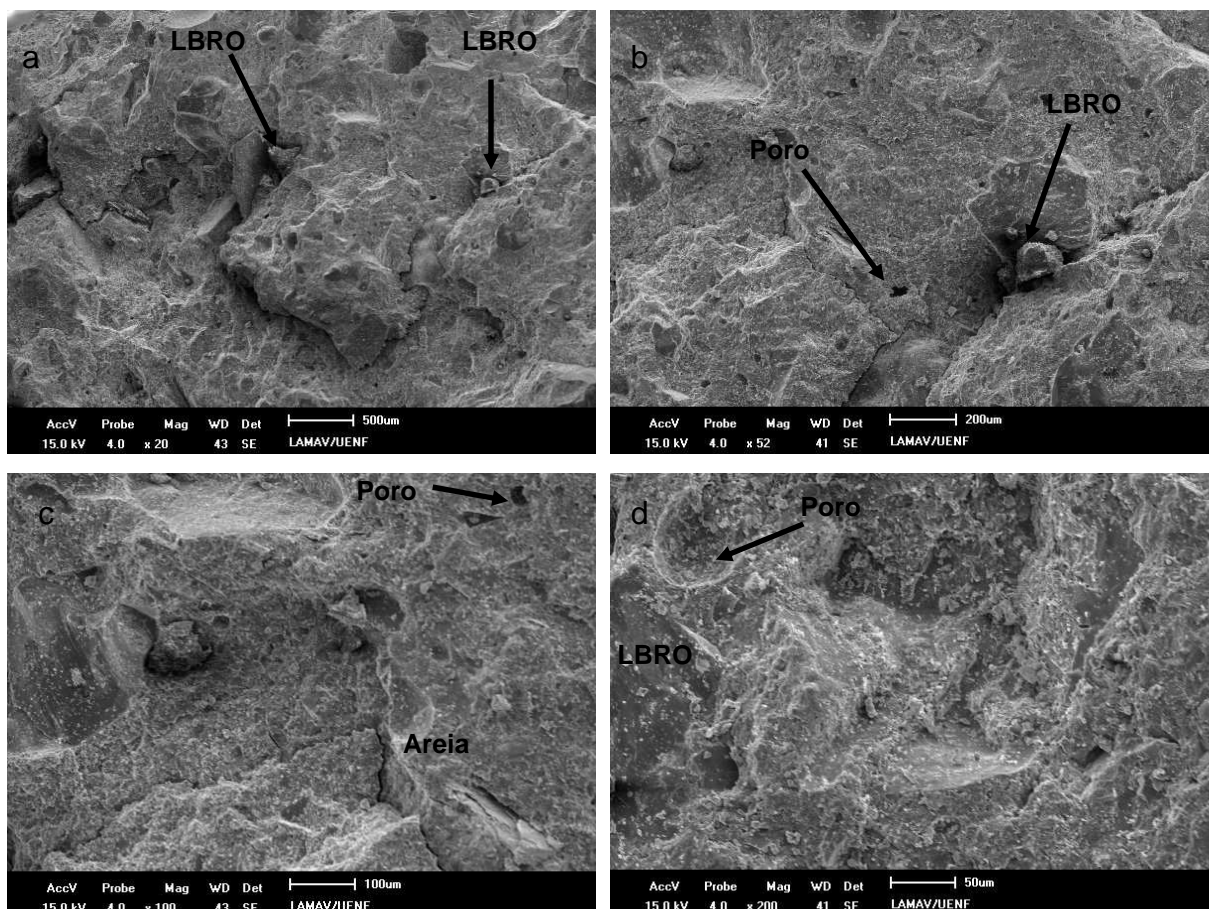


Figura 5.34 – T20 – a/c=0,5 com baixa porosidade e pasta contínua e homogênea, com aumentos de: (a) 20x; (b) 52x; (c) 100x e (d) 200x.

O T20 com a/c=0,5 apresentou, conforme demonstrado na Figura 5.34 com aumentos de 50 a 200 vezes, porosidade da ordem de 0,050 mm, as menores encontradas entre os traços analisados até o momento. Devido à baixa porosidade, os valores de resistência a compressão alcançaram 39 MPa.

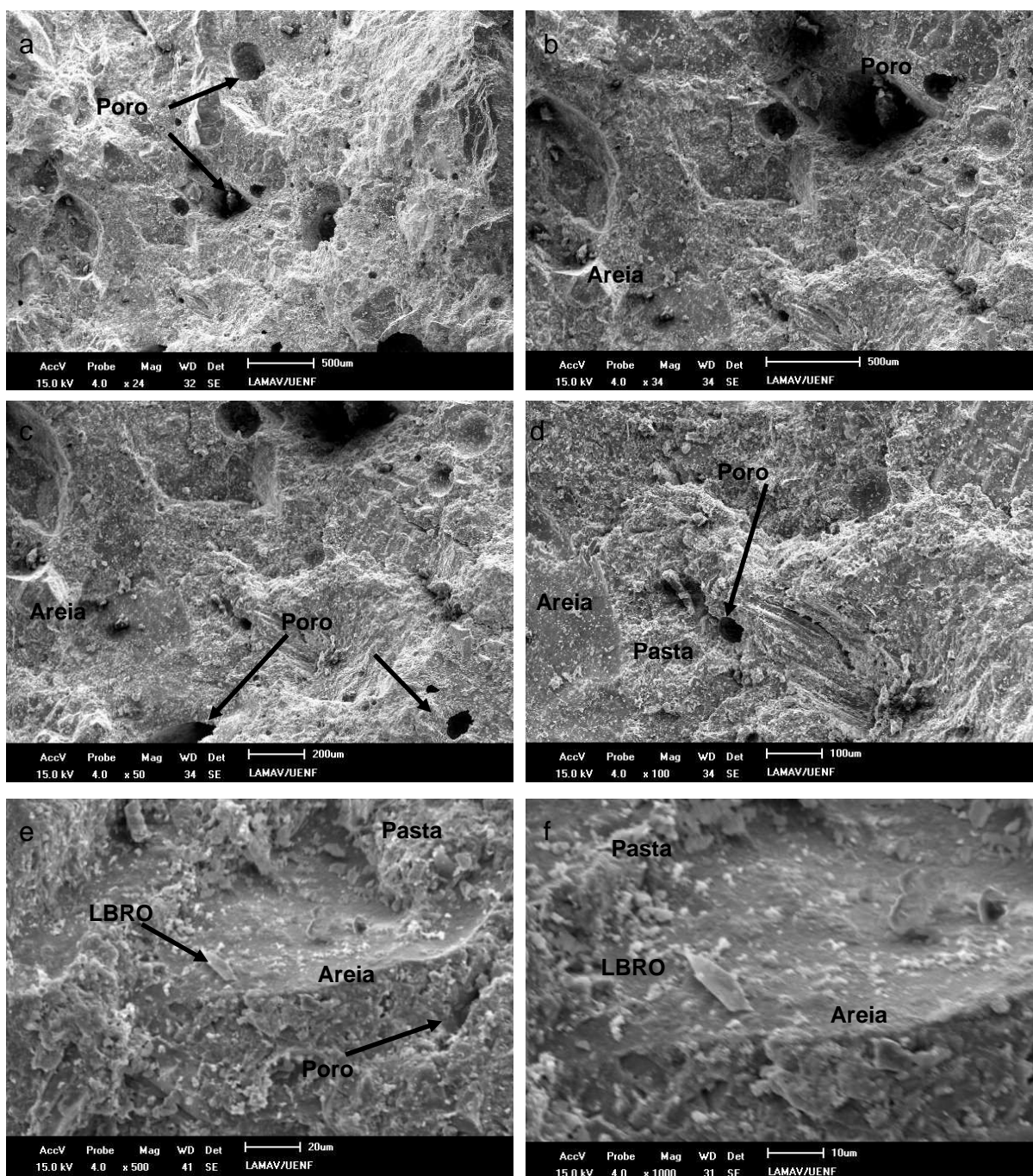


Figura 5.35 – T20 – $a/c=0,5$. Nota-se a ocorrência de porosidade na pasta, mas sem ruptura, com aumentos de: (a) 24x; (b) 34x; (c) 50x; (d) 100x; (e) 500x e (f) 1000x

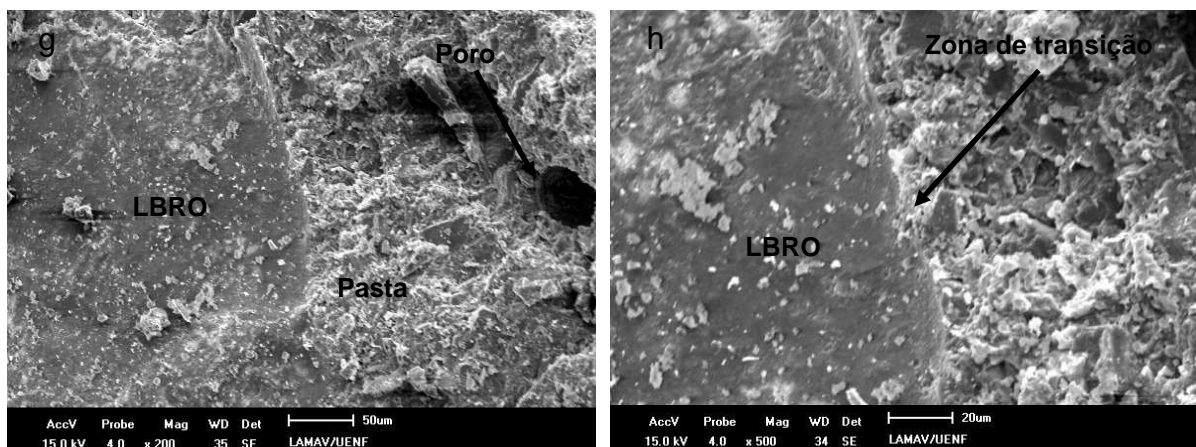


Figura 5.35 (continuação) – T20 – $a/c=0,5$. Nota-se a ocorrência de porosidade na pasta, mas sem ruptura, com aumentos de: (g) 500x e (h) 500x

Nas micrografias da Figura 5.35, percebe-se o bom cobrimento da pastas aos agregados e a zona de transição homogênea. Foi verificada ocorrência de poros na pastas, da ordem 0,05 mm, porém os mesmos não causam um volume grande de microfissuras por acumulo de tensões. Explica-se tal ocorrência, pois a relação a/c de 0,5, menor anterior (0,6), promove pastas com maior resistência característica.

A relação água/agregados de T20 $a/c=0,5$ é 0,123, um valor intermediário entre os traços com $a/c=0,4$ e $a/c=0,6$. O valor intermediário permite bom cobrimento dos agregados e uma pasta mais resistente ao acumulo de tensões concentrados em seus poros.

Sendo assim, a classificação dos pavimentos obtidos neste estudo, segundo a NBR 9781 é a seguinte: Pavimentos para transito de veículos comerciais e de linha.

5.6 – Caracterização Ambiental

Foram realizados testes de caracterização ambiental nos pavimentos usando tanto a norma brasileira, que considera os materiais em estado de pó, quanto à norma francesa, onde os ensaios são feitos sobre o material intacto. Com a obtenção do extrato lixiviado da norma francesa, este sofreu uma caracterização ecotoxicológica, a fim de verificar sua toxicidade.

A caracterização ambiental se deu sobre os pavimentos de traço T20, com relação a/c 0,5, pois estes apresentaram resistência à compressão dentro da NBR 9781/1987 – “Peças de Concreto para Pavimentação: Especificação”, além de possuírem índices de consistência adequado ao manuseio no estado fresco e bom acabamento.

A caracterização ambiental e ecotoxicológica foi realizada no laboratório CETAN – Centro Tecnológico de Análises, situado na cidade de Vitória-ES.

A Tabela 5.42 reproduz na íntegra os resultados obtidos com a caracterização ambiental segundo a norma brasileira.

Tabela 5.41 - Resultados da caracterização ambiental segundo a norma brasileira

Amostra	Pavimento intertravado traço T20, com teor água/cimento de 0,5				Código	1756/11-01	Coleta em	13/05/11
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L1)	LQ	Método	Data do Ensaio		
N-Nitrosodifenilamina (sc)	<0,2	µg/L	--	0,2	EPA 8070-A	23/05/11		
N-Nitrosodimetilamina (sc)	<0,2	µg/L	--	0,2	EPA 8070-A	23/05/11		
N-Nitrosodi-n-propilamina (sc)	<0,2	µg/L	--	0,2	EPA 8070-A	23/05/11		
-Outros-								
Alumínio total	0,15 ± 0,01	mg/L	--	0,033	SM 3500-AI B	19/05/11		
Ferro total	0,21 ± 0,019	mg/L	--	0,094	IT-MT-001/IT-MT-002	20/05/11		
Estanho total	<0,005	mg/L	--	0,005	IT-MT-001/IT-MT-002	20/05/11		
Cobre total	1,23 ± 0,052	mg/L	--	0,002	IT-MT-001/IT-MT-002	19/05/11		
Manganês total	0,39 ± 0,02	mg/L	--	0,001	IT-MT-001/IT-MT-002	20/05/11		
Níquel total	0,11 ± 0,01	mg/L	--	0,005	IT-MT-001/IT-MT-002	20/05/11		
Zinco total	2,02 ± 0,11	mg/L	--	0,021	IT-MT-001/IT-MT-002	19/05/11		
Vanádio total	<0,011	mg/L	--	0,011	IT-MT-001/IT-MT-002	19/05/11		
Cloreto	144,7 ± 2,3	mg/L	--	0,01	IT-IC-001	19/05/11		
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L2)	LQ	Método	Data do Ensaio		
-EXTRATO SOLUBILIZADO-								
pH Final do Extrato Solubilizado	9 ± 1	--	--	1 a 14	NBR-10006:2004 e SM-4500-H+B	23/05/11		
Teor de umidade	<1	%	--	1	NBR-10006:2004	16/05/11		
-Parâmetros Inorgânicos-								
Alumínio total	0,11 ± 0,006	mg/L	0,2	0,033	SM 3500-AI B	24/05/11		
Bário total	0,13 ± 0,01	mg/L	0,7	0,005	IT-MT-001/IT-MT-002	24/05/11		
Cádmio total	<0,0002	mg/L	0,005	0,0002	IT-MT-001/IT-MT-002	23/05/11		
Chumbo total	<0,002	mg/L	0,01	0,002	IT-MT-001/IT-MT-002	24/05/11		
Cloreto	145,9 ± 1,7	mg/L	250	0,01	IT-IC-001	24/05/11		
Cobre total	0,87 ± 0,08	mg/L	2	0,5	IT-MT-001/IT-MT-002	23/05/11		
Cromo total	0,04 ± 0,005	mg/L	0,05	0,0011	IT-MT-001/IT-MT-002	23/05/11		
Ferro total	0,17 ± 0,006	mg/L	0,3	0,094	IT-MT-001/IT-MT-002	24/05/11		
Fluoreto	0,89 ± 0,06	mg/L	1,5	0,01	IT-IC-001	24/05/11		
Manganês total	<0,088	mg/L	0,1	0,088	IT-MT-001/IT-MT-002	24/05/11		
Prata total	<0,001	mg/L	0,05	0,001	IT-MT-001/IT-MT-002	23/05/11		
Zinco total	1,85 ± 0,12	mg/L	5	0,021	IT-MT-001/IT-MT-002	23/05/11		
-Fenóis por Cromatografia (ASTM)-								
Fenol	1,10 ± 0,1	µg/L	--	0,37	ASTM D2580	24/05/11		
2-Clorofenol	<0,33	µg/L	--	0,33	ASTM D2580	24/05/11		
2-Metil 4,6-Dinitrofenol	<0,34	µg/L	--	0,34	ASTM D2580	24/05/11		
o-Cresol (2-Metilfenol)	<0,37	µg/L	--	0,37	ASTM D2580	24/05/11		
m+p-Cresol (3+4-Metilfenol)	<0,4	µg/L	--	0,4	ASTM D2580	24/05/11		
2-Nitrofenol	1,4 ± 0,41	µg/L	--	0,23	ASTM D2580	24/05/11		
2,3,4,6-Tetraclorofenol	<0,32	µg/L	--	0,32	ASTM D2580	24/05/11		

2,4-Diclorofenol	<0,35	µg/L	--	0,35	ASTM D2580	24/05/11		
2,4-Dimetilfenol	<0,22	µg/L	--	0,22	ASTM D2580	24/05/11		
2,4,5-Triclorofenol	<0,32	µg/L	--	0,32	ASTM D2580	24/05/11		
2,4,6-Triclorofenol	<0,27	µg/L	--	0,27	ASTM D2580	24/05/11		
2,6-Diclorofenol	<0,36	µg/L	--	0,36	ASTM D2580	24/05/11		
4-Cloro 3-Metilfenol	<0,31	µg/L	--	0,31	ASTM D2580	24/05/11		
4-Nitrofenol	<0,33	µg/L	--	0,33	ASTM D2580	24/05/11		
Pentaclorofenol	6,2 ± 0,19	µg/L	--	0,42	ASTM D2580	24/05/11		
Fenol total	8,7 ± 0,25	µg/L	10	0,4	ASTM D2580	24/05/11		
-PAHs Discriminados e Total-								
Naftaleno	<0,49	µg/L	--	0,49	IT-CR-004	26/05/11		
Acenaftileno	<0,72	µg/L	--	0,72	IT-CR-004	26/05/11		
Acenafteno	<0,51	µg/L	--	0,51	IT-CR-004	26/05/11		
Fluoreno	<0,59	µg/L	--	0,59	IT-CR-004	26/05/11		
Fenantreno	<0,57	µg/L	--	0,57	IT-CR-004	26/05/11		
Amostra	Pavimento intertravado traço T20, com teor água/cimento de 0,5				Código	1756/11-01	Coleta em	13/05/11
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L2)	LQ	Método		Data do Ensaio	
Antraceno	<0,63	µg/L	--	0,63	IT-CR-004		26/05/11	
Fluoranteno	<0,52	µg/L	--	0,52	IT-CR-004		26/05/11	
Pireno	0,96 ± 0,05	µg/L	--	0,55	IT-CR-004		26/05/11	
Benzo(a)Antraceno	<0,04	µg/L	--	0,04	IT-CR-004		26/05/11	
Criseno	<0,04	µg/L	--	0,04	IT-CR-004		26/05/11	
Benzo(b)Fluoranteno	<0,04	µg/L	--	0,04	IT-CR-004		26/05/11	
Benzo(k)Fluoranteno	<0,04	µg/L	--	0,04	IT-CR-004		26/05/11	
Benzo(a)pireno	1,21 ± 0,08	µg/L	--	0,04	IT-CR-004		26/05/11	
Dibenzo(a,h)Antraceno	<0,55	µg/L	--	0,55	IT-CR-004		26/05/11	
Indeno[1,2,3-cd]Pireno	<0,51	µg/L	--	0,51	IT-CR-004		26/05/11	
Benzo(g,h,i)Perileno	<0,55	µg/L	--	0,55	IT-CR-004		26/05/11	
PAHs-Total	2,17 ± 0,1	µg/L	--	0,49	IT-CR-004		26/05/11	
-Aminas e Cloraminas-								
Monocloramina	<0,01	mg/L	--	0,01	SM 4500 Cl		30/05/11	
Dicloramina	<0,01	mg/L	--	0,01	SM 4500 Cl		30/05/11	
N-Nitrosodifenilamina (sc)	<0,2	µg/L	--	0,2	EPA 8070-A		30/05/11	
N-Nitrosodimetilamina (sc)	<0,2	µg/L	--	0,2	EPA 8070-A		30/05/11	
N-Nitrosodi-n-propilamina (sc)	<0,2	µg/L	--	0,2	EPA 8070-A		30/05/11	
-Outros-								
Cloreto de Vinila	<0,1	µg/L	--	0,1	EPA 502-2		27/05/11	
Estanho total	<0,005	mg/L	--	0,005	IT-MT-001/IT-MT-002		30/05/11	
Níquel total	0,08 ± 0,002	mg/L	--	0,005	IT-MT-001/IT-MT-002		26/05/11	
Vanádio total	<0,011	mg/L	--	0,011	IT-MT-001/IT-MT-002		27/05/11	

Legenda
(L1): NBR 10.005:2004 - Lixiviação
(L2): NBR 10.006:2004 - Solubilização
R±U: Resultado do Ensaio e sua respectiva Incerteza Expandida.
SM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st. Edition, 2005.
IT-: Instrução de Trabalho baseada em metodologias oficiais e validada de acordo com a norma NBR ISO/IEC 17025:2005.
EPA: Environmental Protection Agency.
ASTM: American Society for Testing Materials.
(sc): Ensaio subcontratado com laboratório competente.
ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
LQ: Limite de Quantificação praticável. Em ensaios químicos o Limite de Detecção (LD) = LQ÷3,3.

Observações
Relatório de Ensaio confeccionado de acordo com a IN 02/2009 do IEMA.

O relatório conclui, considerando os limites e a metodologia estabelecidos pela norma brasileira, que o material é classificado como **Resíduo Classe II-B INERTE**, segundo a NBR 10.004/2004.

Analisando a Tabela 5.42 evidencia os compostos encontrados nos ensaios de lixiviação e solubilização. Pode-se encontrar nesta tabela uma gama de elementos químicos, que fazem parte da constituição dos pavimentos, como o cimento e areia, que possuem origem mineral natural.

Além desses compostos, tem-se a LBRO, que é um material composto basicamente de CaO, granalha metálica e pó de rocha. Vale ressaltar que no processo produtivo das rochas ornamentais, os teares, equipamentos responsáveis pelo desdobramento dos blocos, são periodicamente lubrificados com materiais graxos. Esses óleos ou substâncias oleosas acabam, no fim de cada serrada, entrando em contato com a água que é usada na lavagem dos teares ou das chapas, fazendo com que se incorporem na constituição da LBRO final.

Com isso, pode-se verificar a existência de compostos derivados de petróleo na caracterização da Tabela 5.42, como por exemplo, os fenóis. Contudo constatou-se os padrões de classificação inerte para a dosagem adotada destes compostos.

A seguir, considerando os procedimentos de lixiviação adotados na norma francesa AFNOR XPX 31-211 sobre o pavimento intacto, ou monolito, foi realizada a caracterização ecotoxicológica no extrato obtido.

Sobre os extratos lixiviados foram feitos testes ecotoxicológicos agudos e crônicos, utilizando-se organismos teste microcrustáceos e crônicos utilizando-se algas. As Tabelas 5.43 e 5.44 reproduzem na íntegra os resultados obtidos da caracterização ecotoxicológica aguda e crônica do extrato lixiviado.

Tabela 5.42 - Caracterização ecotoxicológica do extrato lixiviado da AFNOR XPX 31-211

Amostra	Pavimento intertravado traço T20, com teor água/cimento de 0,5	Código	1756/11-01	Coleta em	13/05/11
				Data do ensaio:	23/05/11
<p>Definições:</p> <p>* CE₅₀ (Concentração Efetiva Média): Concentração real da amostra que causa efeito agudo (por exemplo: imobilidade) a 50% dos organismos no tempo de exposição, nas condições de ensaio.</p> <p>* CENO (Concentração de Efeito Não Observado): Maior concentração real da amostra que não causa efeito deletério estatisticamente significativo na sobrevivência e reprodução dos organismos em teste, nas condições de ensaio.</p> <p>* CEO (Concentração de Efeito Observado): Menor concentração real da amostra que causa efeito deletério estatisticamente significativo na sobrevivência e reprodução dos organismos em teste, nas condições de ensaio.</p> <p>Análise estatística:</p> <p>Os parâmetros relativos à imobilidade (% de indivíduos imóveis) foram estimados pelo método de quadrados mínimos ponderados, considerando-se os números de indivíduos imóveis como variáveis aleatórias com distribuição binomial. As comparações entre pares de tratamentos foram efetuadas via teste qui-quadrado de Wald. Quando constatados que os dados eram normais e homogêneos, o teste paramétrico de Dunnett's foi utilizado. Quando os dados não foram paramétricos, o teste Steel's Many-one Rank foi utilizado (EPA, 2002). Trabalhou-se com intervalo de confiança em nível de 95%.</p> <p>Observações gerais:</p> <ul style="list-style-type: none"> Os valores numéricos de toxicidade aguda e crônica, expressos como CE₅₀, CENO e CEO, exprimem uma relação inversa à toxicidade, ou seja, menores valores numéricos indicam maiores toxicidades. Para facilitar a comparação e fazer com que esses parâmetros exprimam uma relação direta com a toxicidade, podem ser transformados em unidades tóxicas aguda (U_a / F_{Ta}) ou crônica (U_c / F_{Tc}) pelas seguintes equações: $U_a = 100/CE_{50}$ // $U_c = 100/CENO$ ou $U_c = 100/CEO$. Dessa forma, quanto maior o valor numérico em unidade tóxica, maior será a toxicidade da amostra; Valores considerados ideais para U_a/U_c/F_{Ta}/F_{Tc}: < 1 ou próximos de 1. 					

ECOTOXICIDADE AGUDA (<i>Daphnia similis</i>):		
Metodologia empregada: ABNT NBR 12713 (Ecotoxicologia aquática – toxicidade aguda – método de ensaio com <i>Daphnia</i> spp./Crustacea, Cladocera).		
		Uta / FTa
CE₅₀	50%	2
ECOTOXICIDADE CRÔNICA (<i>Ceriodaphnia dubia</i>):		
Metodologia empregada: ABNT NBR 13373 (Ecotoxicologia aquática – toxicidade aguda – método de ensaio com <i>Ceriodaphnia</i> spp./Crustacea, Cladocera).		
		Utc / FTc
CENO	50%	2
CEO	50%	2

Tabela 5.43 - Caracterização ecotoxicológica crônica para fator de toxicidade do extrato lixiviado da AFNOR XPX 31-211

Amostra	Pavimento intertravado traço T20, com teor água/cimento de 0,5	Código	1756/11-01	Coleta em	13/05/11
				Data do ensaio:	23/05/11
ENSAIO DE ECOTOXICIDADE CRÔNICA					
MÉTODO DE ENSAIO COM ALGAS (<i>Chlorophyceae</i>)					
Princípio do Ensaio: O método consiste na exposição de organismos-teste a várias diluições da amostra, por um período de 72h a 96h. O efeito tóxico é determinado pela inibição do crescimento da biomassa algácea nos recipientes-teste comparado com o controle, sob as mesmas condições de ensaio. Determina-se a menor diluição da amostra na qual se observa inibição do crescimento algáceo < 20%. Neste ensaio determinou-se o FT. Amostras de solo/sedimento/resíduo são solubilizadas durante 7 dias, de acordo com o descrito na norma ABNT NBR 10.006/2004.					
Definições: * FT (Fator de Toxicidade): menor diluição da amostra na qual se observa inibição do crescimento algáceo < 20%.					
Metodologia Empregada: ABNT NBR 12648: Ecotoxicologia aquática – Toxicidade crônica – Método de ensaio com algas (<i>Chlorophyceae</i>).					
Determinação da Biomassa Algácea: Espectrofotometria para determinação do conteúdo de clorofila com leitura da absorbância luminosa a 750nm.					
Cálculos: Realizados de acordo com a norma ABNT NBR 12648.					
$IC (FT) = \frac{Mc - Ma}{Mc} \times 100$					
<p><i>Onde:</i> IC (FT) = Porcentagem de inibição da fluorescência da clorofila Ma = Média da fluorescência obtida na amostra-teste Mc = Média da fluorescência obtida no controle</p>					
Dados do Organismo-Teste Utilizado: <i>Chlorella vulgaris</i> ATCC 11468. Inóculo utilizado: 10 ⁴ a 10 ⁵ células/mL.					
Resultados obtidos com controle e amostra-teste:					
	Absorbância a 750nm				
Controle	9,104				
Amostra-Teste	5,026				
Conclusão: Fator de Toxicidade (FT) = 45					

Os valores expressos na Tabela 5.43 mostram os resultados de ecotoxicidade aguda (*Daphnia similis*) e crônica (*Ceriodaphnia dubia*). Para o lixiviado do pavimento em questão, os valores ecotoxicológicos obtidos indicam a necessidade de uma diluição do lixiviado em 50%, pois não se obteve os valores ideais, ou seja, menores ou iguais a 1 (um).

A Tabela 5.44 traz os resultados de ecotoxicidade crônica com algas (*Chlorophyceae*), para a obtenção do Fator de Toxicidade (FT), que neste método varia em uma escala 0 a 100, ou seja, 0 a 100% de diluição da amostra. O resultado de FT foi de 45, indicando a necessidade de uma diluição de 45 %, para descarte do lixiviado, que é um valor bem próximo que os 50% obtidos nos organismos testes microcrustáceo.

A título de comparação, a fim de verificar a influência ambiental da LBRO na constituição das massas dos pavimentos, tomou-se como base uma classificação ecotoxicológica realizada em um pavimento intertravado comercial, sem a adição da LBRO. Os resultados obtidos são expostos nas Tabelas 5.45 e 5.46 e foram obtidos com a mesma metodologia usada nos pavimentos incorporados com LBRO.

Tabela 5.44 - Caracterização ecotoxicológica do extrato lixiviado da AFNOR XPX 31-211 do pavimento comercial

ECOTOXICIDADE AGUDA (<i>Daphnia similis</i>):		
Metodologia empregada: ABNT NBR 12713 (Ecotoxicologia aquática – toxicidade aguda – método de ensaio com <i>Daphnia</i> spp./Crustacea, Cladocera).		
		Uta / FTa
CE₅₀	50%	2
ECOTOXICIDADE CRÔNICA (<i>Ceriodaphnia dubia</i>):		
Metodologia empregada: ABNT NBR 13373 (Ecotoxicologia aquática – toxicidade aguda – método de ensaio com <i>Ceriodaphnia</i> spp./Crustacea, Cladocera).		
		Utc / FTc
CENO	50%	2
CEO	50%	2
Resultados obtidos com controle e amostra-teste:		
	Absorbância a 750nm	
Controle	8,417	
Amostra-Teste	4,952	
Conclusão: Fator de Toxicidade (FT) = 41		

Comparando os valores de ecotoxicidade crônica e aguda dos pavimentos intertravados comerciais com os incorporados LBRO, verificou-se que ambos os materiais tiveram os mesmos valores numéricos de toxicidade, com Utc (unidade de toxicidade crônica) e Uta (unidade de toxicidade aguda) ambos iguais a 2. Pode-se então aferir que a introdução da LBRO na mistura não influenciou na reatividade do lixiviado com o meio.

Com relação ao FT, calculado com o organismo teste algas, ocorreram valores muito próximos e da mesma ordem de grandeza, podendo-se considerar a diferença insignificante, diferenciando-se de 41 a 45% de diluição.

Sendo assim, a LBRO na constituição da mistura, não exerce influência danosa ao meio, quando da exposição do pavimento às intempéries, além de não necessitar de cuidados especiais de disposição dos pavimentos em aterros de resíduos industriais Classe II A – Não Inertes ou mesmo Classe I – Perigosos, nos casos de demolição ou remoção.

Os padrões ecotoxicológicos dos pavimentos expostos neste trabalho refletem uma característica intrínseca dos pavimentos intertravados de matriz cimentícia, não se podendo restringir, do ponto de vista ambiental, o uso da LBRO na sua constituição para a dosagem adotada.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSOES

7.1 – Considerações sobre o trabalho e os resultados

Este trabalho teve por finalidade elaborar um procedimento para dosagem de pavimentos intertravados de matriz cimentícia - materiais largamente empregados na construção civil - que se baseou na busca de identificação de um menor volume de vazios (fator de empacotamento) entre os agregados usados, além de relações água/cimento que proporcionassem uma resposta mecânica adequada assim como padrões de desforma e acabamento.

Para tanto utilizou-se de ferramentas de planejamento experimental e análises estatísticas para obtenção dos traços mais adequados.

Além da tecnologia necessária a aceitação do pavimento, este trabalho enfatizou o uso de um resíduo industrial como agregado, as LBRO's, em incorporação ao material de estudo final, o pavimento. Foram feitos ensaios de caracterização ambiental segundo normas nacionais e internacionais.

Os resultados mecânicos obtidos mostram que, considerando as metodologias de superfícies de resposta dos planejamentos simplex e fatorial e as análises estatísticas, o traço T20, com uma relação água/cimento de 0,5, teor de cimento de 20% e incorporação de LBRO de 25% em massa dos agregados (20% da massa total), alcançaram valores médios de 36,70 MPa, classificando-o como pavimentos para trânsito de veículos comerciais e de linha, segundo a NBR 9781.

O comportamento mecânico dos diferentes traços e relações a/c foi plenamente comprovado por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, que indicou com clareza as diferentes fases do material, a cobertura e envoltórios dos agregados pela pasta de cimento, assim como a porosidade da pasta e o comportamento da zona de transição.

Do ponto de vista ambiental, o traço T20, traço pelo qual o critério tecnológico foi atendido, foi classificado como Classe II-B Inerte segundo a norma brasileira. A verificação da ecotoxicidade do extrato lixiviado para este traço, obtido segundo procedimentos da norma francesa, indicou influência pouco significativa da incorporação da LBRO na matriz cimentícia, quando comparado com materiais comerciais sem incorporação da lama em questão. Com isso pode-se afirmar que a toxicidade encontrada é fator intrínseco dos produtos de matriz cimentícia usados na pavimentação intertravada.

7.2 – Considerações Finais

Ressalta-se que, apesar do apelo ambiental, por propor uma forma de reaproveitamento de resíduos sólidos industriais em materiais de construção, este trabalho fundamentou-se numa pesquisa científica e tecnológica, para obtenção de um produto que seja tecnologicamente aceitável, procurando atender as exigências normativas vigentes no país, e que possa ser produzido em escala industrial.

Também deve-se considerar a busca pela sustentabilidade das indústrias de beneficiamento de rocha ornamental e da construção civil, pois ambas causam impactos diretos ao meio ambiente, a primeira por ser uma grande geradora de resíduos e a segunda por ser a maior consumidora de matérias primas naturais do mundo.

Com isso, a busca de uma alternativa para reaproveitamento da LBRO em materiais de construção, minimiza o impacto causado pela disposição desta lama ao mesmo tempo em que contribui para economia de matérias primas para construção civil.

7.3 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Ao fim desta pesquisa, algumas sugestões são apresentadas perante os resultados obtidos:

- Utilização de modelagens numéricas para otimização de outras propriedades, tais como: teor de ar incorporado, absorção de água, resistência à abrasão, entre outros;
- Estudos de durabilidade e simulações de envelhecimento para os pavimentos em escala laboratório;
- Construção de um trecho experimental com exposição dos pavimentos ao tráfego real de veículos, para simulações de durabilidade em comparação com a escala de laboratório;

CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J. V (2002). Estudo de Concreto de Alta Resistência Compactado com Rolo Para Pavimentação. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, 116 p.
- ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (2008). O Potencial Chinês para as Exportações Brasileiras no Setor de Rochas Ornamentais. *Informe ABIROCHAS 14/2008*.
- AITCIN, P. C. (1998). High performance concrete. London E&FN SPON, 1998, 569P.
- ACCHAR, W., VIEIRA, F. A., SEGADÃES, A. M. (2006). Using ornamental stone cutting rejects as raw materials for red clay ceramic products: Properties and microstructure development. *Materials Science and Engineering A*: 435–436: 606–610
- AFONSO, W. M. Caracterização de Resíduo de Corte de Rochas na Produção de Argamassas. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes-RJ, 2005.
- ALAVEDRA, P.; DOMINGUEZ, J.; GONZALO, E. et al. (1997). La construction sostenible: El estado da la Cuestion. *Informes de la Construction*, v.49, nº 451, p. 41-47.

ALEXANDRE, J. (2000). Análise da Matéria-Prima e Composição de Massa Utilizada em Cerâmica Vermelha. Dissertação (Doutorado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF./ Jonas Alexandre – Campos dos Goytacazes, RJ, 2000.

ANAGNOSTOPOULOS, I. M., STIVANAKIS V. E. (2008). Utilization of lignite power generation residues for the production of lightweight aggregates. *Journal of Hazardous Materials*: doi:10.1016/j.jhazmat.2008.06.125.

Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais - ABIROCHAS -. “A Força do Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento no Brasil”, 2003. Setembro.

Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais - ABIROCHAS. 2005. “Balanço das exportações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento em 2004 – novo recorde histórico de crescimento”, (<http://www.abirochas.com.br/br/index.html>) em 01/2006.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. 2004. Concreto: Uma receita de bolo; http://www.abcp.org.br/basico_sobre_cimento/concreto.shtml em 01/2006.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1982. Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária - Método de ensaio - NBR 7251. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1987. “Peças de Concreto para Pavimentação:” Determinação da Resistência à Compressão- NBR 9780. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1987. Peças de Concreto para Pavimentação: Especificação - NBR 9781. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1996. Cimento Portland – determinação da resistência à compressão - NBR 7215. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1987. Amostragem de Resíduo NBR 10.007. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1987. Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica - NBR 9778. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1987. Lixiviação de Resíduo – Procedimento - NBR 10.005. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1987. Resíduo Sólido – Classificação - NBR 10004. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1987. Solubilização de Resíduo – Procedimento - NBR 10.006. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1995. Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção da absorção de água por capilaridade - NBR 9779. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1995. Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação do teor de água para a obtenção do índice de consistência padrão - NBR 13276. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1995. Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão - NBR 13279. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial – Especificação. Rio de Janeiro, ABNT, 1991.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1995. Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água - NBR 13277. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1995. Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado - NBR 13278. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1995. Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração - NBR 13528. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 2001. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos - NBR 13281. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1984. Solo – Análise Granulométrica - NBR 7181. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1996. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação - NBR 13749. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 2009. Agregados para concreto – Especificação - NBR 7211. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Determinação do Índice de Vazios Mínimo e Máximo de Componentes Não Coesivos – MB-3388, Rio de Janeiro (1991).

- Association Francaise de Normalisation – AFNOR. 2000. Essai de lixiviation d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification – AFNOR XPX 31-211.
- BAHIENSE, A. V. (2007). Incorporação de Resíduo de Rocha Ornamental em Argamassas Utilizando Planejamento de Experimentos em Rede Simplex, Diss. Mestrado, UENF (2007) 159p.
- BANCO DO BRASIL. Sinopse Setorial - Rochas Ornamentais: mármore e granito. Brasília, no 44, Fevereiro de 2000.
- BARROS NETO, B., SPACINO, I., S., BRUNS, R., E. Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na indústria – 2ª ed. - Campinas-SP: Editora da UNICAMP, 2003.
- BATISTA LEITE, M (2001). Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição . Dissertação (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Mônica Batista Leite – Porto Alegre-RS, 2001.
- BAUER, L. A. F. (1994). Materiais de Construção. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Ed. 435p.
- BAUER, E. SANTOS, C. C. N., MORAIS, D. M., PEREIRA, C. H. A. F. Avaliação da consistência das argamassas industrializadas projetadas utilizando o método vane. e-Mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil Vol. 2, n. 1, p. 54-63, Maio 2005.
- BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New Jersey (2007) Chapter 16, 509.

- BOX, G. E. P.; WETZ, J. Criteria for judging adequacy of estimation by an approximate response function. University of Wisconsin Technical Report, Madison, n. **9**, 1973.
- BOX, G. E. P., HUNTER, W. G. e HUNTER, J. S. (1978). Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis and model building. New York, Wiley, 1978.
- CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. Planejamento de Experimentos Usando o *Statística*, E-Papers Serviços Editoriais, Rio de Janeiro, Brasil (2003), 159.
- CALMON, J. L., et al. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., 1997, Salvador. Anais... Salvador, BA: ANTAC, 1997. p. 64-75.
- CALLISTER, W. D. J. (2000). Materials Science And Engineering, New York-USA, Editora John Wiley & Sons Inc 852 p.
- CASTELO, A. M., GARCIA, F (2007). PAC traz a dinâmica de crescimento para o mercado interno e torna a economia menos vulnerável a flutuações internacionais. *Conjuntura a Construção*, p. 18, 2007.
- CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L. (2005). Considerações sobre o processo de produção de concreto de alto desempenho para estruturas de concreto pré-moldadas. *1o. Encontro Nacional de **Pesquisa-Projeto-Produção** em Concreto pré-moldado*. São Carlos – SP, 2005.
- CHIODI, C.F. Situação e Perspectivas Brasileiras no Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento. I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais, Salvador – BA, 2001.

- CHIODI, C.F.– Kistemann & Chiodi Assessoria e Projetos, para a ABIROCHAS – Associação Brasileira das Indústrias de Rochas Ornamentais, Belo Horizonte – MG, 2011.
- COLLEPARD, S.; *et al.* Mechanisms of action of different superplasticizers for high performance concrete. Gramado In: International Conference on High Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures. 2. Proceedings. 1999. P 503-523.
- CORDEIRO, G. C., Vaillant, J. M. M., Désir, J. M. (2001). Resíduo cerâmico como aditivo mineral em concreto. Ibracon. IV Seminário de desenvolvimento sustentável na construção civil – materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo.
- CORNELL, J. A. (1990). Experiments With Mixtures: Designs, Models, and The Analysis of Mixtures Data - 2nd ed.
- COSCIONE, A. R., ANDRADE, J. C., MAY, G. M. (2005). “O Modelamento Estatístico de Misturas: Experimento Tutorial Usando Voltametria de Redissolução Anódica” Química Nova, Vol. 28, 1116-1122.
- CRF (2004).Code of Federal Regulation. Hazardous waste management *Protection of environmental – Title 40 – Part 260-265.*
- DE LARRARD, F. *et al.* (1997) **The AFREM method for the mix-design of high performance concrete.** *Materials and Structures*, v. 30, p. 439-446, Aug.-Sep.
- CRUZ, L. O. M. (2003). Pavimento Intertravado de Concreto: Estudo dos Elementos e Métodos de Dimensionamento. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPE, Rio de Janeiro, 2003.
- DÉSIR, J. M., DIAS, D. P., ROCHA, C.A.A., DANTAS, D. F. Avaliação da Contribuição da Atividade Pozolânica do Resíduo de Tijolo Moído na

Resistência de Argamassas. Conferência Interamericana sobre Materiais e Tecnologias não-convencionais na Construção Ecológica e Sustentável. Rio de Janeiro, 2005.

DUARTE, A. K., BRANDÃO, P. R. G. (2008). Ceramic encapsulation of refractory and mineral residues based on potassium and magnesium phosphate. *Minerals Engineering* 21: 302 - 309

FELLEMBERG, G. Introdução aos problemas de poluição ambiental. São Paulo, EPU/Springer/EDUSP, 1980.

FERREIRA, M.L.S. Proposta de um Sistema Alternativo de Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos Domiciliares, Executada Por Catadores (Carrinheiros) Na Cidade De Cianorte – Paraná. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2000.

FERREIRA JUNIOR, S. (1995). Produção de blocos de concreto para alvenaria – Prática recomendada. ABCP – Boletim Técnico 103. São Paulo, 3a edição.

FIORITI C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. (2007). Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 43-54, out./dez. 2007.

FJP (2007). Déficit Habitacional no Brasil 2005. Fundação João Pinheiro, Belo Horizonte, abril de 2007.

FLOHR L, BRENTANO D. M., PINTO C.R.S.C, MACHADO V. G., MATIAS W. G. Classificação de resíduos sólidos industriais com base em testes ecotoxicológicos utilizando *Daphnia magna*: uma alternativa. *Biotemas*, 18 (2): 7 - 18, 2005

FREITAS, C. (2007). Estudo do Desempenho Mecânico de Concreto com Adição de Partículas de Borracha Para Aplicação como Material de Reparo em Superfícies Hidráulicas. Dissertação (Mestrado) – PIPE/UFP –Paraná.

- FRASSON JR, A., OLIVEIRA, A. L., PRUDÊNCIO JR., L. R. (2002). Influência do processo produtivo nas resistências dos blocos de concreto. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Foz do Iguaçu - PR.
- GALDAMEZ e CARPINETTI, (2004). Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos no Processo de Injeção Plástica. *Gestão e Produção* v.11, n.1, p. 121-134 jan/abril, 2004.
- GETTO, R; RONCERO, J. Aditivos superfluidificantes para hormigones de altas prestaciones. *In. IV Simposio sobre aditivos para hormigones*, Madrid, 24 e 25 de novembro de 1998.
- GONÇALVES, J. P. Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) para a produção de concretos. 2000. 134f. Dissertação (Mestrado) - NORIE/UFRGS, Porto Alegre.
- GONÇALVES, R. D. C.(2001). Agregados Reciclados de Resíduos de Concreto - Um Novo Material Para Dosagens Estruturais. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 2001.
- GONZALO, R.R., SMITH, D.R., MILLER, J.S., WITCZALC, M.W. Structural design of concrete block pavements. *J. Transp. Eng., ASCE* 116 (5): 615– 635.
- GUERREIRO, H. J. P. (2000). Exploração Subterrânea de Mármore – Aspectos Geotécnicos. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico. Portugal – Lisboa, julho de 2000.
- HALE, W.M., FREYNE, S. F, BUSH, T. D., RUSSELL, B. W. (2008). Properties of concrete mixtures containing slag cement and fly ash for use in transportation structures. *Construction and Building Materials* 22: 1990 .2000.
- HILLS, C. D., POLLARD, S.J.T (1997). The influence of interference effects on the mechanical, microstructural and fixation characteristics of cement-solidified

- hazardous waste forms. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v.52, p. 171-191.
- HOLT, E., RAIVIO, P. (2006). Use of gasification residues in compacted concrete paving blocks. *Cement and Concrete Research* 36: 441 – 448.
- IEL (1996). Mercado Internacional de Rochas Ornamentais – Relatório Final. Instituto Euvaldo Lodi – IEL/FIEC/COMISA, 1996.
- INETI (2001). Guia Técnico – Sector de Pedra Natural. Instituto Nacional de Pedra Natural – INETI. Lisboa – Portugal (2001).
- INFOROCHAS (2006). Informativo do Cetemag, Sicoob Credirochas e Sindirochas. Centro de Tratamento de Resíduos de Nova Venécia-ES. Inforochas, n.11, out., p.15, 2006.
- JOHN, V. M. (1996). Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. Workshop sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção. São Paulo. PCC-USP. Apud Gonçalves (2000).
- JOHN, V. M. A construção e o meio ambiente. 1998 (<http://www.recycle.pcc.usp.Br/artigos1.htm>), em 01/2004.
- JURIČ, B., HANŽIČ, L., ILIĆ, R., SAMEC, N. (2006). Utilization of municipal solid waste bottom ash and recycled aggregate in concrete. *Waste Management*. 26: 1436-1442.
- KNIE, J. L. W.; LOPES, E. W. B. *Testes ecotoxicológicos: métodos, técnicas e aplicações*. Florianópolis: FATMA / GTZ, p. 289, 2004.
- LEEMANN, A., MÜNCH, B., GASSER, P., HOLZER, L. (2006). Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete. *Cement and Concrete Research* 36: 1425–1433.

- LIMA FILHO, V. X., et al. Determinação de parâmetros para a racionalização do processamento de rochas graníticas por abrasão. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 15, 1999. São Paulo. Anais São Paulo, 1999.
- LORENZONI, D. I. (2005). Tijolos Prensados Produzidos com Resíduos Sólidos Industriais: Uma Caracterização Segundo a NBR 10004/2004. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) / Programa de Mestrado em Engenharia Ambiental, Dissertação de Mestrado.
- MARCHAD, J., HORNAIN, H., DIAMOND, S., PIGEON, M., GUIRAUD, H. (1996). The microstructure of dry concrete products. *Cement and Concrete Research*, vol. 26 nº 3, p. 427-438, 1996.
- MARTINS NETO (1999), A. A. A. Aspectos De Desempenho Da Argamassa Dosada em Central. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1999.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. M. (1994) Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 573p.
- MENEZES, ROMUALDO R., NEVES, GELMIRES DE A., FERREIRA, HEBER C. (2002). O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, n.2, p.303-313, 2002.
- MONTANI, C. Stone 2003; repertorio economico mondiale. Faenza (Itália): Faenza Editrice, 2003, 237 p.
- MONTEIRO, S.N., PEÇANHA, L.A., VIEIRA, C.M.F. (2004). Reformulation of roofing tiles body with addition of granite waste from sawing operations. *Journal of the European Ceramic Society* 24 p. 2349–2356.

- MONTGOMERY, D. C. (1997). Design and analysis of experiments, 4 th edition. New York, Wiley, 1997.
- MONTGOMERY, D., CALADO, V. (2003). Planejamento de experimentos usando o Statistica. E-papers, 260p.
- MORANVILLE-REGOURD, M. (1992). Microstructure of high performance concrete. In MALIER, Y. *High Performance Concrete – from material to structure*. London, E & FN Spon. p. 3-13.
- MYERS, R. H. e MONTGOMERY, D. C. (1995). Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. . New York, Wiley, 1995.
- MOREIRA, J. M. S., MANHÃES, J. P. V. T., HOLANDA J. N. F. (2005). Reaproveitamento de resíduo de rocha ornamental proveniente do Noroeste Fluminense em cerâmica vermelha. *Cerâmica* 51: 180-186.
- MOURA, W. A., GONÇALVES, J. P., LEITE, R. S. Utilização do Resíduo de Corte de Mármore e Granito em Argamassas de Revestimento e Confecção de Lajotas para Piso. *Sitientibus, Feira de Santana*, n.26, p.49-61, jan/jun. 2002.
- MOYA, M.M. e SUSLICK, S.B. Avaliação preliminar do setor de rochas ornamentais no Brasil. XXXVII Congresso Brasileiro de Geologia. São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, 1992.
- MULLER, R. M. (2005). Avaliação de Transmissão de Esforços em Pavimentos Intertravados de Blocos de Concreto. Dissertação (Mestrado). COPPE/UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- NEVES, GELMIRE; PATRICIO, S. M. R; FERREIRA, H. C; SILVA, M. C. Utilização de resíduos da serragem de granitos para a confecção de tijolos cerâmicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 43., 1999 Florianópolis. Anais... Florianópolis-SC, 1999.

- NEVILLE, A. M. (1988). *Properties of Concrete*. Burnt Mill, England. Longman of Scientific Technical, 779 p.]
- OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A (1998). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.
- OLIVEIRA, M. J. E., MATTOS, J. T., ASSIS, C. S. (2001). “Resíduos de concreto: classe III versus classe II”. Ibracon. IV Seminário de desenvolvimento sustentável na construção civil – materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo.
- OLIVEIRA SILVA, D. (2003). *Ajudando Dona Nina a Fazer a Melhor Vitamina - Projeto de Experimento Envolvendo Mistura: Um Exemplo Didático. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá. 2003.*
- OLIVEIRA, A. L. (2003). *Contribuição para a Dosagem e Produção de Peças de Concreto para Pavimentação. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.*
- OLIVEIRA, Alexandre L. *Contribuição Para Dosagem e Produção de Peças de Concreto Para Pavimentação. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2004.*
- PENTTALLA, V. (1997). *Concrete and Sustainable Development. ACI Materials Journal. V.94. Nº 5. Set/Out. USA. apud Gonçalves, J. P. (2000).*
- PETTERMANN, R.(2006). *Avaliação do Desempenho de Blocos de Concreto para Pavimentação com Metacaulim e Sílica Ativa. Monografia apresentada ao Programa de Pós- raduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,(2006).*

- PETRUCI, E. G. R (1998). Concreto de Cimento Portland – 13. ed – São Paulo: Globo, 1998.
- PIMENTEL, M. F. e NETO, B. B. Calibração: uma revisão para químicos analíticos. Química nova 19, p. 305-325, 328-332, 1996.
- PINTO, T. P. P. Resultados de Gestão Diferenciada. Técnica, n.31, nov/dez., p.31-34, 1997.
- PIOROTTI, J. L. (1989.). Pavimentação intertravada. 2a ed. Rio de Janeiro, Montana.
- REDE ROCHAS (2004). Grupo para melhoria do setor de rochas ornamentais de Cachoeiro de Itapemirim. Plano de Desenvolvimento do APL de Rochas Ornamentais de Cachoeiro de Itapemirim, Dezembro 2004.
- RESCHKE, J. S. (2005). Avaliação da utilização de escória granulada de fundição como substituição de parte do cimento em concreto. e-Mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil Vol. 2, n. 1, p. 78-91, Maio 2005.
- ROCHA, J.C., JOHN, V.M. (2003). Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. Coletânea Habitare – vol. 4.
- Rodrigues, N. L. V. B. (2007). Testes de toxicidade aguda através de bioensaios no extrato solubilizado dos resíduos classe IIa – não inertes e classe IIb – inertes. Engenharia sanitária e ambiental. Vol.12 - Nº 1- jan/mar 2007, 8-16
- ROSSETTI, V. A., PALMA, L. D., MEDICI, F. (2006). Production of aggregate from non-metallic automotive shredder residues. *Journal of Hazardous Materials* B137: 1089 – 1095.
- SANTOS A. V., BORJA E. V. (2007). Avaliação das Propriedades Mecânicas de Blocos Intertravados com Resíduo de Pneu Reciclado. Holos, Ano 23, Vol. 3

- SEGADÃES, A. M., T, CARVALHO, M. A., ACCHAR, W (2005). Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products. *Applied Clay Science* 30, p. 42– 52.
- SILVA, N. G. DA; SENFF, L.; KATO, R. B.; REPETTE, W. L. (2009). Avaliação do desempenho de aditivos plastificantes e superplastificantes na manutenção da fluidez. 51º Congresso Brasileiro do Concreto, 2009.
- SHACKEL, B. (1992). Computer Based Procedures for the Design and Specification of Concrete Block Pavements. *Fourth International Concrete Block Paving Conference*, Vol. 1, pp. 79-87.
- SHACKEL, B., 2000. The Development and application of mechanistic design procedures for concrete block paving. *Sixth International Concrete Block Paving Conference*, pp. 13-22, Tokyo, Japan.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, INC. (1996). SAE J 1993 - High-Carbon Cast-Steel Grit.
- SCHEFFÉ, H. (1958). Experiments with mixtures. *Journal of the Royal Statistical Society, B*, vol. 20, p 344-306. apud Cornell 1990.
- SCRIVENER, K. L., CRUMBIE, A. K., PRATT, P. L. (1988), A study of the interfacial region between cement paste and aggregate in concrete, in: S. Mindess, S.P. Sha (Eds.), *Bonding in Cementitious Composites*, *Materials Research Society*, 114: 87–95.
- SELMO, S. M. S., NAKAMURA, E. H., MIRANDA, L.F.R., MEDEIROS, M. H. F. SILVA, C. (2002) “Propriedades e especificações de argamassas industrializadas de múltiplo uso”. EPUSP. São Paulo.

- SENA, M. M., COLLINS, C. H., COLLINS, K. E. (2001). “Aplicação de Métodos Quimiométricos na Especificação de Cr(VI) em Solução Aquosa”. *Química Nova*, Vol. 24, No. 3, 331-338, 2001.
- SIJÖSTRÖM, C. *Durability and sustainable use of building materials*. 8p. 1997.
- SILVA, SÉRGIO A. C. Caracterização do resíduo da serragem de blocos de granito. Estudo do potencial de aplicação na fabricação de argamassas de assentamentos e de tijolos de solo-cimento. Vitória (ES), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) / Programa de Mestrado em Engenharia Ambiental, Dissertação de Mestrado, janeiro de 1998.
- SINDIROCHAS (2004) - O Sindicato da Indústria de Rochas Ornamentais, Cal e Calcários do Estado do Espírito Santo. Dados Estatísticos de Exportação. 2004.
- SOO LEE, H., YONG LEE, J., YOUL YU, M. (2003). Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks. *Cement and Concrete Research*, 33: 1889–1896.
- SOUTO, K. M., NEVES G. A, FERREIRA H. C., SILVA M. C., Anais do 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Florianópolis, SC (2001) p. 701-712.
- SPÍNOLA, V. (2003). Liderança nacional do Estado do Espírito Santo. Rochas Ornamentais em Arranjo Produtivo.
- USEPA – United States Environmental Protection Agency (1999). *Solidification/Stabilization Resource Guide*. EPA/542-B-99-002.
- USEPA – United States Environmental Protection Agency (2000). *Solidification/Stabilization Use at Superfund Sites*. EPA/542-R-00-010.

- VALDECIR, A. Q., CINCOTTO, M. A. (2006). Optimization of calculation method for determination of composition of hardened mortars of Portland cement and hydrated lime made in laboratory. *Construction and Building Materials* 20: 1069–1078.
- VALE, E. Estudo econômico sobre rochas ornamentais: mercado internacional de rochas ornamentais. Fortaleza, Federação das Indústrias do Ceará, IEL (CE), 1997.
- VARGAS, A. S. (2002). Estudo da viabilidade do uso do pó de aciaria elétrica a arco na confecção de blocos de concreto para pavimentação. Dissertação de mestrado – Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2002.
- VELOSA, A. L., CACHIM, P. B. (2008). Hydraulic-lime based concrete: Strength development using a pozzolanic addition and different curing conditions. *Construction and Building Materials*, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.08.013
- VILLASCHI, A. F., SABADINI, M. S. Arranjo Produtivo de Rochas Ornamentais (mármore e granito) no estado do Espírito Santo. Estudos Empíricos – Nota Técnica 15. Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – IE/UFRJ, 2000.
- XAVIER, GUSTAVO C. Utilização de resíduos da serragem do mármore e granito na confecção de peças cerâmicas vermelhas. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF./ Gustavo de Castro Xavier – Campos dos Goytacazes, RJ, 2001.
- XAVIER, GUSTAVO C. Resistência, alterabilidade e durabilidade de peças cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduo de granito. Dissertação (Doutorado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF./ Gustavo de Castro Xavier – Campos dos Goytacazes, RJ, 2006.

ZAGATTO, P. A. et al. *Avaliação de toxicidade em sistema de tratamento biológico de afluentes líquidos*. In: Revista SABESP, n. 166, p. 1-6, 1992.

YILMAZ, N. G., KARACA, Z., GOKTAN, R.M., AKAL, C. (2008). Relative brittleness characterization of some selected granitic building stones: Influence of mineral grain size. *Construction and Building Materials*: doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.11.014.

WEITZMANN, L., HAMEL, L.E ; BARTH, E. Evaluation of solidification/stabilization as a best-demonstrated available technology. In: 14TH ANNUAL RESEARCH SYMPOSIUM, 14., 1988, Cincinnati. *Proceedings*. U.S.E.P.A, 1988.